

# Perfil de Riesgo de Desastres para Uruguay

Banco Interamericano de Desarrollo

División de Medio  
Ambiente, Desarrollo Rural  
y Gestión de Riesgo de  
Desastres

NOTA TÉCNICA N°

IDB-TN-01809

Julio 2019

# Perfil de Riesgo de Desastres para Uruguay

Banco Interamericano de Desarrollo



**Catalogación en la fuente proporcionada por la  
Biblioteca Felipe Herrera del  
Banco Interamericano de Desarrollo**

Perfil de riesgo de desastres para Uruguay / Banco Interamericano de Desarrollo.

p. cm. — (Nota técnica del BID; 1809)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Natural disasters-Risk assessment-Uruguay. 2. Droughts-Risk assessment-Uruguay. 3. Flood damage prevention-Uruguay. 4. Emergency management-Uruguay. 5. Disaster relief-Uruguay. I. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Medio Ambiente, Desarrollo Rural y Administración de Riesgos por Desastres. II. Título. III. Serie.

IDB-TN-1809

Código JEL: Q54

Palabras claves: Cambio Climático, Sequia, Gestión del Riesgo de Desastres; Estrategia de Gestión del Riesgo de Desastres; Política Gestión del Riesgo de Desastres; Metodología de Gestión del Riesgo de Desastres; Evaluación probabilística del riesgo.

<http://www.iadb.org>

Copyright © [2019] Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



**Este documento fue preparado por:**

**Especialistas del Banco Interamericano de Desarrollo:** Hori Tsuneki y Sergio Lacambra (especialistas en Gestión del Riesgo de Desastres).

**Consultores Externos:**

**Dirección y Coordinación de Grupos de Trabajo Técnico:** Omar Darío Cardona A. (Dirección General del Proyecto); Gabriel Andrés Bernal G. (Dirección científica INGENIAR); Anibal Perez (Asesor modelación amenazas INGENIAR); Alex Horia Barbat B. (Dirección vulnerabilidad CIMNE); Martha Liliana Carreño T. (Dirección exposición CIMNE).

**Especialistas y Asesores – Grupos de Trabajo:** César Augusto Velásquez V. (Especialista INGENIAR); Alonso Brenes (Especialista INGENIAR); Claudia Villegas (Especialista INGENIAR); Diana González (Especialista INGENIAR); David Rincón (Especialista INGENIAR); Mabel Cristina Marulanda F. (Especialista CIMNE); María Alejandra Escovar (Especialista INGENIAR); John Fredy Molina (Especialista INGENIAR); Paula Marulanda (Especialista INGENIAR); Sthefania Grajales (Especialista INGENIAR).

**Coordinación en campo – Consultores locales:** Raquel Lejtregger, Gerencia local y soporte (URU); Laura Acquaviva, Asesor local capacitación (ARG).

**Agradecimiento a las instituciones participantes:** Presidencia de la República del Uruguay; Sistema Nacional de Emergencias (SINAE); Oficina De Programación Y Políticas Agropecuarias del Ministerio De Ganadería, Agricultura Y Pesca (OPYPA); Dirección Nacional De Aguas del Ministerio De Vivienda, Ordenamiento Territorial Y Medio Ambiente (DINAGUA – MVOTMA); Dirección Nacional De Medio Ambiente del Ministerio De Vivienda, Ordenamiento Territorial Y Medio Ambiente (DINAMA – MVOTMA); Instituto Uruguayo De Meteorología (INUMET); Instituto Nacional De Investigación Agropecuaria (INIA); Universidad de la República: Facultad de Ingeniería y Facultad de Ciencias; Ministerio De Industria, Energía Y Minería; Ministerio De Economía Y Finanzas; Ministerio De Salud Pública; Ministerio De Desarrollo Social; Ministerio De Turismo; Oficina De Planeamiento Y Presupuesto; Obras Sanitarias Del Estado (OSE); Administración Nacional De Usinas Y Trasmisiones Eléctricas (UTE); Secretaría Nacional De Ambiente, Agua Y Cambio Climático; Comisión Técnica Mixta De Salto Grande; Observatorio Geofísico Del Uruguay; Centro Coordinador de Emergencias Departamentales (CeCoED) Canelones.

El desarrollo y publicación de este documento fue financiado a través de la Cooperación Técnica Regional RG-T2759, financiado por el Fondo Fiduciario Multidonantes para la Prevención de Desastres.

## TABLA CONTENIDO

### LISTA DE ACRÓNIMOS

LISTA DE TABLAS

LISTA DE FIGURAS

RESUMEN EJECUTIVO .....	31
INTRODUCCIÓN .....	36
PARTE I .....	37
IMPACTO DE LAS SEQUÍAS EN EL SECTOR AGROPECUARIO EN URUGUAY .....	38
1.1 CUANTIFICACIÓN DE LOS IMPACTOS DE LA SEQUÍA .....	39
1.2 EL EVENTO DE 2008 – 2009 .....	40
1.3 IMPACTOS DE LA SEQUÍA EN EL SECTOR AGROPECUARIO .....	41
METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE RIESGO POR SEQUÍA .....	46
1.4 COMPONENTES DEL ANÁLISIS DEL RIESGO .....	47
1.5 AMENAZA .....	47
1.6 ELEMENTOS EXPUESTOS .....	47
1.7 REPRESENTACIÓN DE LA VULNERABILIDAD PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO .....	48
1.8 ENFOQUE PROBABILISTA EN LA EVALUACIÓN DEL RIESGO .....	49
1.8.1 CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS .....	51
1.9 MÉTRICAS DE RIESGO .....	54
1.9.1 LA PÉRDIDA ANUAL ESPERADA (PAE) .....	54
1.9.2 LA PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE (PML) .....	55
1.9.3 LA PROBABILIDAD DE QUIEBRA (PQ) .....	55
1.9.4 OTRAS MÉTRICAS DEL RIESGO .....	56
1.10 IMPACTO DE LOS DESASTRES EN EL SECTOR AGRÍCOLA .....	56
1.10.1 DAÑOS VS. PÉRDIDAS .....	58

<b>1.11 ALCANCE DE LA METODOLOGÍA .....</b>	<b>62</b>
<b>1.12 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>64</b>
1.12.1 PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE (PML) .....	64
1.12.2 PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS EN UN AÑO .....	65
1.12.3 PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS EN EL PRÓXIMO EVENTO DE SEQUÍA .....	66
1.12.4 PÉRDIDA ANUAL ESPERADA (PAE) .....	67
<b>1.13 DROUGHT PRO .....</b>	<b>68</b>
MODELACIÓN PROBABILISTA DE LA AMENAZA POR SEQUÍA .....	70
<b>1.14 INFORMACIÓN CLIMÁTICA .....</b>	<b>72</b>
1.14.1 INFORMACIÓN DE AGENCIAS NACIONALES .....	73
1.14.2 OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN .....	74
1.14.3 BASE DE DATOS DE INFORMACIÓN CLIMÁTICA.....	78
<b>1.15 GENERACIÓN ESTOCÁSTICA DE SERIES CLIMÁTICAS FUTURAS .....</b>	<b>85</b>
1.15.1 GENERACIÓN DE SERIES ALEATORIAS.....	85
1.15.2 CORRELACIÓN DE SERIES .....	89
<b>1.16 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA.....</b>	<b>94</b>
1.16.1 PARÁMETROS CLIMÁTICOS.....	96
1.16.2 RESULTADOS EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA.....	100
<b>1.17 INDICADORES .....</b>	<b>104</b>
1.17.1 INDICADORES DE SEQUÍA A UTILIZAR.....	104
1.17.2 UMBRALES DE SEQUÍA .....	106
1.17.3 CÁLCULO SOBRE INDICADORES DE SEQUÍA .....	107
1.17.4 DEFINICIÓN DE EVENTOS REGIONALES DE SEQUÍA .....	109
1.17.5 SELECCIÓN DEL INDICADOR DE SEQUÍA.....	112
1.17.6 INDICADOR RDI PARA SERIE PARÁMETROS CLIMÁTICOS HISTÓRICOS.....	114

1.17.7	INDICADOR RDI PARA SERIE PARÁMETROS CLIMÁTICOS ESTOCÁSTICOS .....	117
<b>1.18</b>	<b>CURVAS Y MAPAS DE AMENAZA POR SEQUÍA .....</b>	<b>121</b>
1.18.1	MAPAS DE AMENAZA POR ESCENARIO.....	122
1.18.2	MAPAS DE AMENAZA INTEGRADA .....	124
1.18.3	CURVAS DE AMENAZA.....	138
<b>1.19</b>	<b>EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA AMENAZA POR SEQUÍA.....</b>	<b>141</b>
1.19.1	DISPERSIÓN DE LOS MODELOS GLOBALES DE CIRCULACIÓN .....	141
1.19.2	SELECCIÓN DEL MODELO GLOBAL DE CIRCULACIÓN .....	147
1.19.3	AJUSTE DE SERIES SIMULADAS A PREDICCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO .....	154
1.19.4	MAPAS DE PARÁMETROS CLIMÁTICOS INCLUYENDO CAMBO CLIMÁTICO .....	157
1.19.5	AMENAZA DE SEQUÍA INCLUYENDO CAMBIO CLIMÁTICO .....	167
1.19.6	MAPAS DE AMENAZA INTEGRADA INCLUYENDO CAMBO CLIMÁTICO .....	173
1.19.7	CURVAS DE AMENAZA.....	181
	EXPOSICIÓN DEL SECTOR AGROPECUARIO .....	183
<b>1.20</b>	<b>METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LOS ELEMENTOS EXPUESTOS .....</b>	<b>185</b>
1.20.1	INSUMOS DE ENTRADA PARA LA DETERMINACIÓN DE ELEMENTOS EXPUESTOS.....	185
1.20.2	DEFINICIÓN DE LA UNIDAD DE ANÁLISIS .....	197
1.20.3	BASE DE DATOS DE ELEMENTOS EXPUESTOS EN LA ACTIVIDAD AGRÍCOLA .....	199
1.20.4	BASE DE DATOS DE ELEMENTOS EXPUESTOS EN LA ACTIVIDAD PECUARIA .....	212
<b>1.21</b>	<b>ESTACIONALIDAD DE CULTIVOS .....</b>	<b>220</b>
1.21.1	CULTIVOS TRANSITORIOS .....	221
1.21.2	CULTIVOS PERMANENTES.....	226
<b>1.22</b>	<b>RENDIMIENTOS DE CULTIVOS.....</b>	<b>230</b>
<b>1.23</b>	<b>RENDIMIENTO DE PASTURAS NATURALES.....</b>	<b>233</b>
<b>1.24</b>	<b>AVALÚOS SECTOR AGRÍCOLA .....</b>	<b>234</b>

<b>1.25</b>	<b>AVALÚOS SECTOR PECUARIO .....</b>	<b>235</b>
	VULNERABILIDAD DE CULTIVOS A LA SEQUÍA.....	236
<b>1.26</b>	<b>RENDIMIENTO COMO FUNCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA .....</b>	<b>236</b>
1.26.1	CLIMA.....	239
1.26.2	CULTIVO.....	240
1.26.3	SUELO.....	243
1.26.4	MANEJO .....	244
<b>1.27</b>	<b>LA DINÁMICA DE LA RESPUESTA DE LOS CULTIVOS AL ESTRÉS HÍDRICO .....</b>	<b>245</b>
<b>1.28</b>	<b>INFORMACIÓN DE ENTRADA AL MODELO DE VULNERABILIDAD .....</b>	<b>249</b>
1.28.1	CLIMA: SERIES METEOROLÓGICAS DIARIAS.....	250
1.28.2	CULTIVOS: PARÁMETROS AGRONÓMICOS .....	255
1.28.3	SUELO: CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS .....	269
	VULNERABILIDAD DEL SECTOR PECUARIO A LA SEQUÍA.....	287
<b>1.29</b>	<b>RENDIMIENTO DE PASTURAS NATURALES COMO FUNCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA .....</b>	<b>289</b>
<b>1.30</b>	<b>CONSUMO DE PASTO COMO ALIMENTO PRINCIPAL DE LOS ANIMALES.....</b>	<b>291</b>
1.30.1	CONSUMO POTENCIAL DE PASTURAS.....	291
1.30.2	CONSUMO RELATIVO DE PASTURAS .....	294
1.30.3	CONSUMO REAL DE PASTURAS.....	296
<b>1.31</b>	<b>ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DEL SECTOR PECUARIO .....</b>	<b>296</b>
	EVALUACIÓN PROSPECTIVA DE RIESGO POR SEQUÍA EN URUGUAY .....	298
<b>1.32</b>	<b>EVALUACIÓN DE RIESGO FÍSICO PARA EL SECTOR AGRÍCOLA DE URUGUAY .....</b>	<b>301</b>
1.32.1	PÉRDIDAS POR TIPO DE CULTIVO.....	303
1.32.2	EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RIESGO POR SEQUÍA EN EL SECTOR AGRÍCOLA NACIONAL .....	305
1.32.3	RESULTADOS DE RIESGO POR SEQUÍA DESAGREGADOS POR DEPARTAMENTO.....	309
1.32.4	IMPACTO DEL RIESGO POR SEQUÍA EN EL SECTOR AGRÍCOLA NACIONAL.....	313

<b>1.33</b>	<b>EVALUACIÓN DE RIESGO FÍSICO PARA EL SECTOR PECUARIO DE URUGUAY .....</b>	<b>316</b>
1.33.1	PÉRDIDAS POR TIPO DE GANADERÍA .....	318
1.33.2	EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RIESGO POR SEQUÍA EN EL SECTOR GANADERO NACIONAL ....	319
1.33.3	RESULTADOS DE RIESGO POR SEQUÍA DESAGREGADOS POR DEPARTAMENTO.....	322
1.33.4	IMPACTO DEL RIESGO POR SEQUÍA EN LA GANADERÍA NACIONAL .....	327
<b>1.34</b>	<b>EVALUACIÓN DE RIESGO FÍSICO PARA EL SECTOR AGROPECUARIO DE URUGUAY.....</b>	<b>329</b>
1.34.1	PÉRDIDAS POR SUBSECTOR.....	331
1.34.2	EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RIESGO POR SEQUÍA EN EL SECTOR AGROPECUARIO NACIONAL 332	
1.34.3	RESULTADOS DE RIESGO POR SEQUÍA DESAGREGADOS POR DEPARTAMENTO.....	335
1.34.4	IMPACTO DEL RIESGO POR SEQUÍA EN EL SECTOR AGROPECUARIO NACIONAL .....	339
	EVALUACIÓN RETROSPECTIVA DEL RIESGO .....	341
<b>1.35</b>	<b>ESTIMACIÓN DE LA TASA DE EXCEDENCIA .....</b>	<b>343</b>
<b>1.36</b>	<b>COSTO DE LOS DESASTRES.....</b>	<b>347</b>
<b>1.37</b>	<b>CURVA EMPÍRICA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS PARA URUGUAY.....</b>	<b>350</b>
1.37.1	VALORACIÓN Y CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS .....	355
	CURVA HÍBRIDA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS .....	359
<b>1.38</b>	<b>CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA DE PÉRDIDAS HISTÓRICA.....</b>	<b>359</b>
<b>1.39</b>	<b>CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA DE PÉRDIDAS SIMULADA .....</b>	<b>360</b>
<b>1.40</b>	<b>RESULTADOS DE LA CURVA HÍBRIDA DE PÉRDIDAS .....</b>	<b>361</b>
	PARTE II .....	363
	METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE RIESGO POR INUNDACIÓN .....	364
<b>1.41</b>	<b>PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS DEL RIESGO EN BIENES INMUEBLES .....</b>	<b>364</b>
1.41.1	ECUACIÓN BÁSICA.....	365
1.41.2	INCERTIDUMBRES.....	366
<b>1.42</b>	<b>REPRESENTACIÓN PROBABILISTA DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN .....</b>	<b>367</b>

1.42.1	ENFOQUE BASADO EN EVENTOS .....	367
	ENFOQUE METODOLÓGICO PARA LA MODELACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN .....	372
<b>1.43</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DE ANÁLISIS .....</b>	<b>372</b>
1.43.1	EVENTO INUNDACIÓN 1984.....	374
<b>1.44</b>	<b>INFORMACIÓN DISPONIBLE USADA PARA LA MODELACIÓN .....</b>	<b>375</b>
1.44.1	AMENAZA POR LLUVIAS INTENSAS .....	376
1.44.2	AMENAZA POR INUNDACIÓN .....	379
1.44.3	PARÁMETROS HIDRÁULICOS PARA EL MOTOR DE CÁLCULO (HEC-RAS) .....	384
<b>1.45</b>	<b>MODELO DE AMENAZA POR LLUVIAS INTENSAS.....</b>	<b>385</b>
1.45.1	ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PRECIPITACIÓN.....	385
1.45.2	ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE PRECIPITACIÓN (CURVAS HUFF) .....	392
<b>1.46</b>	<b>MODELO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA .....</b>	<b>395</b>
1.46.1	PROPIEDADES MORFOMÉTRICAS GENERALES DE LA CUENCA RÍO BRANCO .....	395
1.46.2	ESTIMACIÓN DE LA RESPUESTA DE LA CUENCA ANTE UN EVENTO DE LLUVIA.....	403
1.46.3	MODELACIÓN HIDROLÓGICA PRELIMINAR DE LA CUENCA CON HEC-HMS .....	407
<b>1.47</b>	<b>MÉTODO DE CÁLCULO DE VOLUMEN DE ESCORRENTÍA: NÚMERO DE CURVA.....</b>	<b>418</b>
<b>1.48</b>	<b>MODELO DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA: CLARK MODIFICADO .....</b>	<b>423</b>
1.48.1	RESULTADOS PARA LA CUENCA DE RÍO YAGUARÓN .....	428
<b>1.49</b>	<b>MODELO DE AMENAZA POR INUNDACIÓN .....</b>	<b>429</b>
1.49.1	INUNDACIÓN ALUVIAL – MODELO 1D (HEC-RAS).....	430
1.49.2	INUNDACIÓN ALUVIAL – MODELO 2D .....	431
1.49.3	MODELO HIDRAULICO PARA LA CUENCA DEL RÍO YAGUARÓN.....	432
1.49.4	GEOMETRÍA DEL MODELO HIDRÁULICO .....	434
1.49.5	CONDICIÓN DE BORDE .....	442
1.49.6	COMPARACIÓN DE INUNDACIÓN DE 1984 CON MODELO HIDRÁULICO .....	442



<b>1.50</b>	<b>MAPAS DE AMENAZA POR INUNDACIÓN PARA LA CUENCA DEL RÍO YAGUARÓN Y CIUDAD RÍO BRANCO .</b>	<b>444</b>
1.50.1	MAPAS POR ESCENARIO .....	445
1.50.2	MAPAS DE AMENAZA INTEGRADA.....	446
1.50.3	CURVA DE EXCEDENCIA DE NIVELES MÁXIMOS DIARIOS.....	450
	EXPOSICIÓN DE RIO BRANCO .....	453
<b>1.51</b>	<b>METODOLOGÍA PARA CONFORMAR LA BASE DE EDIFICACIONES EXPUESTAS .....</b>	<b>454</b>
1.51.1	INSUMOS DE ENTRADA PARA LA DETERMINACIÓN DE EDIFICACIONES EXPUESTAS .....	454
1.51.2	CONFORMACIÓN DE LA BASE DE EDIFICACIONES EXPUESTAS .....	467
1.51.3	CARACTERIZACIÓN DE LA BASE DE EDIFICACIONES EXPUESTAS.....	471
	VULNERABILIDAD DE EDIFICACIONES ANTE INUNDACIONES.....	475
<b>1.52</b>	<b>FUNCIONES DE DAÑO .....</b>	<b>476</b>
<b>1.53</b>	<b>FUNCIONES DE VULNERABILIDAD .....</b>	<b>478</b>
<b>1.54</b>	<b>FUNCIONES DE FRAGILIDAD.....</b>	<b>481</b>
<b>1.55</b>	<b>RELACIÓN ENTRE FUNCIONES DE FRAGILIDAD Y DE VULNERABILIDAD .....</b>	<b>482</b>
<b>1.56</b>	<b>MODELACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ANTE INUNDACIONES .....</b>	<b>483</b>
1.56.1	GENERALIDADES.....	483
1.56.2	VULNERABILIDAD DE EDIFICACIONES .....	485
1.56.3	METODOLOGÍA.....	487
1.56.4	PARÁMETROS DE CÁLCULO.....	488
	EVALUACIÓN PROSPECTIVA DEL RIESGO POR INUNDACIÓN EN LA CIUDAD DE RÍO BRANCO	493
<b>1.57</b>	<b>RESULTADOS DE RIESGO POR SECTOR DE USO.....</b>	<b>496</b>
<b>1.58</b>	<b>RESULTADOS DE RIESGO POR SISTEMA ESTRUCTURAL .....</b>	<b>497</b>
<b>1.59</b>	<b>RESULTADOS DE RIESGO POR NÚMERO DE PISOS .....</b>	<b>498</b>
<b>1.60</b>	<b>MAPAS DE PÉRDIDA ANUAL ESPERADA .....</b>	<b>499</b>
	CONCLUSIONES .....	501

REFERENCIAS.....	505
GLOSARIO DE TÉRMINOS .....	523
<b>A. 2.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE EN BASE DE DATOS NCEI .....</b>	<b>530</b>
<b>A. 2.2 INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR IDU DINAGUA PARA EVALUACIÓN A ESCALA NACIONAL .....</b>	<b>536</b>
<b>A. 2.3 COMPARACIÓN DATASET CHIRPS CON RESPECTO A REGISTROS DE ESTACIONES EN TIERRA PARA ANÁLISIS DE AMENAZA POR SEQUÍA.....</b>	<b>539</b>
<b>A. 2.4 COMPARACIÓN DE VALORES MEDIOS ANUALES DE TEMPERATURA ENTRE DATOS DEL DATASET DE LA UNIVERSIDAD DE PRINCETON Y CARACTERIZACIÓN AGROCLIMÁTICA DEL URUGUAY 1980-2009.....</b>	<b>546</b>
<b>A. 2.5 INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR IDU DINAGUA PARA EVALUACIÓN DE INUNDACIÓN EN LA CUENCA RÍO BRANCO.....</b>	<b>548</b>
<b>A. 2.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DATASET PRINCETON PARA EVALUACIÓN DE AMENAZA POR INUNDACIÓN ...</b>	<b>550</b>
<b>A. 3.1 MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH.....</b>	<b>563</b>
<b>A. 3.2 PARÁMETROS ATMOSFÉRICOS .....</b>	<b>564</b>
A. 3.2.1 PRESIÓN ATMOSFÉRICA $P$ .....	564
A. 3.2.2 CONSTANTE PSICROMÉTRICA $\gamma$ .....	564
<b>A. 3.3 TEMPERATURA DEL AIRE.....</b>	<b>565</b>
<b>A. 3.4 HUMEDAD DEL AIRE.....</b>	<b>565</b>
A. 3.4.1 PRESIÓN MEDIA DE VAPOR DE LA SATURACIÓN $e_s$ .....	565
A. 3.4.2 PENDIENTE DE LA CURVA DE PRESIÓN DE SATURACIÓN DE VAPOR $\Delta$ .....	566
A. 3.4.3 PRESIÓN REAL DE VAPOR $e_a$ .....	566
<b>A. 3.5 RADIACIÓN.....</b>	<b>568</b>
A. 3.5.1 RADIACIÓN EXTRATERRESTRE .....	568
A. 3.5.2 DURACIÓN MÁXIMA DE LA INSOLACIÓN (N) .....	569
A. 3.5.3 RADIACIÓN SOLAR O DE ONDA CORTA.....	569
A. 3.5.4 RADIACIÓN NETA DE ONDA LARGA .....	570
A. 3.5.5 RADIACIÓN NETA.....	571
<b>A. 3.6 VELOCIDAD DEL VIENTO.....</b>	<b>572</b>

<b>A. 3.7</b>	<b>VARIABLES CLIMÁTICAS A PARTIR DE BASE DE DATOS UNIVERSIDAD DE PRINCETON .....</b>	<b>572</b>
<b>A. 3.8</b>	<b>EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA .....</b>	<b>573</b>
<b>A. 4.1</b>	<b>RDI .....</b>	<b>575</b>
<b>A. 4.2</b>	<b>SPEI .....</b>	<b>576</b>
<b>A. 8.1</b>	<b>IDENTIFICACIÓN DE INFORMACIÓN DISPONIBLE .....</b>	<b>598</b>
A. 8.1.1	SOJA.....	598
A. 8.1.2	TRIGO .....	599
A. 8.1.3	CEBADA .....	600
A. 8.1.4	ARROZ .....	601
A. 8.1.5	MAÍZ .....	603
A. 8.1.6	SORGO.....	605
A. 8.1.7	CÍTRICOS.....	606
A. 8.1.8	VIÑEDOS .....	606
<b>A. 8.2</b>	<b>ACTUALIZACIÓN DEL AVALÚO AL AÑO DE ANÁLISIS .....</b>	<b>606</b>
<b>A. 9.1</b>	<b>CONCENTRACIONES DE CO<sub>2</sub> [PPM] MEDIDAS ENTRE 1980 Y 2017 (DLUGOKENCKY &amp; TANS, 2018)...</b>	<b>608</b>
<b>A. 9.2</b>	<b>PROYECCIÓN DE CONCENTRACIONES DE CO<sub>2</sub> [PPM] SEGÚN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO DEL IPCC</b>	<b>609</b>
<b>A. 10.1</b>	<b>PARÁMETROS QUE DEFINEN EL MODELO DE AQUACROP .....</b>	<b>611</b>
<b>A. 10.2</b>	<b>PARÁMETROS CONSERVATIVOS DE CULTIVOS CONSIDERADOS EN ESTE ESTUDIO .....</b>	<b>613</b>
<b>A. 10.3</b>	<b>PARÁMETROS ESPECÍFICOS SEGÚN TIPO DE CULTIVO .....</b>	<b>615</b>
A. 10.3.1	ARROZ .....	615
A. 10.3.2	CEBADA.....	617
A. 10.3.3	CÍTRICOS.....	620
A. 10.3.4	MAÍZ .....	623
A. 10.3.5	PASTOS.....	625
A. 10.3.6	SOJA.....	628

A. 10.3.7	SORGO.....	631
A. 10.3.8	TRIGO .....	633
A. 10.3.9	VIÑEDOS .....	636
<b>A. 11.1</b>	<b>MARCO TEÓRICO EL ENFOQUE HOLÍSTICO .....</b>	<b>641</b>
<b>A. 11.2</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO .....</b>	<b>643</b>
<b>A. 11.3</b>	<b>EVALUACIÓN HOLÍSTICA DEL RIESGO PARA URUGUAY .....</b>	<b>645</b>
<b>A. 12.1</b>	<b>ARROZ.....</b>	<b>662</b>
<b>A. 12.2</b>	<b>CEBADA.....</b>	<b>663</b>
<b>A. 12.3</b>	<b>CÍTRICOS .....</b>	<b>664</b>
<b>A. 12.4</b>	<b>MAÍZ.....</b>	<b>665</b>
<b>A. 12.5</b>	<b>SOJA .....</b>	<b>667</b>
<b>A. 12.6</b>	<b>SORGO .....</b>	<b>669</b>
<b>A. 12.7</b>	<b>TRIGO .....</b>	<b>671</b>
<b>A. 12.8</b>	<b>VIÑEDOS .....</b>	<b>672</b>
<b>A. 13.1</b>	<b>GANADERÍA BOVINA .....</b>	<b>673</b>
<b>A. 13.2</b>	<b>GANADERÍA OVINA.....</b>	<b>674</b>

## LISTA DE TABLAS

---

TABLA 1. VALOR DE PÉRDIDA ANUAL ESPERADA PARA URUGUAY, BAJO DIFERENTES ESCENARIOS DE CLIMA.....	34
TABLA 2. VALOR DEL VALOR EXPUESTO, Y PAE CON RESPECTO AL PIB NACIONAL PARA URUGUAY, BAJO DIFERENTES ESCENARIOS DE CLIMA.....	34
TABLA 3. IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS ATRIBUIDOS A LA SEQUÍA DE 2008 – 2009 EN DISTINTAS ACTIVIDADES DEL SECTOR AGROPECUARIO.FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE ARU (2009). ....	40
TABLA 4. RESUMEN DE IMPACTOS DE SEQUÍA EN URUGUAY REPORTADOS EN LA LITERATURA .....	43
TABLA 5. URUGUAY. PERIODOS EN LOS QUE SE HA REPORTADO SEQUÍA (1916 – 2018). NOTA: LOS REGISTROS EN ROJO SE DIFERENCIAN DE LOS NARANJAS POR LA PERCEPCIÓN APARENTE DE MAYORES IMPACTOS. SE RECUERDAN COMO EPISODIOS DE SEQUÍA PARTICULARMENTE SEVEROS. LOS REGISTROS AZULES INDICAN AÑOS DE FENÓMENO DE LA NIÑA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE BARTABURU ET AL. 2009; METHOL Y SILVEIRA, 2013, CLIMATE PREDICTION CENTER, 2018 Y REGISTROS DE PRENSA.....	44
TABLA 6. CLASIFICACIÓN DE SEQUÍAS DE ACUERDO CON EL VALOR DE INDICADORES ESTANDARIZADOS. ....	106
TABLA 7. NÚMERO DE EVENTOS DE SEQUÍA REGIONAL POR INDICADOR Y POR ESCALA TEMPORAL.....	109
TABLA 8. RESUMEN EVENTOS REGIONALES SEGÚN RDI -3 MESES.....	115
TABLA 9. RESULTADOS DE DISTANCIA MEDIA MÍNIMA PARA LOS PRIMEROS 6 MODELOS EN URUGUAY. ....	152
TABLA 10. RESULTADOS PARA MODELO CCSM4. PUNTOS DENTRO DEL PERCENTIL 25, 50 Y 75 SEGÚN CORRIDA Y RCP. ....	154
TABLA 11. PREDICCIONES DEL CAMBIO EN LA TEMPERATURA MEDIA DEL MODELO CCSM4 PARA PUNTO 50 DE LA MALLA DE ANÁLISIS PARA URUGUAY .....	155
TABLA 12. PREDICCIONES DEL CAMBIO EN PRECIPITACIÓN DEL MODELO CCSM4 PARA PUNTO 50 DE LA MALLA DE ANÁLISIS PARA URUGUAY .....	156
TABLA 13. PREDICCIONES DEL CAMBIO EN PRECIPITACIÓN DEL MODELO CCSM4 PARA PUNTO 50 DE LA MALLA DE ANÁLISIS PARA URUGUAY .....	172
TABLA 14. SUPERFICIE Y PORCENTAJE DE USO DE SUELO ASOCIADO A LAS REGIONES AGROPECUARIAS DEL URUGUAY EN AL AÑO 2011. FUENTE: (MGAP-DIEA, 2017A) .....	184
TABLA 15. PRODUCCIÓN AGROPECUARIA POR SUBSECTOR EN MILLONES DE DÓLARES, EN EL AÑO 2016.....	185
TABLA 16. ÁREA SEMBRADA, PRODUCCIÓN Y RENDIMIENTO DE GRANOS SELECCIONADOS PARA EL ANÁLISIS. AÑO AGRÍCOLA 2016-2017. FUENTE: (OPYPA). CONSULTAR ORIGEN DE LA INFORMACIÓN EN EL ANEXO A. 7	189
TABLA 17. PRODUCCIÓN DE PASTOS NATURALES POR REGIÓN GEOMORFOLÓGICA, EN KG DE MATERIA SECA POR AÑO .....	190
TABLA 18. ÁREA SEMBRADA, PRODUCCIÓN Y RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS DE INVIERNO. FUENTE: (MGAP-DIEA, 2016A) .....	193
TABLA 19. ÁREA SEMBRADA, PRODUCCIÓN Y RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS DE VERANO. FUENTE: (MGAP-DIEA, 2017B) .....	194
TABLA 20. ÁREA SEMBRADA Y PRODUCCIÓN DE LOS CULTIVOS DE FRUTAS CÍTRICAS. FUENTE: (MGAP-DIEA, 2016A) .....	194
TABLA 21. PORCENTAJE DE USO DEL SUELO, SEGÚN EL CENSO GENERAL AGROPECUARIO DEL 2011 .....	195
TABLA 22. PRODUCCIÓN AGROPECUARIA, SEGÚN SUBSECTOR, PARA EL AÑO 2016. FUENTE: (MGAP-DIEA, 2017A) .....	197
TABLA 23. ÁREA SEMBRADA, PRODUCCIÓN Y PORCENTAJE EXPORTADO DE LOS CULTIVOS SELECCIONADOS PARA EL MODELO DE RIESGO POR SEQUÍA. ....	199
TABLA 24. CULTIVOS SELECCIONADOS COMO ELEMENTOS EXPUESTOS PARA URUGUAY.....	200
TABLA 25. COMPARACIÓN DE ÁREA NACIONAL SEMBRADA POR CULTIVO Y ÁREA FINAL ASIGNADA EN EL MODELO DE EXPOSICIÓN.....	200
TABLA 26. STOCK BOVINO. FUENTE: (INAC, 2017) .....	215

TABLA 27. CLASIFICACIÓN DE GANADO BOVINO Y PARÁMETROS. ....	216
TABLA 28. STOCK OVINO. FUENTE: (INAC, 2017). ....	218
TABLA 29. CLASIFICACIÓN DE GANADO OVINO Y CARACTERÍSTICAS. ....	219
TABLA 30. PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA DE PASTO POR REGIÓN Y ESTACIÓN DEL AÑO (FUENTE: OPYPA CON BASE A BERRETA (1998), BEMHAJA (1991), CARÁMBULA (1987), FORMOSO (1991), AYALA ET. AL (1999) Y ALTESOR ET AL. (2017)) ....	229
TABLA 31. RENDIMIENTOS DE REFERENCIA (TON/HA) UTILIZADOS EN EL MODELO DE EXPOSICIÓN. 1FUENTE: (MGAP-DIEA, 2017A). 2FUENTE: (MGAP-DIEA, 2016A). 3FUENTE: (MGAP-DIEA, 2016B). 4FUENTE: (MGAP-DIEA, 2017B). 5FUENTE: (INAVI, 2017).....	231
TABLA 32. PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA DE PASTO POR REGIÓN Y ESTACIÓN DEL AÑO (FUENTE: OPYPA CON BASE A BERRETA (1998), BEMHAJA (1991), CARÁMBULA (1987), FORMOSO (1991), AYALA ET. AL (1999) Y ALTESOR ET AL. (2017)).....	234
TABLA 33. RESUMEN DEL AVALÚO EN USD/TONELADA POR PRODUCTO EN EL MODELO DE EXPOSICIÓN PARA EL AÑO AGRÍCOLA 2016/2017. 1FUENTE: INFORMACIÓN RECIBIDA DE OPYPA-MGAP. 2FUENTE: (CODINA, 2017). 3FUENTE: (FAOSTAT, 2018). ....	235
TABLA 34. AVALÚO EN USD/KG POR ESPECIE EN EL MODELO DE EXPOSICIÓN GANADERO PARA EL AÑO 2017. .	235
TABLA 35. PARÁMETROS QUE DEFINEN EL MODELO DE AQUACROP. ....	256
TABLA 36. PARÁMETROS CONSERVATIVOS DE CULTIVOS CONSIDERADOS EN ESTE ESTUDIO. ....	257
TABLA 37. PARÁMETROS ESPECÍFICOS DEL CULTIVO POR CATEGORÍA. ....	258
TABLA 38. PARÁMETROS ESPECÍFICOS SEGÚN TIPO DE CULTIVO. ....	259
TABLA 39. LISTA DE REFERENCIAS ESPECÍFICAS CONSULTADAS POR CULTIVO. ....	261
TABLA 40. PARÁMETROS DE CULTIVOS Y SU PARTICIPACIÓN EN LA BASE DE DATOS DE ELEMENTOS EXPUESTOS POR PAÍS. ....	262
TABLA 41. PARÁMETROS ESPECÍFICOS PARA ASOCIAR LA PRODUCCIÓN DE PASTURAS CON LA PRODUCCIÓN PECUARIA. ....	263
TABLA 42. PARÁMETROS QUE DEFINEN EL CRECIMIENTO DE LA COBERTURA Y SUS VALORES PARA CEBADA, TRIGO, SORGO Y CÍTRICOS.....	265
TABLA 43. PARÁMETROS QUE DEFINEN EL DESARROLLO DEL ÍNDICE DE COSECHA Y SUS VALORES PARA MAÍZ, FRÍJOL Y PALMA. ....	267
TABLA 44. VALORES DE PARÁMETROS DE CONTENIDO VOLUMÉTRICO DE AGUA POR DEFECTO EN EL MODELO AQUACROP. ....	273
TABLA 45. RELACIÓN UNIDAD CARTOGRÁFICA CON TEXTURA DE SUELO PARA URUGUAY. (DURÁN, 1997).....	275
TABLA 46. VALORES DE PARÁMETROS HIDROLÓGICOS DEL SUELO POR DEFECTO EN EL MODELO AQUACROP (DIRK RAES ET AL., 2011). ....	277
TABLA 47. CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN SEGÚN GRUPO HIDROLÓGICO DEL SUELO (FUENTE: SOIL CONSERVATION SERVICE, 1986, DIRK RAES ET AL., 2011). ....	277
TABLA 48. RELACIÓN UNIDAD CARTOGRÁFICA CON GRUPO HIDROLÓGICO DE SUELO PARA URUGUAY. (MVOTMA, 2011). ....	278
TABLA 49. VALORES DE CN PARA DIFERENTES COBERTURAS (USOS DE LA TIERRA) Y TIPOS DE SUELO.....	280
TABLA 50. EQUIVALENCIAS ENTRE CATEGORÍAS DE COBERTURA DEL SUELO DEL MAPA DEL MVOTMA Y CATEGORÍAS DE USO DE SUELO DEL SOIL CONSERVATION SERVICE PARA URUGUAY.....	280
TABLA 51. PARÁMETROS PARA EL SUELO QUE DEFINEN EL MODELO DE AQUACROP. ....	282
TABLA 52. PARÁMETROS NO CONSERVATIVOS DEL SUELO QUE DEFINEN EL MODELO DE AQUACROP. ....	285
TABLA 53. RELACIÓN TEXTURA DEL SUELO CON PARÁMETROS DE CONTENIDO DE AGUA Y GRUPO HIDROLÓGICO. ....	285

TABLA 54. CONTENIDO PORCENTUAL DE MATERIA SECA EN DIFERENTES TIPOS DE ALIMENTO (FUENTE: IRIGOYEN, 2011 P.5).....	290
TABLA 55. PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA EN DIFERENTES PASTURAS NATURALES DE DIFERENTES ZONAS EN URUGUAY (FUENTE: OPYPA CON BASE A BERRETA (1998), BEMHAJA (1991), CARÁMBULA (1987), FORMOSO (1991), AYALA ET. AL (1999) Y ALTESOR ET AL. (2017)). .....	290
TABLA 56. PORCENTAJE DE DIGESTIBILIDAD DE MATERIA SECA EN PASTURAS NATURALES DE URUGUAY. (FUENTE: CARÁMBULA 1991. CUADRO 6). .....	294
TABLA 57. RESULTADOS DE RIESGO PARA EL PORTAFOLIO COMPLETO EN URUGUAY.....	302
TABLA 58. RESULTADOS DE PÉRDIDA ANUAL ESPERADA DESAGREGADOS POR CULTIVOS PARA URUGUAY. ....	304
TABLA 59. RESULTADOS DE PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE PARA 20, 50, 100 Y 200 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO, DESAGREGADOS POR CULTIVOS PARA URUGUAY. ....	304
TABLA 60. RESULTADOS DE RIESGO POR SEQUÍA PARA EL PORTAFOLIO DE CULTIVOS DE URUGUAY PARA LOS ESCENARIOS DE CLIMA BASE Y CON CAMBIO CLIMÁTICO RCP 2.6, 4.5, 6 Y 8.5. ....	307
TABLA 61. RESULTADOS DE PÉRDIDA ANUAL ESPERADA DESAGREGADOS POR CULTIVOS Y ESCENARIOS DE CLIMA PARA URUGUAY .....	309
TABLA 62. RESULTADOS DE PÉRDIDA ANUAL ESPERADA DESAGREGADOS POR DEPARTAMENTO Y ESCENARIOS DE CLIMA PARA URUGUAY. ....	310
TABLA 63. PÉRDIDA ANUAL ESPERADA PARA EL PORTAFOLIO COMPLETO DE CULTIVOS DE URUGUAY Y SU RELACIÓN CON EL PIB NACIONAL. ....	314
TABLA 64. PÉRDIDA DE PRODUCCIÓN ANUAL ESPERADA PARA EL PORTAFOLIO DE GRANOS BÁSICOS DE URUGUAY. ....	315
TABLA 65. PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE PARA 100 AÑOS DE PERIODO PARA EL PORTAFOLIO DE GRANOS BÁSICOS DE URUGUAY.....	315
TABLA 66. RESULTADOS DE RIESGO PARA EL PORTAFOLIO COMPLETO DE GANADERÍA EN URUGUAY. ....	316
TABLA 67. RESULTADOS DE PÉRDIDA ANUAL ESPERADA PARA GANADERÍA EN URUGUAY. ....	318
TABLA 68. RESULTADOS DE PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE PARA 20, 50, 100 Y 200 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO, PARA GANADERÍA EN URUGUAY. ....	318
TABLA 69. RESULTADOS DE RIESGO POR SEQUÍA PARA EL PORTAFOLIO DE GANADERÍA DE URUGUAY PARA LOS ESCENARIOS DE CLIMA BASE Y CON CAMBIO CLIMÁTICO RCP 2.6, 4.5, 6 Y 8.5. ....	321
TABLA 70. RESULTADOS DE PÉRDIDA ANUAL ESPERADA EN GANADERÍA Y ESCENARIOS DE CLIMA PARA URUGUAY. ....	322
TABLA 72. PÉRDIDA ANUAL ESPERADA PARA EL PORTAFOLIO COMPLETO DE GANADERÍA EN URUGUAY Y SU RELACIÓN CON EL PIB NACIONAL DE 2017.....	327
TABLA 73. PÉRDIDA DE PRODUCCIÓN ANUAL ESPERADA PARA EL PORTAFOLIO DE GANADERÍA EN URUGUAY.. ..	328
TABLA 74. PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE PARA 100 AÑOS DE PERIODO PARA EL PORTAFOLIO DE GRANOS BÁSICOS DE URUGUAY.....	329
TABLA 75. RESULTADOS DE RIESGO PARA EL PORTAFOLIO COMPLETO DEL SECTOR AGROPECUARIO EN URUGUAY.. ..	329
TABLA 76. RESULTADOS DE PÉRDIDA ANUAL ESPERADA PARA SECTOR AGROPECUARIO EN URUGUAY.....	332
TABLA 77. RESULTADOS DE PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE PARA 20, 50, 100 Y 200 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO, PARA EL SECTOR AGROPECUARIO EN URUGUAY.. ..	332
TABLA 78. RESULTADOS DE RIESGO POR SEQUÍA PARA EL PORTAFOLIO COMPLETO DE URUGUAY PARA LOS ESCENARIOS DE CLIMA BASE Y CON CAMBIO CLIMÁTICO RCP 2.6, 4.5, 6 Y 8.5. ....	334
TABLA 79. RESULTADOS DE PÉRDIDA ANUAL ESPERADA POR SUBSECTOR Y ESCENARIOS DE CLIMA PARA URUGUAY. ....	335
TABLA 80. RESULTADOS DE PÉRDIDA ANUAL ESPERADA DESAGREGADA POR DEPARTAMENTO Y ESCENARIOS DE CLIMA PARA URUGUAY. ....	336

TABLA 81. PÉRDIDA ANUAL ESPERADA PARA EL PORTAFOLIO COMPLETO DE GANADERÍA EN URUGUAY Y SU RELACIÓN CON EL PIB NACIONAL DE 2017 Y EL PIB AGROPECUARIO DE 2017.....	340
TABLA 82. AFECTACIÓN TOTAL POR CATEGORÍA.....	353
TABLA 83. RELACIÓN ENTRE CATEGORÍAS. ....	354
TABLA 84. RESUMEN DE AFECTACIÓN DESPUÉS DE LA AGRUPACIÓN.....	354
TABLA 85. COSTOS UNITARIOS.....	355
TABLA 86. PÉRDIDAS POR CATEGORÍA (EN DÓLARES).....	356
TABLA 87. PÉRDIDA ANUAL ESPERADA (EN DÓLARES).....	356
TABLA 88. EVENTOS CATASTRÓFICOS DE MAYOR PÉRDIDA EN URUGUAY ENTRE 1988-2013 REPORTADOS EN PLATAFORMA DESINVENTAR.....	357
TABLA 89. EVENTOS ARBITRARIOS A Y SU MEDIDA DE PROBABILIDAD. ....	370
TABLA 90. EVENTOS REPORTADOS EN DESINVENTAR.....	374
TABLA 91. ASIGNACIÓN GRUPO HIDROLÓGICO DE SUELOS BRASILEROS.....	381
TABLA 92. ASIGNACIÓN GRUPO HIDROLÓGICO DE SUELOS URUGUAYOS.....	382
TABLA 93. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS GENERALES CUENCA RÍO BRANCO.....	399
TABLA 94. ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN EMPLEANDO DIFERENTES METODOLOGÍAS .....	408
TABLA 95. COMBINACIONES EVALUADAS EN EL MODELO HEC HMS PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES A LA SALIDA DE LA CUENCA. ....	412
TABLA 96. ENSAYO 1. NC SCS- HU SCS.....	414
TABLA 97. RESULTADOS DE CAUDAL PICO. ENSAYO 1. ....	414
TABLA 98. ENSAYO 2. NC SCS- HU CLARK. ....	415
TABLA 99. RESULTADOS DE CAUDAL PICO. ENSAYO 2. ....	415
TABLA 100. ENSAYO 3. NC SCS- HU SNYDER. ....	416
TABLA 101. RESULTADOS DE CAUDAL PICO. ENSAYO 3. ....	416
TABLA 102. RESULTADOS DE CAUDAL PICO. MODELACIÓN HIDROLÓGICA HEC. ....	417
TABLA 103. VALORES DE CN PARA DIFERENTES COBERTURAS (USOS DE LA TIERRA) Y TIPOS DE SUELO.....	419
TABLA 104. DESTINO ECONÓMICO SEGÚN DIRECCIÓN NACIONAL DE CATASTRO.....	462
TABLA 105. TIPO DE VIVIENDA. (FUENTE: INE,2011).....	466
TABLA 106. PARÁMETROS DE CÁLCULO PARA VULNERABILIDAD DE EDIFICACIONES. ....	489
TABLA 107. RESULTADOS DE RIESGO POR INUNDACIÓN PARA LAS EDIFICACIONES DE RÍO BRANCO.....	494
TABLA 108. RESULTADOS DE RIESGO POR SECTOR DE USO. ....	496
TABLA 109. RESULTADOS DE RIESGO POR SISTEMA ESTRUCTURAL. ....	497
TABLA 110. RESULTADOS DE RIESGO POR NÚMERO DE PISOS.....	498



## LISTA DE FIGURAS

---

FIGURA 1. DISTRIBUCIÓN DE LAS PÉRDIDAS ECONÓMICAS ENTRE SUBACTIVIDADES DEL SECTOR AGROPECUARIO DURANTE LA SEQUÍA 2008-2009. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE ARU (2009).	41
FIGURA 2. REGISTRO DEL ÍNDICE DE BIENESTAR HÍDRICO EN EL SUROESTE DE URUGUAY (IBH) (JULIO, 1999 – JUNIO, 2011). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE MGAP-FAO (2013).	45
FIGURA 3. ESQUEMA GENERAL DEL MODELO PROBABILISTA DE EVALUACIÓN DE RIESGO POR SEQUÍA	46
FIGURA 4. PÉRDIDAS POR EVENTO EN UNA VENTANA AMPLIA DE TIEMPO.	50
FIGURA 5. VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LA TASA DE EXCEDENCIA CON EL TAMAÑO DE LA MUESTRA.	51
FIGURA 6. EJEMPLO DE CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS. EL EJE VERTICAL MUESTRA LA TASA DE EXCEDENCIA (IZQUIERDA) Y SU VALOR INVERSO O PERIODO DE RETORNO (DERECHA). EL EJE HORIZONTAL MUESTRA LA PÉRDIDA ASOCIADA.	52
FIGURA 7. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE RIESGO POR SEQUÍA	54
FIGURA 8. DIFERENCIAS ENTRE PÉRDIDAS Y DAÑOS EN EL SECTOR AGRÍCOLA (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE FAO, 2017)	59
FIGURA 9. DIFERENCIAS ENTRE PÉRDIDAS Y DAÑOS EN EL SECTOR AGRÍCOLA PARA DESASTRES ASOCIADOS CON SEQUÍA APLICADAS EN ESTE ESTUDIO. (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE FAO, 2017).	60
FIGURA 10. DIFERENCIAS ENTRE PÉRDIDAS Y DAÑOS EN EL SECTOR PECUARIO PARA DESASTRES ASOCIADOS CON SEQUÍA (ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE FAO, 2017).	61
FIGURA 11. EJEMPLO DE CURVA DE PML	65
FIGURA 12. EJEMPLO DE CURVA DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS EN UN AÑO.	66
FIGURA 13. EJEMPLO DE CURVA DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDA EN EL PRÓXIMO EVENTO	67
FIGURA 14. EJEMPLO DE PAE PARA LOS DIFERENTES ESCENARIOS CLIMÁTICOS MODELADOS	67
FIGURA 15. SOFTWARE DROUGHT PRO PARA ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA POR SEQUÍA	69
FIGURA 16. ESQUEMA DE METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE LA AMENAZA POR SEQUÍA	71
FIGURA 17. MAPA DE LOCALIZACIÓN ESTACIONES DE URUGUAY DISPONIBLES EN NCDC	74
FIGURA 18. PORCENTAJE DE VALORES COMPLETOS DE ESTACIONES URUGUAY DISPONIBLES EN NCDC	75
FIGURA 19. REGISTROS DE PRECIPITACIÓN TOTAL DIARIA [MM/DÍA] PARA FECHAS SELECCIONADAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	76
FIGURA 20. REGISTROS DE DATASET PRINCETON DE TEMPERATURA MEDIA, MÁXIMA Y MÍNIMA PARA EL DÍA 01/01/1981 EN EL ÁREA DE ESTUDIO.	78
FIGURA 21. MALLA DE ANÁLISIS 0.5°x0.5° PARA URUGUAY	79
FIGURA 22. MAPA DE PRECIPITACIÓN ACUMULADA ANUAL (1981-2010) SEGÚN BASE DE DATOS CHIRPS	80
FIGURA 23. DIAGRAMA DE CAJAS DE VALORES DE PRECIPITACIÓN MENSUAL EN (1981-2010) SEGÚN BASE DE DATOS CHIRPS	81
FIGURA 24. MAPAS DE PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL (1981-2010) SEGÚN BASE DE DATOS CHIRPS	82
FIGURA 25. MAPA DE TEMPERATURA MEDIA ANUAL (1981-2010) SEGÚN BASE DE DATOS DE LA UNIVERSIDAD DE PRINCETON	83
FIGURA 26. MAPA DE TEMPERATURA MÁXIMA ANUAL (IZQUIERDA) Y MÍNIMA ANUAL (DERECHA) (1981-2010) SEGÚN BASE DE DATOS DE LA UNIVERSIDAD DE PRINCETON.	83
FIGURA 27. MAPAS DE TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (1981-2010) SEGÚN BASE DE DATOS DE LA UNIVERSIDAD DE PRINCETON	84

FIGURA 28. AJUSTE DE DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD PARA REGISTROS HISTÓRICOS DEL 1RO ENERO PARA UN PUNTO DE LA MALLA DE ANÁLISIS: TEMPERATURA MEDIA (IZQUIERDA) Y PRECIPITACIÓN TOTAL DIARIA (DERECHA).	86
FIGURA 29 HISTOGRAMA PARA VALORES DE PRECIPITACIÓN REGISTRADOS EN DÍA DE TEMPORADA SECA Y UN DÍA EN TEMPORADA DE LLUVIAS.	88
FIGURA 30 FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD Y PROBABILIDAD ACUMULADA TENIENDO EN CUENTA $P=0$	89
FIGURA 31 SERIES SINTÉTICAS DE UN AÑO DE SIMULACIÓN PARA UNA ESTACIÓN SELECCIONADA EN MALLA DE ANÁLISIS DE URUGUAY.	91
FIGURA 32 PROMEDIO DIARIO MULTIANUAL DE PRECIPITACIÓN (ARRIBA) Y DE TEMPERATURA MEDIA (ABAJO) PARA SERIE HISTÓRICA (1981-2010) Y SERIE SINTÉTICA (1000 AÑOS DE SIMULACIÓN).	92
FIGURA 33 DIAGRAMAS DE CAJA PARA PROMEDIO ANUAL DE PRECIPITACIÓN (IZQUIERDA) Y DE TEMPERATURA MEDIA (DERECHA) PARA SERIE HISTÓRICA (1981-2010) Y SERIE SINTÉTICA (1000 AÑOS DE SIMULACIÓN).	92
FIGURA 34. MAPAS DE VALORES MEDIOS MULTIANUALES PARA PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA MEDIA, MÁXIMA Y MÍNIMA DE REGISTROS HISTÓRICOS (IZQUIERDA) Y SERIES MODELADAS (DERECHA).	94
FIGURA 35 MAPA DE RADIACIÓN ENTRANTE DE ONDA LARGA MEDIA ANUAL (IZQUIERDA) Y VARIACIÓN DE LA MEDIA DECADAL (DERECHA) PARA 103 ESTACIONES EN URUGUAY.	97
FIGURA 36 MAPA DE RADIACIÓN ENTRANTE DE ONDA CORTA MEDIA ANUAL (IZQUIERDA) Y VARIACIÓN DE LA MEDIA DECADAL (DERECHA) PARA 103 ESTACIONES EN URUGUAY.	97
FIGURA 37 MAPA DE PRESIÓN ATMOSFÉRICA MEDIA ANUAL (IZQUIERDA) Y VARIACIÓN DE LA MEDIA DECADAL (DERECHA) PARA 103 ESTACIONES EN URUGUAY.	98
FIGURA 38 MAPA DE HUMEDAD ESPECÍFICA MEDIA ANUAL (IZQUIERDA) Y VARIACIÓN DE LA MEDIA DECADAL (DERECHA) PARA 103 ESTACIONES EN URUGUAY.	99
FIGURA 39 MAPA DE VELOCIDAD DEL VIENTO MEDIA ANUAL (IZQUIERDA) Y VARIACIÓN DE LA MEDIA DECADAL (DERECHA) PARA 103 ESTACIONES EN URUGUAY. ESTA VELOCIDAD DEL VIENTO ES MEDIDA A 2 M DE LA SUPERFICIE.	100
FIGURA 40 VARIACIÓN DE LA MEDIA DECADAL DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA PARA REGISTROS HISTÓRICOS (IZQUIERDA) Y PARA SERIE SIMULADA (DERECHA) PARA 103 ESTACIONES EN URUGUAY.	101
FIGURA 41 MAPAS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIA MENSUAL (1981-2010) APLICANDO ECUACIÓN PENMANN-MONTEITH.	102
FIGURA 42 MAPAS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIA MENSUAL PARA SERIES SIMULADAS APLICANDO ECUACIÓN PENMANN-MONTEITH.	103
FIGURA 43 ESQUEMA DE INDICADORES DE SEQUÍA Y CONCEPTOS DE SEVERIDAD, DURACIÓN E INTENSIDAD DEL EVENTO.	104
FIGURA 44 SERIES DE INDICADOR DE SEQUÍA PARA 3 MESES CON UMBRAL=-1.	107
FIGURA 45 SERIES DE INDICADOR DE RDI PARA 3 MESES (ARRIBA), 6 MESES (MEDIO) Y 12 MESES (ABAJO).	108
FIGURA 46 SERIES DE INDICADOR DE SPEI PARA 3 MESES (ARRIBA), 6 MESES (MEDIO) Y 12 MESES (ABAJO).	108
FIGURA 47 IDENTIFICACIÓN DE SEQUÍAS REGIONALES SOBRE LAS SERIES DE TIEMPO DE TODAS LAS ESTACIONES DEL ÁREA DE ESTUDIO.	110
FIGURA 48 NÚMERO DE EVENTOS DE SEQUÍA REGIONAL SEGÚN DURACIÓN [MESES] PARA INDICADOR SPEI (IZQUIERDA) Y RDI (DERECHA).	111
FIGURA 49 NÚMERO DE EVENTOS DE SEQUÍA REGIONAL SEGÚN FECHA DE INICIO DEL EVENTO PARA INDICADOR SPEI (IZQUIERDA) Y RDI (DERECHA).	111
FIGURA 50. BONDAD DEL AJUSTE A UNA DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD NORMAL ESTÁNDAR DE LOS INDICADORES SPEI Y RDI CALCULADOS PARA 3, 6 Y 12 MESES PARA UNA ESTACIÓN DE LA MALLA DE ANÁLISIS EN URUGUAY.	113

FIGURA 51. RESUMEN REGISTROS EVENTOS DE SEQUÍA PARA URUGUAY EN BASE DE DATOS DESINVENTAR, NÚMERO DE EVENTOS POR DÉCADA (IZQUIERDA) Y NÚMERO DE EVENTOS SEGÚN MES DE INICIO (DERECHA).	113
FIGURA 52 NÚMERO DE EVENTOS SEGÚN MES DE INICIO PARA INDICADOR SPEI (IZQUIERDA) Y RDI (DERECHA).	114
FIGURA 53. MAPAS DE INDICADOR DE RDI PARA 3 MESES PARA EL EVENTO DE SEQUÍA DE OCTUBRE DE 2008 A MARZO DE 2009.	116
FIGURA 54 MAPAS SEVERIDAD (IZQUIERDA) E INTENSIDAD (DERECHA) DEL EVENTO DE SEQUÍA DE OCTUBRE DE 2008 A MARZO DE 2009.	117
FIGURA 55 SERIES DE INDICADOR DE RDI PARA 3 MESES PARA LA SERIE SIMULADA, INDICANDO VALOR UMBRAL=-1.	118
FIGURA 56 NÚMERO DE EVENTOS SEGÚN MES DE INICIO PARA INDICADOR SPEI (IZQUIERDA) Y RDI (DERECHA) PARA EVENTOS REGIONALES A PARTIR DE LA SERIE SIMULADA DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA.	118
FIGURA 57. NÚMERO DE ESTACIONES QUE PARTICIPAN EN UN EVENTO DE SEQUÍA REGIONAL PARA ESCENARIOS ESTOCÁSTICOS.	119
FIGURA 58 DURACIÓN MÁXIMA (IZQUIERDA) Y SEVERIDAD MÁXIMA (DERECHA) PARA 750 EVENTOS ESTOCÁSTICOS DE SEQUÍA EN URUGUAY.	120
FIGURA 59 SEVERIDAD PARA 750 EVENTOS ESTOCÁSTICOS DE SEQUÍA EN URUGUAY, COMPARANDO DOS PUNTOS ALEATORIOS DE LA MALLA.	121
FIGURA 60. DURACIÓN EN MESES PARA 750 EVENTOS ESTOCÁSTICOS DE SEQUÍA EN URUGUAY, COMPARANDO DOS PUNTOS ALEATORIOS DE LA MALLA.	121
FIGURA 61 MAPAS DE SEVERIDAD (ARRIBA), DURACIÓN EN MESES (MEDIO) E INTENSIDAD (ABAJO) PARA TRES EVENTOS ESTOCÁSTICOS DE SEQUÍA.	124
FIGURA 62 . MAPAS DE SEVERIDAD DE SEQUÍA PARA 2 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO (SIN UNIDADES).	126
FIGURA 63 . MAPAS DE SEVERIDAD DE SEQUÍA PARA 10 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO (SIN UNIDADES).	127
FIGURA 64. MAPAS DE SEVERIDAD DE SEQUÍA PARA 20 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO (SIN UNIDADES).	127
FIGURA 65. MAPAS DE SEVERIDAD DE SEQUÍA PARA 25 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO (SIN UNIDADES).	128
FIGURA 66. MAPAS DE SEVERIDAD DE SEQUÍA PARA 50 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO (SIN UNIDADES).	128
FIGURA 67. MAPAS DE SEVERIDAD DE SEQUÍA PARA 100 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO (SIN UNIDADES).	129
FIGURA 68. MAPAS DE SEVERIDAD DE SEQUÍA PARA 200 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO (SIN UNIDADES).	129
FIGURA 69. MAPAS DE DURACIÓN DE SEQUÍA PARA 2 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO (EN MESES).	130
FIGURA 70. MAPAS DE DURACIÓN DE SEQUÍA PARA 10 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO (EN MESES).	131
FIGURA 71. MAPAS DE DURACIÓN DE SEQUÍA PARA 20 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO (EN MESES).	131
FIGURA 72. MAPAS DE DURACIÓN DE SEQUÍA PARA 25 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO (EN MESES).	132
FIGURA 73. MAPAS DE DURACIÓN DE SEQUÍA PARA 50 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO (EN MESES).	132
FIGURA 74. MAPAS DE DURACIÓN DE SEQUÍA PARA 100 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO (EN MESES).	133
FIGURA 75. MAPAS DE DURACIÓN DE SEQUÍA PARA 200 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO (EN MESES).	133
FIGURA 76. MAPAS DE INTENSIDAD DE SEQUÍA PARA 2 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO (EN 1/MESES).	134
FIGURA 77. MAPAS DE INTENSIDAD DE SEQUÍA PARA 10 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO (EN 1/MESES).	135

FIGURA 78. MAPAS DE INTENSIDAD DE SEQUÍA PARA 20 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO (EN 1/MESES). .....	135
FIGURA 79. MAPAS DE INTENSIDAD DE SEQUÍA PARA 25 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO (EN 1/MESES). .....	136
FIGURA 80. MAPAS DE INTENSIDAD DE SEQUÍA PARA 50 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO (EN 1/MESES). .....	136
FIGURA 81. MAPAS DE INTENSIDAD DE SEQUÍA PARA 100 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO (EN 1/MESES). .....	137
FIGURA 82. MAPAS DE INTENSIDAD DE SEQUÍA PARA 200 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO (EN 1/MESES). .....	137
FIGURA 83. CURVA DE TASA DE EXCEDENCIA DE AMENAZA, SEGÚN INDICADOR DE SEQUÍA RDI.....	139
FIGURA 84. CURVA DE TASA DE EXCEDENCIA DE AMENAZA, SEGÚN INDICADOR DE SEQUÍA RDI.....	139
FIGURA 85. PROYECCIONES DE CAMBIO DE PRECIPITACIÓN SEGÚN MÚLTIPLES GCM Y RCP .....	142
FIGURA 86. PROYECCIONES DE CAMBIO DE TEMPERATURA PROMEDIO SEGÚN MÚLTIPLES GCM Y RCP.....	143
FIGURA 87. UBICACIÓN DE LOS 4 PUNTOS SELECCIONADOS COMO EJEMPLO.....	144
FIGURA 88 DIAGRAMA DE CAJAS DE VALORES MEDIOS MENSUALES DE PRECIPITACIÓN TOTAL DIARIA .....	145
FIGURA 89. DIAGRAMA DE CAJAS DE VALORES DE PROMEDIO MENSUALES TEMPERATURA MEDIA .....	146
FIGURA 90. DISPERSIÓN DE LAS DIFERENCIAS EN TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN PARA EL MES DE ABRIL EN EL PUNTO 50.....	150
FIGURA 91. DIAGRAMA DE CAJAS PARA LAS DIFERENCIAS EN TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN EN EL PUNTO 50	150
FIGURA 92. DISPERSIÓN DE LAS DIFERENCIAS EN TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN .....	151
FIGURA 93. PROMEDIO MULTIANUAL DE TEMPERATURA MEDIA PARA LA SERIE HISTÓRICA Y LAS SERIES SINTÉTICAS PERTURBADAS POR CAMBIO CLIMÁTICO .....	156
FIGURA 94. PRECIPITACIÓN ANUAL PARA 25 AÑOS SIMULADOS Y LAS SERIES SINTÉTICAS PERTURBADAS POR CAMBIO CLIMÁTICO.....	156
FIGURA 95. RESULTADOS SIN PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO – SE PRESENTAN NUEVAMENTE EN ESTA SECCIÓN COMO REFERENCIA .....	158
FIGURA 96. MAPAS DE CAMBIO PORCENTUAL EN LA PRECIPITACIÓN DIARIA SEGÚN VARIACIONES DE CADA RCP DEL MODELO DE CIRCULACIÓN GLOBAL CCSM4.....	159
FIGURA 97. MAPAS DE PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL SEGÚN VARIACIONES DE CADA RCP DEL MODELO DE CIRCULACIÓN GLOBAL CCSM4.....	160
FIGURA 98. MAPAS DE CAMBIO ABSOLUTO EN LA TEMPERATURA SEGÚN VARIACIONES DE CADA RCP DEL MODELO DE CIRCULACIÓN GLOBAL CCSM4. ....	161
FIGURA 99. MAPAS DE TEMPERATURA MEDIA ANUAL SEGÚN VARIACIONES DE CADA RCP DEL MODELO DE CIRCULACIÓN GLOBAL CCSM4.....	162
FIGURA 100. MAPAS DE TEMPERATURA MÁXIMA ANUAL SEGÚN VARIACIONES DE CADA RCP DEL MODELO DE CIRCULACIÓN GLOBAL CCSM4.....	163
FIGURA 101. MAPAS DE TEMPERATURA MÍNIMA ANUAL SEGÚN VARIACIONES DE CADA RCP DEL MODELO DE CIRCULACIÓN GLOBAL CCSM4.....	164
FIGURA 102. MAPAS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA ANUAL SEGÚN VARIACIONES DE CADA RCP DEL MODELO DE CIRCULACIÓN GLOBAL CCSM4.....	167
FIGURA 103. NÚMERO DE EVENTOS DE SEQUÍA PARA 1,000 AÑOS DE SIMULACIÓN PARA LA SIMULACIÓN BASE Y CUATRO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO. ....	169
FIGURA 104. DIAGRAMAS DE CAJAS PARA LA SERIE DE DURACIÓN DE LAS SEQUÍAS [EN MESES] PARA LA SIMULACIÓN BASE Y CUATRO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	169

FIGURA 105. HISTOGRAMA DE MESES DE INICIO DE LAS SEQUIAS PARA LA SIMULACIÓN BASE Y CUATRO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	170
FIGURA 106. VALORES DEL INDICADOR RDI PARA EVENTO SIMULADO DE SEQUÍA, PARA SIMULACIÓN DE CLIMA BASE Y MODIFICADA SEGÚN RCP PARA EL PUNTO 50 DE LA MALLA DE ANÁLISIS.....	172
FIGURA 107. MAPAS DE SEVERIDAD DE SEQUÍA PARA SIMULACIÓN BASE, RCP2.6 Y, 4.5; PARA 10, 20, 50, 100 Y 200 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO. EL INDICADOS SPEI NO TIENE UNIDADES .....	175
FIGURA 108. MAPAS DE SEVERIDAD DE SEQUÍA RCP6 Y, 8.5; PARA 10, 20, 50, 100 Y 200 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO. EL INDICADOR SPEI NO TIENE UNIDADES .....	176
FIGURA 109. MAPAS DE DURACIÓN DE SEQUÍA PARA SIMULACIÓN BASE, RCP2.6 Y, 4.5; PARA 10, 20, 50, 100 Y 200 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO. ....	177
FIGURA 110. MAPAS DE DURACIÓN DE SEQUÍA PARA RCP6 Y, 8.5; PARA 10, 20, 50, 100 Y 200 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO. ....	178
FIGURA 111. MAPAS DE INTENSIDAD DE SEQUÍA PARA SIMULACIÓN BASE, RCP2.6 Y, 4.5; PARA 10, 20, 50, 100 Y 200 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO. ....	179
FIGURA 112. MAPAS DE INTENSIDAD DE SEQUÍA PARA RCP6 Y, 8.5; PARA 10, 20, 50, 100 Y 200 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO. ....	180
FIGURA 113. CURVAS DE AMENAZA INCLUYENDO CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL PUNTO 7 DE LA MALLA DE ANÁLISIS DE URUGUAY.....	181
FIGURA 114. ÁREA DE CÍTRICOS SEMBRADA, POR ÁREA DE ENUMERACIÓN CENSAL, EN EL AÑO 2014. FUENTE: (OPYPA). CONSULTAR ORIGEN DE LA INFORMACIÓN EN EL ANEXO A. 7 .....	186
FIGURA 115. ÁREA DE ARROZ SEMBRADA, POR ÁREA DE ENUMERACIÓN CENSAL, EN EL VERANO 2016-2017. FUENTE: (OPYPA). CONSULTAR ORIGEN DE LA INFORMACIÓN EN EL ANEXO A. 7 .....	187
FIGURA 116. ÁREA DE CULTIVOS DE INVIERNO (TRIGO Y CEBADA) SEMBRADA, POR ÁREA DE ENUMERACIÓN CENSAL, EN EL AÑO 2017. FUENTE: (OPYPA). CONSULTAR ORIGEN DE LA INFORMACIÓN EN EL ANEXO A. 7 .....	187
FIGURA 117. ÁREA DE SOJA SEMBRADA, POR ÁREA DE ENUMERACIÓN CENSAL, EN EL AÑO 2016-2017. FUENTE: (OPYPA). CONSULTAR ORIGEN DE LA INFORMACIÓN EN EL ANEXO A. 7 .....	188
FIGURA 118. ÁREA DE SORGO Y MAÍZ SEMBRADA, POR ÁREA DE ENUMERACIÓN CENSAL, EN EL AÑO 2016-2017. FUENTE: (OPYPA). CONSULTAR ORIGEN DE LA INFORMACIÓN EN EL ANEXO A. 7.....	188
FIGURA 119. ÁREA DE PASTOS NATURALES, POR ÁREA DE ENUMERACIÓN CENSAL, EN EL AÑO 2015-2016. FUENTE: (OPYPA). CONSULTAR ORIGEN DE LA INFORMACIÓN EN EL ANEXO A. 7 .....	189
FIGURA 120. MAPA DE COBERTURA DE SUELO, DEL AÑO 2015. FUENTE: (MVOTMA, 2018). ....	191
FIGURA 121. MAPA DE COBERTURA DE SUELO, DEL AÑO 2015. ZONAS DE CULTIVOS. FUENTE: (MVOTMA, 2011). ....	192
FIGURA 122. MAPA DE USO DE SUELO, DEL AÑO 2015. FRUTALES. FUENTE: (MVOTMA, 2018).....	192
FIGURA 123. MAPA DE USO DE SUELO, DEL AÑO 2015. ZONAS DE PASTOS. FUENTE: (MVOTMA, 2018) .....	193
FIGURA 124. MALLA CON RESOLUCIÓN DE 5 KM POR 5 KM, PARA URUGUAY.....	198
FIGURA 125. MAPA DE LOCALIZACIÓN DE SIEMBRAS DE SOJA DE PRIMERA EN URUGUAY, POR DEPARTAMENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	202
FIGURA 126. MAPA DE LOCALIZACIÓN DE SIEMBRAS DE SOJA DE SEGUNDA EN URUGUAY, POR DEPARTAMENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	203
FIGURA 127. MAPA DE LOCALIZACIÓN DE SIEMBRAS TOTALES DE TRIGO EN URUGUAY, POR DEPARTAMENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	204
FIGURA 128. MAPA DE LOCALIZACIÓN DE SIEMBRAS TOTALES DE CEBADA EN URUGUAY, POR DEPARTAMENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	205
FIGURA 129. MAPA DE LOCALIZACIÓN DE SIEMBRAS DE ARROZ EN URUGUAY, POR DEPARTAMENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	206

FIGURA 130. MAPA DE LOCALIZACIÓN DE SIEMBRAS DE MAÍZ DE PRIMERA EN URUGUAY, POR DEPARTAMENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	207
FIGURA 131. MAPA DE LOCALIZACIÓN DE SIEMBRAS DE MAÍZ DE SEGUNDA EN URUGUAY, POR DEPARTAMENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	208
FIGURA 132. MAPA DE LOCALIZACIÓN DE SIEMBRAS DE SORGO DE PRIMERA EN URUGUAY, POR DEPARTAMENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	209
FIGURA 133. . MAPA DE LOCALIZACIÓN DE SIEMBRAS DE SORGO DE SEGUNDA EN URUGUAY, POR DEPARTAMENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	209
FIGURA 134. MAPA DE LOCALIZACIÓN DE SIEMBRAS DE CÍTRICOS EN URUGUAY, POR DEPARTAMENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	210
FIGURA 135. MAPA DE LOCALIZACIÓN DE SIEMBRAS DE VIÑEDOS EN URUGUAY, POR DEPARTAMENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	211
FIGURA 136. MAPA DE LOCALIZACIÓN DE PASTOS NATURALES EN URUGUAY, POR DEPARTAMENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	213
FIGURA 137. CLASIFICACIÓN DE UNIDADES DE ANÁLISIS DE ACUERDO CON LAS REGIONES GEOMORFOLÓGICAS, POR DEPARTAMENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	214
FIGURA 138. MAPA DE LOCALIZACIÓN DE STOCK BOVINO EN URUGUAY, POR DEPARTAMENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	217
FIGURA 139. MAPA DE LOCALIZACIÓN DE STOCK OVINO EN URUGUAY, POR DEPARTAMENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	220
FIGURA 140. ESQUEMA DE ETAPAS DE CRECIMIENTO DE UNA PLANTA.....	221
FIGURA 141. CALENDARIO DE CULTIVOS DE VERANO PARA URUGUAY. ....	222
FIGURA 142. FENOLOGÍA DEL CULTIVO DE MAÍZ Y SU RELACIÓN CON EL CLIMA EN URUGUAY (FASSIO ET AL., N.D.). ....	223
FIGURA 143. FENOLOGÍA DEL CULTIVO DE SOJA Y SU RELACIÓN CON EL CLIMA EN URUGUAY (FASSIO ET AL., N.D.). ....	224
FIGURA 144. FENOLOGÍA DEL CULTIVO DE SORGO Y SU RELACIÓN CON EL CLIMA EN URUGUAY (FASSIO ET AL., N.D.). ....	225
FIGURA 145. CALENDARIO DE CULTIVOS DE INVIERNO PARA URUGUAY.....	226
FIGURA 146. CALENDARIO DE CULTIVOS DE PERENNES PARA URUGUAY.....	227
FIGURA 147. PRINCIPALES ETAPAS FENOLÓGICAS DE LOS CÍTRICOS EN EL LITORAL NORTE DE URUGUAY (INIA SALTO GRANDE, 2009).....	228
FIGURA 148. REGIONES GEOMORFOLÓGICAS DE URUGUAY QUE DEFINEN PRODUCCIÓN DE PASTIZALES (TOMADO DE BRESCIANO, RODRÍGUEZ, LEZAMA, & ALTESOR,.....	229
FIGURA 149. CICLO DE PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA DE PASTO EN URUGUAY (REALIZADO A PARTIR DE DATOS DE LA TABLA 30). ....	230
FIGURA 150. DIAGRAMA DE CAJA PARA PRECIPITACIÓN ANUAL PROMEDIO DE URUGUAY Y VALORES DE PRECIPITACIÓN DEL AÑO 2016. (FUENTE: ELABORADO A PARTIR DE INFORMACIÓN DE BASE DE DATOS DE CHIRPS PARA EL RANGO 1981-2010). ....	232
FIGURA 151. DISPERSIÓN Y VARIACIÓN TEMPORAL DE VALORES DE RENDIMIENTO A ESCALA NACIONAL PARA CULTIVOS SELECCIONADOS EN URUGUAY (FUENTE: ELABORADO A PARTIR DE INFORMACIÓN DEL MGAP). ....	233
FIGURA 152. FUNCIONES DE AGUA-RENDIMIENTO PARA EL MAÍZ (ADAPTADO DE STEDUTO ET AL., 2012, P. 8)..	238
FIGURA 153. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL DESARROLLO EN EL TIEMPO DE LA COBERTURA VEGETAL Y LA PROFUNDIDAD DE ENRAIZAMIENTO (ADAPTADO DE STEDUTO ET AL., 2012, P. 23).....	242
FIGURA 154. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL CAMBIO EN EL TIEMPO DEL ÍNDICE DE COSECHA (HI) PARA CULTIVOS DE FRUTAS O GRANOS (ADAPTADO DE STEDUTO ET AL., 2012, P. 27).....	243

FIGURA 155. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL VOLUMEN DE CONTROL DE LA ZONA RADICULAR (ADAPTADO DE STEDUTO ET AL., 2012, P. 28).....	244
FIGURA 156. FUNCIÓN DEL COEFICIENTE DE ESTRÉS (KS) (ADAPTADO DE STEDUTO ET AL., 2012, P. 32). .....	245
FIGURA 157. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA RESPUESTA DEL CULTIVO AL ESTRÉS HÍDRICO (ADAPTADO DE RAES ET AL., 2011). .....	246
FIGURA 158. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL COEFICIENTE DE ESTRÉS HÍDRICO (ADAPTADO DE RAES ET AL., 2011). .....	247
FIGURA 159. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA EXPANSIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL, BAJO CONDICIONES ÓPTIMAS (GRIS) Y BAJO ESTRÉS HÍDRICO (VERDE). (ADAPTADO DE RAES ET AL., 2011). .....	248
FIGURA 160. COMPARACIÓN DE MAPAS DE VALORES DIARIOS DE PARÁMETROS CLIMÁTICOS PARA DOS DÍAS SIMULADOS: PRECIPITACIÓN TOTAL DIARIA, TEMPERATURA MEDIA, MÁXIMA Y MÍNIMA DE REFERENCIA TOTAL DIARIA.. .....	252
FIGURA 161. COMPARACIÓN DE MAPAS DE VALORES DIARIOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN PARA DOS DÍAS SIMULADOS.....	253
FIGURA 162. CONCENTRACIONES MEDIAS ANUALES DE CO <sub>2</sub> PROYECTADAS SEGÚN ESCENARIOS DEL ASSESSMENT REPORT 5 DEL IPCC (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS DE IPCC AR5 (DLUGOKENCKY & TANS, 2018)). .....	254
FIGURA 163. PARÁMETROS DE CULTIVOS QUE DEPENDEN DEL TIPO DE PLANTA Y CONDICIONES AMBIENTALES (FAO, 2017). .....	259
FIGURA 164. DESARROLLO LA COBERTURA VERDE CON EL TIEMPO. A LA DERECHA, COMPARACIÓN ENTRE CULTIVOS DE CEREALES DE CICLO CORTO Y A LA IZQUIERDA LA COMPARACIÓN ENTRE CULTIVOS DE CICLO CORTO Y CICLO LARGO.....	265
FIGURA 165. DESARROLLO LA BIOMASA CON EL TIEMPO. A LA DERECHA, COMPARACIÓN ENTRE CULTIVOS DE CICLO CORTO Y A LA IZQUIERDA LA COMPARACIÓN ENTRE CULTIVOS DE CICLO CORTO Y CICLO LARGO.....	266
FIGURA 166. DESARROLLO DEL ÍNDICE DE COSECHA CON EL TIEMPO. A LA DERECHA, COMPARACIÓN ENTRE CULTIVOS DE CICLO CORTO Y A LA IZQUIERDA LA COMPARACIÓN ENTRE CULTIVOS DE CICLO CORTO Y CICLO LARGO.....	267
FIGURA 167. ACUMULACIÓN DE RENDIMIENTO CON EL TIEMPO. A LA DERECHA, COMPARACIÓN ENTRE CULTIVOS DE CICLO CORTO Y A LA IZQUIERDA LA COMPARACIÓN ENTRE CULTIVOS DE CICLO CORTO Y CICLO LARGO. ....	268
FIGURA 168. RELACIÓN ENTRE BIOMASA ACUMULADA Y TRANSPIRACIÓN ACUMULADA, POR CULTIVO. SE RESALTA EL VALOR DE LA WP* O PRODUCTIVIDAD HÍDRICA NORMALIZADA POR ETO Y CO <sub>2</sub> . .....	269
FIGURA 169. ESQUEMA METODOLOGÍA APLICADA PARA DETERMINAR CARACTERÍSTICAS DEL SUELO NECESARIAS EN EL MÓDULO DE VULNERABILIDAD PARA EVALUAR RIESGO POR SEQUÍA EN EL SECTOR AGRÍCOLA. ....	270
FIGURA 170. ESQUEMA DE LA DISPONIBILIDAD DEL AGUA EN EL SUELO. ....	271
FIGURA 171. ESQUEMA DE RETENCIÓN DE AGUA SEGÚN TIPO DE SUELO (SHEPPARD & HOYLE, 2018).....	272
FIGURA 172. TRIÁNGULO DE CLASES TEXTURALES BÁSICAS DE SUELOS SEGÚN EL TAMAÑO DE PARTÍCULAS. ELABORADO POR EL DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DE LOS ESTADOS UNIDOS (USDA).....	273
FIGURA 173. CARTA DE RECONOCIMIENTO DE SUELOS DEL URUGUAY (MGAP, 2018). ....	274
FIGURA 174. MAPA DE TEXTURA DE SUELOS PARA URUGUAY. ....	276
FIGURA 175. MAPA DE COBERTURA DE SUELOS DE URUGUAY CON CLASIFICACIÓN DEL SCS.....	281
FIGURA 176. MAPA DE NÚMERO DE CURVA PARA URUGUAY.....	282
FIGURA 177. MAPA DE ESPESOR DEL SUELO USADO EN LA MODELACIÓN. FUENTE: (INIA-GRAS, 2012). ....	284
FIGURA 178. ESQUEMA DE MÓDULOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y EXPOSICIÓN PARA ESTIMAR EL RIESGO POR SEQUÍA EN EL SECTOR PECUARIO.....	288
FIGURA 179. ESQUEMA PARA EL CÁLCULO DE LA OFERTA DE MASA SECA UTILIZABLE A PARTIR DE BIOMASA DE PASTURA. ....	289

FIGURA 180. RENDIMIENTO DEL EVENTO VS. RENDIMIENTO POTENCIAL PARA EL CULTIVO DE SOJA EN URUGUAY. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	299
FIGURA 181. PÉRDIDAS CALCULADAS POR UNIDAD DE TIERRA CULTIVADA DE SOJA PARA UN EVENTO DE SEQUÍA EN URUGUAY. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	300
FIGURA 182. CURVA DE PÉRDIDAS VS. PERIODO DE RETORNO PARA EL PORTAFOLIO COMPLETO EN URUGUAY..	302
FIGURA 183. CURVAS DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE UNA PÉRDIDA PARA EL PORTAFOLIO COMPLETO EN URUGUAY. A LA IZQUIERDA, PROBABILIDAD DE EXCEDER UNA PÉRDIDA EN EL SIGUIENTE AÑO. A LA DERECHA, PROBABILIDAD DE EXCEDER UNA PÉRDIDA EN EL SIGUIENTE EVENTO DE SEQUÍA. ....	303
FIGURA 184. PROYECCIONES MEDIAS ANUALES DE CAMBIO EN PRECIPITACIÓN (EJE VERTICAL) Y CAMBIO EN TEMPERATURA (EJE HORIZONTAL) SEGÚN MODELO CCSM4 PARA CUATRO ESCENARIOS DE RCP PARA LAS 103 ESTACIONES VIRTUALES. ....	306
FIGURA 185. RESULTADOS DE RIESGO POR SEQUÍA PARA URUGUAY COMPARANDO ESCENARIOS DE CLIMA BASE Y PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA RCP 2.6, 4.5, 6 Y 8.5. ....	308
FIGURA 186. VALOR EXPUESTO EN MILLONES DE USD PARA URUGUAY. ....	310
FIGURA 187. MAPAS DE PÉRDIDA ANUAL ESPERADA ABSOLUTA (USD MILES) PARA URUGUAY. ....	312
FIGURA 188. MAPAS DE PÉRDIDA ANUAL ESPERADA RELATIVA (%) PARA URUGUAY. ....	313
FIGURA 189. CURVA DE PÉRDIDAS VS. PERIODO DE RETORNO PARA EL PORTAFOLIO COMPLETO DE GANADERÍA EN URUGUAY.....	317
FIGURA 190. CURVAS DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE UNA PÉRDIDA PARA EL PORTAFOLIO COMPLETO DE GANADERÍA EN URUGUAY. A LA IZQUIERDA, PROBABILIDAD DE EXCEDER UNA PÉRDIDA EN EL SIGUIENTE AÑO. A LA DERECHA, PROBABILIDAD DE EXCEDER UNA PÉRDIDA EN EL SIGUIENTE EVENTO D .....	318
FIGURA 191. PROYECCIONES MEDIAS ANUALES DE CAMBIO EN PRECIPITACIÓN (EJE VERTICAL) Y CAMBIO EN TEMPERATURA (EJE HORIZONTAL) SEGÚN MODELO CCSM4 PARA CUATRO ESCENARIOS DE RCP PARA LAS 103 ESTACIONES VIRTUALES. ....	320
FIGURA 192. RESULTADOS DE RIESGO POR SEQUÍA PARA GANADERÍA EN URUGUAY COMPARANDO ESCENARIOS DE CLIMA BASE Y PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA RCP 2.6, 4.5, 6 Y 8.5. ....	322
FIGURA 193. VALOR EXPUESTO EN MILLONES DE USD PARA GANADERÍA EN URUGUAY.....	324
FIGURA 194. MAPAS DE PÉRDIDA ANUAL ESPERADA ABSOLUTA (USD MILLONES) PARA GANADERÍA EN URUGUAY. ....	325
FIGURA 195. MAPAS DE PÉRDIDA ANUAL ESPERADA RELATIVA (%) PARA GANADERÍA EN URUGUAY.....	326
FIGURA 196. CURVA DE PÉRDIDAS VS. PERIODO DE RETORNO PARA EL SECTOR AGROPECUARIO EN URUGUAY.	330
FIGURA 197. CURVAS DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE UNA PÉRDIDA PARA EL PORTAFOLIO COMPLETO EN URUGUAY. A LA IZQUIERDA, PROBABILIDAD DE EXCEDER UNA PÉRDIDA EN EL SIGUIENTE AÑO. A LA DERECHA, PROBABILIDAD DE EXCEDER UNA PÉRDIDA EN EL SIGUIENTE EVENTO DE SEQUÍA. ....	331
FIGURA 198. PROYECCIONES MEDIAS ANUALES DE CAMBIO EN PRECIPITACIÓN (EJE VERTICAL) Y CAMBIO EN TEMPERATURA (EJE HORIZONTAL) SEGÚN MODELO CCSM4 PARA CUATRO ESCENARIOS DE RCP PARA LAS 103 ESTACIONES VIRTUALES. ....	333
FIGURA 199. RESULTADOS DE RIESGO POR SEQUÍA EN URUGUAY COMPARANDO ESCENARIOS DE CLIMA BASE Y PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA RCP 2.6, 4.5, 6 Y 8.5. ....	335
FIGURA 200. VALOR EXPUESTO EN MILLONES DE USD PARA EL PORTAFOLIO COMPLETO EN URUGUAY.....	336
FIGURA 201. MAPAS DE PÉRDIDA ANUAL ESPERADA ABSOLUTA (USD MILLONES) EN URUGUAY. ....	338
FIGURA 202. MAPAS DE PÉRDIDA ANUAL ESPERADA RELATIVA (%) EN URUGUAY. ....	339
FIGURA 203. ILUSTRACIÓN DE UN PROCESO DE POISSON. ....	341
FIGURA 204. ESQUEMA DE METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE LA CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS RETROSPECTIVA (A PARTIR DE LA METODOLOGÍA DE VELÁSQUEZ (2015)). ....	343
FIGURA 205. ILUSTRACIÓN DE PÉRDIDAS CONTRA EL TIEMPO, VALORADAS A PARTIR DE UNA BASE DE DATOS DE DESASTRES. ....	345



FIGURA 206. VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LA TASA DE EXCEDENCIA CON EL TAMAÑO DE LA MUESTRA.....	346
FIGURA 207. NÚMERO DE REGISTROS POR AÑO Y ACUMULADO DE DESASTRES EN DESINVENTAR PERIODO 1959-2014.....	351
FIGURA 208. NÚMERO DE REGISTROS POR AÑO Y ACUMULADO DE DESASTRES EN DESINVENTAR PERIODO 1988-2013.....	352
FIGURA 209. NÚMERO DE REGISTROS POR AÑO Y ACUMULADO DE DESASTRES EN DESINVENTAR PARA SEQUÍAS Y EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS EN EL PERIODO 1988-2013. ....	352
FIGURA 210. DISTRIBUCIÓN DE LA AFECTACIÓN TOTAL POR CATEGORÍA. ....	353
FIGURA 211. DISTRIBUCIÓN DE LA AFECTACIÓN TOTAL POR CATEGORÍA DESPUÉS DE AGRUPACIÓN. ...	354
FIGURA 212. CURVA EMPÍRICA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS. TASA DE EXCEDENCIA ESTIMADA +/- UNA DESVIACIÓN ESTÁNDAR. ....	357
FIGURA 213. CURVA DE PÉRDIDAS HISTÓRICA.....	360
FIGURA 214. CURVA DE PÉRDIDAS SIMULADA.....	360
FIGURA 215. CURVA DE PÉRDIDAS HISTÓRICAS Y SIMULADAS PARA URUGUAY.....	362
FIGURA 216. CURVA HÍBRIDA DE PÉRDIDAS CALCULADA PARA URUGUAY. ....	362
FIGURA 217. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UN EVENTO ARBITRARIO A DENTRO DEL ESPACIO DE MUESTRO DE PÉRDIDAS S.....	368
FIGURA 218. SUBDIVISIÓN DEL ESPACIO DE MUESTRO S EN EVENTOS BASE B. ....	368
FIGURA 219. INTERSECCIONES ENTRE EL EVENTO A Y LOS EVENTOS BASE B.....	369
FIGURA 220. UBICACIÓN Y DETALLE DE LA CUENCA RÍO BRANCO. ....	373
FIGURA 221. ESTIMACIÓN DE VIVIENDA Y POBLACIÓN EN ÁREA INUNDABLE PARA RÍO BRANCO. MVOTMA, DINAGUA. MAPA PUBLICADO EN 2014. ....	375
FIGURA 222. MALLA DE ANÁLISIS 0.25°X0.25° PARA LA CUENCA RÍO BRANCO. ....	377
FIGURA 223. PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL PARA EL ÁREA DE ESTUDIO, EN MM/MES.....	378
FIGURA 224. PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL MEDIA PARA EL ÁREA DE ESTUDIO, EN MM/AÑO.....	378
FIGURA 225. MAPA DE TOPOGRAFÍA PARA LA CUENCA RÍO BRANCO.....	380
FIGURA 226. MAPA DE GRUPO HIDROLÓGICO DEL SUELO PARA LA CUENCA RÍO BRANCO.....	383
FIGURA 227. MAPA DE COBERTURA Y USO DEL SUELO CUENCA RÍO BRANCO.....	384
FIGURA 228. ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA DE MODELACIÓN DE AMENAZA POR LLUVIAS INTENSAS. ....	386
FIGURA 229. FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD Y PROBABILIDAD ACUMULADA TENIENDO EN CUENTA $P=0$ .....	388
FIGURA 230. MAPAS DE VALORES MEDIO MULTIANUALES PARA PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO YAGUARÓN. ....	389
FIGURA 231. MAPAS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE TORMENTAS EN LA CUENCA DEL RÍO YAGUARÓN. ....	392
FIGURA 232. EJEMPLO DE CURVAS HUFF CALCULADAS PARA INDIANA (EEUU). (RAO & KAO, 2006) .....	393
FIGURA 233. DEM CORREGIDO Y CUENCA DE RIO BRANCO (IZQUIERDA). DELIMITACIÓN DE LA CUENCA Y DRENAJES (DERECHA). ....	398
FIGURA 234. HIDROGRAMA ESPERADO SEGÚN LA FORMA DE LA CUENCA. ....	401
FIGURA 235. MAPA DE PENDIENTES Y RED DE DRENAJES DE LA CUENCA DE RÍO BRANCO. ....	402
FIGURA 236. CURVA HIPSOMÉTRICA DE FRECUENCIAS PARA LA CUENCA DE RÍO YAGUARÓN. ....	403
FIGURA 237. FUNCIÓN DE ANCHO E HISTOGRAMA PARA LA CUENCA DE ESTUDIO (UNIDADES: METROS). ....	405
FIGURA 238. ÍNDICE TOPOGRÁFICO E HISTOGRAMA PARA LA CUENCA DE ESTUDIO. ....	406
FIGURA 239. ESQUEMATIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO. FUENTE: (TEIXEIRA, CHRETIES, & CRISCI, 2013) ...	407

FIGURA 240. DISTRIBUCIÓN DE LA LLUVIA DE 15 HORAS. ....	409
FIGURA 241. DISTRIBUCIÓN DE LA LLUVIA DE 18 HORAS. ....	410
FIGURA 242. DISTRIBUCIÓN DE LA LLUVIA DE DISEÑO SEGÚN EL TERCER CUARTIL DE HUFF PARA CADA SUBCUENCA. .....	411
FIGURA 243. COMPARACIÓN DE LOS CUARTILES DE HUFF Y LA DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS DIARIOS DE LLUVIA EN TODAS LAS ESTACIONES. ....	411
FIGURA 244. HIDROGRAMAS OBTENIDOS DE LA MODELACIÓN. ENSAYO 1. ....	415
FIGURA 245. HIDROGRAMAS OBTENIDOS DE LA MODELACIÓN. ENSAYO 2. ....	416
FIGURA 246. HIDROGRAMAS OBTENIDOS DE LA MODELACIÓN. ENSAYO 3. ....	417
FIGURA 247. MAPA DE NÚMEROS DE CURVA CN PARA CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE SECA.....	420
FIGURA 248. HISTOGRAMA DE FRECUENCIA DE CN PARA CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE SECA.....	420
FIGURA 249. MAPA DE NÚMEROS DE CURVA CN PARA CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE INTERMEDIA....	421
FIGURA 250. HISTOGRAMA DE FRECUENCIA DE CN PARA CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE INTERMEDIA	421
FIGURA 251. MAPA DE NÚMEROS DE CURVA CN PARA CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE HÚMEDA. ....	422
FIGURA 252. HISTOGRAMA DE FRECUENCIA DE CN PARA CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE HÚMEDA. ....	422
FIGURA 253. CLASIFICACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS, PROPUESTA POR SINGH (1988).....	424
FIGURA 254. MODELO DE ESCORRENTÍA DIRECTA MODCLARK. MODELO CONCEPTUAL (KULL & FELDMAN, 1998). .....	427
FIGURA 255. HIDROGRAMAS EN EL PUNTO DE CONCENTRACIÓN PARA 50 ESCENARIOS DE LLUVIA ESTOCÁSTICA. .....	428
FIGURA 256. CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA RÍO YAGUARÓN (1D) Y ÁREA BIDIMENSIONAL, CIUDAD DE RÍO BRANCO. .....	433
FIGURA 257. ÁREA BIDIMENSIONAL, CIUDAD DE RÍO BRANCO. ....	434
FIGURA 258. TRATAMIENTO DEL DEM.....	435
FIGURA 259. CARACTERIZACIÓN DEL RÍO, MODELO UNIDIMENSIONAL.....	436
FIGURA 260. SECCIONES TRANSVERSALES, ZONA INICIAL DEL MODELO UNIDIMENSIONAL. ....	437
FIGURA 261. SECCIONES TRANSVERSALES, ZONA INTERMEDIA Y FRENTE A LA CIUDAD DE RIO BRANCO DEL MODELO UNIDIMENSIONAL.....	437
FIGURA 262. ADECUACIÓN PERFIL LONGITUDINAL DEL RÍO. ....	438
FIGURA 263. CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA ÁREA BIDIMENSIONAL (DEM), RÍO BRANCO. ....	439
FIGURA 264. CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA ÁREA BIDIMENSIONAL (IMAGEN SATELITAL), RÍO BRANCO.....	439
FIGURA 265. SHAPE DE POLÍGONOS, N DE MANNING, PARA EL MODELO 2D COMPLETO. ....	440
FIGURA 266. FLUJO NO ESTACIONARIO, INGRESO DE HIDROGRAMAS AL MODELO HIDRAULICO.....	441
FIGURA 267. RAS-MAPPER: EJEMPLO DE VISUALIZACIÓN MANCHA DE INUNDACIÓN. ....	442
FIGURA 268. HIDROGRAMAS HISTÓRICOS.....	443
FIGURA 269. MANCHA DE INUNDACIÓN PARA EL ESCENARIO DE INUNDACIÓN DE 1984.....	443
FIGURA 270. COMPARACIÓN MANCHA DE INUNDACIÓN HISTÓRICA Y MAPA DE VIVIENDA Y POBLACIÓN EN ÁREA INUNDABLE. ....	444
FIGURA 271. MAPAS DE PROFUNDIDAD DE AGUA PARA CUATRO ESCENARIOS DE INUNDACIÓN. ....	445
FIGURA 272. MAPAS DE AMENAZA INTEGRADA DE INUNDACIÓN PARA 20 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO EN LA CIUDAD DE RÍO BRANCO.....	447
FIGURA 273. MAPAS DE AMENAZA INTEGRADA DE INUNDACIÓN PARA 50 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO EN LA CIUDAD DE RÍO BRANCO.....	448

FIGURA 274. MAPAS DE AMENAZA INTEGRADA DE INUNDACIÓN PARA 100 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO EN LA CIUDAD DE RÍO BRANCO.....	448
FIGURA 275. MAPAS DE AMENAZA INTEGRADA DE INUNDACIÓN PARA 200 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO EN LA CIUDAD DE RÍO BRANCO.....	449
FIGURA 276. MAPAS DE AMENAZA INTEGRADA DE INUNDACIÓN PARA 250 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO EN LA CIUDAD DE RÍO BRANCO.....	449
FIGURA 277. CURVA HISTÓRICA DE TASA DE EXCEDENCIA DE AMENAZA, SEGÚN NIVEL MÁXIMO DIARIO EN LA ESTACIÓN RÍO BRANCO. ....	451
FIGURA 278. CURVA HISTÓRICA Y MODELADA DE TASA DE EXCEDENCIA DE AMENAZA, SEGÚN NIVEL MÁXIMO DIARIO EN LA ESTACIÓN RÍO BRANCO. ....	451
FIGURA 279. CURVA HÍBRIDA DE TASA DE EXCEDENCIA DE AMENAZA, SEGÚN NIVEL MÁXIMO DIARIO EN LA ESTACIÓN RÍO BRANCO. ....	452
FIGURA 280. UBICACIÓN Y DETALLE DE LA CUENCA Y DE LA CIUDAD DE RÍO BRANCO. ....	454
FIGURA 281. RELEVAMIENTO RÍO BRANCO. ....	455
FIGURA 282. CATEGORÍA DE USO O DESTINO. ....	456
FIGURA 283. NIVEL DE PISO TERMINADO DE LAS EDIFICACIONES. ....	456
FIGURA 284. CANTIDAD DE NIVELES DE LA EDIFICACIÓN. ....	457
FIGURA 285. ESTADO DE TERMINACIÓN DE LA EDIFICACIÓN. ....	457
FIGURA 286. CANTIDAD DE UNIDADES POR PREDIO. ....	458
FIGURA 287. CATEGORÍAS DE CONSTRUCCIÓN.....	460
FIGURA 288. ESTADOS DE CONSERVACIÓN. ....	460
FIGURA 289. NIVEL/PISO. ....	461
FIGURA 290. AÑO DE CONSTRUCCIÓN. ....	461
FIGURA 291. VALOR EXPUESTO POR PADRÓN. ....	463
FIGURA 292. ÁREA CONSTRUIDA POR PADRÓN.....	463
FIGURA 293. CANTIDAD DE VIVIENDAS. ....	464
FIGURA 294. CONDICIÓN DE OCUPACIÓN. ....	465
FIGURA 295. MATERIAL PREDOMINANTE EN LAS PAREDES EXTERIORES.....	466
FIGURA 296. INSPECCIÓN VISUAL MEDIANTE LA HERRAMIENTA STREET VIEW DE GOOGLE EARTH.....	469
FIGURA 297. ASIGNACIÓN DE SECTOR DE USO. ....	469
FIGURA 298. ASIGNACIÓN DE SISTEMA ESTRUCTURAL. ....	470
FIGURA 299. DISTRIBUCIÓN DE SISTEMA ESTRUCTURAL. ....	471
FIGURA 300. DISTRIBUCIÓN DE NÚMERO DE PISOS. ....	472
FIGURA 301. DISTRIBUCIÓN DE SECTOR DE USO. ....	472
FIGURA 302. DISTRIBUCIÓN DE CATEGORÍA DE LA CONSTRUCCIÓN.....	473
FIGURA 303. DISTRIBUCIÓN DE ÁREA CONSTRUIDA.....	473
FIGURA 304. DISTRIBUCIÓN DE VALOR EXPUESTO. ....	474
FIGURA 305. EJEMPLO DE UNA FUNCIÓN DE VULNERABILIDAD. ....	480
FIGURA 306. EJEMPLO DE FUNCIONES DE FRAGILIDAD.....	482
FIGURA 307. ESQUEMA DE DISTRIBUCIÓN DE COMPONENTES EN UN ELEMENTO EXPUESTO. ....	485
FIGURA 308. FUNCIÓN DE DAÑO TÍPICA.....	486
FIGURA 309. FUNCIONES DE VULNERABILIDAD ANTE INUNDACIÓN PARA EDIFICACIONES EN MADERA. ....	490
FIGURA 310. FUNCIONES DE VULNERABILIDAD ANTE INUNDACIÓN PARA EDIFICACIONES EN MAMPOSTERÍA. ....	490

FIGURA 311. FUNCIONES DE VULNERABILIDAD ANTE INUNDACIÓN PARA EDIFICACIONES EN CONCRETO. ....	491
FIGURA 312. FUNCIONES DE VULNERABILIDAD ANTE INUNDACIÓN PARA EDIFICACIONES EN MADERA POR ENCIMA DEL NIVEL DE LA CALLE. ....	492
FIGURA 313. FUNCIONES DE VULNERABILIDAD ANTE INUNDACIÓN PARA EDIFICACIONES EN MAMPOSTERÍA POR ENCIMA DEL NIVEL DE LA CALLE.....	492
FIGURA 314. CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS.....	494
FIGURA 315. CURVA DE PÉRDIDAS MÁXIMAS PROBABLES.....	495
FIGURA 316. PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS.....	496
FIGURA 317. DISTRIBUCIÓN DE PÉRDIDA ANUAL ESPERADA SEGÚN SECTOR DE USO.....	497
FIGURA 318. DISTRIBUCIÓN DE PÉRDIDA ANUAL ESPERADA SEGÚN SISTEMA ESTRUCTURAL.....	498
FIGURA 319. DISTRIBUCIÓN DE PÉRDIDA ANUAL ESPERADA SEGÚN NÚMERO DE PISOS. ....	499
FIGURA 320. PÉRDIDA ANUAL ESPERADA ABSOLUTA (DÓLARES) POR PADRÓN. ....	500
FIGURA 321. PÉRDIDA ANUAL ESPERADA RELATIVA (AL MILLAR) POR PADRÓN.....	500

## LISTA DE ACRÓNIMOS

---

AIC:	Criterio de Información de Akaike
BIC:	Criterio Bayesiano de Información
CeCoED:	Centro Coordinador de Emergencias Departamentales, Canelones
CEP:	Curva de Excedencia de Pérdidas
CHIRPS:	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data
CV:	Coeficiente de variación
DIEA:	Dirección de Estadísticas Agropecuarias
DINAGUA:	Dirección Nacional de Aguas del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente.
DINAMA:	Dirección Nacional de Medio Ambiente del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente.
EDI:	Effective Drought Index
ENA:	Encuesta Nacional Agropecuaria
ENOS:	El Niño-Oscilación del Sur
FAO:	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GCM:	Global circulation model o modelo de circulación global
INAVI:	Instituto Nacional de Vitivinicultura
INIA:	Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria
INUMET:	Instituto Uruguayo de Meteorología
IPCC:	Intergovernmental Panel on Climate Change
MGAP:	Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca
MVOTMA:	Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente
NCEI:	National Centers for Environmental Information o Centro Nacional de Información Climática de Estados Unidos
OMM:	Organización Meteorológica Mundial
OSE:	Obras Sanitarias del Estado
OPYPA:	Oficina de Programación y Políticas Agropecuarias del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca
PAE:	Pérdida Anual Esperada

PDSI:	Palmer Drought Severity Index
PIB:	Producto Interno Bruto
PML:	Pérdida Máxima Probable o Probable Maximum Loss
RCP:	Representative Concentration Pathways o forcings antropogénicos
RDI:	Reconnaissance Drought Index
SAN:	Seguridad alimentaria y nutricional
SINAE:	Sistema Nacional de Emergencias
SCS:	Soil Conservation Service
SIG:	Sistema de información geográfica
SPEI:	Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
SPI:	Standardized Precipitation Index
UdelaR:	Universidad de La República
UNESCO:	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
UNISDR:	Oficina de las Naciones Unidas para Reducción de Riesgo de Desastres
UTE:	Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas

## RESUMEN EJECUTIVO

---

Este informe presenta los resultados del *Perfil de Riesgo de Desastre por Sequía* para el sector agropecuario de Uruguay. El documento presenta los aspectos más relevantes de la metodología y resultados obtenidos en lo que se refiere a la evaluación probabilista de la amenaza por sequía, a la construcción de la base de elementos expuestos del sector agrícola y pecuario, y el modelo de vulnerabilidad de cultivos y ganadería. En un mayor nivel de detalle se presenta la evaluación prospectiva del riesgo de desastres y cálculo de la curva empírica de excedencia de pérdidas. La evaluación de riesgo por sequía a nivel nacional se complementa con la evaluación de riesgo por inundación en la ciudad de Río Branco en la cuenca del Río Yaguarón.

### ***Sequía como fenómeno amenazante***

Las sequías agrícolas ocurren cuando el contenido de agua del suelo no satisface la demanda de agua de los cultivos, hay un aumento de la evaporación del suelo y la transpiración de la planta. Así, los escenarios considerados para la definición de la amenaza consisten en eventos de condiciones continuas y simultáneas de déficit de precipitación y alta temperatura. Para este estudio, el componente de amenaza para la evaluación probabilista del riesgo por sequías agrícolas se define como un conjunto de escenarios estocásticos, colectivamente exhaustivos y mutuamente excluyentes. Estos escenarios describen la distribución espacial, la frecuencia de ocurrencia y la aleatoriedad de la intensidad de las sequías en la región de interés. Los escenarios de sequía se derivan de la simulación estocástica de las condiciones meteorológicas (simulación de las series de lluvias y temperaturas), después de lo cual la identificación de las sequías se realiza mediante índices. Los resultados de la modelación de la amenaza se presentan en formato de mapas de amenaza por escenario, y curvas y mapas de amenaza integrada para todo el país.

La amenaza por sequía que incluye cambio climático para Uruguay considera las variaciones de clima según proyecciones del modelo CCSM4 (Community Climate System Model) para los RCP 2.6, 4.5, 6 y 8.5; son 4 escenarios de análisis. Según los resultados obtenidos, se puede concluir que las predicciones del modelo de circulación global CCSM4 derivan en sequías de mayor duración y similar severidad con un incremento de eventos de sequía. Sin embargo, es importante anotar que incluso sin los efectos del cambio climático, la evaluación de amenaza por sequía indica que se pueden presentar eventos de una alta gravedad que tiene impactos directos en el sector agropecuario.

### ***Cultivos como elementos expuestos al impacto de la sequía***

En este estudio se evalúa el riesgo por sequía en el sector agrícola y pecuario, por lo que los elementos expuestos son cultivos y stock ganadero. El modelo de exposición tiene como objetivo conformar una base de elementos expuestos en el área donde se estima el riesgo de sequía. Toda la información base fue tomada de fuentes oficiales y que en su mayoría es publicada en censos y encuestas nacionales agropecuarios. La selección de los productos agrícolas se hizo a partir del nivel de detalle de la información que se tenía disponible, además de considerar los cultivos más importantes y representativos de la economía del país, tanto en términos de subsistencia como producción con fines comerciales. Este modelo

se enfoca en la escala nacional, por lo que no es posible diferenciar de forma directa áreas cultivadas para subsistencia o explotación agroindustrial. En cuanto a la base de elementos expuestos de ganadería se consideran tanto los diferentes tipos de pasturas como las manadas de animales, bovinos y ovinos, que están localizados y se alimentan de ese tipo de pastura. La metodología del modelo se limita a estimar pérdidas para sistemas productivos de carne, y estima las pérdidas en relación al peso vivo del animal luego de la ocurrencia de la sequía. Este modelo se enfoca en variaciones anuales del stock ganadero y no considera cambios demográficos en la manada (nacimientos o muertes por causa natural de animales) o movimiento de los animales entre diferentes zonas del país.

#### ***Vulnerabilidad de los cultivos en función de su respuesta a condiciones de estrés hídrico***

El modelo de vulnerabilidad de este estudio sigue la metodología de cálculo de rendimiento de productos agrícolas propuesta por la FAO. En el marco de este estudio, la vulnerabilidad se define en términos de la pérdida de rendimiento que sufre el cultivo durante un período prolongado de escasez de agua. Dado que se aplica un modelo agronómico de respuesta de cultivos, no se emplearán curvas o funciones de vulnerabilidad. La complejidad de la metodología seleccionada para el modelo de vulnerabilidad de cultivos a la sequía representa la complejidad de este fenómeno como evento amenazante, y su interacción con sistemas naturales y sociales.

#### ***Vulnerabilidad del sector pecuario en función de su respuesta a condiciones de estrés hídrico***

El modelo de vulnerabilidad de este estudio sigue la metodología de cálculo de rendimiento de productos agropecuarios implementado en estudios internacionales, y aplicado previamente al contexto uruguayo. En el marco de este estudio, la vulnerabilidad se define en términos de la pérdida de la pastura de capacidad de alimentar la carga animal que está en ese sitio, dado las reducciones de producción de pasturas naturales en cada evento de sequía. Dado que se aplica un modelo bioeconómico de respuesta de pasturas y crecimiento animal, no se emplearán curvas o funciones de vulnerabilidad.

#### ***Estimación de pérdidas de producción en el sector agropecuario por efecto de las sequías***

Desde un enfoque probabilista, se estimó el riesgo por sequía para el sector agropecuario de Uruguay en términos de la Pérdida Anual Esperada y Pérdida Máxima Probable junto con otras métricas de riesgo complementarias. Dentro del marco de este estudio, se considera que los efectos de la sequía en la agricultura se reflejan en disminución en la producción y no en daños de activos del stock agropecuario (destrucción o daños en infraestructura, maquinaria, herramientas o equipos). Por su parte, los efectos de la sequía en el sector ganadero se reflejan en la disminución de la capacidad de la pastura de alimentar el animal que deriva en un menor número de animales que se pueden mantener. Es decir, la gravedad de los eventos de sequía se evalúa en términos de la diferencia entre la producción óptima y la real alcanzada bajo condiciones de estrés hídrico y altas temperaturas. Incluso, las pérdidas en producción derivan en impactos directos hacia los productores, generando pérdidas económicas que afectan la cadena completa de producción y comercialización de productos.

En el contexto global, según el informe de los impactos de los desastres en el sector agrícola publicada por la FAO (2017), la agricultura absorbe de forma desproporcionada los impactos de las



sequías, concentrando el 83%<sup>1</sup> de los daños y pérdidas causados por esta amenaza en todos los sectores. Según evaluaciones hechas a partir de reportes de pérdidas y daños por desastres a nivel global, se estima que en zonas donde la ocurrencia de sequías es frecuente, en promedio las pérdidas en la producción agrícola están entre 3 y 4%, que pueden llegar hasta 10 o 20%<sup>2</sup> en algunos países africanos, para los eventos ocurridos entre 2005 y 2010.

La estimación de riesgo por sequía se hizo para diferentes escenarios de clima, incluyendo el clima actual (a partir del clima normal del periodo 1981-2010) y haciendo uso de proyecciones de un modelo de circulación global incluido en el AR5 del IPPC. De la evaluación hecha para el clima actual se puede concluir que Uruguay presenta en el sector agrícola una PAE del 0.60%. Para escenarios que incluyen proyecciones de cambio climático, se presenta un aumento de las PAE a medida que se van sometiendo los cultivos a escenarios de clima con mayores temperaturas, por lo cual, para el escenario RCP8.5 la PAE es mayor que en todos los demás escenarios, incluyendo el escenario de clima base, con un valor de 0.98%, lo que implica mayores precipitaciones acompañadas de mayores temperaturas que configuran condiciones adversas para el desarrollo de los cultivos y por consiguiente mayores pérdidas agrícolas.

Por otro lado, el sector pecuario presenta una PAE del 2.63%, siendo mayor con respecto al sector agrícola para el escenario de clima base. La mayor PAE se presenta para el escenario RCP4.5 asociado a un incremento mínimo en las precipitaciones (entre el 0-5%) y un aumento de poco menos de 2 °C en la temperatura, generan respuestas desfavorables en la producción vegetal, y por ende en la disponibilidad de alimento para el desarrollo de los animales aumentando el valor de la PAE.

Es importante notar que, en este caso, los valores de PAE se están normalizando bajo valores de producción anuales (valor de producción de los cultivos para el sector agrícola y el valor de los derivados del sector pecuario), asociados con la temporalidad de la producción agrícola, y no sobre el stock de capital o el capital producido por un país. Esto muestra como los fenómenos de sequía afectan principalmente a la producción tanto agrícola como pecuaria, y manifiesta que debe atenderse de forma prioritaria al ser valores anuales.

---

<sup>1</sup> Ver Página 16 de FAO, 2017.

<sup>2</sup> Ver Página 33 en FAO, 2017.

Tabla 1. Valor de pérdida anual esperada para Uruguay, bajo diferentes escenarios de clima.

Escenario de clima	Agrícola		Pecuario		Agropecuario	
	PAE	%	PAE	%	PAE	%
	USD Millones		USD Millones		USD Millones	
Clima base	\$ 9.27	0.60%	\$ 50.56	2.63%	\$ 59.83	1.73%
RCP 2.6	\$ 10.64	0.69%	\$ 51.14	2.66%	\$ 61.78	1.78%
RCP 4.5	\$ 13.28	0.86%	\$ 51.75	2.69%	\$ 65.04	1.88%
RCP 6	\$ 14.02	0.91%	\$ 51.48	2.67%	\$ 65.49	1.89%
RCP 8.5	\$ 15.06	0.98%	\$ 50.96	2.65%	\$ 66.02	1.91%

También se pueden analizar los resultados de riesgo en términos de su impacto en la economía nacional. La siguiente tabla muestra los resultados de pérdida anual esperada relativa al valor del PIB nacional para 2017, reportado por el Banco Mundial (2017). Estos indicadores muestran el efecto de las pérdidas derivadas por sequía en la economía nacional.

Es importante anotar que incluso sin los efectos del cambio climático, la evaluación de amenaza y riesgo por sequía indica que se pueden presentar eventos de una alta gravedad que tiene impactos directos en el sector de la agricultura y la ganadería, generando altas pérdidas anuales esperadas y pérdidas máximas probables en el sector agropecuario. Esta es la primera vez que en la región se realiza una evaluación prospectiva del riesgo por sequía y se evalúan sus impactos en el sector agropecuario de Uruguay.

Tabla 2. Valor del valor expuesto, y PAE con respecto al PIB nacional para Uruguay, bajo diferentes escenarios de clima.

		Agrícola	Pecuario	Agropecuario
Valor Expuesto [USD Millones]		1,541	1,925	3,465
PIB Nacional 2017 (WB) [USD Millones]		56,157	56,157	56,157
Relacion VE/PIB		2.74%	3.43%	6.17%
PAE/PIB 2017	Clima base	0.022%	0.09%	0.11%
	RCP 2.6	0.025%	0.09%	0.12%
	RCP 4.5	0.031%	0.09%	0.12%
	RCP 6	0.033%	0.09%	0.12%
	RCP 8.5	0.035%	0.09%	0.13%

Estos resultados son el insumo para desarrollar iniciativas que busquen mitigar los efectos de la sequía, y haciendo uso de mejores prácticas agrícolas, reducir las pérdidas probables económicas y en producción que tienen un impacto considerable en la economía nacional.

#### **Uso de los resultados de la evaluación probabilista de riesgo por sequía**

Esta es la primera vez que en la región se realiza una evaluación prospectiva del riesgo por sequía y se evalúan sus impactos en el sector agropecuario de Uruguay. Estos resultados son el insumo para

desarrollar iniciativas que busquen mitigar los efectos de la sequía, y haciendo uso de mejores prácticas agrícolas, reducir las pérdidas probables económicas y en producción que tienen un impacto considerable en la economía nacional y en términos de seguridad alimentaria.

Dada la complejidad de la sequía como fenómeno peligroso y de las interacciones entre los sistemas socio-ecológicos durante estos eventos, el avance en riesgo por sequías es muy poco a nivel mundial. Sin embargo, al cuantificar el riesgo y sus componentes de amenaza, exposición y vulnerabilidad, se brindan herramientas para la toma de decisiones encaminadas a disminuir la vulnerabilidad social en el momento en que ocurre una sequía.

Algunos ejemplos de aplicación de los resultados del modelo probabilista de riesgo son:

- Planificación del territorio con el uso de mapas de amenaza integrada: *¿dónde y qué sembrar para reducir las pérdidas esperadas? ¿Dónde establecer nuevos proyectos agro-industriales? ¿En qué zonas del país incentivar el uso de semillas resistentes a sequía?*
- Inversión en proyectos de infraestructura: *¿qué distritos de riego priorizar?*
- Seguros agrícolas para la transferencia del riesgo: *¿Cuál es la prima pura de riesgo?*
- Análisis costo-beneficio de estrategias de manejo de cultivos (como distritos de riego, construcción de reservorios, uso de fertilizantes, rotación de cultivos).
- Medidas de adaptación a variabilidad climática.

Estas aplicaciones se pueden desarrollar a escala local, subnacional o nacional por iniciativas públicas y/o privadas. Este no es un modelo de pretenda pronosticar sequías, por lo que no es posible su uso como sistema de alerta temprana.

### ***Evaluación de riesgo por inundación en la ciudad de Río Branco***

La evaluación de riesgo por inundación asociado a lluvias intensas sobre la cuenca de Río Yaguarón, ubicado en la frontera entre Uruguay y Brasil, se hizo a partir de la modelación probabilista de la amenaza sobre la cuenca, la conformación de la base de datos de elementos expuestos a partir del relevamiento hecho en la ciudad de Río Branco, y la modelación de vulnerabilidad que relaciona el daño esperado por la profundidad de la inundación con el tipo de estructura de las edificaciones. Como resultado se obtuvo que se tiene una pérdida anual esperada de 2.4‰ (2.4 al millar o 0.24%), relativo al valor expuesto del portafolio completo de edificaciones. Este valor también se conoce como la prima pura en el sector de los seguros ya que es la anualización de todas las pérdidas que se tendrán a futuro, y por lo tanto equivaldría al valor que se tendría que pagar cada año para cubrir dichas pérdidas. Los resultados de riesgo probabilista por inundación en Río Branco también incluye métricas como las curvas de excedencia de pérdidas o de pérdida máxima probable que, junto a mapas de riesgo, son herramientas útiles para la toma de decisiones informada en planificación territorial y gestión del riesgo en general.

## INTRODUCCIÓN

---

Una de las actividades fundamentales de la gestión del riesgo de desastres a nivel de país es la evaluación del riesgo catastrófico, o de eventos extremos, para lo cual es necesario aplicar metodologías confiables que permitan una adecuada estimación y cuantificación del potencial de pérdidas en un tiempo de exposición determinado. No obstante, aunque se han desarrollado a nivel internacional diversas metodologías para la evaluación detallada del riesgo para diferentes tipos de amenazas naturales, pocas metodologías permiten realizar un análisis a nivel país por dos razones principales: primero, la falta de información detallada que impide la conformación de bases de datos robustas para describir la exposición y, segundo, la falta de metodologías que permitan modelar de manera integrada las amenazas, la vulnerabilidad de los elementos expuestos y el riesgo que se deriva de su respectiva convolución.

Para alcanzar, entonces, el objetivo general de identificar y cuantificar el riesgo catastrófico de un país, es necesario utilizar un método que permita tener en cuenta las amenazas naturales en forma integral, que incluya de la manera más completa, y en lo posible detallada, los bienes expuestos –teniendo en cuenta sus principales características–, que permita tener en cuenta la vulnerabilidad específica de cada elemento y que, finalmente, permita la evaluación del riesgo mediante un proceso de cálculo probabilista apropiado que tenga en cuenta las incertidumbres propias e inherentes a este tipo de evaluaciones, así como las inevitables limitaciones en la información disponible.

En Uruguay, los desastres naturales se deben casi exclusivamente a fenómenos de tipo hidrometeorológico. Las grandes inundaciones han sido causantes de masivos desplazamientos internos en el pasado, dadas las vastas extensiones de tierra anegada tras el desbordamiento de los ríos, o por el encharcamiento producto de las fuertes precipitaciones y una topografía muy plana. Por otra parte, las temporadas secas, en muchas ocasiones intensificadas por el fenómeno de La Niña, generan importantes sequías en Uruguay, afectando de manera importante el sector agrícola y ganadero, siendo este último de gran importancia en la economía uruguaya.

Este informe presenta la metodología y resultados obtenidos para Uruguay, en dos partes. En la Parte I se presenta lo que se refiere al impacto de las sequías en el sector agropecuario y el cálculo de la curva empírica de excedencia de pérdidas para el país y la evaluación probabilista de la amenaza por sequía, y en la Parte II se presenta la evaluación probabilista de la amenaza por inundación en la población de Río Branco, ubicada al nororiente del país, al margen de río Yaguarón.

## **Parte I**

### Perfil de Riesgo de Desastres por Sequía

## IMPACTO DE LAS SEQUÍAS EN EL SECTOR AGROPECUARIO EN URUGUAY

---

La sequía es una amenaza de desarrollo lento, con impactos nulos sobre edificaciones o infraestructura, pero muy elevados para las actividades agropecuarias, así como para la población expuesta. La afectación de la población adquiere diferentes manifestaciones sectoriales y territoriales. Además de la que se realza con mayor frecuencia (la reducción en la disponibilidad de agua para consumo doméstico y sus consecuentes impactos en materia de higiene y alimentación), las afectaciones pueden manifestarse mediante la interrupción en el suministro eléctrico, en países en donde existe una dependencia de fuentes de energía hidroeléctrica; interrupciones en el funcionamiento de actividades industriales que requieren altos volúmenes de agua; o afectaciones en el transporte en territorios donde la población utiliza rutas fluviales. Los impactos de la sequía dependen no sólo de la magnitud del evento natural, sino también de la vulnerabilidad de la sociedad en el momento en que ocurre la sequía. Es bien sabido que la pobreza y la segregación social son factores que agravan las condiciones de vulnerabilidad de los asentamientos humanos expuestos a peligros naturales y que los desastres perpetúan la pobreza y contribuyen al subdesarrollo de dichos asentamientos, lo que vuelve a favorecer la vulnerabilidad, en un, aparentemente, interminable círculo vicioso. Este concepto se aplica también a las sequías, con la diferencia que esta amenaza no causa pérdidas sobre el ambiente construido (edificaciones e infraestructura en general), sino que ocasiona una degradación a los medios de subsistencia de la población expuesta (principalmente agua y cultivos), aumentando las condiciones de inseguridad y, en consecuencia, aumentando el riesgo a niveles que pueden exceder los impuestos por eventos catastróficos (Hagman, 1984 en Donald A Wilhite, 1993).

En Uruguay prevalece la noción de que las afectaciones por desastre son marginales dentro de las problemáticas del desarrollo. Sin embargo, los datos en el sector agropecuario demuestran que la variabilidad climática tiene un impacto de consideración en algunos territorios y actividades. La manifestación esporádica de la sequía suele afectar a los productores agropecuarios, en algunas ocasiones de manera considerable, lo que deriva en requerimientos de asistencia por parte de las instituciones

de gobierno encargadas de apoyar al sector. Alguna evidencia disponible indica que la recurrencia de la sequía en el país podría incrementarse considerablemente en las próximas décadas conforme aumente el calentamiento del planeta. Bajo las condiciones actuales del sector agropecuario, esto podría implicar un crecimiento de las pérdidas registradas de importante consideración, con serias implicaciones en la vida de cientos de familias que dependen de esta actividad productiva.

## **1.1 Cuantificación de los impactos de la sequía**

La cuantificación de los impactos es un elemento fundamental dentro del ámbito del conocimiento del riesgo de desastre. Dimensiona en parte el tamaño del problema. El conocimiento de los daños históricos permite derivar parte de los potenciales daños a futuro. Es, por lo demás, uno de los principales argumentos para enfatizar y justificar las acciones técnicas y políticas que la gestión del riesgo de desastre impulsa en diversos contextos institucionales.

El riesgo no se distribuye uniformemente, ni en el territorio ni entre sectores de la población; tampoco ocurre lo mismo con los impactos derivados de los desastres. Por ello es crítico conocer la distribución temporal, espacial y sectorial de los impactos, ya que esto permite a los decisores diseñar medidas de intervención focalizadas y mejor acopladas a necesidades y particularidades dentro de los territorios.

El registro de impactos, por otra parte, funciona como un mecanismo de comprobación de efectos de las políticas públicas. Siendo el interés principal de la gestión del riesgo de desastre incrementar los niveles de seguridad expresados en una disminución de daños y pérdidas ante la manifestación de dinámicas naturales, el registro sistemático de esta información es central para medir la efectividad de las políticas públicas implementadas. Paralelamente, de su estudio detallado también es posible identificar cuándo algunos impactos, atribuidos genéricamente a una amenaza, en realidad tienen su explicación causal en otros procesos.

Cuantificar los impactos es una tarea de alta complejidad, tanto en términos metodológicos como operativos. En casos como el de la sequía, la variable temporal representa un desafío particular: ¿cómo contabilizar impactos que se dan en largos periodos o cuyas ramificaciones se extienden y combinan con otros procesos

territoriales? La dimensión espacial también presenta niveles de complejidad: la contabilidad agregada de impactos a nivel nacional, por ejemplo, puede invisibilizar en la escala local a serias afectaciones para sectores o zonas particularmente vulnerables.

## 1.2 El evento de 2008 – 2009

La determinación de daños y pérdidas es un ejercicio complejo en vista de la cantidad de factores y dinámicas que ocurren de manera simultánea. Desde variables meteorológicas hasta macroeconómicas se combinan en distintas intensidades; todo ello configura de múltiples formas los factores de amenaza, exposición y vulnerabilidad. Por ello, aunque es posible llegar a estimaciones probabilísticas más integrales, para los análisis históricos de los eventos la mejor herramienta es el inventario pormenorizado y territorializado de los daños y pérdidas. Para el evento de 2008 – 2009 la Asociación Rural del Uruguay (ARU) realizó un inventario detallado, que muestra muchas de las ramificaciones y formas de estimar el impacto de la sequía en el sector agropecuario. A continuación, se presenta el resumen de la cuantificación de pérdidas en el sector agropecuario del Uruguay para el evento en mención.

Tabla 3. Identificación de impactos atribuidos a la sequía de 2008 – 2009 en distintas actividades del sector agropecuario. Fuente: Elaboración propia a partir de ARU (2009).

Actividad: Agricultura			
Subactividad	Menor área de siembra	Caída de producción por menor rendimiento	
Soja	Se espera un menor número de hectáreas de soja sembradas.	Se estima una reducción en el rendimiento de aproximadamente 20%	
Maíz	Se espera un menor número de hectáreas de maíz sembradas.	Se estima una reducción en el rendimiento de aproximadamente 20%	
Sorgo		Se estima una reducción en el rendimiento de aproximadamente 15%	
Girasol		Se estima una reducción en el rendimiento de aproximadamente 20%	
Arroz	Se estima una reducción de 20.000 ha cultivadas		
Papa			
Cítricos		Se estima una cosecha menor al promedio de las 5 zafas anteriores.	
Actividad: Pecuaria			
Subactividad	Pérdida de peso en el stock	Pérdidas en el proceso	Pérdidas en el valor de los ganados para faena
Carne vacuna	Venta de individuos de menor peso.	Menores nacimientos	



		asociados a pérdidas futuras	
Leche			
Praderas		Pérdida aproximada de 25% del área disponible.	

El resumen de pérdidas totales según ARU (2009) indica que en agricultura se acumularon pérdidas por 95.5 millones de dólares, en citricultura 30 millones de dólares, en producción ganadera de carne 653 millones de dólares y en producción lechera de 90 millones de dólares. El resumen, representado en porcentaje, se muestra en Figura 1. A partir de este estudio se puede concluir que la sequía ocurrida entre 2008 y 2009 acumuló pérdidas por 868 millones de dólares para el sector agropecuario de Uruguay.

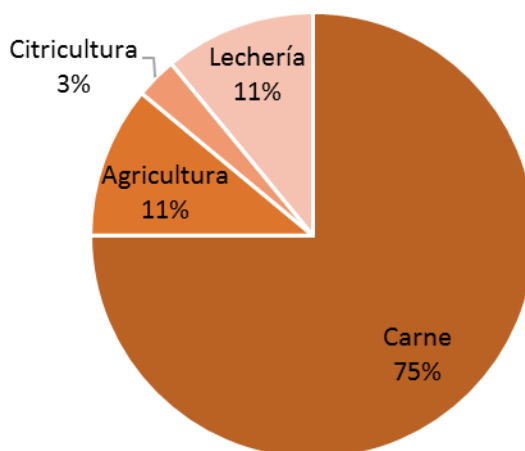


Figura 1. Distribución de las pérdidas económicas entre subactividades del sector agropecuario durante la sequía 2008-2009. Fuente: Elaboración propia a partir de ARU (2009).

### 1.3 Impactos de la sequía en el sector agropecuario

Las actividades agropecuarias constituyen un elemento histórico y cultural central dentro del desarrollo del Uruguay. Durante los últimos 20 años, el dinamismo del sector se incrementó gracias a la combinación de factores internos y externos. El auge del precio de las materias primas fue un aspecto macroeconómico que además supo ser aprovechado por los productores uruguayos, que diversificaron el portafolio agropecuario e intensificaron la productividad de las actividades por unidad de área, procesos que se vieron favorecidos por incentivos tributarios que estimularon la inversión sectorial. El crecimiento del sector pudo verse reflejado en un aumento significativo de las

exportaciones de bienes y productor agropecuarios y agroindustriales, así como por una diversificación de los mercados de colocación de mercaderías (MGAP, 2015).

Desde inicios de la década del 2000 Uruguay experimentó un crecimiento económico significativo, reflejado en un incremento de más de tres veces su ingreso per cápita, que pasó de 4.229 dólares en 2002 a 15.414 en 2015. Del total de este crecimiento, el sector de agroindustria contribuyó con el 7 por ciento del producto interno bruto en 2015 (Uruguay XXI, 2018); adicionalmente, se estima que más de un 6 por ciento de aportes en otros rubros guardan una estrecha relación y dependencia de la actividad agroindustrial. Otras actividades económicas, como construcción, transporte, alimentaciones y servicios, también guardan estrechos encadenamientos con el sector.

En términos de empleo, la agroindustria emplea alrededor del 15 por ciento del personal ocupado, principalmente distribuidos en la cría de ganado y el cultivo de cereales. También para la balanza comercial el sector es crucial: cerca del 78 por ciento de los bienes exportados del país son derivados agropecuarios; en 2016, las exportaciones agroindustriales rondaron los 6.440 millones de dólares, constituidas principalmente por carne bovina, celulosa y soya.

El impacto de la sequía se registra principalmente en la ganadería. Durante una sequía prolongada, un vacuno puede perder entre 50 a 100 kilos; el impacto potencial de la sequía podría disminuir la producción anual de carne en unas 285.000 toneladas (Bruno, 2006). El impacto en el crecimiento del pasto deriva en problemas con la totalidad del ciclo de desarrollo de los animales. La tasa de preñez desciende y el porcentaje de terneros nacidos (porcentaje de parición) puede llegar a disminuir hasta en una proporción del 33 por ciento (MGAP-FAO, 2013). Además, se han detectado impactos en actividades vinculadas a la producción de carne. De dos a tres años posteriores a una sequía, se registran pérdidas en actividades como la industria frigorífica, transporte y servicios asociados a la producción ganadera.

En términos macroeconómicos, las sequías tienen un impacto considerable. En la producción ganadera las pérdidas son muy relevantes debido a que a las pérdidas directas en la fase primaria se suman las indirectas derivadas de impactos concatenados en los sectores de actividad vinculados (OPYPA-MGAP, 2010; MGAP-FAO, 2013). En la Tabla 4 se muestra un resumen de los impactos identificados en una revisión de reportes

de pérdidas en Uruguay provocadas por eventos de sequía. Por ejemplo, la sequía ocurrida entre 1999 y el 2000, para la que se le calcula una recurrencia de 10 años, dejó pérdidas directas de 200 millones de dólares (PNUD, 2007). La sequía de los años 2008 – 2009 dejó pérdidas directas que rondaron los 400 millones de dólares, cifra que ascendió a los 1.000 millones de dólares cuando se le sumaron las pérdidas indirectas sufridas por la industria frigorífica, servicios asociados y disminución de empleos (Paolino, Methol, & Quintans, 2010). Como resultado de la revisión de reportes de pérdidas e impactos de la sequía en el sector agropecuario, se puede concluir que la valoración es muy compleja y hay tantas metodologías como investigadores. No se tiene una metodología estándar que permita comparar los efectos de los diferentes eventos que han ocurrido. Sin embargo, se reconoce que las pérdidas derivadas de eventos de sequía son considerables para Uruguay.

Tabla 4. Resumen de impactos de sequía en Uruguay reportados en la literatura

Fecha evento	Impacto	Referencia
1988-1989	15.6% de disminución en existencias vacunas	Bartaburu et al. 2009
1999-2000	200 millones de dólares	PNUD, 2007
2005-2006	15% de disminución en existencias vacunas en Artigas y Salto.	Montes & Bartaburu, 2007
2008-2009	1,000 millones de dólares en pérdidas directas e indirectas	Paolino, Methol, & Quintans, 2010
	6 millones de dólares en distribución de suplementos y granos para atender ganado.	Methol & Silveira, 2013
	868 millones de dólares sector Agropecuario	ARU, 2009
	Sobrecostos de US\$40/cabeza vacuna (suplir alimentación).	Bartaburu, 2010

Las sequías que se dan en el Uruguay guardan una estrecha relación con la manifestación de La Niña (Baethgen y Gimenez, s.f.; Methol y Silveira, 2013); sin embargo, existen episodios que también se han dado en otros momentos como se puede ver en la Tabla 5.

[illegible]

44

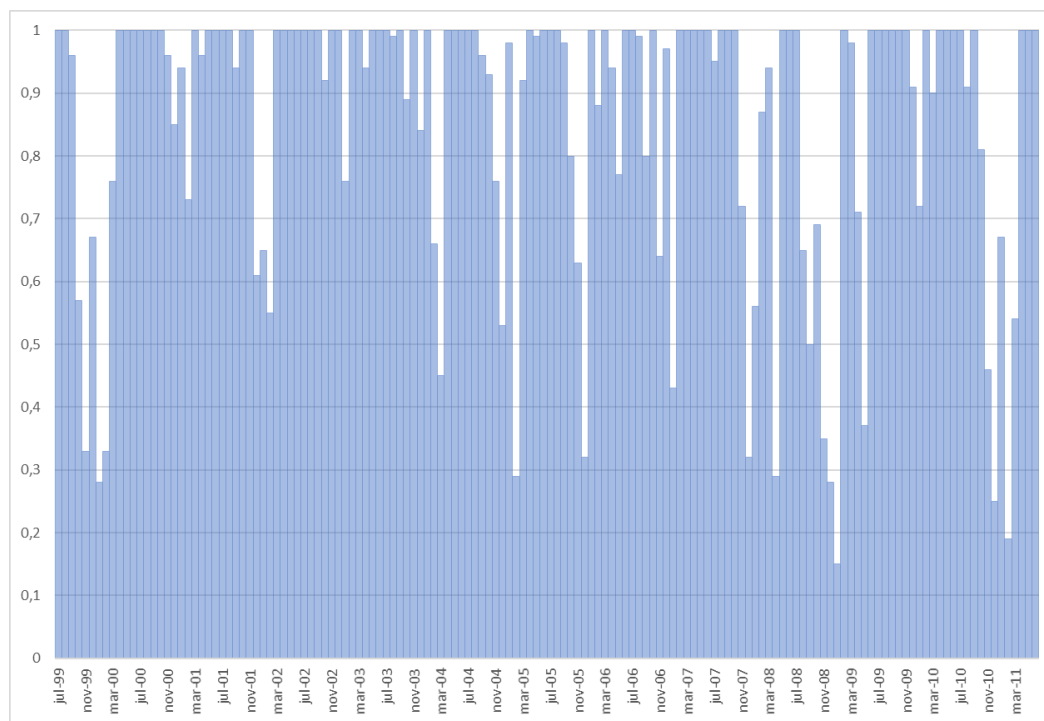


Figura 2. Registro del índice de bienestar hídrico en el suroeste de Uruguay (IBH) (Julio, 1999 – junio, 2011). Fuente: Elaboración propia a partir de MGAP-FAO (2013).

En conclusión, la valoración de las pérdidas económicas relacionadas con eventos de sequía son tareas de alta complejidad que no cuentan con un estándar entre los evaluadores. Según el alcance de cada uno de los estudios de valoración de pérdidas por sequías se obtiene un valor de pérdidas diferente, considerando que los factores asociados a pérdidas se relacionan con pérdidas de rendimiento (menor cosecha de cultivos o peso de animales), mayores costos de producción (costos asociados a riego o suplementos de alimentación para animales), o incluso pérdidas futuras en especial en cultivos permanentes y cría de animales. Es por esto que, al no ser suministrados por una misma fuente los valores reportados de pérdida no pueden ser comparados.

## METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE RIESGO POR SEQUÍA

La gestión del riesgo comprende todo el conjunto de acciones que pueden ser ejecutadas con el fin de reducir el impacto negativo de los desastres en el marco del desarrollo. El primer paso para una correcta gestión del riesgo es identificarlo y cuantificarlo. Ahora bien, para conocer el riesgo deben conocerse sus componentes: la amenaza, los elementos expuestos y su vulnerabilidad. La amenaza se refiere a la ocurrencia de un fenómeno natural, en este caso las sequías, y la severidad con que impacta una región específica. Los elementos expuestos son el conjunto de bienes o activos que se encuentran expuestos a la amenaza y pueden llegar a sufrir daños que deriven en pérdidas económicas o afectación a la población. Por último, la vulnerabilidad es esa medida de susceptibilidad a sufrir daño que tienen los elementos expuestos, tras la manifestación de la amenaza en su ubicación. La evaluación del riesgo resulta entonces de la combinación de sus tres componentes. La Figura 3 muestra un resumen de la metodología propuesta para la evaluación del riesgo de sequía agrícola, dividida en sus componentes principales: amenaza, vulnerabilidad, exposición y riesgo.

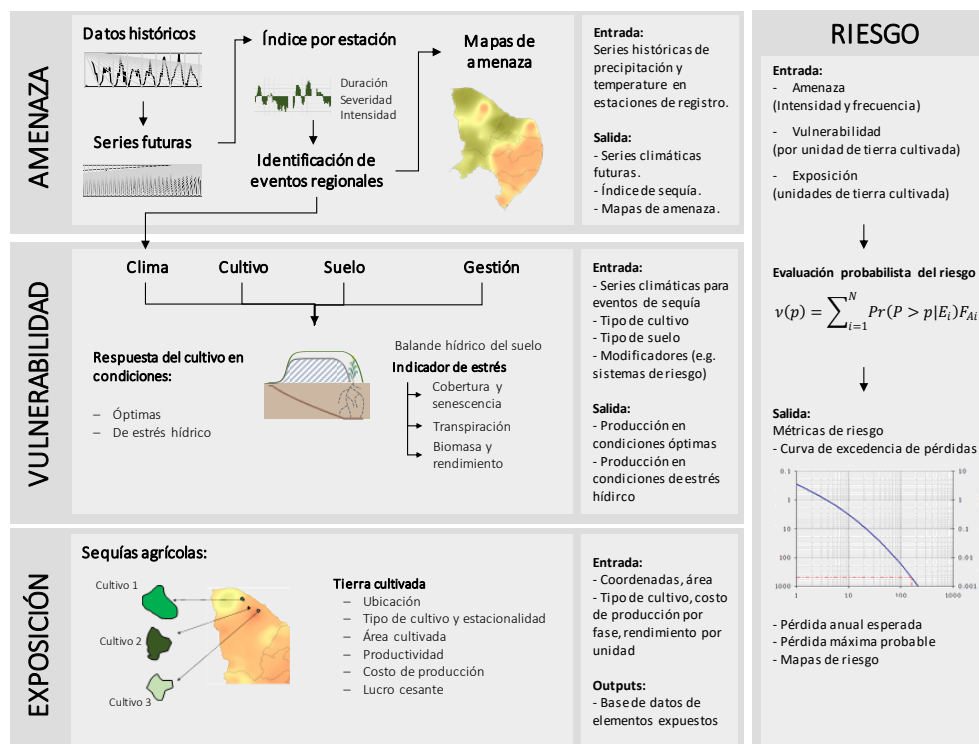


Figura 3. Esquema general del modelo probabilista de evaluación de riesgo por sequía

La identificación del riesgo por sequía en Uruguay se hizo siguiendo la metodología de análisis probabilista que tiene como objetivo estimar la distribución de probabilidad de la pérdida que puede presentarse en un conjunto de elementos expuestos, tras la ocurrencia de un fenómeno natural. La modelación probabilista permite entonces realizar pronósticos sobre los niveles futuros de pérdida, considerando la amenaza propia de la región de estudio y la incertidumbre en su estimación, así como la vulnerabilidad inherente de los elementos expuestos y su incertidumbre.

#### **1.4 Componentes del análisis del riesgo**

##### **1.5 Amenaza**

En términos generales, la amenaza se representa por medio de una colección de escenarios, generados de manera estocástica, los cuales representan de manera integral, y en términos de probabilidad, la amenaza de una región. Cada escenario tiene asociada una frecuencia de ocurrencia y contiene la distribución espacial de parámetros que permiten construir la distribución de probabilidad de las intensidades producidas por su ocurrencia. La razón por la cual debe representarse la amenaza como una colección de escenarios está relacionada directamente con la evaluación del riesgo, dado que esta representación permite aplicar la metodología probabilista de análisis de riesgo de manera directa, y permite incluir de manera racional las incertidumbres asociadas a la amenaza.

Para el caso de la sequía, la amenaza se calcula a partir de la identificación de eventos regionales con condiciones simultáneas de déficit hídrico y altas temperaturas, que se derivan de la generación estocástica de series de clima. La sequía, para esta metodología, se describe a partir de su severidad, duración e intensidad; tanto en escalas temporales como espaciales.

##### **1.6 Elementos expuestos**

Los elementos expuestos, son el conjunto de bienes o activos susceptibles de sufrir daños y producir pérdidas, dada la ocurrencia de los escenarios que definen la amenaza. Estos elementos se caracterizan por su ubicación geográfica, su valor de reposición y tipo. Los elementos expuestos son fundamentales dentro del análisis de riesgo, debido

a que comprenden los objetos sobre los cuales se evalúan las pérdidas, es decir, son la fuente de las pérdidas potenciales debido al hecho de estar expuestos a una amenaza y ser susceptibles de sufrir un daño.

En este caso, la evaluación de riesgo por sequía se hace con énfasis en el sector agropecuario, por lo que los elementos expuestos son cultivos susceptibles a eventos déficit hídrico, incluyendo pasturas para evaluar la susceptibilidad del sector pecuario del país. Los cultivos incluidos en el estudio se limitan a condiciones de secano que son aquellos que no cuentan con irrigación, a excepción del cultivo del arroz que considera anegación durante un periodo de su desarrollo.

### **1.7 Representación de la vulnerabilidad para la evaluación del riesgo**

La vulnerabilidad puede entenderse como las características del elemento expuesto para resistir el impacto derivado de la ocurrencia de un evento peligroso. Estas características determinan el grado en el cual la integridad elemento queda en riesgo por cuenta del evento peligroso. En el caso de la evaluación de riesgo por sequía, el componente de vulnerabilidad está conformado por la metodología de respuesta de los cultivos a la disponibilidad de agua, aplicada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y publicada en el Artículo 66 de la unidad de Drenaje e Irrigación (Steduto, Hsiao, Fereres, & Raes, 2012). El resultado del módulo de vulnerabilidad cuantifica las diferencias entre el rendimiento óptimo alcanzado por la planta sin restricciones de agua y el rendimiento real logrado bajo condiciones de estrés hídrico.

La vulnerabilidad es una característica intrínseca de los elementos expuestos y que caracteriza el comportamiento de los elementos expuestos (cultivos) durante la ocurrencia de un evento peligroso (sequía). Para la metodología aplicada en este estudio, no se considera la definición de vulnerabilidad mediante curvas en las que la pérdida en el elemento expuesto es función de la intensidad de amenaza que ocurra en su ubicación. Por el contrario, la metodología de vulnerabilidad de respuesta de los cultivos al agua está asociada a reducciones en el rendimiento del cultivo según el uso de parámetros específicos por especie que definen los procesos físicos, químicos y



biológicos que interactúan en el modelo de desarrollo de la planta y sus interacciones con los sistemas de atmósfera y suelo.

Información detallada sobre la representación de la vulnerabilidad para la evaluación del riesgo se presenta en la Sección 3 del *Producto 3: Estimación del valor expuesto y modelación de la vulnerabilidad* (Cardona et al., 2018) de esta consultoría.

## **1.8 Enfoque probabilista en la evaluación del riesgo**

En este trabajo, el objetivo de la evaluación probabilista del riesgo es evaluar las pérdidas potenciales para el sector agropecuario de Uruguay debido a la ocurrencia natural de condiciones de sequía, considerando exposición y vulnerabilidad de cultivos. Este enfoque permite identificar áreas geográficas y tierras cultivadas que se encuentran en riesgo. El riesgo se modela en términos de pérdida económica, definida como una variable aleatoria que incorpora la incertidumbre presente en los componentes de amenaza, vulnerabilidad y exposición del modelo.

Al realizar la evaluación de riesgo por escenarios, los eventos de sequía valorados se organizan en una Gráfica de Pérdida vs. Tiempo, como se muestra en la Figura 4. Al establecer una pérdida económica  $p$ , se puede identificar en la gráfica todos los eventos cuyas pérdidas exceden  $p$ . Los tiempos entre eventos  $(T_1, T_2, \dots, T_{1n})$  también se estiman a partir de la Figura 4 y se usan para estimar el parámetro  $\lambda$  de una distribución exponencial, la cual corresponde a la distribución de probabilidad del tiempo entre eventos de un proceso de Poisson. Además, este parámetro de la distribución exponencial tiene la particularidad de ser el mismo  $\lambda$  que define el proceso de Poisson completamente (i.e. es la misma tasa de excedencia,  $\lambda = v(p)$ ). Para el caso de la evaluación prospectiva del riesgo por sequía, la ventana de tiempo considerada para calcular  $\lambda$  es igual al número de simulaciones estocásticas de las series climáticas, y en este caso es de 1,000 años equivalentes.

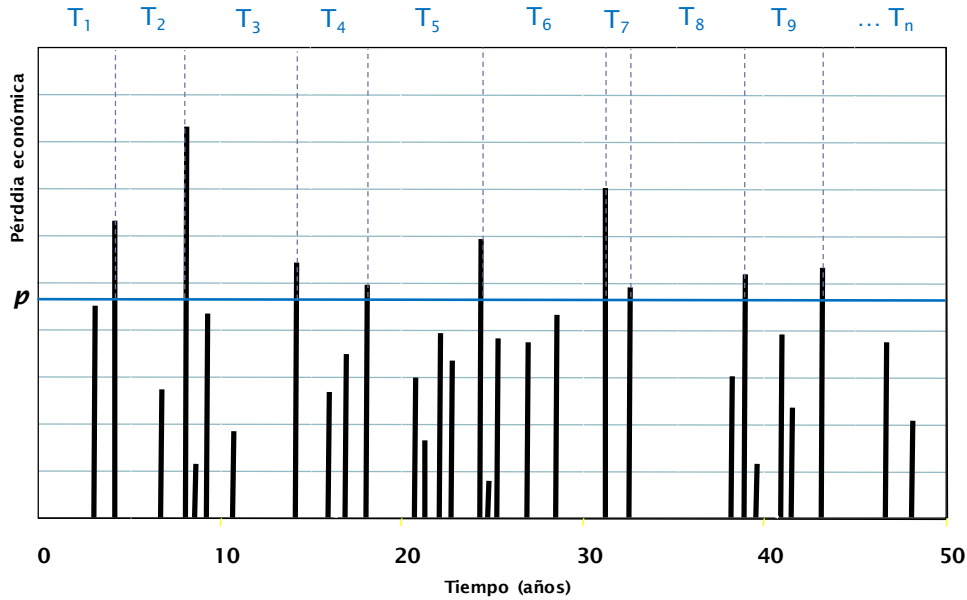


Figura 4. Pérdidas por evento en una ventana amplia de tiempo.

La tasa de excedencia poblacional ( $\lambda$ ) es estimada mediante la tasa de excedencia empírica ( $\Lambda$ ) de la siguiente manera:

$$\Lambda = \frac{n - 1}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad 0-1$$

En donde  $n$  es el número de eventos que superan la pérdida  $p$  y  $T_i$  son los tiempos observados. Este estimador cumple con los cuatro criterios estadísticos de calidad de la estimación de parámetros de distribuciones de probabilidad: es no sesgado, de varianza mínima, consistente y suficiente. Ahora bien, es posible demostrar que el estimador  $\Lambda$  sigue una distribución de probabilidad *Gamma inversa* con parámetros  $n$  y  $(n-1)\lambda$ , a partir de lo cual se puede determinar su coeficiente de variación (CV) como:

$$CV = \frac{1}{\sqrt{n - 2}} \quad 0-2$$

El coeficiente de variación indica la relación entre la desviación estándar y la media de una variable aleatoria. Como se indica en la Ecuación 2-2, CV disminuye a medida que el número de datos ( $n$ ) aumenta. La Ecuación 2-2 es una fórmula estándar, aplicable a cualquier problema de estimación del riesgo por eventos, en donde el CV de la tasa de excedencia varía con el tamaño de la muestra cómo se indica en la Figura 5.

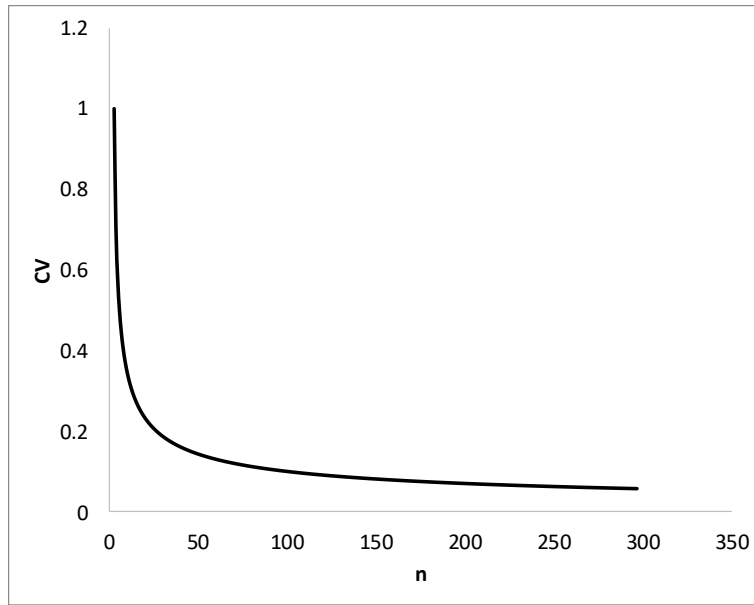


Figura 5. Variación del coeficiente de variación de la tasa de excedencia con el tamaño de la muestra.

El CV crece rápidamente a medida que  $n$  disminuye. Esto quiere decir que, al estimar la tasa de excedencia de pérdidas grandes (eventos catastróficos) a partir de pocos eventos modelados, para los cuales se contará con un valor pequeño de  $n$  (es decir, pocos eventos que exceden esa pérdida dentro del conjunto de escenarios de sequía), la dispersión de la estimación (i.e. su desviación estándar) es muy grande en comparación a la estimación misma, lo cual implica una mayor incertidumbre. Por el contrario, al estimar la tasa de excedencia de pérdidas con un mayor número de eventos modelados,  $n$  será necesariamente un número más grande y, en consecuencia, la dispersión de la tasa disminuye a valores incluso despreciables en la práctica. Esto es por lo que, para que el resultado sea estadísticamente suficiente se debe hacer uso de un gran número de años simulados dentro de los cuales se pueda identificar un número considerable de eventos de sequía.

### 1.8.1 Curva de excedencia de pérdidas

Es así como el riesgo se define por medio de la curva de excedencia de pérdidas (ver Figura 6), la cual establece el número de veces en un año en las que un valor de pérdida se verá excedido. Esta cantidad se conoce como la *tasa anual de excedencia*, la cual es un valor único y específico para cada cuantía de pérdida, e incorpora el aporte de todos

los posibles escenarios de sequía contenidos en la evaluación de la amenaza. Como se mencionó anteriormente, la tasa de excedencia es igual al parámetro  $\lambda$  que define la ocurrencia en el tiempo de los eventos de pérdida, es decir:

$$v(p) = \frac{n_p - 1}{\sum_{i=1}^{n_p} T_i} \quad 0-3$$

en donde  $p$  es la pérdida económica,  $v(p)$  es su tasa anual de excedencia,  $n_p$  es el número total de eventos en los cuales se supera  $p$  y  $T_i$  es el tiempo  $i$  entre eventos que superan  $p$ . El periodo de retorno  $Tr(p)$  se calcula como el inverso de la tasa de excedencia  $v(p)$ .

$$Tr = \frac{1}{v(p)} \quad 0-4$$

El periodo de retorno es el valor esperado del tiempo entre eventos. Es decir, corresponde al periodo de tiempo promedio para el cual, considerando una ventana temporal de observación suficientemente amplia, se verá igualada o excedida una pérdida dada, y se muestra en el eje vertical de la derecha de la curva ejemplo mostrada en la Figura 6.

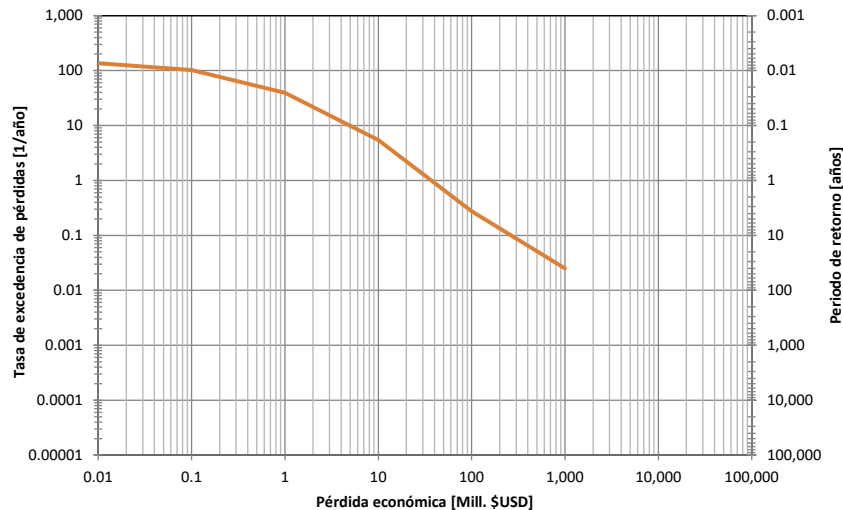


Figura 6. Ejemplo de curva de excedencia de pérdidas. El eje vertical muestra la tasa de excedencia (izquierda) y su valor inverso o periodo de retorno (derecha). El eje horizontal muestra la pérdida asociada.

El cálculo de la Ecuación 0-3 corresponde a la estimación de la tasa de excedencia de las cuantías de pérdida que ocurren en todos los activos expuestos (unidades de tierra cultivada) para todos los eventos potencialmente nocivos incluidos en el modelo de amenaza (el conjunto de escenarios estocásticos de sequía regional previamente identificados). La pérdida para un escenario de sequía se determina mediante la suma de las pérdidas causadas en las unidades individuales cultivadas.

Para la evaluación del riesgo de sequía, la pérdida  $p$  en la Ecuación 0-3 se debe a la reducción en los ingresos de producción (lucro cesante) de cultivos debido a la reducción en el rendimiento de cada unidad de tierra cultivada, en donde se conocen el tipo de suelo, tipo de cultivo, su estacionalidad y su valor económico de reposición. La pérdida económica en una unidad cultivada, para un escenario específico, se calcula como:

$$P_i = A \cdot PV \cdot (Y_x - Y_i) \quad 0-5$$

En donde  $P_i$  es la pérdida económica para el escenario  $i$ ,  $A$  es el área de la unidad de tierra cultivada,  $PV$  es la valoración económica del cultivo,  $Y_x$  es el rendimiento máximo (calculado bajo condiciones óptimas) y  $Y_i$  es el rendimiento para el escenario  $i$  bajo condiciones de déficit hídrico.

Como se muestra en la Figura 7, la evaluación probabilista del riesgo de sequía se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Para cada evento de sequía, se determina la pérdida en todas y cada una de las unidades cultivadas, considerando tipo de suelo, tipo de cultivo, estacionalidad y fase fenológica.
2. Se calcula la pérdida causada por todo el evento de sequía, como la suma de las pérdidas individuales causadas en las unidades cultivadas.
3. Una vez se conocen las pérdidas de todos los escenarios de sequía, se calculan las tasas de excedencia según la Ecuación 0-3.

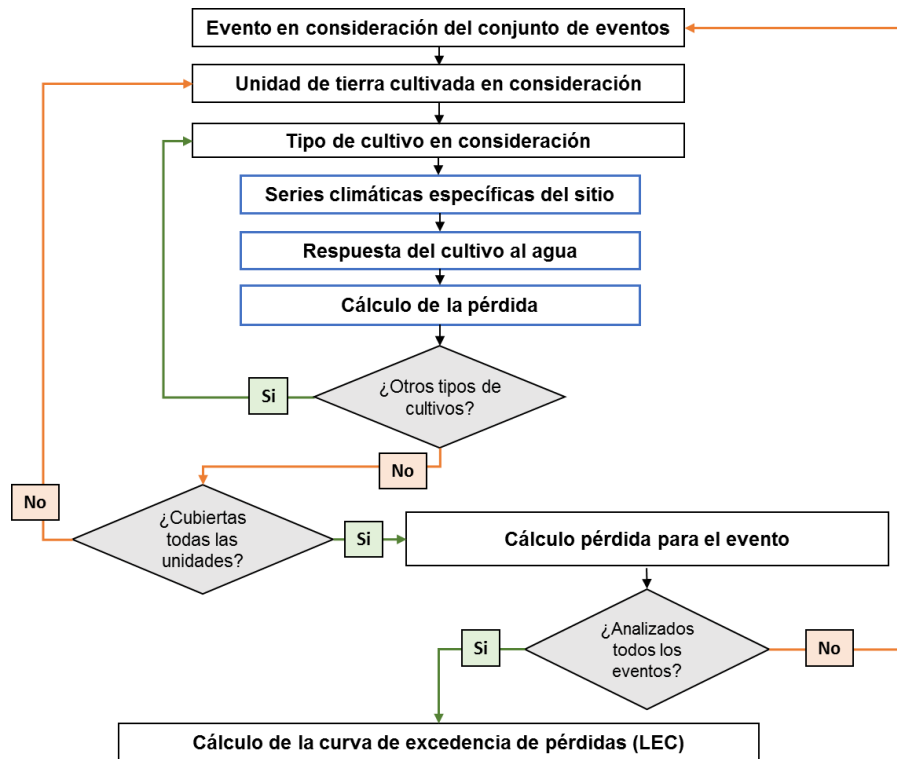


Figura 7. Diagrama de flujo para la metodología de evaluación de riesgo por sequía

## 1.9 Métricas de riesgo

A partir de la curva de excedencia de pérdidas es posible obtener diversas métricas del riesgo, las cuales son útiles para diferentes fines dentro de la toma de decisiones y la gestión del riesgo. Estas métricas pretenden proporcionar una representación integral del riesgo, por lo general condensada en uno o unos pocos números, en lugar de proporcionar todo el conjunto de las pérdidas por escenarios o la curva de excedencia de pérdidas completa.

### 1.9.1 La pérdida anual esperada (PAE)

La PAE corresponde al valor esperado de la pérdida anual. Indica el valor anual que debe pagarse para compensar, en el largo plazo, todas las pérdidas futuras. En un esquema simple de seguro, la PAE sería la prima pura anual justa. Se calcula como a partir del conjunto de eventos como:

$$PAE = \frac{\sum_{i=1}^N p_i}{T} \quad 0-6$$

Es decir, se trata del valor esperado de las pérdidas anuales. La PAE se puede obtener también como el área bajo la curva de excelencia de pérdidas. La pérdida anual esperada es un indicador importante dado que integra en un único valor el efecto, en términos de pérdida, de la ocurrencia de los escenarios de amenaza sobre los elementos expuestos vulnerables. Se considera como el indicador más robusto de riesgo, no solo por su capacidad de resumir el proceso de generación de pérdidas en un solo número, sino por ser relativamente insensible a la incertidumbre.

### **1.9.2 La pérdida máxima probable (PML)**

Se denota PML por sus siglas en inglés (Probable Maximum Loss). Corresponde a una pérdida que ocurre poco frecuentemente, es decir, que está asociada a un periodo de retorno grande. Como se indicó anteriormente, el periodo de retorno es el inverso de la tasa de excedencia de pérdidas. En realidad, la PML es una curva que relaciona las pérdidas a su correspondiente periodo de retorno. No obstante, es práctica común definir la PML como un único valor. La selección del periodo de retorno de la PML depende exclusivamente de la aversión al riesgo del tomador de decisiones. Por ejemplo, en la industria aseguradora el periodo de retorno de la PML se toma usualmente entre 200 y 1500 años. Este estudio presenta como resultado la curva de pérdida máxima probable (PML) para un amplio rango de periodos de retorno, así como el valor de la PML para 20, 50, 100 y 200 años. La selección del periodo de retorno la hace el tomador de decisión, según el objetivo de la evaluación, ya que no existe un estándar aceptado mundialmente.

### **1.9.3 La probabilidad de quiebra (PQ)**

Asumiendo que el proceso de ocurrencia de las pérdidas en el tiempo sigue un proceso de Poisson, es posible determinar la probabilidad de alcanzar o exceder un nivel de pérdida dado, en un periodo de exposición particular,

$$\Pr(P > p) = 1 - e^{-v(p) \cdot T} \quad 0-7$$

en donde  $\Pr(P > p)_T$  es la probabilidad de excedencia de la pérdida  $p$ , en el lapso de tiempo  $T$  (dado en años). Si la pérdida  $p$  corresponde a la PML, entonces el término

$\Pr(P > p)_T$  se conoce como la *probabilidad de quiebra* ( $P_Q$ ), la cual no es más que la probabilidad de exceder la PML en un lapso de tiempo  $T$ .

#### 1.9.4 Otras métricas del riesgo

Como se mencionó anteriormente, la curva de excedencia de pérdidas contiene toda la información necesaria para caracterizar de manera rigurosa la ocurrencia de pérdidas. Es posible determinar directamente de  $v(p)$  otras métricas del riesgo que pueden ser relevantes para la toma de decisiones. Aquí se presentan algunos ejemplos.

La función de densidad de probabilidad de la pérdida durante el próximo evento, o un evento tomado al azar, se obtiene como,

$$f(p) = -\frac{1}{v(0)} \cdot \frac{dv(p)}{dp} \quad 0-8$$

La probabilidad de exceder un nivel de pérdida particular tras la ocurrencia del próximo evento, o un evento tomado al azar, se puede calcular como,

$$\Pr(P > p) = \frac{v(p)}{v(0)} \quad 0-9$$

La función de densidad de probabilidad del tiempo hasta la ocurrencia del próximo evento ( $t$ ) es exponencial y se define como,

$$f(t) = v(p) \cdot e^{-v(p) \cdot t} \quad 0-10$$

El número de eventos ( $N$ ) que ocurrirán en un lapso de tiempo  $T$ , que igualan o exceden la pérdida  $p$ , se distribuye Poisson, por lo cual la probabilidad que ese número sea igual a  $n$  es,

$$\Pr(N = n) = \frac{v(p) \cdot T \cdot e^{-v(p) \cdot T}}{n!} \quad 0-11$$

#### 1.10 Impacto de los desastres en el sector agrícola

La agricultura es particularmente vulnerable a los desastres asociados a amenazas naturales, por su alta dependencia en las condiciones climáticas. Los desastres impactan al sector agrícola más allá del corto plazo, en especial los desastres asociados a eventos de sequía cuya fecha de inicio, duración y fecha de resolución no son fácilmente determinables. Los efectos de los desastres en la agricultura son principalmente pérdidas



en las cosechas y destrucción de su infraestructura, como los invernaderos o sistemas de riego. Cuando la amenaza es la sequía, se espera que no se tengan impactos en la infraestructura, pero si en los valores de producción.

Una de las grandes limitaciones para cuantificar el impacto de la sequía en el sector agrícola es la falta de información sobre estos eventos. Esto se debe a que los registros de pérdidas y daños por los desastres no se toman en forma sistemática lo que impide hacer análisis estadísticos y comparaciones confiables. Entonces, las bases de datos no cuentan con información relevante para entender el efecto de las sequías a diferentes escalas (nacional, regional o global) ni su evolución en el tiempo.

Con esto en mente, el presente proyecto de evaluación probabilista de riesgo por sequía en Uruguay adopta la metodología de *Los impactos de desastres y crisis en la agricultura y la seguridad alimentaria* propuesta por la FAO (2017) disponible para consulta en <http://www.fao.org/3/I8656EN/i8656en.pdf>. Esta metodología está enfocada en la implementación de la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, y junto con la Oficina de las Naciones Unidas para Reducción de Riesgo de Desastres (UNISDR) buscan dar respuesta a la necesidad de un indicador global de pérdida económica en la agricultura causado por desastres. Esta metodología busca atender el *Objetivo de Desarrollo Sostenible 1.5*<sup>3</sup>: Fomentar la resiliencia de las personas que se encuentran en situaciones de vulnerabilidad y reducir su exposición y vulnerabilidad a fenómenos extremos relacionados con el clima; así como el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030<sup>4</sup> *Meta C-2*: Reducir las pérdidas económicas directas ocasionadas por los desastres en el sector agrícola.

El objetivo de la FAO (2017) es desarrollar una metodología estándar, aplicable a nivel mundial, por lo que este proyecto es una oportunidad para adoptar esta metodología en Uruguay. El alcance de la metodología de evaluación de impactos considera los subsectores agrícolas, pecuario, silvicultura, acuicultura y pesca. Para el presente proyecto, se evalúan los impactos por eventos de sequía únicamente en los subsectores agrícola y pecuario.

---

<sup>3</sup> Para más información sobre la Agenda 2030 y los ODS, ver PNUD 2018 o visitar: <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>

<sup>4</sup> Para más información sobre el marco de Sendai, ver UNISDR 2016 o visitar: [https://www.unisdr.org/files/43291\\_spanishsendaiframeworkfordisasterri.pdf](https://www.unisdr.org/files/43291_spanishsendaiframeworkfordisasterri.pdf)

### 1.10.1 Daños vs. Pérdidas

En términos generales, la cuantificación del impacto de los desastres en el sector agrícola hace una diferencia importante entre los conceptos de daño y pérdida:

- Daño: es la destrucción parcial o total de los activos físicos e infraestructura en áreas afectadas por desastres. Se expresa en términos de los costos de reemplazo o reparación. En el sector agrícola, el daño incluye impactos a cultivos permanentes, maquinaria, sistemas de irrigación, refugios de ganado, entre otros.
- Pérdida: se refiere a los cambios en los flujos económicos derivados de un desastre. En el sector agrícola, las pérdidas incluyen la disminución de ingresos asociado a reducción del rendimiento de la cosecha, disminución de ingresos asociados a reducción en la producción de derivados pecuarios. También se puede considerar el momento después de ocurrido el desastre en el que el incremento de los costos de los insumos, mayores costos operacionales, gastos más altos en imprevistos significan menores ganancias de la actividad agrícola general.

La Figura 8 muestra la diferencia que hace la FAO (2017) en términos de daño y pérdida para la producción y los activos en el sector agrícola. En cuanto a la producción, el daño corresponde a los impactos de los desastres a insumos y producción almacenada, así como impactos en cultivos permanentes; mientras que, para la pérdida, los impactos se ven reflejados en la variación de los ingresos al productor asociado con disminuciones en los rendimientos de la cosecha. Por otro lado, para los activos los daños están asociados a impactos en maquinaria, equipo y herramienta y no se consideran pérdidas, al no asociar cambios en flujos económicos a los activos. La medición se hace a partir de avalúos y costos de reparación/reemplazo estimados en condiciones anteriores al evento y diferencias en ingresos percibidos entre cosecha óptima y cosecha en condición de desastre. La metodología también puede incluir los costos temporales que deben incurrir los productores para mantener las actividades agrícolas durante o luego de la ocurrencia de un desastre.

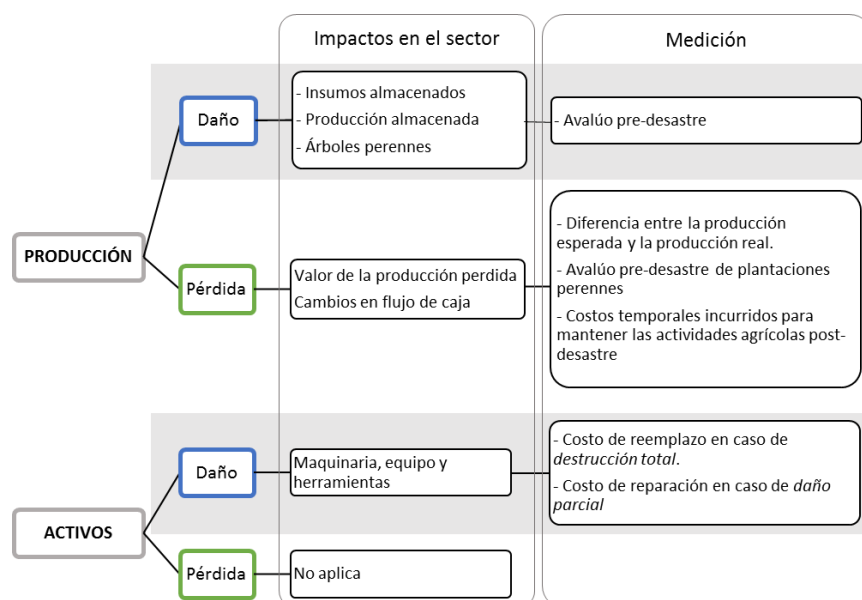


Figura 8. Diferencias entre pérdidas y daños en el sector agrícola (Elaboración propia a partir de FAO, 2017)

### Impactos en cultivos

El caso específico de los impactos de la sequía en la producción de cultivos se muestra en la Figura 9. En este caso, no se consideran daños o pérdidas para los activos de los productores, considerando que la amenaza por déficit hídrico no representa destrucción parcial o total de maquinaria, equipo, herramientas o infraestructura. Para la producción, se consideran los impactos tanto para cultivos transitorios como para cultivos permanentes. Los daños en la producción no se consideran afectaciones a la cosecha e insumos almacenados; sin embargo, se puede estimar el costo de reposición de los árboles en etapa productiva muertos por estrés hídrico. Las pérdidas en la producción están asociadas a diferencias entre la cosecha óptima ( $Y_x$ ) y la cosecha alcanzada bajo condiciones de estrés hídrico ( $Y_i$ ), que a su vez se pueden medir como la diferencia entre los ingresos potenciales en condiciones óptimas ( $\$x$ ) versus los ingresos reales alcanzados bajo condiciones de sequía ( $\$i$ ). Las pérdidas de producción también incluyen la destrucción total de cultivos transitorios o permanentes y los costos para la recuperación post-desastre.

Dado el alcance del proyecto de evaluación probabilista del riesgo por sequía Uruguay, así como la disponibilidad de información, el presente estudio se limita a

estimar las pérdidas en la producción asociados con diferencias entre la cosecha óptima ( $Y_x$ ) y la cosecha alcanza bajo condiciones de estrés hídrico ( $Y_i$ ). La estimación de estas pérdidas se hace con referencia a los precios de producción por producto, reportados por instituciones oficiales.

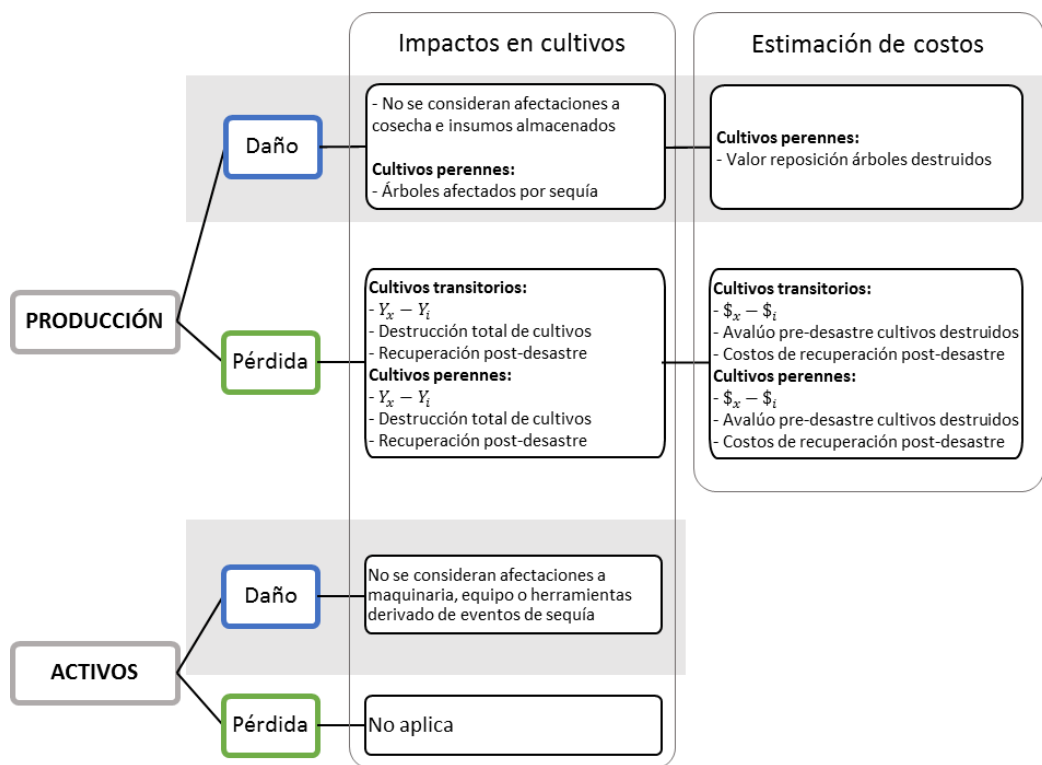


Figura 9. Diferencias entre pérdidas y daños en el sector agrícola para desastres asociados con sequía aplicadas en este estudio. (Elaboración propia a partir de FAO, 2017).

Para ampliar la implementación de la metodología de estimación de impactos por desastres, se requiere información local sobre valores de reposición de árboles destruidos, avalúos pre-desastre para cultivos y costos de recuperación asumidos por el productor.

### ***Impactos en sector pecuario***

El caso específico de los impactos de la sequía en la producción pecuaria se muestra en la Figura 10. Como en el caso de los cultivos, no se consideran daños o pérdidas para los activos de los productores, considerando que la amenaza por déficit hídrico no representa destrucción parcial o total de maquinaria, equipo, herramientas o infraestructura necesaria para la actividad pecuaria. Para la producción, se consideran

los impactos tanto producción de ganado (carne y derivados lácteos) como bovina (producción de lana). El daño en la producción no se consideran afectaciones a insumos almacenados (tipo forraje o alimento suplementario para los animales); sin embargo, se puede estimar el costo de reposición de los animales muertos por estrés hídrico. Las pérdidas en la producción están asociados a diferencias entre la producción óptima ( $Y_x$ ) y la producción alcanzada bajo condiciones de estrés hídrico ( $Y_i$ ), que a su vez se pueden medir como la diferencia entre los ingresos potenciales en condiciones óptimas ( $\$x$ ) versus los ingresos reales alcanzados bajo condiciones de sequía ( $\$i$ ). Las pérdidas de producción también incluyen los costos para la recuperación post-desastre.

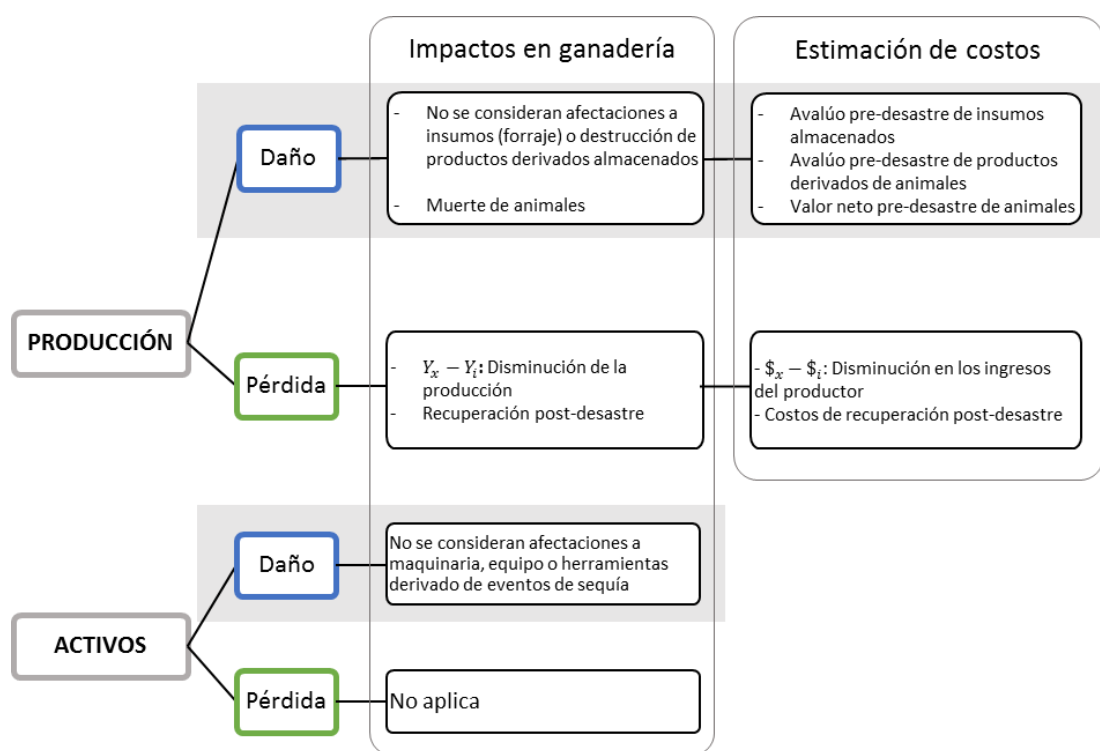


Figura 10. Diferencias entre pérdidas y daños en el sector pecuario para desastres asociados con sequía (Elaboración propia a partir de FAO, 2017).

Dado el alcance del proyecto de evaluación probabilista del riesgo por sequía Uruguay, así como la disponibilidad de información, el presente estudio se limita a estimar las pérdidas en la producción asociados con diferencias entre la producción óptima ( $Y_x$ ) y la producción alcanzada bajo condiciones de estrés hídrico ( $Y_i$ ). La estimación de estas pérdidas se hace con referencia a los costos de producción por

producto, reportados por instituciones oficiales. Para ampliar la implementación de la metodología de estimación de impactos por desastres, se requiere información local sobre valores de reposición de animales y costos de recuperación asumidos por el productor (alimentación suplementaria, pastoreo en zonas no convencionales, entre otros).

### ***Limitaciones de la evaluación de impactos de sequía***

Es importante mencionar que esta metodología debe hacer suposiciones y definir límites para su interpretación, ya que la producción del sector agrícola está sujeta a variaciones anuales producto de múltiples circunstancias que no necesariamente se relacionan con la ocurrencia de eventos amenazantes, como lo son las variaciones en el mercado, cambios en la demanda, la variabilidad normal del clima o brotes de enfermedades. La FAO hace las siguientes consideraciones que se deben aplicar en este estudio:

- El uso de la producción esperada implica que la cosecha resultante es producto de las condiciones impuestas por la sequía, y ninguno de los factores que no está relacionado con la sequía (mercado, enfermedades, oferta/demanda) tiene un efecto significativo.
- El impacto de los desastres en la producción se asume por completo en el mismo año en el que el evento ocurre, y no se considera la acumulación de impactos para eventos que ocurran en años sucesivos.

En conclusión, la metodología de evaluación de impactos desarrollada por la FAO ofrece una base para fortalecer las instituciones nacionales y sus capacidades para monitorear y registrar información relacionada a daños y pérdidas causadas por desastres (FAO, 2017, p. 120). Al adoptarla en el presente estudio se busca apoyar la implementación de esta metodología en Uruguay.

### **1.11 Alcance de la metodología**

La metodología de evaluación de riesgo de sequías pretende evaluar las pérdidas en la producción potencial de cultivos expuestos a sequías. Esto es lo mismo que evaluar la disminución en el rendimiento de los cultivos bajo condiciones de estrés hídrico, aplicando la metodología de dinámica de respuesta de las plantas a la disponibilidad de

agua. Esta metodología no considera cualquier otro efecto adverso de las sequías sobre sectores diferentes al agrícola. Al definir el alcance de la metodología a la estimación de pérdidas en el sector agrícola, esta metodología no considera pérdidas o afectaciones de vidas humanas. Incluso, la presente metodología no considera efectos sobre la disponibilidad de agua para suministro de agua potable, generación de energía o dinámicas del agua subterránea.

Otras consideraciones sobre el alcance de la metodología son:

- La metodología de amenaza por sequía contempla en su alcance la generación estocástica de series de precipitación y temperatura (proceso estadístico de simulación del clima a partir de registros históricos). La modelación de otras variables climáticas (humedad, radiación, velocidad del viento) implica el uso de modelos complejos de circulación atmosférica e interacción de sistemas terrestres, que no está dentro del alcance de este estudio.
- El efecto del cambio climático se considera únicamente para las proyecciones de precipitación y temperatura. Los modelos de circulación global siempre brindan proyecciones de estas dos variables, y en pocos casos brindan información sobre otros parámetros climáticos (humedad, radiación, velocidad del viento) al ser parámetros complejos que responden a interacciones físicas y químicas de los modelos acoplados de atmósfera-océano-superficie terrestre-hielo oceánico.
- En la creación del modelo de exposición, la selección de los productos se hizo a partir del nivel de detalle de la información que se tenía disponible, además de considerar los cultivos más importantes y representativos de la economía del país, tanto en términos de subsistencia como producción con fines comerciales.
- Este modelo se enfoca en la escala nacional, por lo que no es posible diferenciar de forma directa áreas cultivadas para subsistencia o explotación agroindustrial. El modelo no está en la capacidad de diferenciar tipos de pasturas naturales.
- La base de datos de cultivos generada en este estudio también incluye las prácticas agrícolas típicas de la región. El modelo de exposición incluye detalles como las épocas de primera y segunda siembra, ajustando las áreas y duración del ciclo de crecimiento del cultivo en cada caso. Estos modelos no consideran la rotación de cultivos. En el caso de cultivos permanentes, se considera que los

cultivos están en etapa productiva, es decir, los árboles o viñedos ya completaron su crecimiento vegetativo.

- El modelo de vulnerabilidad de este estudio sigue la metodología de cálculo de rendimiento de productos agrícolas propuesta por la FAO. En el marco de este estudio, la vulnerabilidad se define en términos de la pérdida de rendimiento que sufre el cultivo durante un período prolongado de escasez de agua. Dado que se aplica un modelo agronómico de respuesta de cultivos, no se emplearán curvas o funciones de vulnerabilidad.
- La estimación de impactos económicos para el sector agrícola se limita a la estimación de pérdidas asociadas a la diferencia entre la cosecha óptima y la alcanzada bajo condiciones de estrés hídrico, valuadas según costos de producción. No se consideran pérdidas asociadas con disminución en la calidad del producto, que puede implicar un menor precio de venta. Las pérdidas se suponen que son producto del evento amenazante y no considera factores externos como variaciones del mercado, brotes de enfermedades, entre otros.
- La metodología hace uso de rendimientos de producción (total de cosecha producida en toneladas por unidad de área en hectáreas) para las condiciones locales. Estos rendimientos, obtenidos de fuentes oficiales, son rendimientos de referencia que permiten verificar los resultados de rendimiento obtenidos con el modelo para estimar las pérdidas. Sin embargo, cabe resaltar que dichos rendimientos se asumen estáticos en el modelo dado que no se tienen en cuenta las mejores prácticas agrícolas que en un futuro puedan adoptarse y que resulten en un incremento del rendimiento de los cultivos.

## **1.12 Interpretación de los resultados**

A continuación, se hace una breve explicación de la correcta interpretación y lectura de los resultados obtenidos en la evaluación de riesgo por sequía.

### **1.12.1 Pérdida máxima probable (PML)**

El principal resultado de este estudio es la curva de pérdidas máximas probables, o curva de PML (Probable Maximum Loss). Esta curva indica la relación entre las pérdidas y un



periodo de retorno (de la pérdida y no del evento amenazante). De esta curva se pueden definir valores de pérdida probable para ciertos periodos de retorno (por ejemplo 20, 50, 100 y 200 años). La selección del periodo de retorno de la PML depende exclusivamente de la aversión al riesgo del tomador de decisiones.

La siguiente gráfica (Figura 11) es un ejemplo de la curva de PML, en donde a partir de un período de retorno seleccionado en el eje horizontal, que en este caso corresponde a 100 años, se puede determinar el valor de la pérdida reportada en el eje vertical, lo que indica que esta pérdida ocurrirá una vez en promedio cada 100 años.

Para una acertada comunicación de los resultados de riesgo, se prefiere presentar como resultado la curva de *Pérdida vs. Periodo de retorno* sobre la curva de *Pérdida vs. Tasa de excedencia* llamada curva de excedencia de pérdidas, porque se considera que es más claro entender el significado del periodo de retorno de un valor de pérdida de, por ejemplo, 200 años, al de una tasa de excedencia correspondiente de 0.005 (considerando que el periodo de retorno es el inverso de la tasa de excedencia).

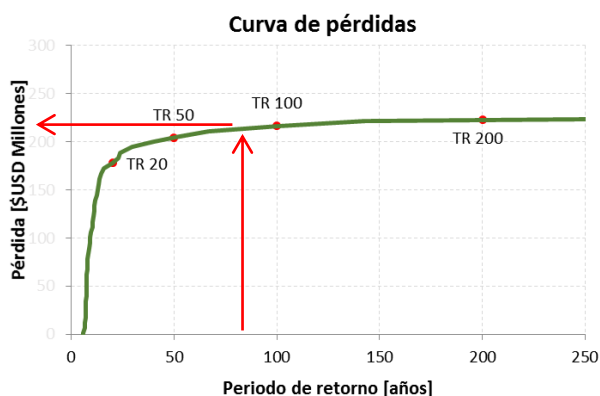


Figura 11. Ejemplo de curva de PML

### 1.12.2 Probabilidad de excedencia de pérdidas en un año

Esta curva indica cuál es la probabilidad de exceder un cierto valor de pérdida en un intervalo de tiempo, determinado como la vida útil. Considerando que los cultivos típicamente tienen una ventana de exposición de un año, al ser cultivos transitorios que se reemplazan anualmente o en el caso de los cultivos permanentes para los cuales se considera un periodo de producción anual, esta curva indica la probabilidad de superar un cierto nivel de pérdida en el próximo año.

La siguiente gráfica (Figura 12) es un ejemplo de probabilidad de excedencia del valor de la pérdida en el año inmediatamente siguiente, en donde a partir de un valor de pérdida seleccionado en el eje horizontal, que en este caso corresponde a \$100 millones de dólares, se puede determinar la probabilidad de que ese valor sea superado en el próximo año reportada en el eje vertical, lo que indica que hay una probabilidad del 10% de que en el siguiente año se supere una pérdida de \$100 millones de dólares.

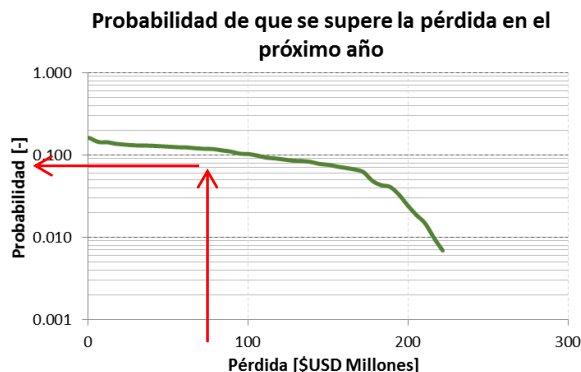


Figura 12. Ejemplo de curva de probabilidad de excedencia de pérdidas en un año.

### 1.12.3 Probabilidad de excedencia de pérdidas en el próximo evento de sequía

Esta curva indica cuál es la probabilidad de exceder un cierto valor de pérdida tras la ocurrencia del próximo evento de sequía, o de un evento tomado al azar. Es diferente a la curva anterior, que indica la probabilidad de superar una cierta pérdida el siguiente año, porque esta curva no considera el tiempo entre eventos amenazantes. Por el contrario, considera la probabilidad de que las pérdidas asociadas a un evento superen un cierto valor, comparado con las pérdidas de cada sequía dentro del conjunto total de eventos simulados.

La gráfica presentada a continuación (Figura 13) es un ejemplo de probabilidad de excedencia del valor de la pérdida en un siguiente evento de sequía, en donde a partir de un valor de pérdida seleccionado en el eje horizontal, que en este caso corresponde a \$100 millones de dólares, se puede determinar la probabilidad de que ese valor sea mayor en el próximo evento reportada en el eje vertical, lo que indica que hay una probabilidad del 60% de que en el siguiente evento de sequía se supere esta pérdida de \$100 millones de dólares.

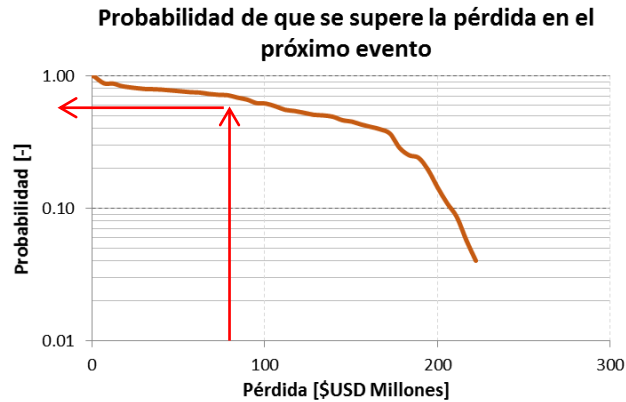


Figura 13. Ejemplo de curva de probabilidad de excedencia de pérdida en el próximo evento

#### 1.12.4 Pérdida anual esperada (PAE)

Como ya se mencionó, la PAE se considera como el indicador más robusto de riesgo debido a que determina la esperanza matemática de las pérdidas en una base anual y es insensible a la incertidumbre. Este valor representa la también llamada prima pura de riesgo en el sector de los seguros y es la anualización de todas las pérdidas que se tendrán a futuro, y por lo tanto equivaldría al valor que se tendría que pagar cada año para cubrir dichas pérdidas.

El análisis de los resultados de riesgo por sequía para los cultivos evaluados incluye la comparación de pérdidas anuales esperadas, en términos totales y relativos al valor expuesto, para cada uno de los escenarios de cambio climático modelados como se muestra en la siguiente gráfica de ejemplo. Esta comparación es útil para evaluar el efecto que tiene el cambio en precipitación, en términos de incrementos o disminución de lluvias, y de temperatura, en términos de aumento de la temperatura del aire, en el riesgo para los cultivos expuestos. Se puede observar que la condición actual (simulación base) reporta el menor valor relativo que se pierde cada año a causa de eventos de sequía.

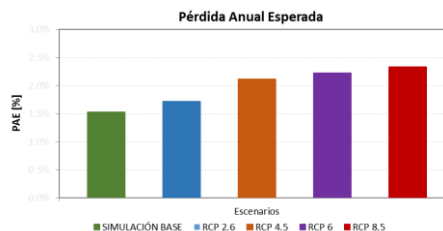


Figura 14. Ejemplo de PAE para los diferentes escenarios climáticos modelados

### 1.13 Drought Pro

Drought Pro es un software desarrollado por el grupo consultor, cuyo objetivo es la evaluación de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo por sequía. Permite estimar las pérdidas en los cultivos expuestos a eventos de sequía, haciendo uso de modelos de vulnerabilidad que relacionan el déficit de agua disponible para el cultivo con su crecimiento y producción de cosecha, y la vulnerabilidad del sector pecuario en términos de la disminución de la capacidad de carga de la pastura. En la Figura 14 se observa una ventana ejemplo del programa Drought Pro para la evaluación del riesgo por sequía.

Drought Pro permite almacenar, editar y actualizar la información de amenazas, exposición, vulnerabilidad y riesgo. Este software es una plataforma independiente, desarrollada con herramientas de programación avanzadas.

Drought Pro integra los módulos de amenaza con los módulos de exposición y vulnerabilidad para hacer una estimación de riesgo, que se presenta en términos de pérdidas económicas o de producción, para el sector agrícola y pecuario. Para calcular el riesgo por sequía en el sector agrícola en primer lugar, se modela la amenaza a partir de los registros históricos de precipitación y temperatura, con el fin de generar series futuras correlacionadas de parámetros climáticos e identificar condiciones de sequía a muy largo plazo. Posteriormente, se ingresa la base de datos de elementos expuestos con datos sobre ubicación, características de los cultivos (parámetros propios, tipo y estacionalidad), área, productividad y costo de producción de cada unidad de tierra cultivada. Luego, la vulnerabilidad de los cultivos se define a partir de parámetros fenológicos y físicos que representan el desarrollo de los cultivos y permiten estimar la diferencia entre la producción óptima de rendimiento (si no hay límites para agua y nutrientes) y producción bajo déficit hídrico. Por último, el riesgo de sequía agrícola se modela en términos de pérdidas económicas derivadas de la pérdida de rendimiento debido a la escasez de agua. El riesgo se expresa en términos de la curva de excedencia de pérdidas, la pérdida anual esperada y las pérdidas máximas probables; métricas de riesgo que son útiles para los procesos de toma de decisiones. En el caso del cálculo de riesgo del sector pecuario se ingresa la información asociada a la exposición en términos de pasturas y stock ganadero y el programa evalúa su vulnerabilidad en términos de la reducción de capacidad de carga de la pastura natural.

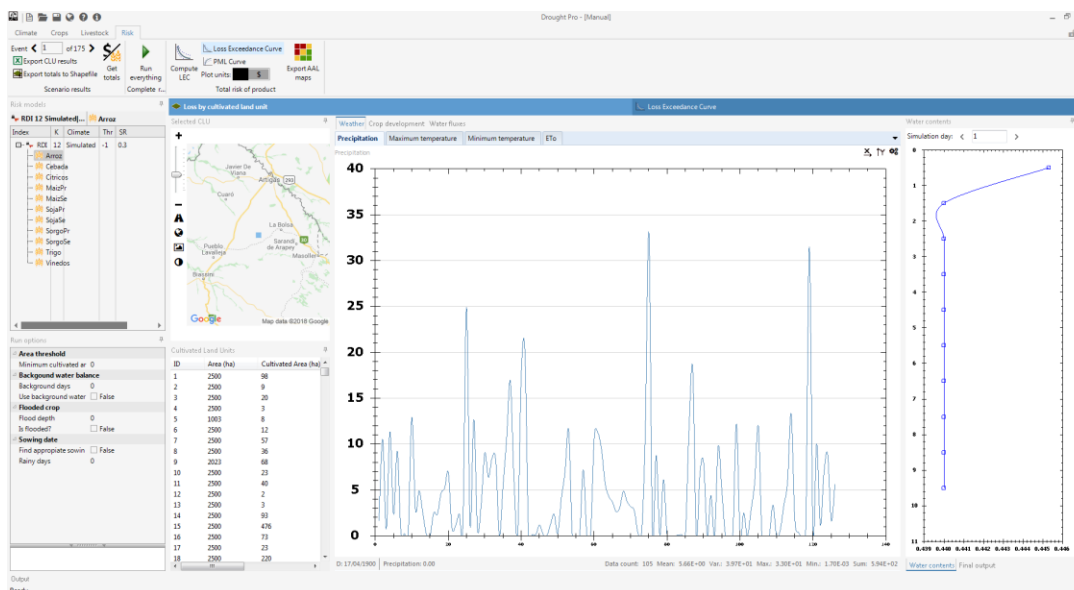


Figura 15. Software Drought Pro para estimación de pérdidas en producción agrícola por sequía

Drought Pro calcula para múltiples escenarios de clima y cultivos las principales métricas de riesgo de forma simultánea. Se obtienen entonces resultados tanto para el portafolio completo de cultivos, como desagregado por producto. Las actividades de transferencia de conocimiento se enfocan en capacitar a los interesados en la modelación probabilista de riesgo por sequía, en el uso de todos los módulos implementados en Drought Pro.

Drought Pro es un sistema realizado por INGENIAR para llevar a cabo estudios especializados de riesgo por sequía con un enfoque probabilista compatible con los demás módulos de la plataforma CAPRA-NG de INGENIAR (Next Generation). Este programa (Bernal et. al., 2018) es de propiedad de INGENIAR. ©INGENIAR CAD/CAE Ltda. 2018. Su uso puede ser facilitado y acordado con sus autores, con fines académicos y no comerciales.

## MODELACIÓN PROBABILISTA DE LA AMENAZA POR SEQUÍA

---

Las sequías agrícolas ocurren cuando el contenido de agua del suelo no satisface la demanda de agua de los cultivos, hay un aumento de la evaporación del suelo y la transpiración de la planta. Así, los escenarios considerados para la definición de la amenaza consisten en eventos de condiciones continuas y simultáneas de déficit de precipitación y alta temperatura. Para este estudio, el componente de amenaza para la evaluación probabilista del riesgo por sequías agrícolas se define como un conjunto de escenarios estocásticos, colectivamente exhaustivos y mutuamente excluyentes. Estos escenarios describen la distribución espacial, la frecuencia de ocurrencia y la aleatoriedad de la intensidad de las sequías en la región de interés. Los escenarios de sequía se derivan de la simulación estocástica de las condiciones meteorológicas (simulación de las series de lluvias y temperaturas), después de lo cual la identificación de las sequías se realiza mediante índices. En este documento se presenta el resultado detallado de la modelación de la amenaza de sequía para Uruguay, siguiendo la metodología propuesta por el consultor que se muestra de forma esquemática en la Figura 16.

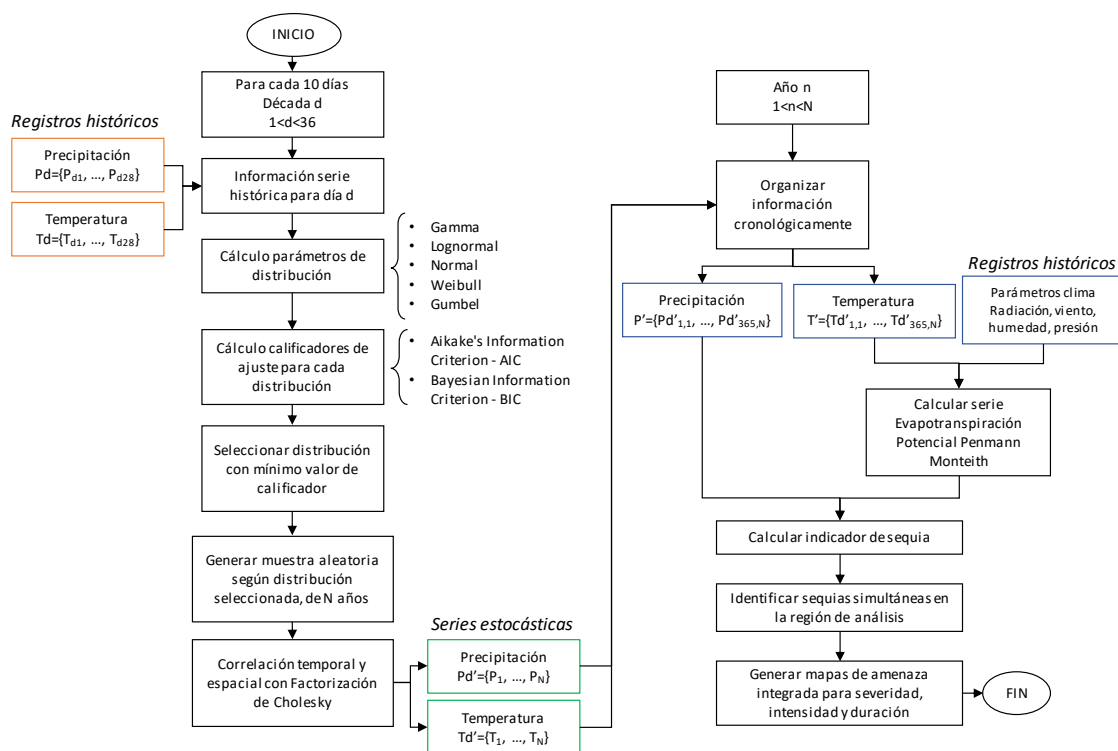


Figura 16. Esquema de metodología de estimación de la amenaza por sequía

El paso preliminar en la generación de eventos de amenaza de sequía es la definición de la accesibilidad a los registros de datos climáticos históricos, para verificar qué parámetros meteorológicos están disponibles y qué índices de sequía pueden ser considerados en la metodología (Ver Sección 0) Después de una evaluación de la calidad de los registros meteorológicos, se generan series estocásticas de parámetros climáticos ajustando una distribución de probabilidad para cada día del año y para cada estación en el área bajo estudio. Las series aleatorias resultantes se ajustan entonces mediante una correlación temporal y espacial (Ver Sección 1.15). Posteriormente, se calcula la evapotranspiración potencial (Ver Sección 1.16) que es insumo para calcular los índices de sequía para cada estación (Ver Sección 1.17), durante todo el período de simulación, e identificar los episodios de sequía que ocurren simultáneamente en la región. Finalmente, se realiza una interpolación espacial para cada uno de los eventos de sequía identificada, lo que da lugar a escenarios de sequía que cubren el área de estudio completa y no sólo las estaciones. Con un gran número de eventos regionales de sequía,

los mapas de amenaza integrada se pueden calcular con un enfoque de evaluación probabilista (Ver Sección 10).

Finalmente, la misma metodología se aplica para evaluar el efecto del cambio climático en la severidad y duración de las sequías probables sobre el territorio uruguayo. En la Sección 1.19 se explica en detalle la selección del modelo de circulación global que se utiliza como insumo al modelo, además de los efectos que tiene la proyección del cambio en la temperatura y en la precipitación del modelo escogido en la amenaza por sequía en Uruguay.

### **1.14 Información climática**

La metodología implementada en este estudio utiliza datos climáticos históricos de la región de interés, principalmente la acumulación diaria de precipitación y mediciones de temperatura máxima, mínima y media. Se prefiere el uso de datos observados en estaciones dado que son mediciones directas y usualmente tienen periodos de registro largos (en comparación con los registros de radar o de satélite). Sin embargo, la metodología propuesta permite también el uso de datos recopilados por teledetección, los cuales son útiles principalmente en caso de que no se puedan obtener registros históricos de las estaciones, para complementar valores faltantes, ante la existencia de datos de baja calidad o la ausencia de estaciones operativas.

Los datos climáticos históricos deben obtenerse para el período de registro más largo posible y el mayor número de estaciones disponibles en el área de interés. Primero, las estaciones con pocos años de observación son retiradas de la base de datos, verificando que la ubicación de las estaciones restantes está distribuida uniformemente. Posteriormente, se evalúa la consistencia de los registros eliminando valores extremos. Las observaciones de precipitación y temperatura resultantes se usan para generar series climáticas correlacionadas para estimar eventos de sequía que aún no han ocurrido.

Para el estudio de las sequías en Uruguay se consultaron tanto el Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET), como bases de datos internacionales, para complementar la información primaria de registros históricos de precipitación y temperatura.



### 1.14.1 Información de agencias nacionales

El Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET) es la entidad encargada de realizar el monitoreo de las condiciones atmosféricas en Uruguay. Este instituto cuenta con un gran número de estaciones activas, incluyendo estaciones pluviométricas, convencionales y automáticas, correspondientes a la Red Pluviométrica Nacional y la Red Meteorológica Nacional. En una primera consulta, no fue posible obtener acceso libre a la información de estas estaciones.

Adicionalmente, el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) de Uruguay cuenta con cinco Estaciones meteorológicas convencionales algunas con registro desde 1967 como la de la Estación Experimental La Estanzuela y 8 estaciones automáticas<sup>5</sup>. Si bien la información histórica es buena, la representatividad de las cinco estaciones meteorológicas del INIA a nivel de todo el territorio nacional no es suficiente. Con respecto a las estaciones automáticas, estas han sido recientemente instaladas, siendo la más antigua instalada en el año 2000, y la más reciente en el 2013; en consecuencia, el registro más extenso es de 17 años. Para análisis estadísticos de la información climática se requieren al menos 30 años de registros continuos, para reducir la incertidumbre de las mediciones.

El grupo de Inundación y Drenaje Urbano (IDU) de la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA) suministró vía correo electrónico el 4 de octubre de 2018 información con valores diarios de precipitación medidas en 50 estaciones entre 1981 y 2009. Esta información es de muy buena calidad ya que cuenta con los registros diarios completos para un gran número de estaciones; sin embargo, la información no está completa ya que no se suministró información sobre registros de temperatura, parámetro importante para la evaluación probabilista de sequía.

---

<sup>5</sup> Los registros diarios de las estaciones agroclimáticas del INIA se publican, a paso diario, en el siguiente link: <http://www.inia.uy/gras/Clima/Estaciones-agroclim%C3%A1ticas-INIA/observaciones-agrometeorol%C3%B3gicas>

## 1.14.2 Otras fuentes de información

### 1.14.2.1 Información del Centro Nacional de Información Ambiental de Estados Unidos

La base de datos del Centro Nacional de Información Ambiental de Estados Unidos (National Centers for Environmental Information (NCEI) en inglés) cuenta con información de 9,000 estaciones reportadas por 195 países pertenecientes a la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Entre los parámetros disponibles se encuentran valores diarios de precipitación total, temperatura (máxima, media y mínima), presión atmosférica, visibilidad, velocidad y dirección del viento, entre otras<sup>6</sup>. Esta base de datos reporta 18 estaciones hidrometeorológicas en Uruguay que son administradas por el INUMET y se muestran en la Figura 17. Los puntos en verde indican que tiene más del 90% de los registros completos, los puntos amarillos indican que tienen entre 60 y 90% de los datos y los puntos en rojo indican que tienen disponibles menos del 60% de los datos.

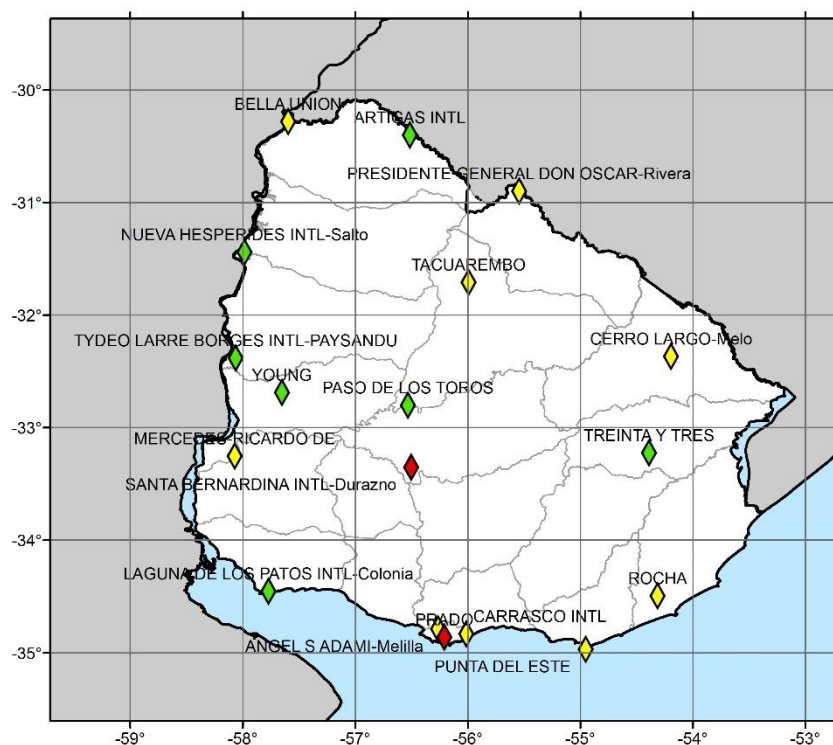


Figura 17. Mapa de localización estaciones de Uruguay disponibles en NCDC

<sup>6</sup> Disponible en: <http://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/cdo>.

La Figura 18 muestra la fracción, en porcentaje, del número de datos disponibles por estación en la base de datos de National Climatic Data Center (NCDC) de Estados Unidos del periodo entre el primero de enero de 1980 y el 31 de diciembre de 2010. Se puede ver que, de las 18 estaciones, únicamente 7 estaciones tienen más del 90% de los datos completos (estaciones en verde en la Figura 17). Esto implica que la información obtenida de estaciones no es suficiente para adelantar un análisis estadístico. En el Anexo A. 2 se presentan las gráficas de series de tiempo para la precipitación total para las 18 estaciones disponibles. En estas gráficas se puede ver la información faltante en bloques de vacíos, lo que hace muy complicado adelantar un proceso de completitud resultando en una alta incertidumbre en la información de entrada al modelo.

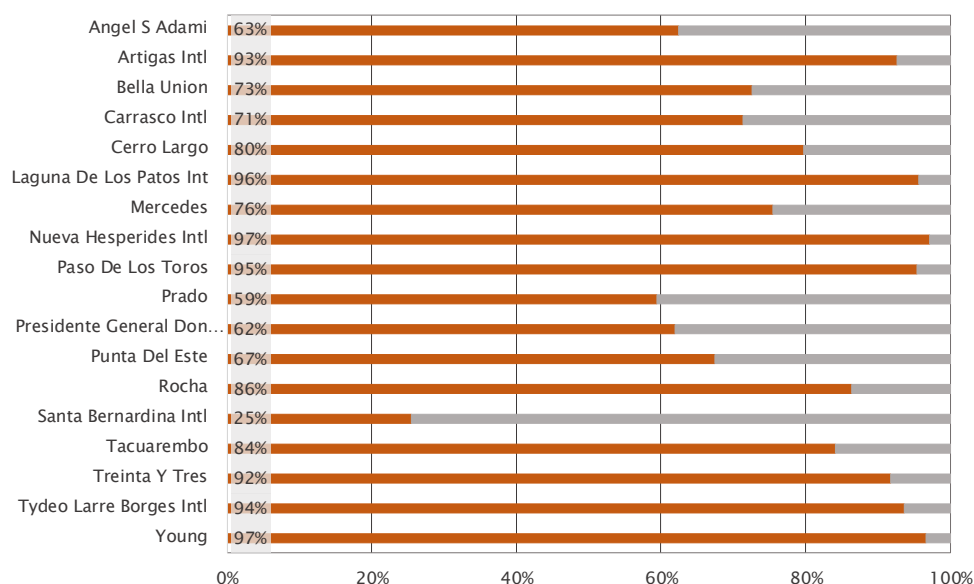


Figura 18. Porcentaje de valores completos de estaciones Uruguay disponibles en NCDC

Para evitar el uso de registros históricos de precipitación y temperatura incompletos y de baja calidad, este estudio consulta bases de datos globales para obtener información de precipitación total diaria y temperatura media, máxima y mínima diaria. Los datasets que se consultan en este estudio se presentan a continuación.

#### 1.14.2.2 CHIRPS

La base de datos CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) cuenta con información global (50°S-50°N para todas las longitudes) de más de 30

años de registros de precipitación iniciando en el año 1981 (Funk et al., 2015). Esta base de datos incorpora información satelital (medida en resolución de 0.5°) con información de estaciones para generar series de tiempo para el análisis de tendencias y el monitoreo de sequías estacionales. La información global diaria en la versión 2.0 se puede descargar gratis de <ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0>. Para este estudio se utilizó la información en formato raster (archivos de extensión tiff) y de resolución 0.5°x0.5°, la mejor disponible a la fecha<sup>7</sup>. En la Figura 19 se muestra el registro de precipitación total diaria para diferentes fechas en la zona de estudio, en las que se muestra la localización e intensidad de la lluvia diaria. La escala de colores indica precipitación diaria entre 0 (blanco) y 30 (azul oscuro) milímetros de lluvia. Las fechas fueron seleccionadas de forma aleatoria, para diferentes épocas del año para apreciar la variación temporal de la lluvia en la región. Entonces, se cuenta con información en la totalidad de área de estudio, completa para 30 años en la ventana de tiempo entre 1981 a 2010.

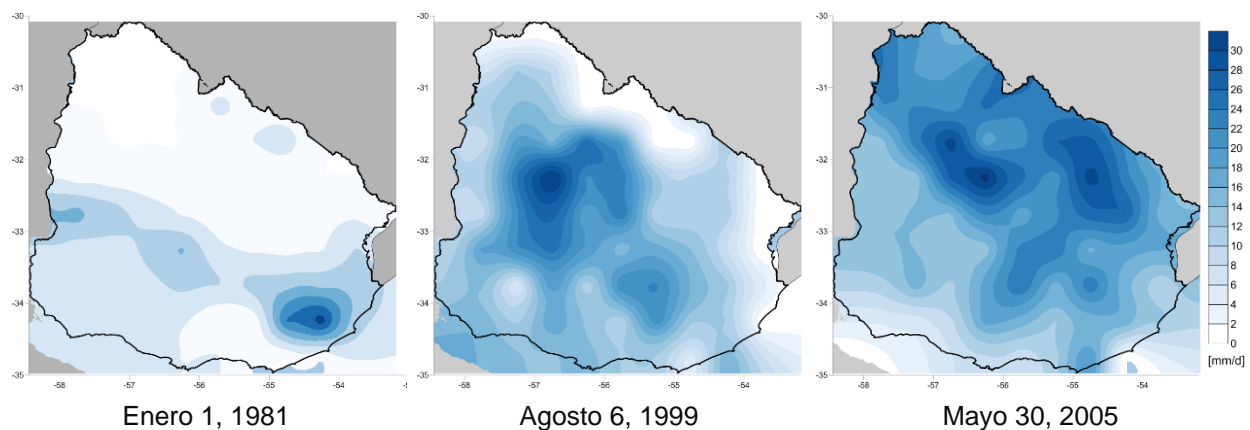


Figura 19. Registros de precipitación total diaria [mm/día] para fechas seleccionadas en el área de estudio

### 1.14.2.3 Universidad de Princeton

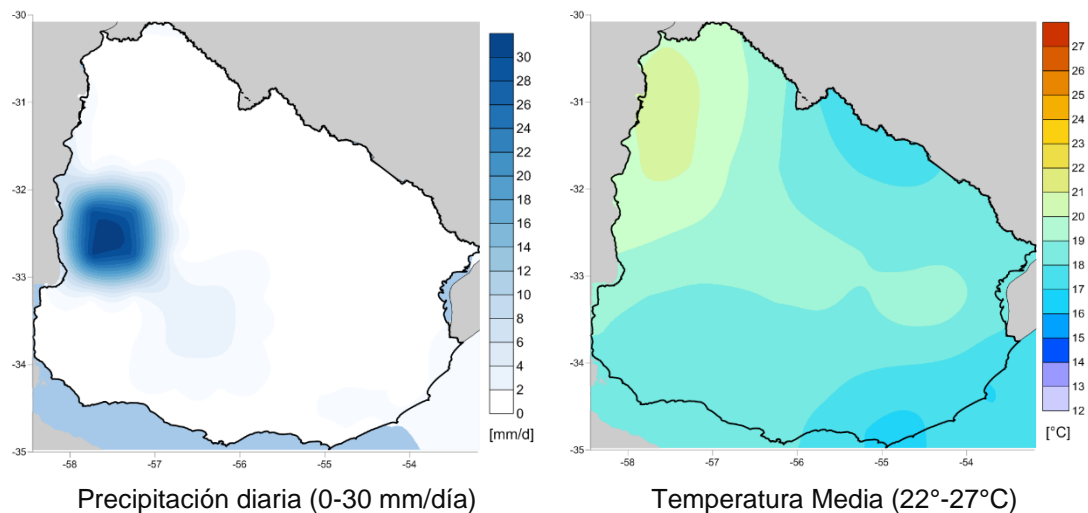
El Grupo de Investigación de Hidrología Terrestre de la Universidad de Princeton generó un dataset meteorológico global para la modelación en la superficie terrestre. Esta base de datos provee información meteorológica (que incluye precipitación y temperatura) cercana a la superficie, resultado de re-análisis de observaciones en el

<sup>7</sup> Fecha de consulta febrero de 2017.

periodo 1901-2012 (para la Versión 2), en mallas de resolución de 1°, 0.5° y 0.25°. La información global diaria en la versión 2.0 se puede descargar gratis de <http://hydrology.princeton.edu/data.pgf.php>. La información disponible está en formato NetCDF (archivos de extensión nc) y para este estudio se utilizaron las mallas de resolución 0.5°x0.5°, para comparar con el dataset de CHIRPS.

En la Figura 20 se muestra en el mapa del área de estudio, el registro precipitación diaria, y temperatura media, máxima y mínima para el 1ro de enero de 1981. Este es un ejemplo de un día, pero muestra que se cuenta con información en la totalidad de área de estudio, completa para 30 años en la ventana de tiempo entre 1981 a 2010.

Otra ventaja de la base de datos desarrollada por la Universidad de Princeton es que incluye múltiples parámetros climáticos, registrados en la misma resolución espacial y temporal. Los parámetros disponibles son precipitación, temperatura (media, mínima y máxima), radiación de onda corta y de onda larga, humedad específica, presión de aire en la superficie y velocidad del viento, que son ajustadas a los cambios de elevación. Estas variables son útiles para el cálculo de la evapotranspiración, que es un parámetro importante para la modelación de sequías y de la vulnerabilidad de los cultivos.



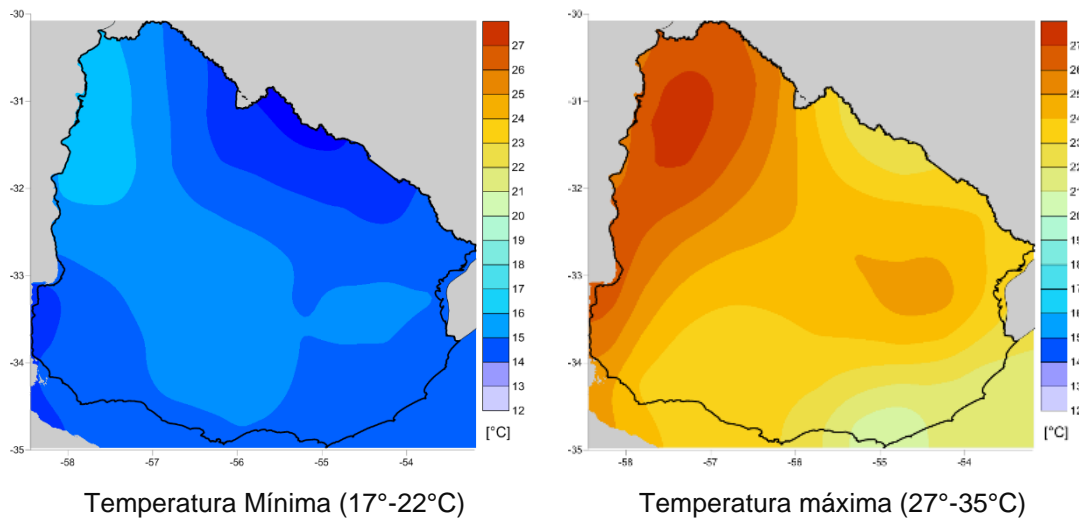


Figura 20. Registros de dataset Princeton de temperatura media, máxima y mínima para el día 01/01/1981 en el área de estudio.

### 1.14.3 Base de datos de información climática

Como se mostró en la sección anterior, la disponibilidad y acceso a la información climática oficial son limitados para este estudio. Por esta razón, la base de datos de registros climáticos utilizada en este estudio se generó a partir de información climática procesada por agencias internacionales como las bases de datos CHIRPS y de la Universidad de Princeton. Las ventajas de utilizar este tipo de base de datos incluyen que la información está completa en las dimensiones temporales y espaciales, son bases de datos usadas ampliamente por científicos a nivel mundial para el análisis del clima y de sequías, y se cuenta con múltiples parámetros climáticos para el cálculo de la evapotranspiración. En la Figura 21 **Error! Reference source not found.** se muestra la malla de puntos que compone la base de datos de información climática. En cada uno de los puntos de la malla se tiene información de precipitación total diaria de CHIRPS y temperatura (media, mínima y máxima), radiación solar (de onda corta y de onda larga), velocidad de viento, presión atmosférica y humedad específica del dataset de la Universidad de Princeton.

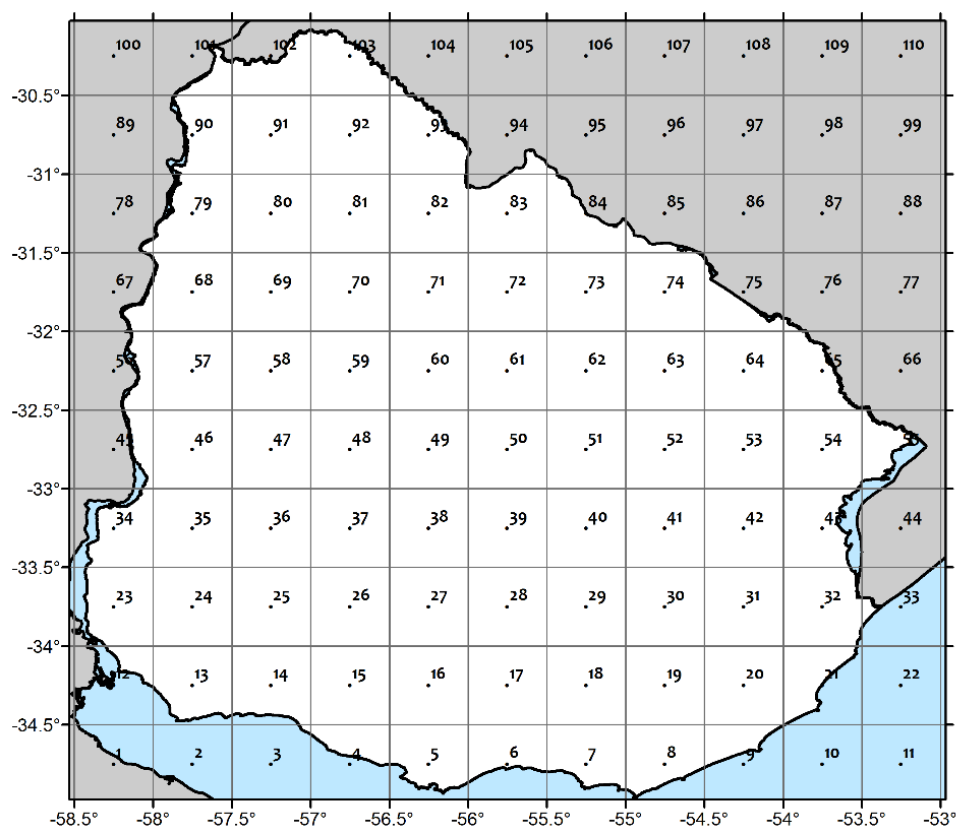


Figura 21 Malla de análisis 0.5°x0.5° para Uruguay

La ventana de tiempo seleccionada fue entre los años 1981 y 2010. Hay dos criterios principales para explicar que la ventana de tiempo de la información de parámetros de clima (precipitación y temperatura) sea entre 1981 y 2010. Primero, el dataset de CHIRPS inicia su registro en 1981, no publica valores de precipitación para una fecha anterior. Segundo, el rango de 30 años de 1981 a 2010 es considerado como una ventana válida para evaluar valores climatológicos normales y “*La nueva regla técnica sobre el Cálculo de las normales climatológicas reglamentarias*” aprobada por el Congreso Meteorológico Mundial<sup>8</sup> implica que todos los países van a empezar a utilizar el período 1981-2010 para sus análisis de clima local.

### 1.14.3.1 Precipitación

A partir de la información de la base de datos de CHIRPS, los valores medios de precipitación acumulada anual sobre Uruguay están entre 1000 y 1600 mm para el

<sup>8</sup> Para más información ver <https://public.wmo.int/es/media/news/nuevo-enfoque-de-dos-niveles-para-las-%E2%80%9Cnormales-climatol%C3%B3gicas%E2%80%9D>

periodo de 1981-2010. Los valores mínimos se localizan hacia el suroeste del país y los máximos hacia el noreste, como se muestra en la Figura 22.

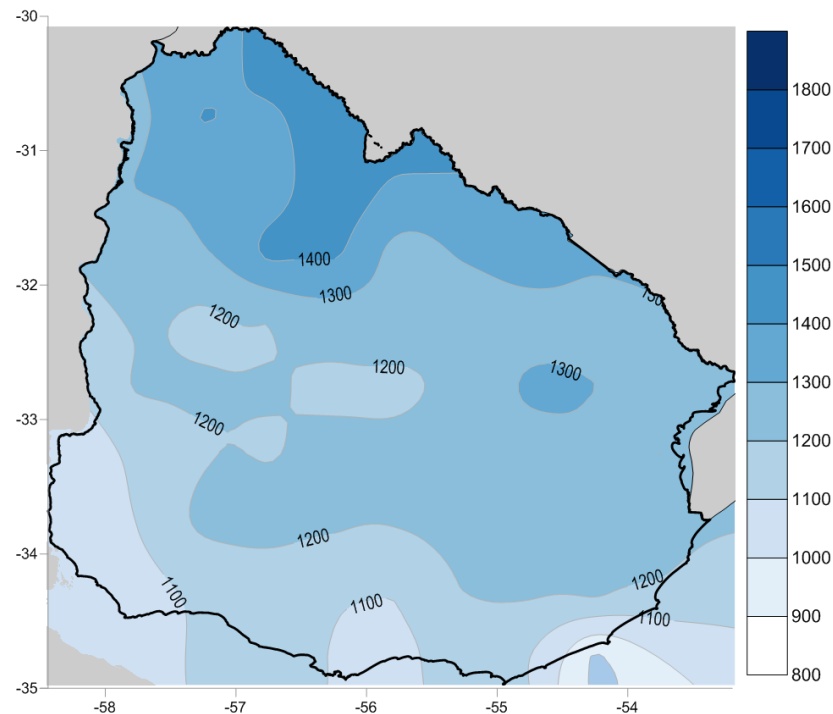


Figura 22 Mapa de precipitación acumulada anual (1981-2010) según base de datos CHIRPS

En la Figura 23 se muestra, para cada mes del año, la precipitación acumulada mensual registrada en la base de datos CHIRPS. En general, Uruguay presenta un régimen bimodal con dos temporadas de lluvias y dos temporadas secas al año. Los meses de precipitación más alta son marzo y abril con una segunda ocurrencia de lluvias de menor intensidad hacia octubre, mientras que los meses de menor precipitación son julio y agosto con una segunda ocurrencia de reducción en las lluvias hacia el mes de diciembre.



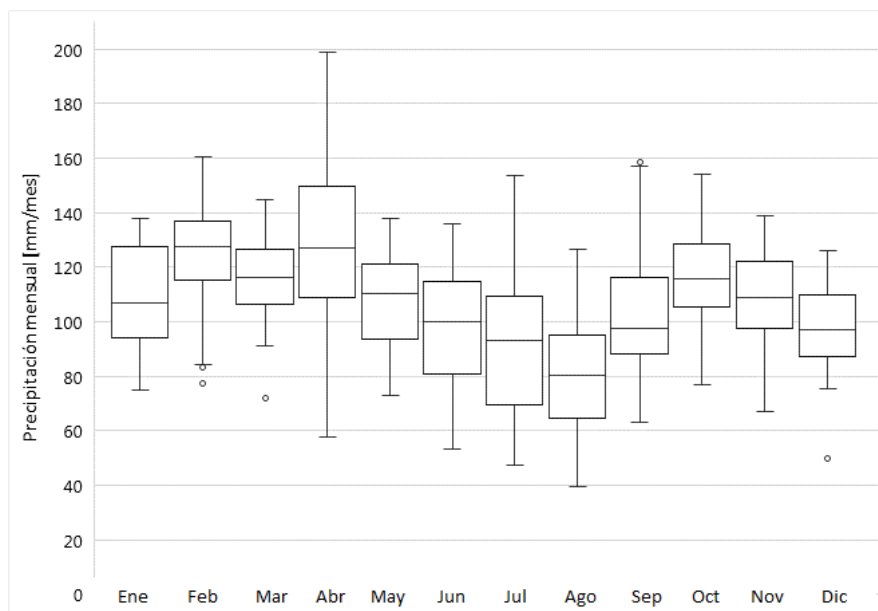
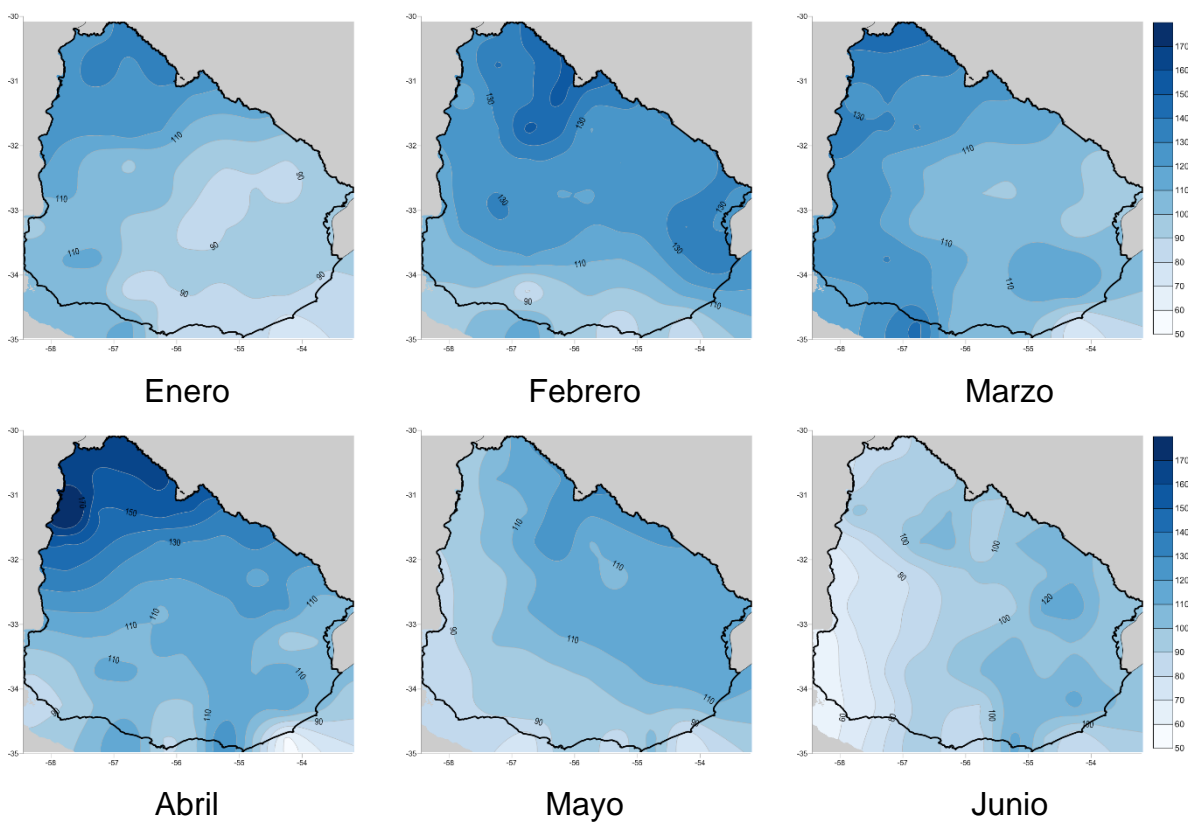


Figura 23 Diagrama de cajas de valores de precipitación mensual en (1981-2010) según base de datos CHIRPS



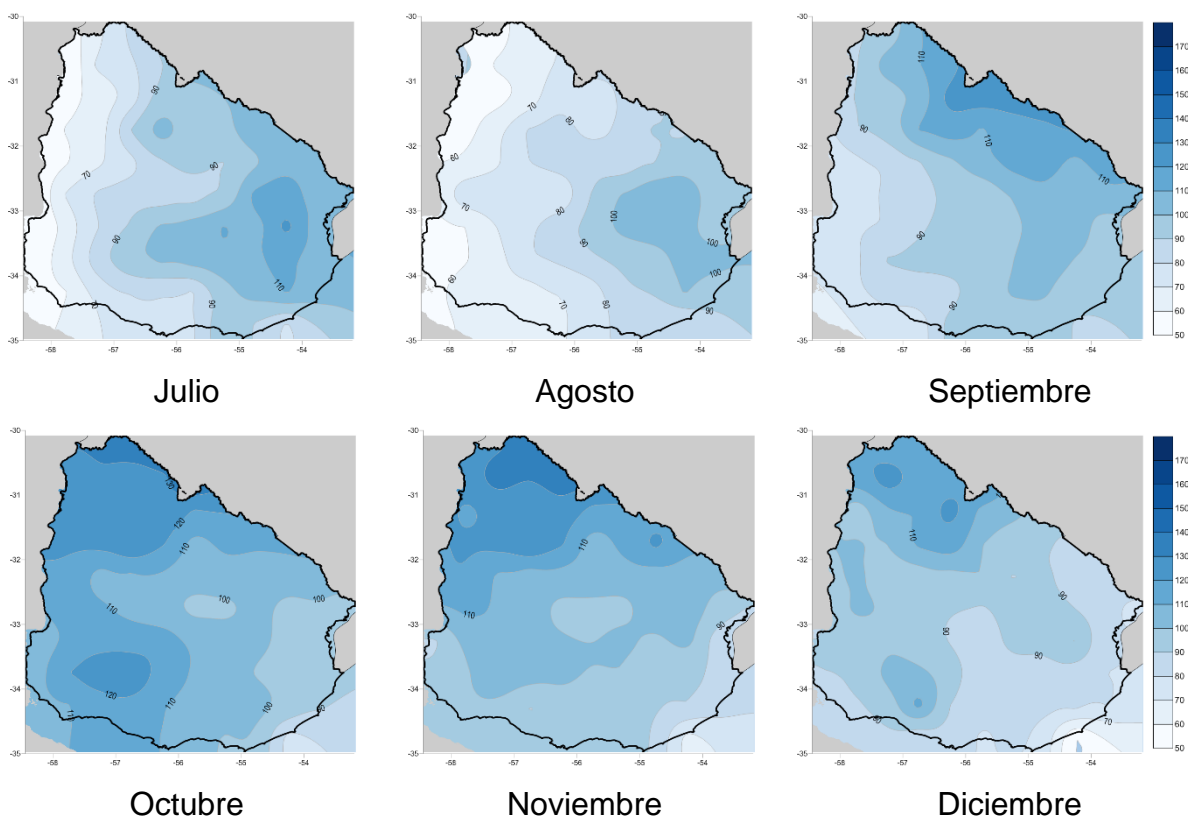


Figura 24 Mapas de precipitación media mensual (1981-2010) según base de datos CHIRPS

### 1.14.3.2 Temperatura

La temperatura media anual en Uruguay, según los registros de la base de datos de la Universidad de Princeton, es de 18°C. La temperatura media es más alta en el norte del país llegando hasta 20° (en el departamento de Artigas) y la temperatura media es más baja en el sureste del país con un valor de 16.5°C (en la costa del departamento Rocha). La temperatura máxima y mínima anual también presenta un gradiente creciente de sureste a noroeste. En la Figura 25 se muestra el mapa de temperatura media anual para todo el país y la Figura 26 muestra los mapas de temperatura máxima anual y mínima anual.

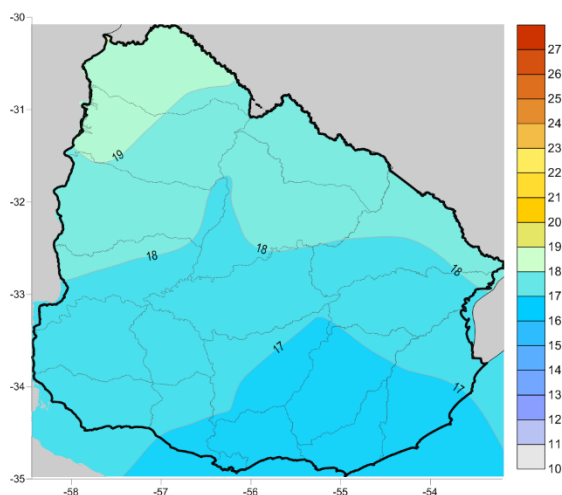


Figura 25 Mapa de temperatura media anual (1981-2010) según base de datos de la Universidad de Princeton

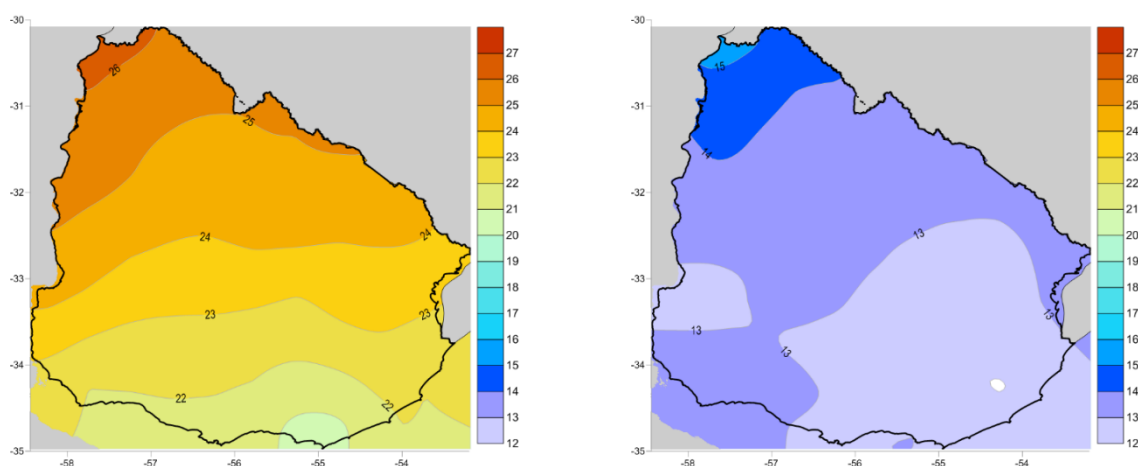


Figura 26 Mapa de temperatura máxima anual (izquierda) y mínima anual (derecha) (1981-2010) según base de datos de la Universidad de Princeton

En cuanto a la variación mensual, los meses más fríos son junio y julio, mientras que los meses más cálidos son enero y febrero, que corresponden a las estaciones de invierno y verano del hemisferio sur. Los mapas de temperatura por meses se presentan en la Figura 27. A partir de esta información de precipitación y temperatura para Uruguay, se generó la base de datos de información climática de entrada para el modelo de sequía. La base de datos tiene información diaria de precipitación total, temperatura media, temperatura máxima y mínima, desde 1981 a 2010 en 103 puntos o estaciones en tierra sobre una malla que cubre la totalidad del territorio uruguayo.

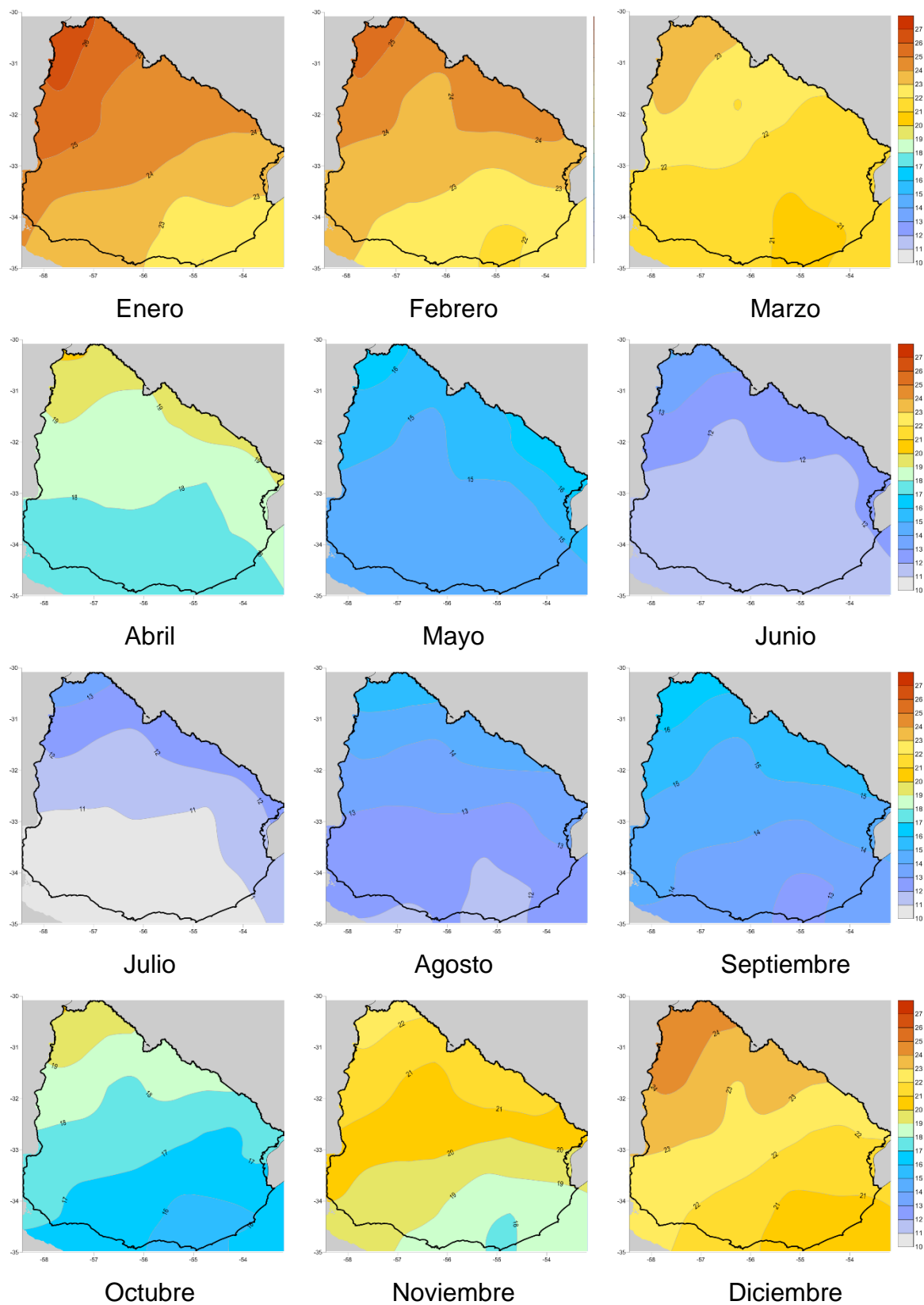


Figura 27. Mapas de temperatura media mensual (1981-2010) según base de datos de la Universidad de Princeton

## **1.15 Generación estocástica de series climáticas futuras**

La metodología propuesta utiliza distribuciones paramétricas de probabilidad para definir conjuntos de datos climáticos históricos y estimar la probabilidad de ocurrencia de un determinado valor de precipitación o temperatura fuera del rango de observaciones históricas. La metodología toma cada día o grupo de 10 días del año hidrológico en un análisis separado, y encuentra la distribución de probabilidad que se ajusta mejor a los registros históricos. Posteriormente, se generan números aleatorios para la precipitación diaria y la temperatura para un determinado número de años de simulación, usando los parámetros de las distribuciones seleccionadas. Estas series generadas aleatoriamente se correlacionan en el tiempo y en el espacio para representar las condiciones climáticas de la región de análisis. A continuación, se explica en detalle la metodología y se muestran los resultados para Uruguay.

### **1.15.1 Generación de series aleatorias**

El primer paso es seleccionar las funciones de distribución de probabilidad que pueden ser aplicadas a la modelación de cada variable. Se consideran distribuciones normalmente empleadas en ciencias atmosféricas como son Gamma, Lognormal, Normal, Weibull o Gumbel, entre otras. Posteriormente, para cada día del año, los parámetros de las distribuciones seleccionadas se estiman mediante el método de los momentos o de máxima verosimilitud.

El ajuste de las distribuciones de probabilidad se evalúa usando métodos cualitativos y cuantitativos. Los métodos cualitativos incluyen herramientas gráficas para discernir subjetivamente la bondad del ajuste. Se utiliza la superposición de la distribución paramétrica ajustada y el histograma de datos, gráficos cuantil-cuantil, gráficos de distribución acumulativa empírica y teórica (CDF), y gráficos de probabilidad-probabilidad o comparaciones de probabilidad acumulativa. La selección cualitativa se realiza con el Criterio de Información de Akaike (AIC, Akaike 1974) o el Criterio Bayesiano de Información (BIC, Schwarz 1978), que miden la calidad relativa de los modelos de distribución para un conjunto dado de datos. Está claro que los criterios AIC y BIC no dan ninguna indicación sobre la calidad del modelo, sino que es una comparación entre

la bondad de ajuste de cada modelo y su complejidad en términos de un valor de penalización que aumenta con el número creciente de parámetros ajustados (Banimahd & Khalili, 2013).

Numerosas alternativas de distribuciones de probabilidad se ponen a prueba para cada día del año hidrológico y cada variable climática. Un ejemplo de las gráficas para definir la selección cualitativa de la distribución de probabilidad que mejor se ajusta se muestra en la Figura 152, tanto para la temperatura media diaria (izquierda) como para la precipitación total diaria (derecha). El número de datos empíricos de cada gráfica es 300, que en este caso corresponden a 30 años de periodo de registro histórico por 10 días de datos diarios en el acumulado decadal.

Luego de definir la distribución de probabilidad más apropiada para la precipitación y la temperatura (media, máxima y mínima), para cada uno de los 365 días del año o grupo de 10 días consecutivos (decadales), se generan números aleatorios para un determinado número de años de simulación (del orden de 1,000 años o más). Así, se producen series aleatorias de datos climáticos para cada una de las estaciones en el área de estudio.

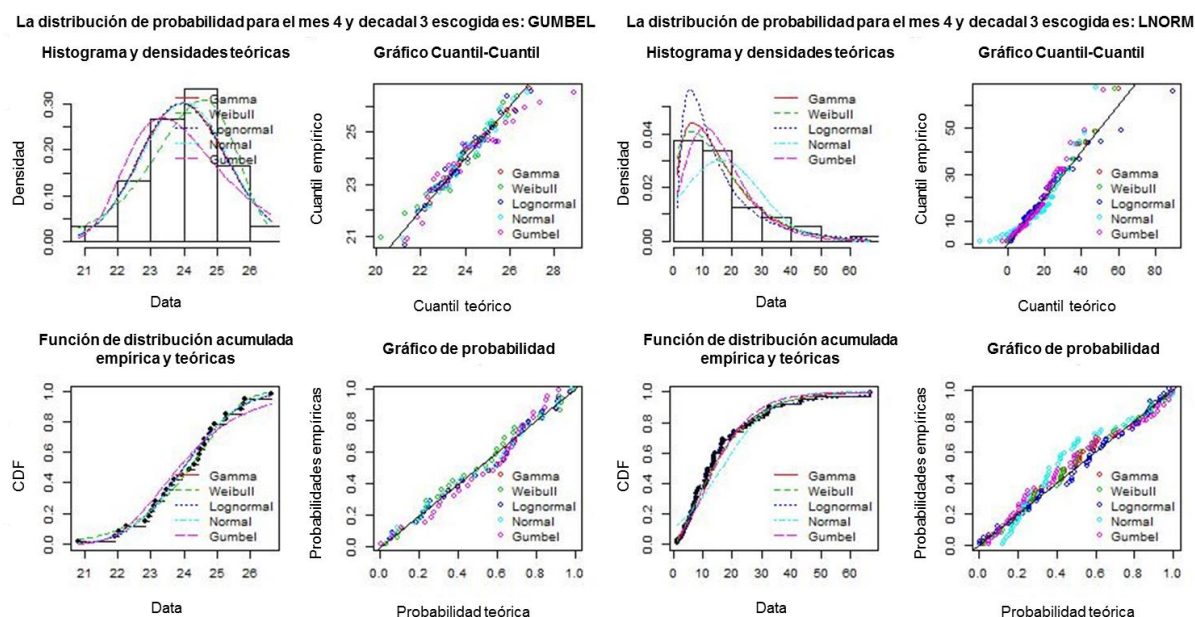


Figura 28. Ajuste de distribuciones de probabilidad para registros históricos del 1ro enero para un punto de la malla de análisis: Temperatura media (izquierda) y precipitación total diaria (derecha).

En cuanto a los resultados del ajuste de las distribuciones de probabilidad<sup>9</sup> a las series de variables climáticas se puede ver que para el caso de la precipitación la distribución que mayor número de veces se ajusta a los registros decadales en todas las estaciones es la log-normal seguida por la distribución Gamma. Para el caso de la temperatura la distribución que mejor se ajusta en la mayoría de los casos es la normal, seguida por la lognormal y la Gumbel. Es importante anotar que las distribuciones de probabilidad no varían significativamente por estación, pero si se presenta una variación en el tiempo. Por ejemplo, para el caso de la temperatura, las épocas de temperaturas más altas (enero y febrero) tienden a ajustarse a distribuciones tipo Gumbel. Para el caso de la precipitación, aunque en todas las épocas del año predomina el ajuste de la distribución lognormal, en épocas secas se presentan mayores casos de ajuste de la distribución Weibull.

Para evaluar el ajuste de las distribuciones de probabilidad se utilizó la prueba de ajuste con los coeficientes de Anderson-Darling (no está definida para distribuciones Pearson Tipo III o Logísticas) y Kolmogorov-Smirnov. Para definir si la muestra sigue una cierta distribución, se comparó el valor de significancia p-value con un nivel de 0.05, que implica que la probabilidad de concluir que los datos no siguen una distribución de probabilidad definida, cuando si siguen esa distribución, es del 5%. Al obtener valores de p-value por encima del nivel de significancia, no se puede rechazar la hipótesis nula ni concluir que los datos no se ajustan a la distribución considerada.

#### **1.15.1.1 Series de precipitación**

Como caso particular, para la generación estocástica de series de precipitación se debe considerar el efecto de los días de no lluvia para el ajuste de la función de distribución de probabilidad. En la Figura 29 se presenta el histograma de valores de precipitación diaria para 1) un día de temporada seca 2) un día de temporada de lluvias, registrados dentro del periodo 1981-2010. Se puede ver como para la temporada seca más del 95% de los datos se concentran en el valor 0, mientras que para la temporada de lluvias los días secos son menos del 10%. Esto implica que en el momento de la selección de una

---

<sup>9</sup> Se pueden consultar los resultados del ajuste de la distribución para cada variable para cada estación en los documentos disponibles en el link: <https://1drv.ms/f/s!AqMZbV1LfkWNhdNnm0aHIVFJdSZe1A>

distribución de probabilidad que mejor se ajuste a los valores de precipitación, se pueden tener inconvenientes cuando la mayoría de los valores son iguales a cero, lo que deriva en un mal ajuste de probabilidades. Por esta razón, para días en temporada seca se hace un procedimiento adicional para el ajuste de la distribución de probabilidad.

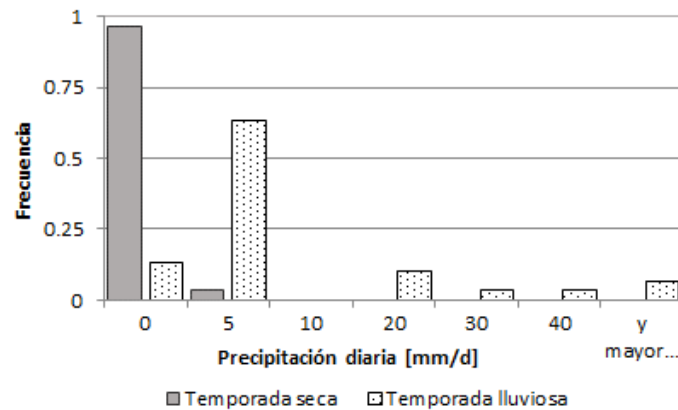


Figura 29 Histograma para valores de precipitación registrados en día de temporada seca y un día en temporada de lluvias.

La Figura 30 muestra las funciones de densidad de probabilidad y de probabilidad acumulada para el caso en que el número de días secos en la muestra sea muy alto. En ese caso, se divide la función de densidad de probabilidad en dos partes 1) cuando la precipitación es igual a cero ( $P_0$ ) 2) cuando la precipitación es mayor a cero ( $1-P_0$ ). La probabilidad de que ocurra un día seco se define como:

$$P_0 = \frac{n}{N} = \frac{\# \text{ días secos}}{\# \text{ días en la muestra}} \quad \text{Ec. 0-1}$$



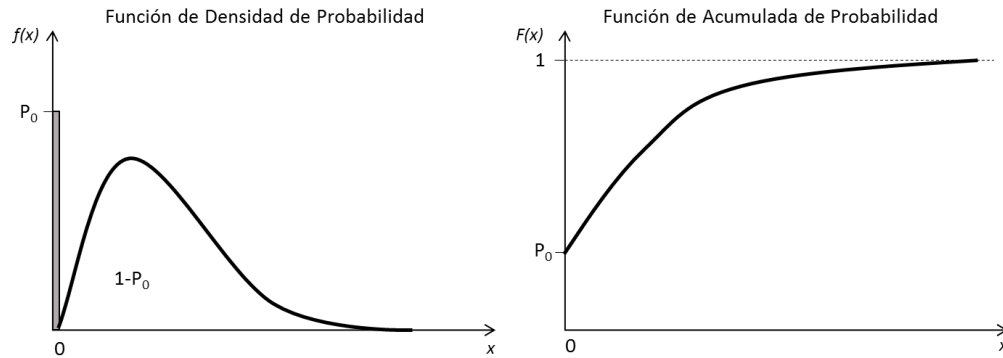


Figura 30 Funciones de densidad de probabilidad y probabilidad acumulada teniendo en cuenta  $p=0$

Al seguir este procedimiento, se obtienen series de precipitación que mantienen la relación histórica de días de no lluvia con respecto al total de días, según la temporada del régimen de lluvias. Si se utiliza la función de densidad de probabilidad sin hacer este ajuste, no se obtienen días secos en las series aleatorias.

### 1.15.2 Correlación de series

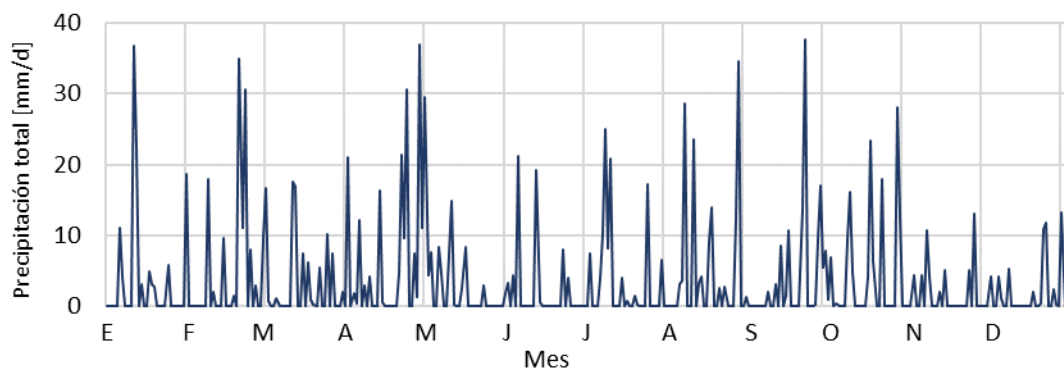
Enseguida, con el fin de incluir la correlación existente entre valores de precipitación y temperatura en periodos de tiempo sucesivos, se calcula la matriz de autocorrelación para cada una de las series aleatorias generadas. La autocorrelación temporal indica la correlación de una variable con sus valores pasados y futuros (Wilks, 2006). Además, se incluyen los efectos de la correlación espacial, que representan la aparición de datos simultáneos en múltiples estaciones del área de estudio, utilizando la matriz de autocorrelación espacial entre valores de las diferentes estaciones de registro.

El método de correlación utilizado en este estudio es la transformación o descomposición de Cholesky, el cual es un método gaussiano de descomposición para la solución de sistemas lineales de ecuaciones. Este método se basa en que una serie de variables no correlacionadas se pueden transformar en variables correlacionadas dadas sus covarianzas (que expresa la relación lineal entre variables). Esta transformación se hace a partir de la matriz de Cholesky que es la matriz que transforma las variables no correlacionadas en variables cuyas varianzas y covarianzas están definidas por la matriz de covarianzas de las series de precipitación y temperatura.

Las series de números aleatorios correlacionados son más suaves que las series aleatorias, ya que los valores adyacentes (en escalas temporales y espaciales) tienden a ser más parecidos que en series independientes. De esta manera, se evitan cambios abruptos en los valores de precipitación y temperatura para días consecutivos.

#### Relación series estocásticas de precipitación y temperatura

La Figura 31 **Error! Reference source not found.** muestra las series sintéticas de precipitación y temperatura, simuladas mediante el procedimiento descrito anteriormente, para una estación de la malla de análisis de Uruguay (Longitud: -56.25, Latitud: -32.75). Se modelaron 1,000 años equivalentes. Vale la pena destacar que estos 1,000 años no corresponden a un pronóstico, son valores aleatorios que han sido correlacionados para que se ajusten y representen el clima del área de estudio y brinden más información (comparado con la poca información histórica) sobre posibles eventos de sequía, que no se han presentado aún. Estas series modeladas son el insumo principal para la evaluación de riesgo probabilista de sequías, de las cuales se puede obtener un mayor número de eventos estocásticos para modelar la amenaza. Estos eventos cumplen con las condiciones de ser mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos.



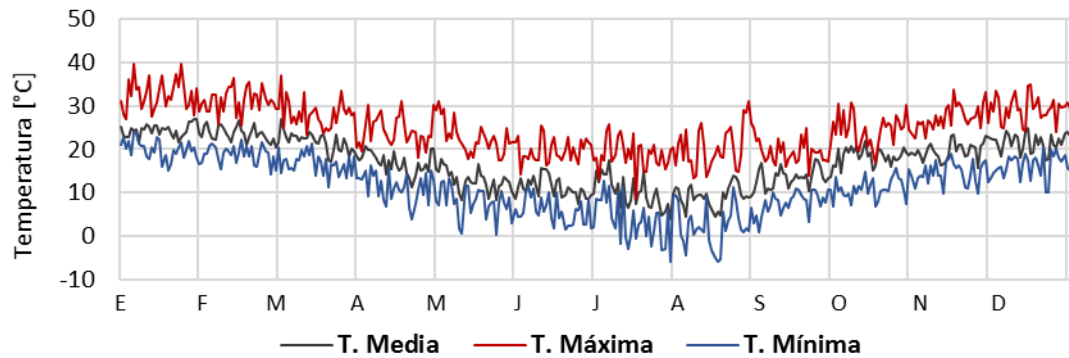
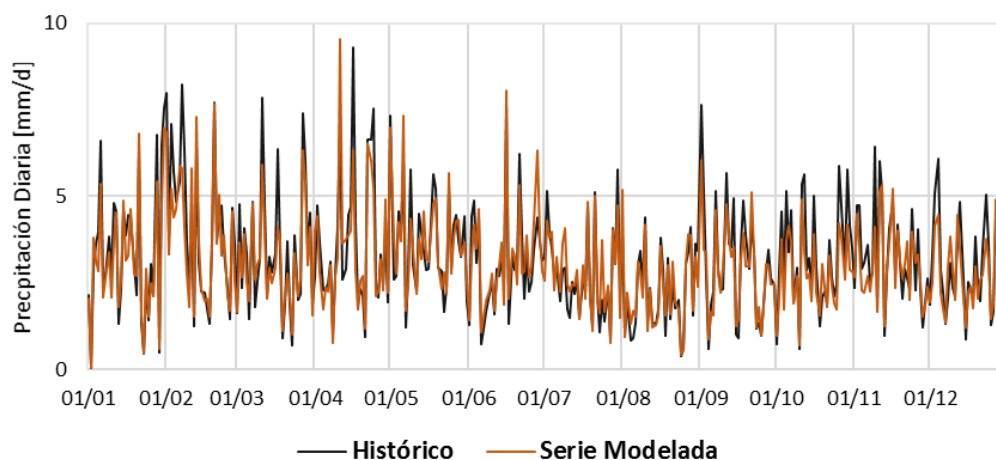


Figura 31 Series sintéticas de un año de simulación para una estación seleccionada en malla de análisis de Uruguay.

En la Figura 32 se muestra el ajuste del promedio diario multianual de los parámetros de precipitación (superior) y de temperatura media (inferior) de las series históricas del periodo 1981 al 2010 y de la serie sintética simulada aleatoriamente, para el mismo punto de análisis. Se puede ver cómo la metodología propuesta resulta en series sintéticas con un ajuste preciso a los datos históricos, lo que indica que la serie aleatoria conserva adecuadamente las características promedio del clima de la zona.

Una de las ventajas de la metodología de generación estocástica de series climáticas es la obtención de valores atípicos extremos, que hacen referencia a valores de precipitación por encima de los máximos de los registros históricos, y valores de temperatura por fuera del rango medio registrado en estaciones. Esto quiere decir que las series modeladas incluyen valores de precipitación y temperatura que no se han presentado, pero pueden ocurrir con una baja probabilidad, en el futuro.



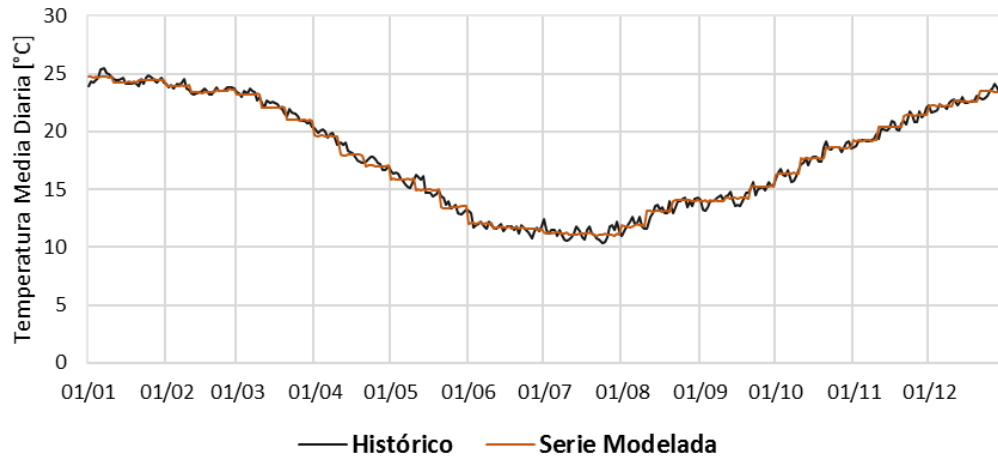


Figura 32 Promedio diario multianual de precipitación (arriba) y de temperatura media (abajo) para serie histórica (1981-2010) y serie sintética (1000 años de simulación).

Los diagramas de cajas de la Figura 33 muestran los valores atípicos para un punto de análisis en Uruguay. En este ejemplo, la máxima precipitación anual registrada en el periodo 1981-2010 fue 2,040 mm/año; sólo 20 de 1,000 años simulados superan este valor alcanzando un máximo de 3,090 mm/año. Esto refleja que los valores extremos se tienen en cuenta en el análisis aun cuando probabilidad de ocurrencia es muy baja y justifica la condición de que los eventos de amenaza derivados de series estocásticas sean colectivamente exhaustivos.

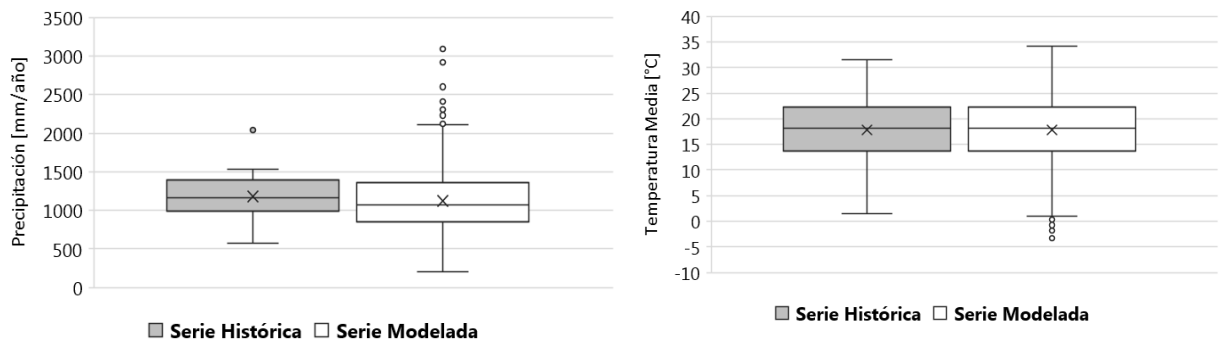
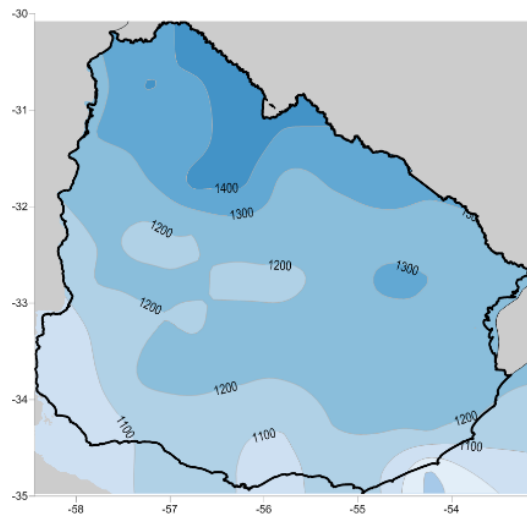


Figura 33 Diagramas de caja para promedio anual de precipitación (izquierda) y de temperatura media (derecha) para serie histórica (1981-2010) y serie sintética (1000 años de simulación).

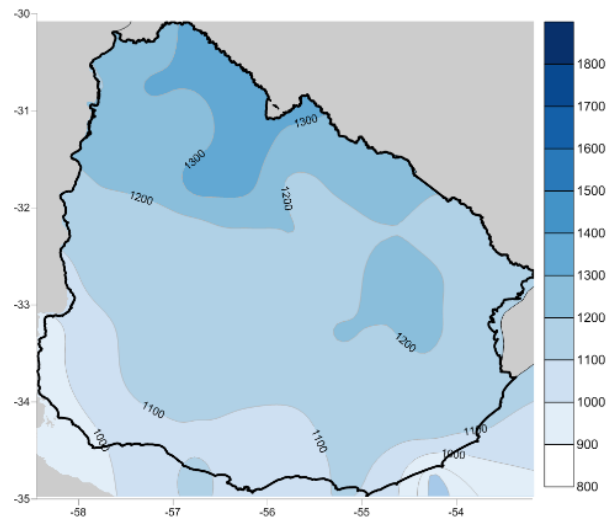
Los resultados globales de la simulación de series de precipitación y temperatura se muestran en la Figura 34. Mapas de valores medios multianuales para precipitación, temperatura media, máxima y mínima de registros históricos (izquierda) y series modeladas (derecha).

. Estos mapas muestran los valores medios multianuales para la precipitación anual y temperatura media, mínima y máxima. Para todos los casos, se puede ver como

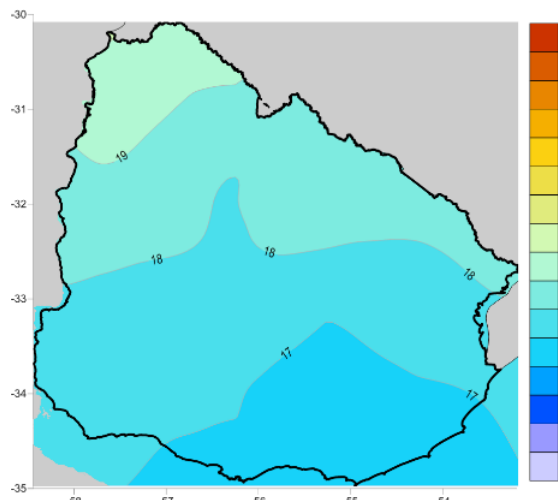
se conservan los valores medios en toda el área de estudio, con resultados sobresalientes para la temperatura. Los valores de precipitación de las series simuladas tienden a ser más bajos que los registros históricos, pero se iguala el orden de magnitud y la distribución espacial de la precipitación total anual de los registros históricos y la serie estocástica. Con la verificación de estos resultados, se procede a calcular la evapotranspiración y los indicadores de sequía.



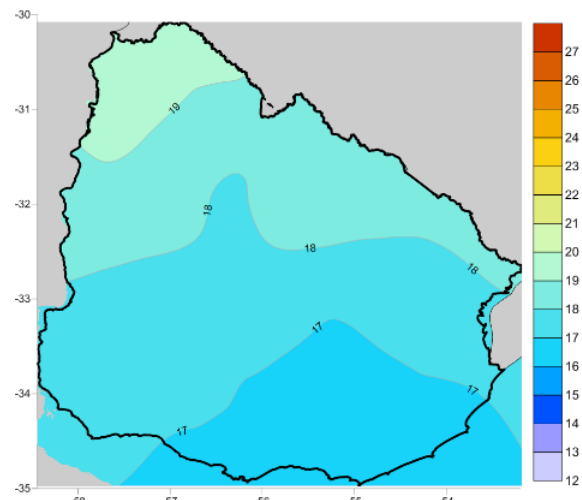
Precipitación Registros 1981-2010



Precipitación Simulada



Temperatura Media Registros 1981-2010



Temperatura Media Simulada

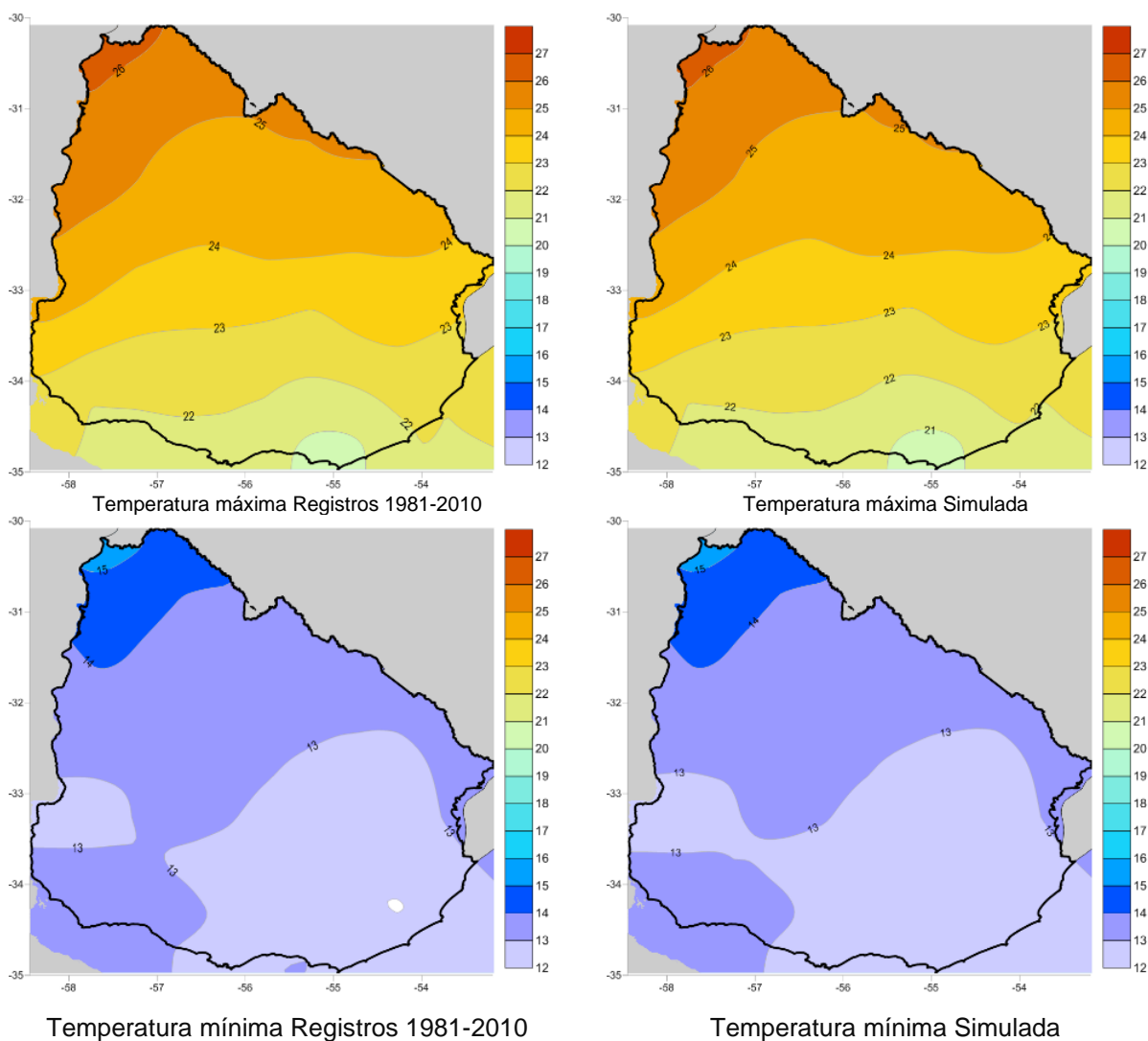


Figura 34. Mapas de valores medios multianuales para precipitación, temperatura media, máxima y mínima de registros históricos (izquierda) y series modeladas (derecha).

### 1.16 Evapotranspiración de referencia

El cálculo de los indicadores de sequía propuestos requiere del cálculo previo de la evapotranspiración de referencia, para evaluar las condiciones atmosféricas que definen si se presenta un exceso de agua en la atmósfera (baja evapotranspiración) o un déficit (alta evapotranspiración y poca lluvia). La evapotranspiración de referencia se estima siguiendo el Manual *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements* (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998), que es considerado el método estándar y es el más recomendado.

La evapotranspiración de referencia es el potencial de evaporación de la atmósfera; se calcula en una superficie vegetal uniforme sin restricciones hídricas. La superficie de referencia es un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, una resistencia superficial fija de 70 s/m y un albedo de 0,23 (Allen et al., 1998); es independiente del tipo de cultivo, de su desarrollo o de su manejo. Al no tener restricciones en el contenido de agua, las características del suelo tampoco influyen en su resultado. Estas condiciones permiten comparar los resultados en diferentes localizaciones o estaciones para evaluar las condiciones evaporativas de la atmósfera ya que el ETo únicamente varía según las condiciones climáticas presentes.

Es importante señalar que la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) es diferente a la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ( $ET_c$ ) y a la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ( $ET_{c\ aj}$ ). La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ( $ET_c$ ) considera características particulares según el tipo de cultivo que se esté evaluando (resistencia del cultivo, albedo, anatomía de las hojas, características de los estomas, propiedades aerodinámicas, entre otros). Por otro lado, la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ( $ET_{c\ aj}$ ) considera cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes a condiciones óptimas de suelo y agua, presencia de enfermedades o fertilización que implican cambios en el rendimiento de la cosecha.

El método de Penman-Monteith (Ver Ec. 0-2) para el cálculo de la evapotranspiración de referencia permite cuantificar los procesos de evaporación (vaporización de agua desde una superficie: suelo, vegetación húmeda) y transpiración (vaporización del agua contenida en los tejidos vegetales), que ocurren simultáneamente. Los parámetros necesarios para el cálculo son el brillo solar, la temperatura, la humedad, la velocidad del viento, el flujo de vapor y la resistencia aerodinámica.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{Ec. 0-2}$$

En donde  $R_n$  es la radiación neta,  $G$  es el flujo de calor del suelo,  $\gamma$  es la constante psicrométrica,  $T$  es la temperatura promedio diaria,  $u_2$  es la velocidad del viento (a 2m de la superficie),  $(e_s - e_a)$  representa el déficit de presión de vapor y  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor. La aplicación de la metodología de Penman-Monteith implica la recopilación de información meteorológica que puede no estar disponible en todos los casos. Los parámetros meteorológicos faltantes se establecen a partir de criterio de expertos, información meteorológica general de la región y las reglas de cálculo recomendadas por la FAO (Raes, 2009).

La metodología detallada para el cálculo de la evapotranspiración de referencia se presenta en el Anexo A. 2.

### **1.16.1 Parámetros climáticos**

El cálculo de la evapotranspiración de referencia puede ser complejo porque involucra numerosos parámetros climáticos que son difíciles de obtener en bases de datos de registros históricos. Variables como la humedad del aire, la radiación, la presión atmosférica y la velocidad del viento no se suelen medir en todas las estaciones de monitoreo, por lo que la cantidad y calidad de registros es muy baja. Como se mencionó en la Sección 1.14.2.3 la Universidad de Princeton publicó una base de datos de información climática (Sheffield, Goteti, & Wood, 2006) que es utilizada como fuente de información para este estudio. La información disponible está en formato NetCDF (archivos de extensión nc) y para este estudio se utilizaron las mallas de resolución  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ .

A continuación, se presenta un resumen de la información disponible de parámetros climáticos útiles para el cálculo de la evapotranspiración de referencia, disponibles en esta base de datos.

#### **1.16.1.1 Radiación**

En la Figura 35 y la Figura 36 se muestra un resumen de la información de radiación que se utiliza en este estudio para calcular la serie de evapotranspiración para Uruguay, obtenida de la base de datos de la Universidad de Princeton. En las figuras se puede ver el mapa de distribución espacial de las variables para la media multianual y a la derecha



se ve la variación en el tiempo, dividida en grupos de 10 días o decadales, de la misma variable. En el caso de la radiación, se presentan los valores más altos en latitudes más bajas. También se muestra como en la temporada de invierno (junio-agosto), la radiación entrante es menor que para meses de verano (diciembre-febrero). Las unidades de radiación de la base de datos son watts por metro cuadrado [ $\text{W/m}^2$ ], que se transforman a mega julios por metro cuadrado [ $\text{MJ/m}^2$ ] para el uso de la ecuación de Penmann-Monteith.

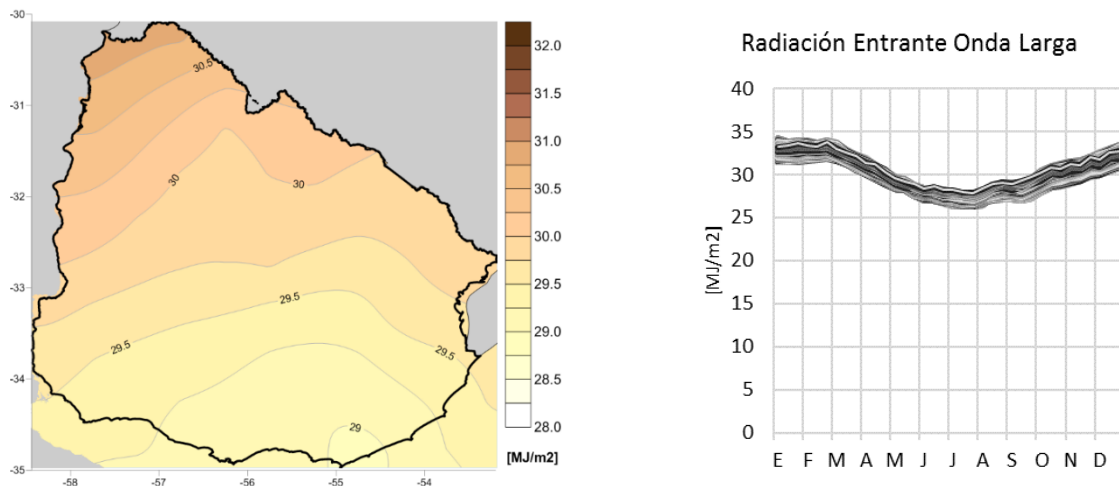


Figura 35 Mapa de radiación entrante de onda larga media anual (izquierda) y variación de la media decadal (derecha) para 103 estaciones en Uruguay.

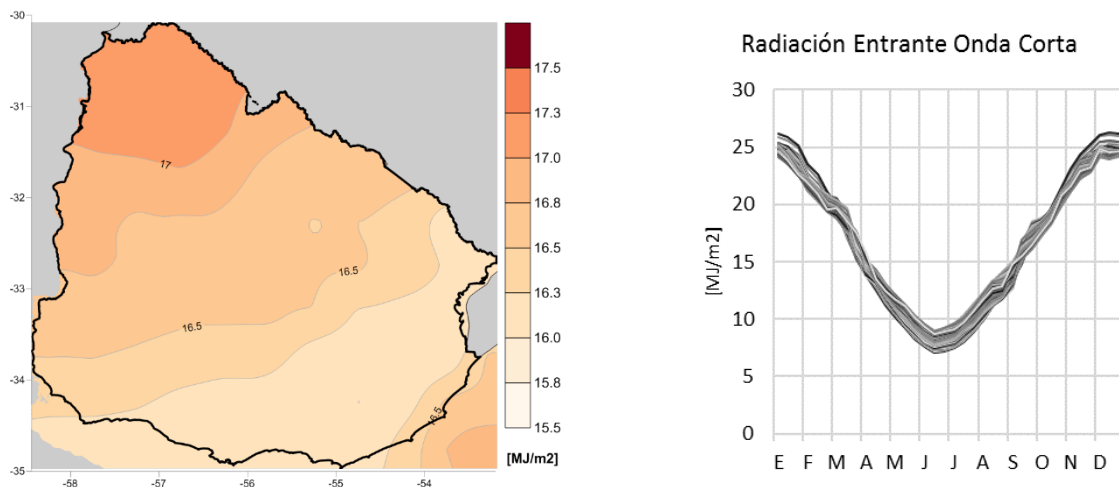


Figura 36 Mapa de radiación entrante de onda corta media anual (izquierda) y variación de la media decadal (derecha) para 103 estaciones en Uruguay.

### 1.16.1.2 Presión atmosférica

En la Figura 37 se muestra el mapa de distribución espacial de la media multianual de la presión atmosférica y a la derecha se ve la variación en el tiempo, dividida en grupos de 10 días o decadales, de la misma variable. La presión atmosférica varía con la elevación de la superficie, por esta razón los valores medios de presión atmosférica son menores en la zona de la Cuchilla Grande (elevación máxima 514 msnm) y la Cuchilla de Haedo (elevación máxima 215 msnm). La presión atmosférica no tiene variación importante durante las estaciones del año, como se ve en la gráfica de la derecha que presenta el valor de presión atmosférica por decadal para todas las estaciones consideradas en el análisis.

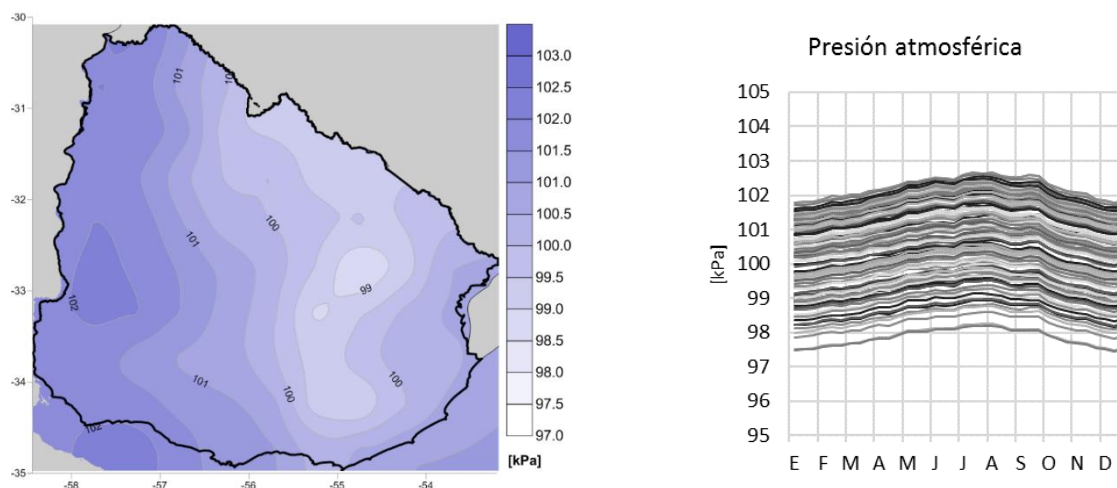


Figura 37 Mapa de presión atmosférica media anual (izquierda) y variación de la media decadal (derecha) para 103 estaciones en Uruguay.

### 1.16.1.3 Humedad específica

En la Figura 38 se muestra el mapa de distribución espacial de la media multianual de humedad específica y a la derecha se ve la variación en el tiempo, dividida en grupos de 10 días o decadales, de la misma variable. La humedad específica relaciona la masa de vapor de agua presente en una unidad de masa de aire seco, en este caso se presenta gramos de vapor de agua con relación a gramos de aire seco. En la gráfica de la derecha se puede ver cómo con temperaturas más altas en verano (diciembre-febrero) se puede contener mayor cantidad de vapor de agua en el aire que comparado con las temperaturas bajas de invierno (junio-agosto).

La ecuación de Penmann-Monteith para el cálculo de la evapotranspiración de referencia incluye el valor de humedad relativa, que no es el mismo que la humedad específica que reporta la base de datos consultada. La humedad relativa es la cantidad de humedad que posee una masa de aire con relación a la humedad máxima que podría contener sin que se produzca condensación. Entonces, para calcular la humedad relativa se debe tener en cuenta las condiciones de temperatura y presión atmosférica, que definen qué tanta humedad puede contener el aire. En el Anexo A. 2 se explica en detalle cómo se hace este cálculo.

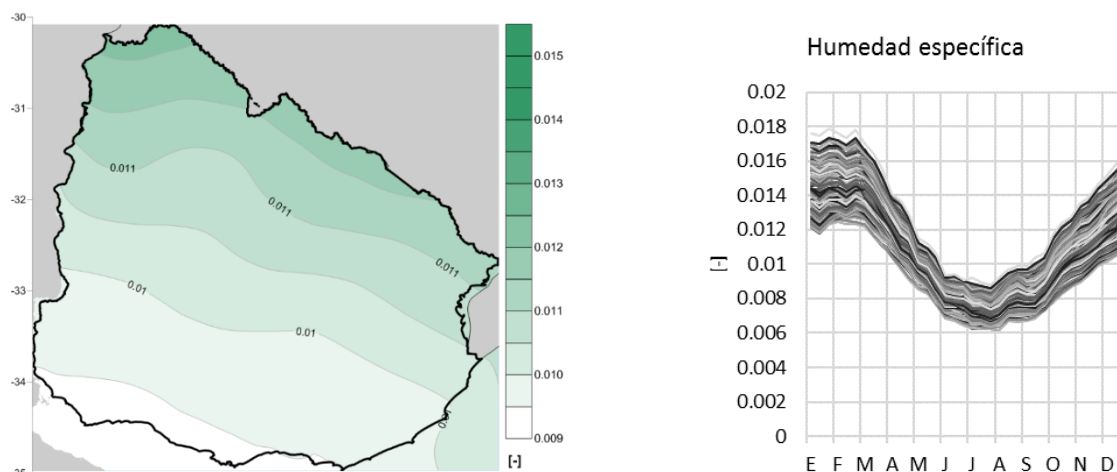


Figura 38 Mapa de humedad específica media anual (izquierda) y variación de la media decadal (derecha) para 103 estaciones en Uruguay.

#### 1.16.1.4 Velocidad del viento

En la Figura 39 se muestra el mapa de distribución espacial de la media multianual de la velocidad del viento y a la derecha se ve la variación en el tiempo, dividida en grupos de 10 días o decadales, a partir de la información del dataset de la Universidad de Princeton. Esta velocidad del viento es medida a 2 m de la superficie. En el mapa se puede observar como los valores de velocidad de viento son mayores en las zonas costeras del país, con un gradiente ascendente desde el noroeste hacia el sureste. La variación temporal de la velocidad de viento es poca, con valores más altos registrados en la temporada de invierno (junio-agosto).

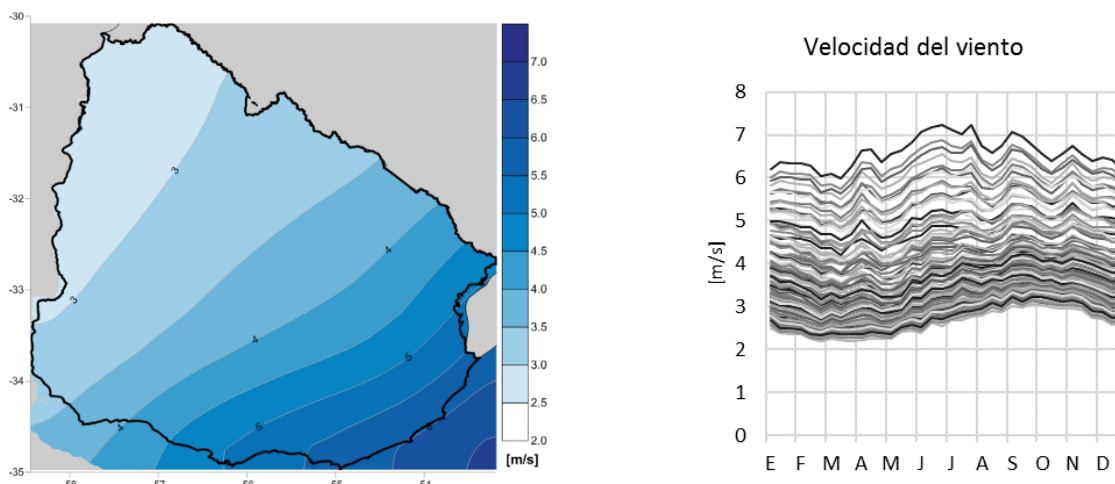


Figura 39 Mapa de velocidad del viento media anual (izquierda) y variación de la media decadal (derecha) para 103 estaciones en Uruguay. Esta velocidad del viento es medida a 2 m de la superficie.

### 1.16.2 Resultados evapotranspiración de referencia

Siguiendo la metodología detallada para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (Ver Anexo A. 2) se estimaron las series de evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) para la información histórica entre los años 1981 y 2010 y para la información resultado de la modelación estocástica de temperatura, equivalente a 1,000 años de simulaciones.

En la Figura 40 se presenta la variación decadal (grupos de 10 días consecutivos) de la media de serie de evapotranspiración de referencia para los registros históricos y para la serie simulada. En estas gráficas se puede ver como la evapotranspiración de referencia es más alta en época de verano (diciembre-febrero), dadas las altas temperaturas que favorecen la evaporación en el suelo y la apertura de estomas en las plantas que incrementa su transpiración. La evapotranspiración de referencia en estos meses alcanza valores de 180 mm/mes. En época de invierno (junio-agosto) los valores de la evapotranspiración de referencia son menores, cercanos a 40 mm/mes. El análisis comparativo de estas gráficas permite concluir que los valores de evapotranspiración de referencia resultados de las simulaciones estocásticas se acercan, en términos de medias mensuales, a los valores calculados para la serie de registros históricos. En la serie de evapotranspiración de referencia simulada se pueden observar valores atípicos, que representan las condiciones de temperatura que no se han presentado en la zona

pero que pueden ocurrir en algún momento futuro, pero siempre respetando las condiciones climáticas de Uruguay.

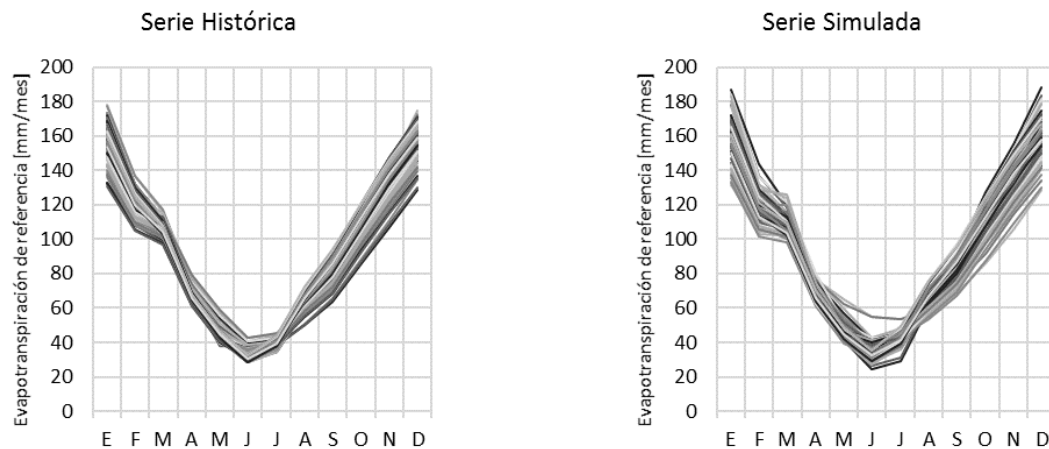


Figura 40 Variación de la media decadal de la evapotranspiración de referencia para registros históricos (izquierda) y para serie simulada (derecha) para 103 estaciones en Uruguay.

Los mapas de la Figura 41 y la Figura 42 permiten comparar, en términos de distribución espacial, los resultados de las series de evapotranspiración de referencia histórica y simulada, respectivamente. Al igual que en la gráfica anterior, se puede ver que las condiciones históricas de evapotranspiración de referencia se mantienen en promedio en la serie simulada, que introduce variaciones al considerar condiciones de temperatura (variaciones en la media o en los extremos máximos y mínimos) que no se han registrado en la historia pero que pueden ocurrir en el futuro. La distribución espacial y temporal de los resultados para la serie simulada confirma que la metodología que se aplica respeta las condiciones climáticas históricas del área de estudio.

### 1.16.2.1 Evapotranspiración histórica

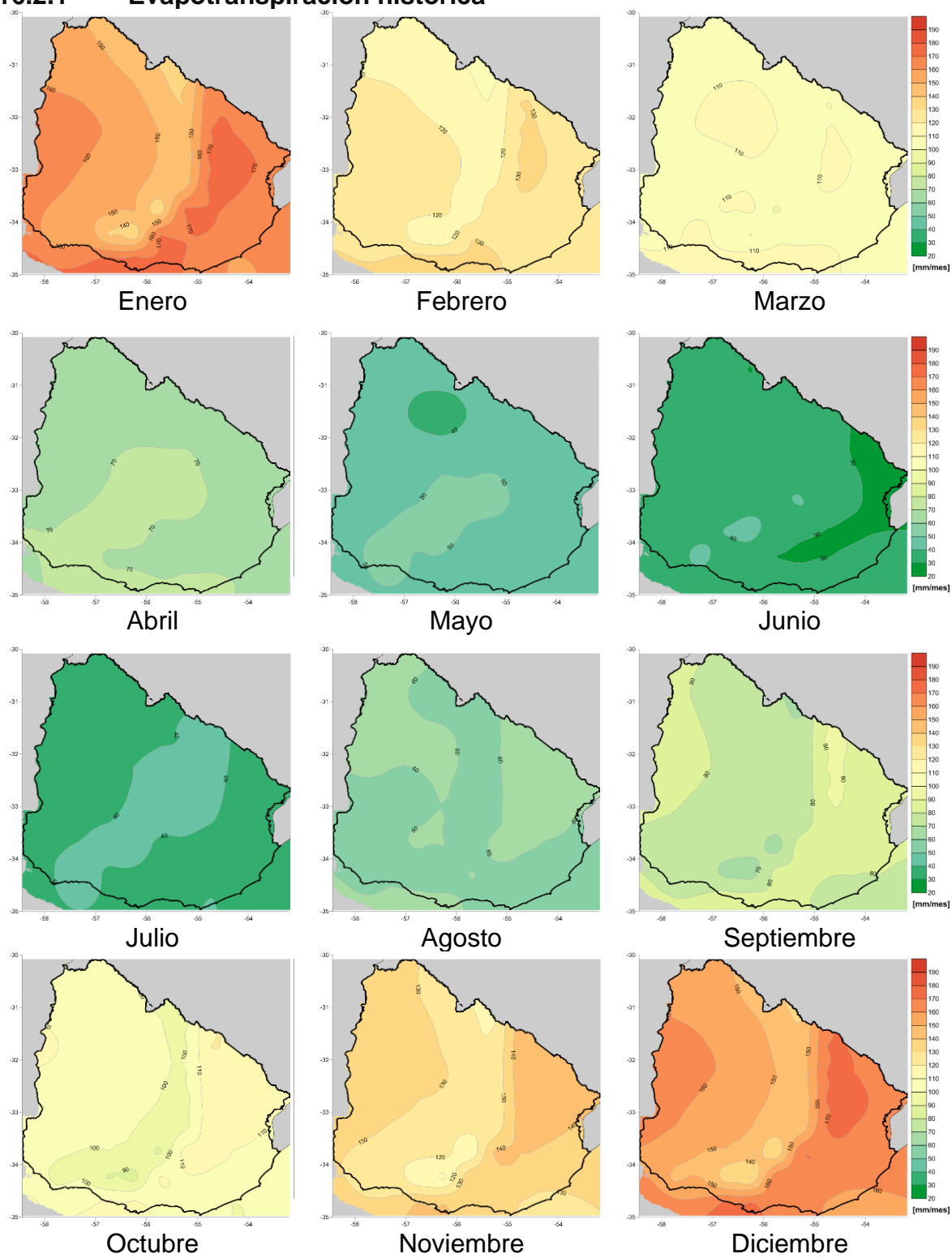


Figura 41 Mapas de evapotranspiración media mensual (1981-2010) aplicando ecuación Penmann-Monteith.

### 1.16.2.2 Evapotranspiración simulada

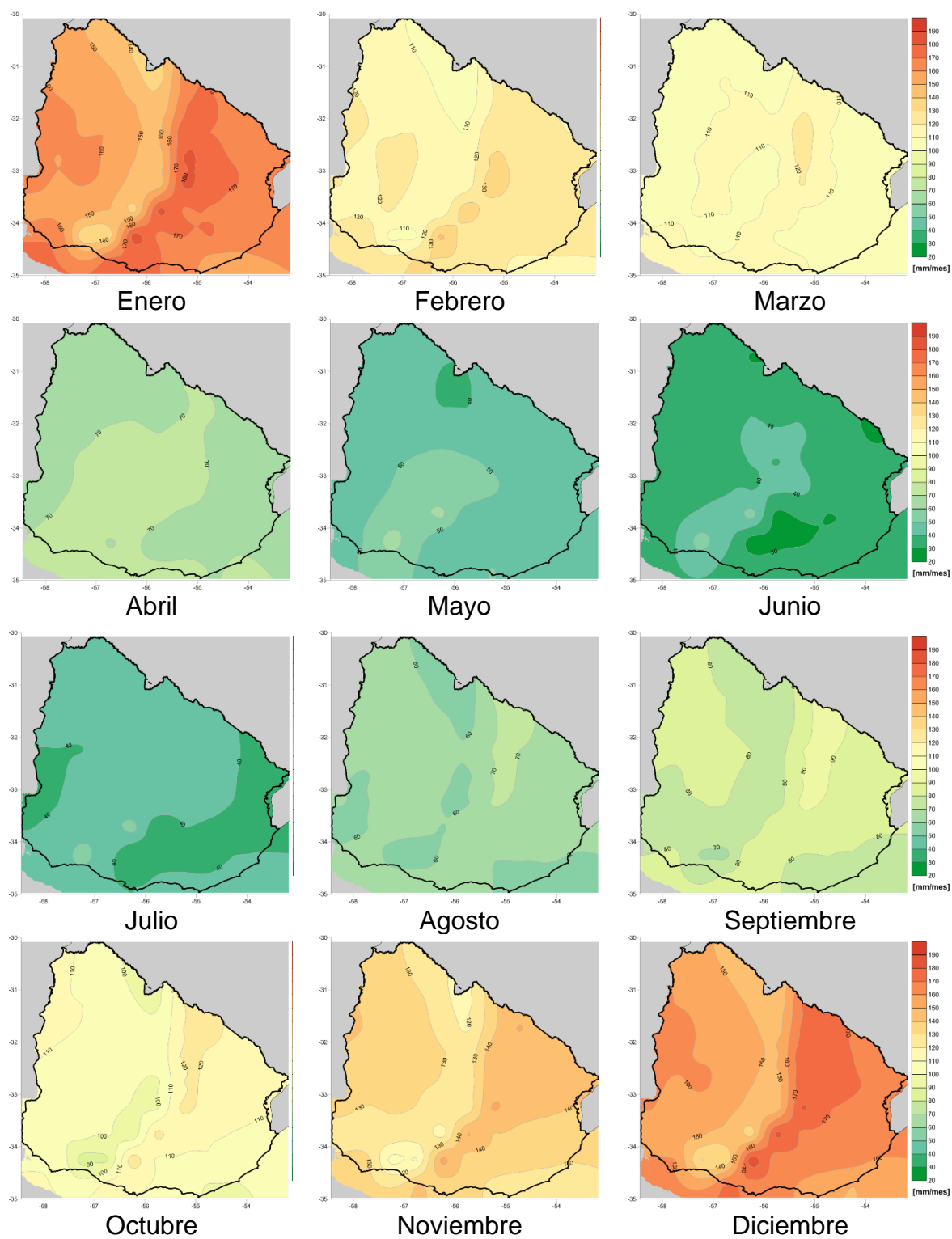


Figura 42 Mapas de evapotranspiración media mensual para series simuladas aplicando ecuación Penmann-Monteith.

## 1.17 Indicadores

Los indicadores son ampliamente utilizados para identificar las sequías, al detectar condiciones de precipitación por debajo de la precipitación media y condiciones simultáneas de temperatura por encima de las temperaturas promedio. Los indicadores pueden definir la *duración* y la *severidad* de los eventos de sequía. Las fechas de inicio y terminación establecen el período de duración en el que un indicador de sequía está continuamente por debajo de un nivel crítico predefinido (a menor valor del indicador, más intensa la sequía). La severidad de una sequía denota la deficiencia acumulativa de un parámetro de sequía por debajo de un umbral entre las fechas de iniciación y terminación. La relación entre severidad y duración es la *intensidad* de la sequía (Mishra y Singh, 2010). Estos conceptos se muestran de forma esquemática en la Figura 43. Cada evento de sequía está compuesto por la siguiente información:

- *Severidad*: corresponde al área bajo la curva del evento, es decir, el valor acumulado del indicador durante el evento.
- *Duración*: es el tiempo que dura el evento.
- *Intensidad*: se calcula como la severidad dividida por la duración. Es una medida unitaria de la magnitud del evento.

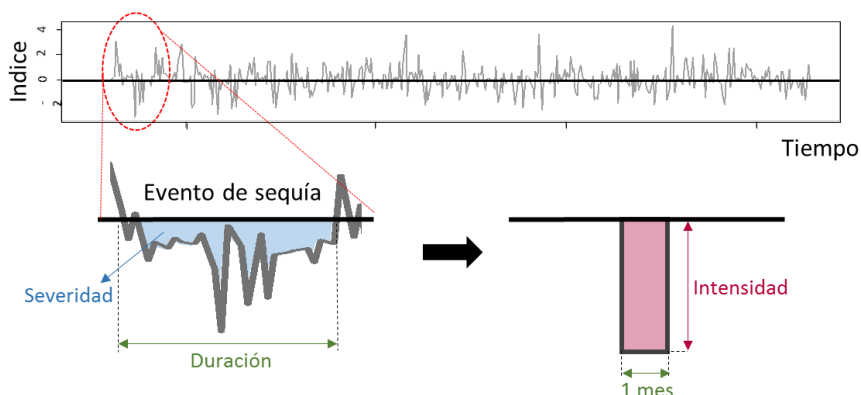


Figura 43 Esquema de indicadores de sequía y conceptos de severidad, duración e intensidad del evento.

### 1.17.1 Indicadores de sequía a utilizar

Dependiendo del tipo de sequía a evaluar, se pueden incluir diferentes parámetros en el cálculo de los índices. Las sequías meteorológicas están condicionadas a la deficiencia



de precipitación en términos de cantidad, intensidad y tiempo de precipitación, y al aumento de la evaporación y transpiración a causa de altas temperaturas, vientos fuertes, baja humedad relativa, intenso sol y menor nubosidad. Las sequías agrícolas están condicionadas por la deficiencia de agua en el suelo en términos de estrés hídrico para las plantas, y la reducción en la biomasa y el rendimiento. Las sequías hidrológicas están determinadas por la reducción en caudales de ríos y quebradas, almacenamiento reducido de los embalses y reducción de los humedales. Esta clasificación de sequías, como sequía meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica fue definida por primera vez por Wilhite y Glantz (1985).

Según Jayanthi (2014), los indicadores de sequía agrícola deben integrar las variables pluviométricas y de temperatura, junto con la evapotranspiración para el monitoreo efectivo de los cultivos de secano, pastos y pastizales. Banimahd y Khalili (2013) compararon los índices de sequía agrícola más utilizados, como el Palmer Drought Severity Index (PDSI-Palmer 1965), el Standardized Precipitation Index (SPI-McKee et al., 1993), el Effective Drought Index (EDI-Byun y Wilhite 1996), el Reconnaissance Drought Index (RDI-Tsakiris et al., 2007) y el Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI, Vicente-Serrano et al., 2010). Sus resultados mostraron que la SPEI y la RDI detectaron de manera más apropiada las severidades de sequía máximas, enfatizando el importante papel de la evapotranspiración. Estos resultados son consistentes con el trabajo de Tsakiris et al. (2007), en donde se demuestra que la sola precipitación no correlaciona satisfactoriamente con la producción de rendimiento en cultivos, sino que se requiere la incorporación de la evapotranspiración de referencia (que depende directamente de la temperatura), para describir apropiadamente la ocurrencia de las sequías. Para este modelo, se propone emplear el RDI y el SPEI, los cuales incorporan la precipitación y las temperaturas media, máxima y mínima en su cálculo. El procedimiento de cálculo de estos indicadores se presenta en el Anexo A. 4.

Este estudio no incluye el uso de indicadores que tienen en cuenta parámetros propios del suelo o del cultivo para definir un evento de sequía, como el Indicador de Palmer. Esto se debe a que en el módulo de amenaza del modelo probabilista de sequía se evalúan las condiciones de tiempo (precipitación y temperatura) únicamente, para clasificar los eventos de sequía independientes de sus posibles efectos en elementos

socioeconómicos. De esta forma se puede evaluar la amenaza independiente de la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Es en el módulo de vulnerabilidad que se incluyen los parámetros propios del suelo y cultivos existentes en cada unidad de tierra cultivada dentro del área de análisis.

### 1.17.2 Umbrales de sequía

Los indicadores estandarizados de sequía, como el RDI y el SPEI, pueden compararse entre sí en dimensiones espaciales y temporales. La severidad de la sequía caracterizada aplicando estos indicadores, se puede clasificar de acuerdo con lo presentado en la Tabla 6 **Error! Reference source not found.**

Tabla 6 Clasificación de sequías de acuerdo con el valor de indicadores estandarizados.

Clase de sequía	Valor del Indicador
No ocurre sequía	Mayor a 0
Leve	Entre -1 y 0
Moderada	Entre -1.5 y -1
Severa	Menor a -1.5

Nótese que, en todos los casos, los indicadores reflejan condiciones de sequía cuando sus valores son negativos, siendo las sequías más severas las asociadas a valores más negativos. Es conveniente evaluar los escenarios de sequía con más de un indicador, ya que ninguno de ellos puede aplicarse universalmente debido a la complejidad de esta amenaza y a las condiciones particulares de las diversas zonas climáticas (Tsakiris, Pangalou y Vangelis, 2007). Los indicadores se calculan para cada serie (histórica o simulada) en cada uno de los puntos de la malla de análisis. La Figura 44 muestra un ejemplo del cálculo del indicador de sequía para tres años de la serie histórica e indica la línea del umbral para definir sequías desde los eventos leves (umbral=-1). En este ejemplo, se presenta una sequía de 4 meses entre finales de 1981 y principios de 1982.

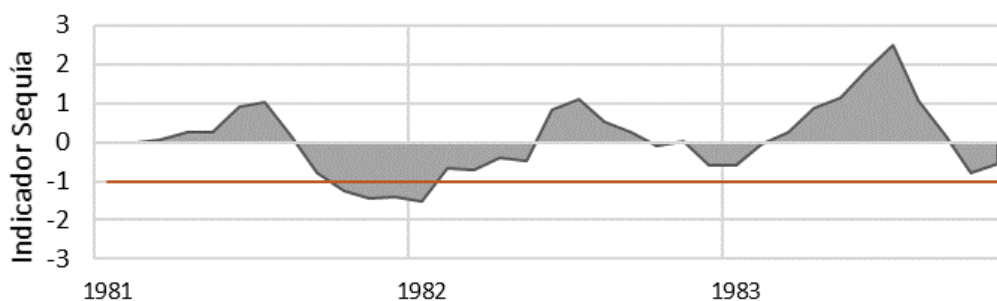
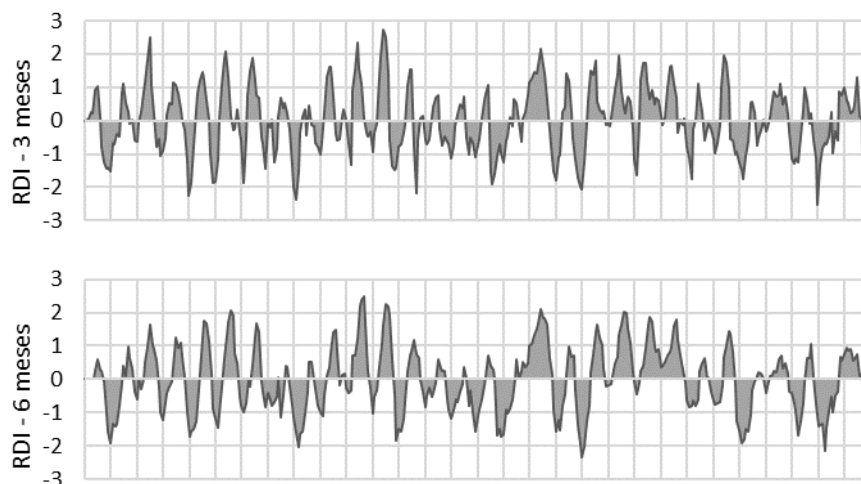


Figura 44 Series de indicador de sequía para 3 meses con umbral=-1.

### 1.17.3 Cálculo sobre indicadores de sequía

Con las series históricas (1981-2010) de precipitación obtenidas de la base de datos de CHIRPS (Ver Sección 1.14.2.2) y la serie de evapotranspiración de referencia calculada a partir de información de variables climáticas de la base de datos de la Universidad de Princeton (Ver Sección 1.14.2.3 y Anexo A. 4), se procedió a calcular el valor de los indicadores RDI y SPEI, siguiendo el procedimiento descrito en el Anexo A. 4. Las series para RDI se muestran en la Figura 45 y las series para SPEI se muestran en la Figura 46 **Error! Reference source not found.**, cada una calculada para escalas de 3, 6 y 12 meses para un único punto de la malla de análisis de Uruguay.



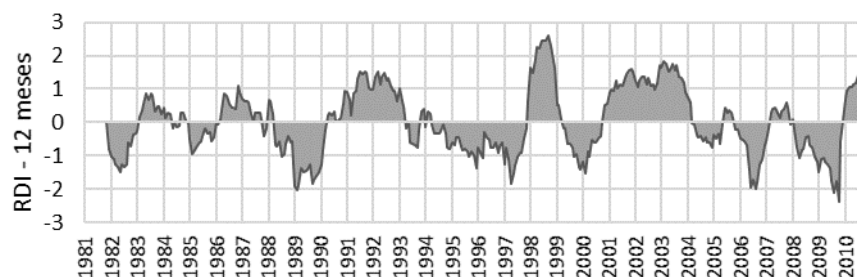


Figura 45 Series de indicador de RDI para 3 meses (arriba), 6 meses (medio) y 12 meses (abajo).

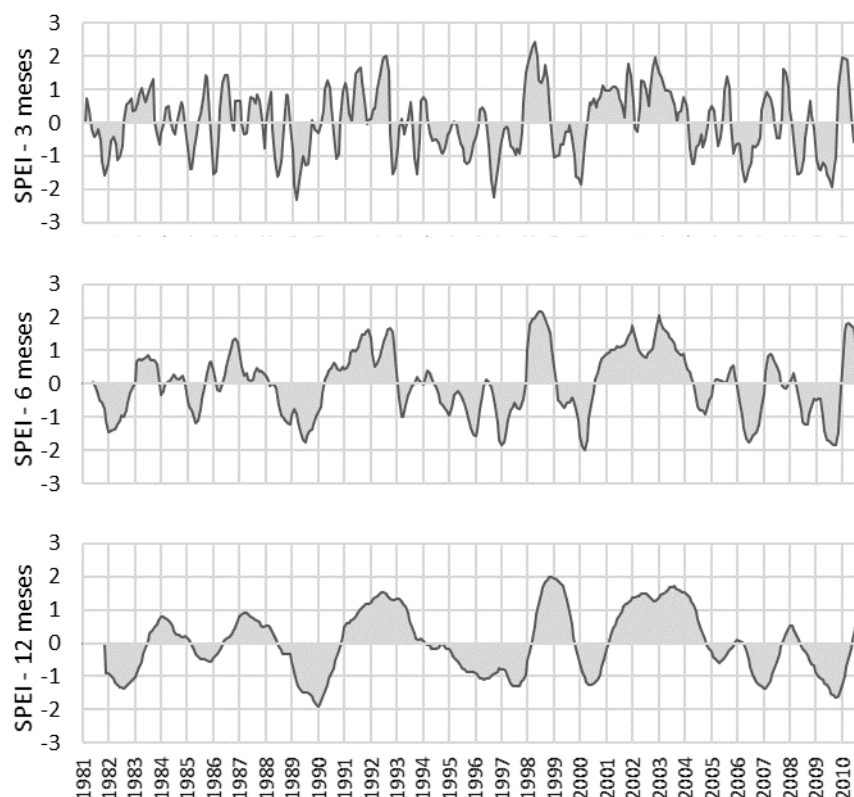


Figura 46 Series de indicador de SPEI para 3 meses (arriba), 6 meses (medio) y 12 meses (abajo).

Estas series muestran cómo la escala temporal tiene un efecto en los eventos de sequía que superan cierto umbral. Las series de indicador de menor escala, 3 meses, identifican sequías de menor duración cuyos efectos se pueden ver en sistemas de respuesta acelerada como los cultivos. De otro lado, las series del indicador de mayor escala temporal, 12 meses, identifican sequías de mayor duración cuyos efectos se pueden ver en sistemas de respuesta más lenta, como almacenamiento de agua en reservorios o agua subterránea. Dependiendo del tipo de sequía del análisis, se debe seleccionar la escala de tiempo del indicador de sequía. En el caso del presente estudio,

al evaluar el efecto de eventos de sequía en el sector agrícola, se prefieren los indicadores de menor escala temporal.

#### 1.17.4 Definición de eventos regionales de sequía

El siguiente paso es identificar los eventos de sequía que ocurren simultáneamente en varias estaciones de la región de estudio. Para cada mes, se identifican las estaciones con un valor de indicador por debajo del umbral definido para la evaluación (por ejemplo, -1, para detectar sequías moderadas y severas). Si el número total de estaciones con valores por debajo del umbral es mayor que un cierto porcentaje (por ejemplo, 50%), entonces se identifica una sequía regional. Con cálculos consecutivos para todos los años de simulación, se pueden detectar múltiples sequías regionales, con su valor asociado de duración, severidad e intensidad en cada estación. Cada una de las sequías regionales es un escenario de sequía individual, con una frecuencia anual de ocurrencia igual a  $1/N$ , en donde  $N$  es el número total de años de simulación. La Figura 47 muestra esquemáticamente cómo se identifican las sequías regionales, de acuerdo con los criterios de selección definidos por un valor umbral de indicador y un número mínimo de estaciones que satisfacen dicha condición. Este procedimiento puede aplicarse para toda la región de estudio, o para subregiones definidas por otros criterios, como zonas climáticas, zonas productivas, entidades territoriales, etcétera.

A partir de estos criterios se procedió a identificar los eventos de sequía en la serie de registros históricos (1981-2010) que ocurren simultáneamente en Uruguay en al menos 34 estaciones (es una tercera parte de las estaciones de la malla de análisis), con un valor de indicador menor a -1. Se hizo la identificación automática de eventos regionales para los indicadores RDI y SPEI para tres escalas temporales: 3, 6 y 12 meses. El número de eventos identificados por indicador y escala temporal se muestra en la Tabla 7 **Error! Reference source not found.** Por ejemplo, para el caso de 3 meses, el indicador RDI identificó 25 eventos mientras que el indicador SPEI identificó 22; que no son exactamente los mismos eventos, difieren en duración y fecha de inicio.

Tabla 7 Número de eventos de sequía regional por indicador y por escala temporal.

	3 meses	6 meses	12 meses
RDI	25	24	13
SPEI	22	11	5

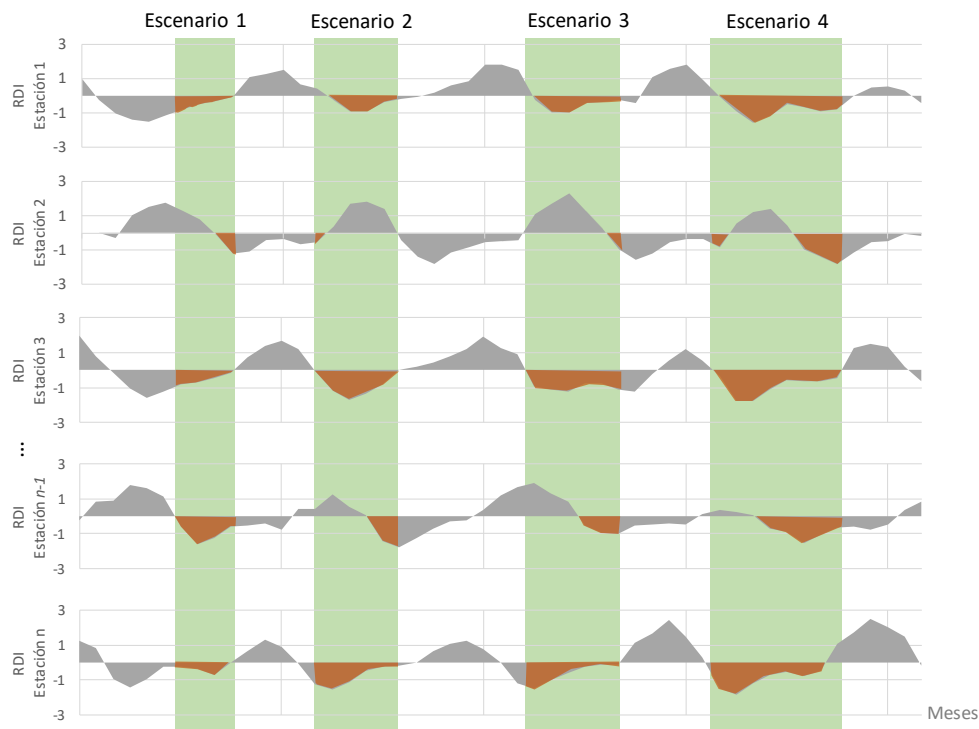


Figura 47 Identificación de sequías regionales sobre las series de tiempo de todas las estaciones del área de estudio.

Con el fin de apreciar las diferencias de calificación de los dos indicadores utilizados en el análisis, RDI y SPEI, se hizo una comparación de los eventos regionales que identificó cada uno. La Figura 48 muestra el número de eventos de sequía regional según duración [meses] para indicador SPEI (izquierda) y RDI (derecha).

muestra el número de eventos regionales identificado por cada indicador, para cada escala temporal de análisis. Para escalas de 3 meses se identifica un mayor número de eventos de menor duración, mientras que escalas de 12 meses del indicador identifica menor número de eventos y en el caso del SPEI identifica eventos de larga duración, hasta 12 meses consecutivos de sequía. Estos resultados muestran un comportamiento muy diferente entre los indicadores y sus escalas temporales de cálculo.

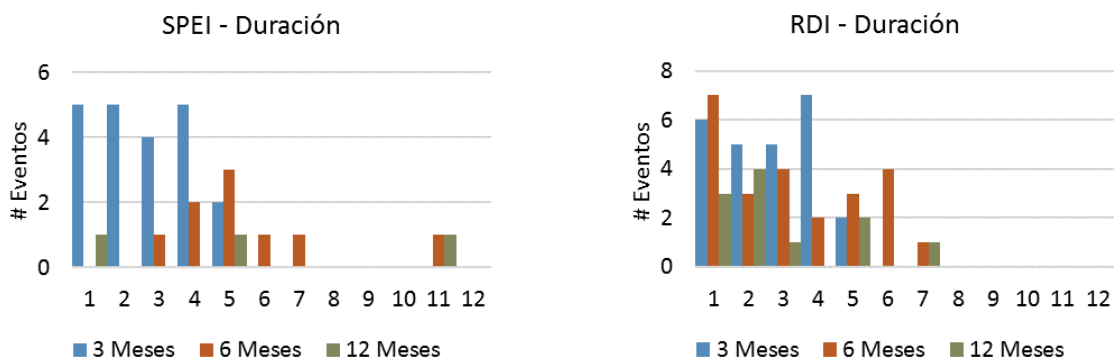


Figura 48 Número de eventos de sequía regional según duración [meses] para indicador SPEI (izquierda) y RDI (derecha).

La Figura 49 muestra otro parámetro de comparación entre indicadores: el mes de inicio de los eventos regionales. Este parámetro es útil para identificar la ocurrencia de sequías en el tiempo y asociar los eventos regionales con las estaciones climáticas. Por ejemplo, el mes de inicio de los eventos identificados por SPEI para 3 meses no tiene ninguna estacionalidad, el mes de mayor número de eventos es noviembre, seguido de mayo. Por el contrario, el indicador RDI parece identificar un mayor número de eventos de sequías regionales en enero y diciembre, meses de verano, sin dejar de identificar sequías en épocas de invierno.

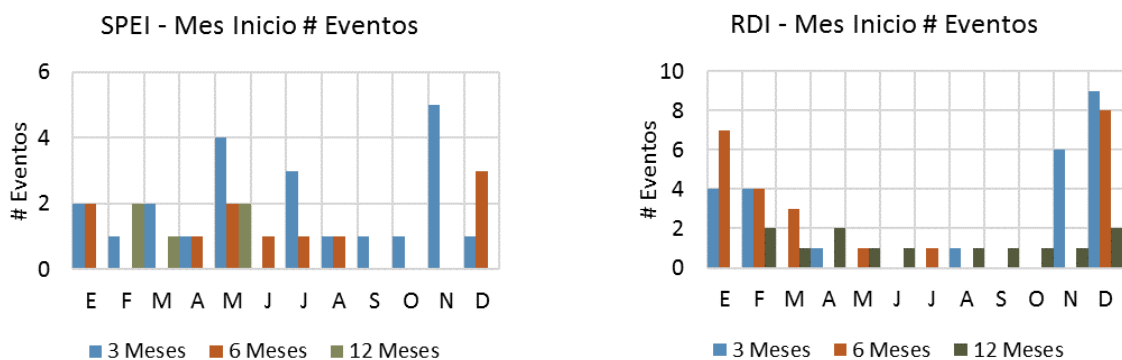


Figura 49 Número de eventos de sequía regional según fecha de inicio del evento para indicador SPEI (izquierda) y RDI (derecha).

Los resultados que aquí se presentan muestran cómo dos indicadores de sequía, RDI y SPEI que incluyen variables de precipitación y evapotranspiración potencial, brindan resultados muy diferentes cuando se calculan para una misma serie histórica. Como se mencionó antes, no hay un indicador que se ajuste a las condiciones globales,

por lo que se debe seleccionar el indicador que mejor se ajuste a las condiciones del territorio en estudio.

### 1.17.5 Selección del indicador de sequía

La selección del indicador más apropiado depende de la adaptación de cada parámetro ( $\alpha$  en el caso de RDI y  $D$  para SPEI) a sus funciones de probabilidad teóricas (log-normal para RDI y log-logística de 3 parámetros para SPEI), así como el ajuste de los indicadores mismos a una distribución de probabilidad Normal Estándar, condición que debe cumplirse como consecuencia de la estandarización.

Adicionalmente, la escala de tiempo también puede definir la selección del indicador apropiado. Las escalas de tiempo cortas se relacionan principalmente con el contenido de agua en el suelo y los flujos superficiales, las escalas de tiempo medias están relacionadas con los almacenamientos de embalses y las escalas de tiempo largo están relacionadas con las variaciones en el almacenamiento de agua subterránea (Vicente-Serrano, Beguería & López-Moreno, 2010). Por lo tanto, las escalas de tiempo corto (3 a 6 meses) pueden describir mejor las sequías agrícolas, mientras que las escalas a largo plazo (de 12 a 24 meses) pueden describir mejor las sequías hidrológicas. Por ejemplo, para el estudio de caso de Banimahd y Khalili (2013), las severidades de sequía máxima en una escala de tiempo anual fueron detectadas por SPEI, mientras que las severidades de sequía de las escalas temporales de 3 y 6 meses fueron detectadas por RDI. La metodología propuesta puede adaptarse a diferentes escalas de tiempo para seleccionar el indicador de sequía más apropiado.

La Figura 50 **Error! Reference source not found.** muestra el ajuste de los indicadores RDI y SPEI, calculados para 3, 6 y 12 meses, a una distribución de probabilidad Normal estándar<sup>10</sup>, para el caso de un punto (Punto 58) de la malla de análisis sobre el territorio de Uruguay. Como puede apreciarse, el indicador que presenta el mejor ajuste a la distribución teórica de probabilidad es el RDI. Esta evaluación se repite para todas las estaciones incluidas en la evaluación de la amenaza. A partir de

---

<sup>10</sup> La distribución normal estándar, es aquella que tiene por media el valor cero ( $\mu = 0$ ), y por desviación típica la unidad ( $\sigma = 1$ ). Esta es una distribución que está definida. Esta distribución estándar se compara con las funciones de densidad (que es el cálculo de la probabilidad relativa según la cual dicha variable aleatoria tomará determinado valor) de los valores calculados de los indicadores para diferentes escalas de agregación temporal. La función de densidad se calculó a partir de la estimación de densidad de kernel.



este análisis, se obtuvo que 93 de 103 estaciones están mejor representadas por valores de RDI que de SPEI.

Este resultado se ajusta al análisis de eventos históricos de sequía registrados en la base de Datos DesInventar (<http://www.desinventar.org/>). Para Uruguay, los registros de daños en eventos asociados con sequía son 25 para fechas únicas, que ocurren entre 1981 y 2010. En la Figura 51 se muestra el resumen de información de los eventos de sequía que se han incluido en la base de datos de desastres. Según esta información, los eventos de sequía inician en su mayoría en los meses de enero y diciembre, en época de verano. Por el contrario, a mitad de año, los eventos de sequía son menos frecuentes. Entonces, el indicador que se seleccione debe también reflejar esta tendencia histórica.

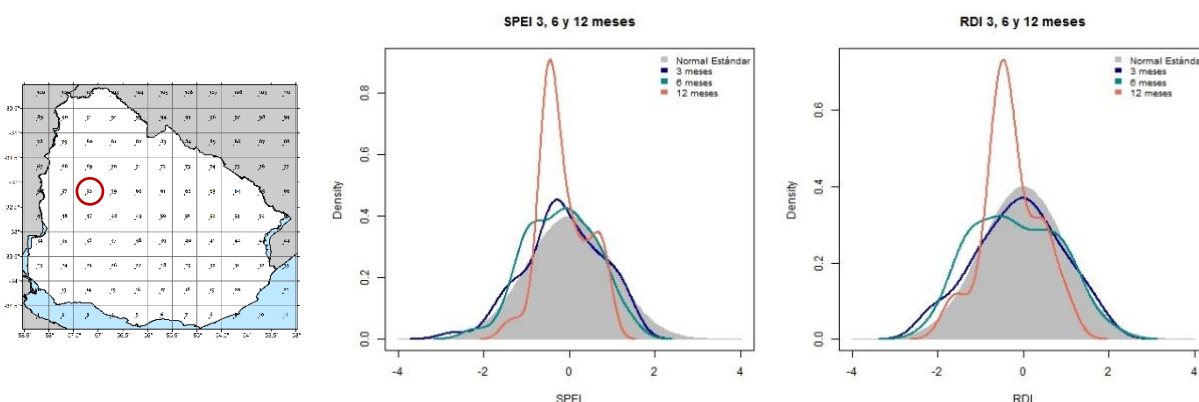


Figura 50. Bondad del ajuste a una distribución de probabilidad Normal estándar de los indicadores SPEI y RDI calculados para 3, 6 y 12 meses para una estación de la malla de análisis en Uruguay.

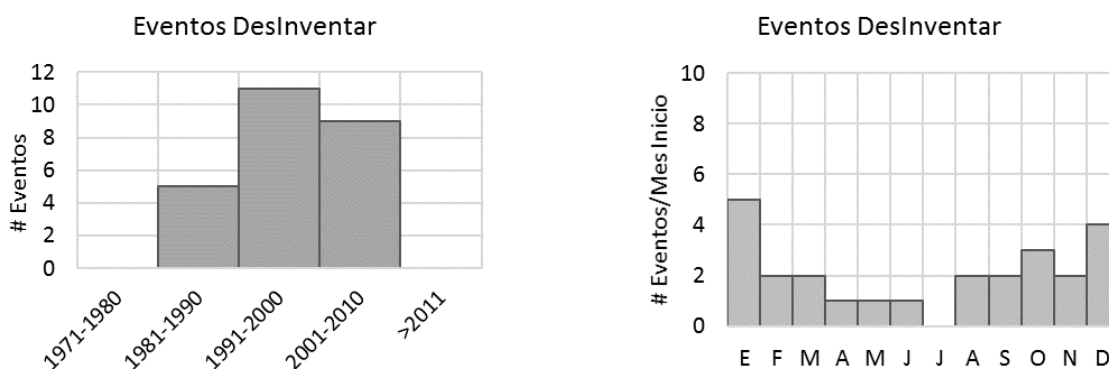


Figura 51. Resumen registros eventos de sequía para Uruguay en base de datos DesInventar, número de eventos por década (izquierda) y número de eventos según mes de inicio (derecha).

Luego de calcular el indicador de sequía RDI y el SPEI de 3, 6 y 12 meses para la serie de precipitación y evapotranspiración de referencia de la serie histórica, se puede

determinar en qué fecha inician los eventos, para luego compararlo con los registros históricos de DesInventar. Los gráficos de la Figura 52 muestran la comparación de los resultados por indicador y por escala temporal. La sombra gris de los gráficos es el número de eventos según mes de inicio de acuerdo con los registros de la base de datos DesInventar. Según estos resultados, el indicador RDI registra eventos de sequía que inician en su mayoría en los meses de enero y diciembre, con muy pocos eventos que inician en los meses de mitad de año. Esta tendencia se ajusta mejor a los resultados de DesInventar que para el indicador SPEI, el cual registra que la mayoría de los eventos de sequía ocurren en mayo, julio y noviembre.

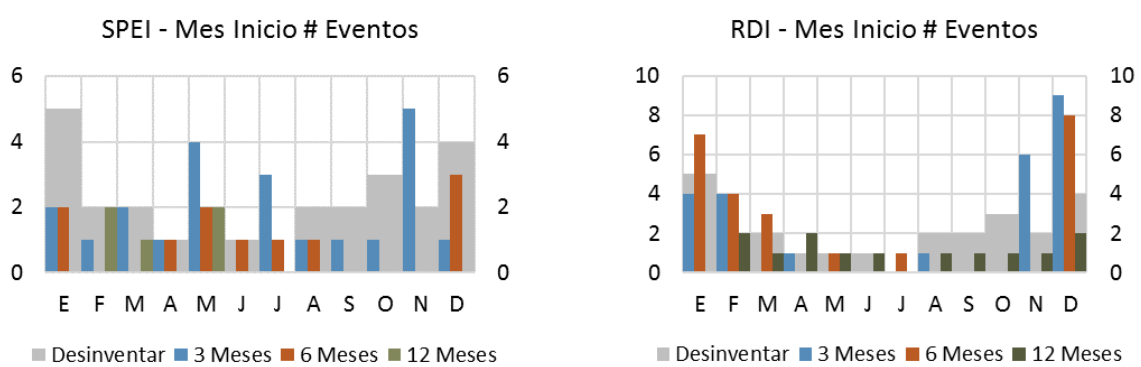


Figura 52 Número de eventos según mes de inicio para indicador SPEI (izquierda) y RDI (derecha).

Según el análisis estadístico (de ajuste de los indicadores a una distribución normal estándar) y el análisis de eventos históricos (según mes de inicio de eventos en DesInventar), se puede concluir que para Uruguay el indicador que mejor se ajusta es el RDI. Como el análisis probabilista de amenaza es por sequía agrícola, se seleccionó la menor escala temporal, la de 3 meses. A continuación, se presentan los resultados de identificación de sequías en la serie histórica y simulada con este indicador.

### 1.17.6 Indicador RDI para serie parámetros climáticos históricos

La Tabla 8 muestra el resumen de los 25 eventos regionales identificados por el indicador RDI de escala 3 meses. En la tabla se puede ver los eventos de 1988-1989, 1998-1999, 2005, 2008-2009 y 2010-2011 que son eventos reconocidos como sequías severas con daños generalizados en Uruguay.

Tabla 8. Resumen eventos regionales según RDI -3 meses.

RDI					
Sequia	Duración [meses]	Año Inicio	Mes Inicio	Año Fin	Mes Fin
1	5	1981	11	1982	4
2	2	1982	12	1983	2
3	1	1983	12	1984	1
4	4	1984	12	1985	4
5	3	1985	12	1986	3
6	1	1987	2	1987	3
7	1	1988	4	1988	5
8	5	1988	12	1989	5
9	3	1989	11	1990	2
10	1	1990	8	1990	9
11	3	1991	2	1991	5
12	1	1992	1	1992	2
13	2	1992	11	1993	1
14	2	1995	1	1995	3
15	4	1995	12	1996	4
16	4	1996	12	1997	4
17	3	1998	12	1999	3
18	4	1999	11	2000	3
19	1	2002	2	2002	3
20	2	2004	2	2004	4
21	3	2005	1	2005	4
22	4	2005	12	2006	4
23	4	2008	1	2008	5
24	4	2008	11	2009	3
25	2	2010	11	2010	12

Los indicadores de sequía se pueden analizar en dimensiones espaciales, como se muestra en los mapas de la Figura 53. En estos mapas se puede ver el resultado del indicador RDI a escala 3 meses, que se calculó para cada uno de los puntos de la malla de análisis y luego se interpoló usando la técnica de Kriging, para el evento de sequía que ocurrió a finales de 2008 y principios de 2009. Con esto, se obtienen mapas del indicador por mes que muestran las variaciones de la

intensidad de la sequía (RDI/mes) y al comparar meses consecutivos se puede ver cómo las condiciones secas van cambiando también en el tiempo.

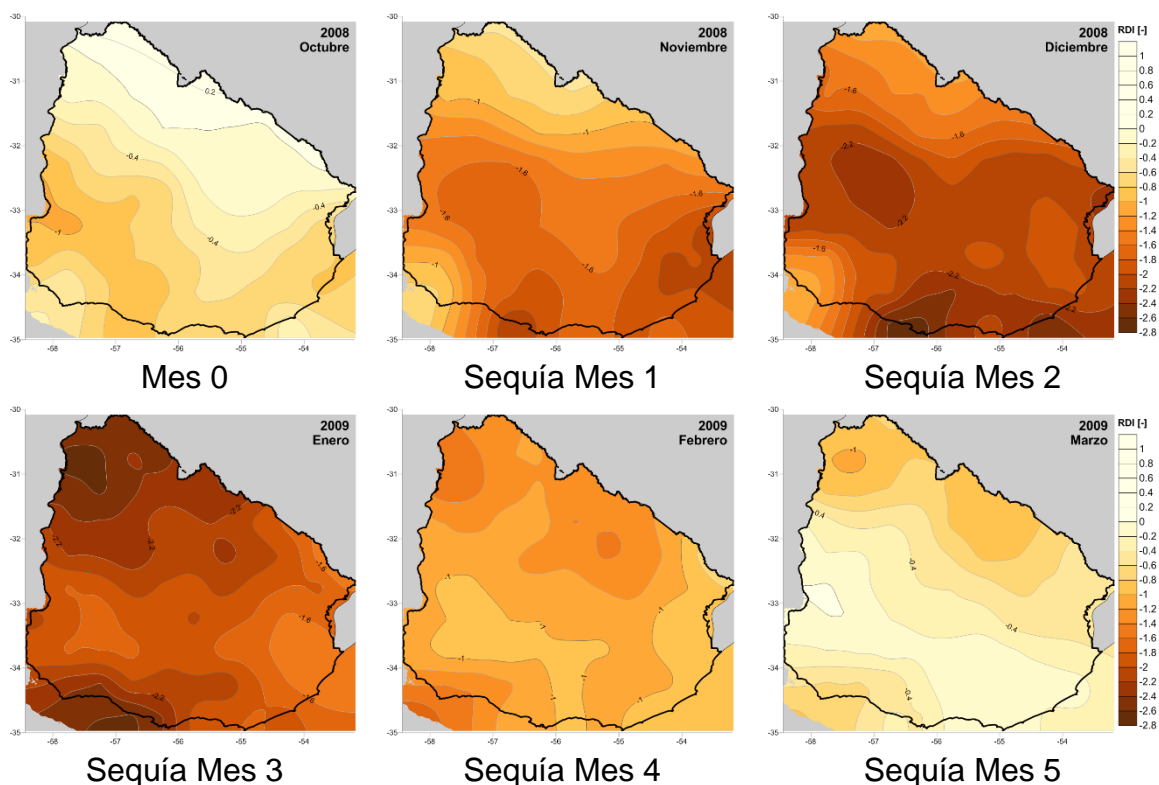


Figura 53. Mapas de indicador de RDI para 3 meses para el evento de sequía de octubre de 2008 a marzo de 2009.

Los mapas de la Figura 54 **Error! Reference source not found.** muestran la severidad, que es el valor acumulado del indicador durante los 4 meses de sequía, y la intensidad, que es el valor promedio mensual del indicador de sequía. Estos mapas permiten identificar qué zonas del país experimentaron la mayor intensidad de la sequía, que en este caso fue al sureste del país, en los departamentos de San José y Montevideo.

Como se resume en la Tabla 8, en 30 años de registros históricos se pueden identificar 25 eventos de sequía, desde eventos leves a eventos severos con duraciones entre un mes a cinco meses. Esta es una muestra de lo que ha ocurrido y es identificado por el indicador RDI como un momento de déficit de precipitación y alta evapotranspiración asociada a temperaturas por encima de lo normal. Ahora bien, 25 eventos no son suficientes para evaluar la amenaza que enfrenta el territorio uruguayo, para más adelante evaluar el riesgo total. Por esta razón, el modelo que se utiliza en este

estudio simula condiciones climáticas para obtener un gran número de eventos de sequía posibles, que no han ocurrido aún.

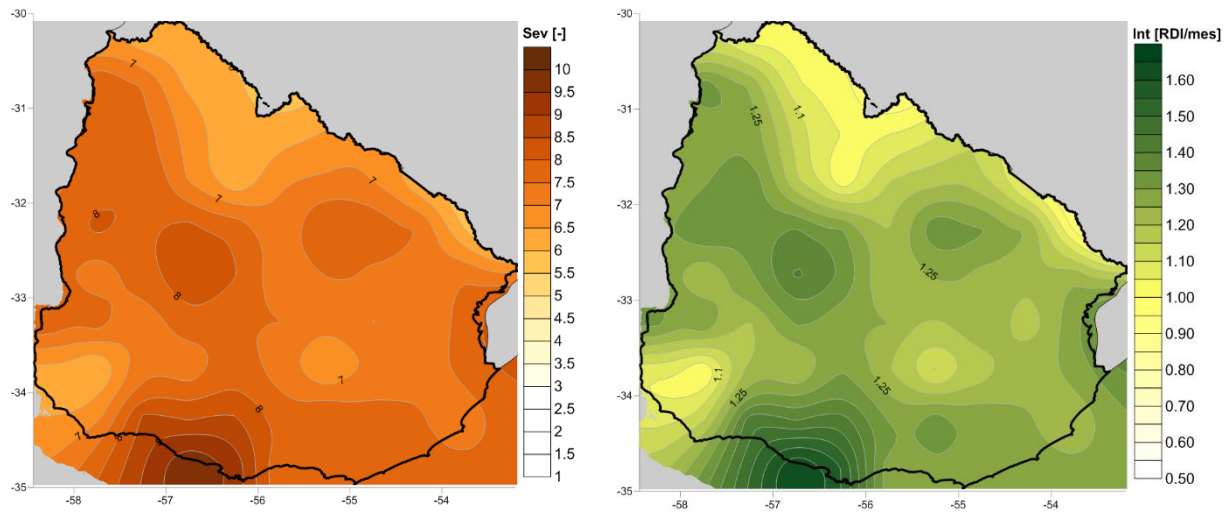


Figura 54 Mapas severidad (izquierda) e intensidad (derecha) del evento de sequía de octubre de 2008 a marzo de 2009.

### 1.17.7 Indicador RDI para serie parámetros climáticos estocásticos

Luego de aplicar el modelo de generación estocástica de series de precipitación y temperatura (*Ver Sección 1.15*), calcular la serie de evapotranspiración de referencia para la temperatura simulada (*Ver Sección 1.16*) y calcular la serie del indicador RDI para las series estocásticas de precipitación y evapotranspiración de referencia (*Ver Sección 1.17.3*), se obtuvieron 750 eventos de regionales de sequía para 1,000 años equivalentes de parámetros climáticos. La serie del indicador RDI para un punto de la malla de análisis para los 1,000 años equivalentes se muestra en la Figura 55, que también indica el límite del umbral -1. En esta serie se puede ver la variedad de eventos que se obtienen en una ventana de tiempo tan extensa. Los 750 eventos de sequía regionales se identificaron a partir de los resultados para indicadores de sequía con umbral menor a -1 y eventos que ocurren simultáneamente en Uruguay en al menos 34 estaciones.

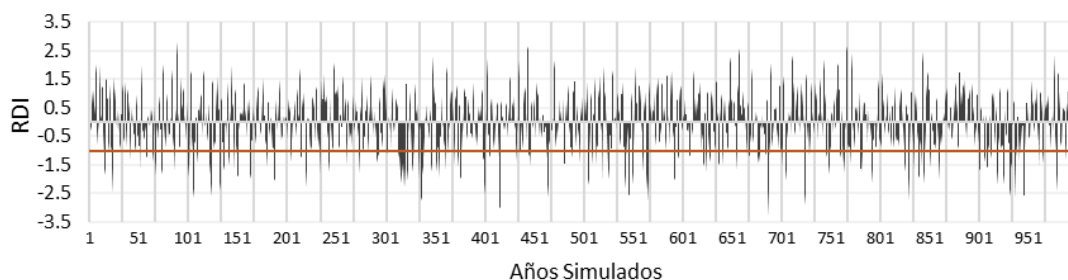


Figura 55 Series de indicador de RDI para 3 meses para la serie simulada, indicando valor umbral=-1.

Como se mostró en la Sección 1.17.5, la selección del indicador de sequía para el territorio de Uruguay se hizo a partir de criterios estadísticos (ajuste de los resultados del indicador a una distribución de probabilidad) y de criterios de comparación con los registros de eventos históricos de la base de datos DesInventar. Para corroborar que las series del indicador de sequía, que se calculó a partir de series sintéticas de precipitación y temperatura, se ajustan al mismo indicador de la serie histórica, se procedió a comparar los resultados de los indicadores de sequía RDI y SPEI con los registros de mes de inicio de los eventos registrados en DesInventar. Estos resultados se muestran en la Figura 56 **Error! Reference source not found.** Se puede ver como los resultados para el mes de inicio de los eventos identificados por el indicador RDI se ajustan mejor a los registros históricos reportados, con mayor frecuencia de inicio de eventos en los meses de enero y febrero y menor frecuencia a mitad de año en época de invierno. Esta verificación permite corroborar la selección del indicador RDI para el caso de evaluación de sequías en el territorio uruguayo y confirma que el comportamiento medio del clima se mantiene entre las series históricas y las series sintéticas.

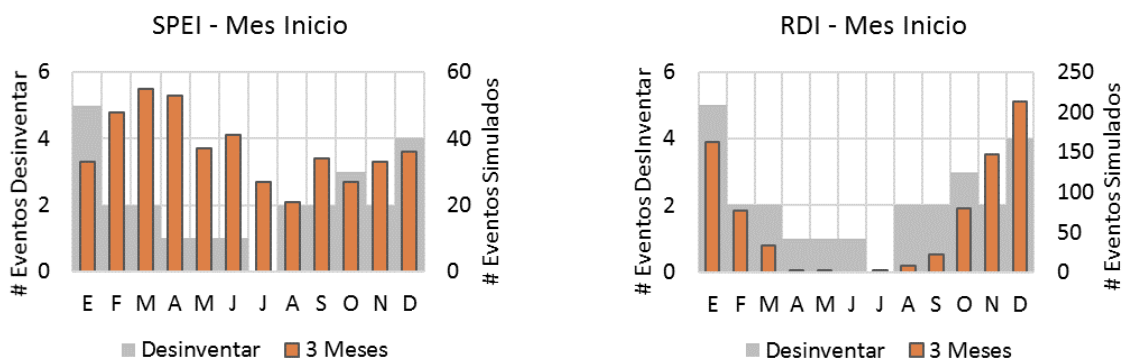


Figura 56 Número de eventos según mes de inicio para indicador SPEI (izquierda) y RDI (derecha) para eventos regionales a partir de la serie simulada de precipitación y temperatura.

Sobre los 750 eventos estocásticos de sequía identificados, se encontró lo siguiente:

- Número de estaciones que contribuye en la sequía:

El criterio para definir que un evento se puede considerar como una sequía regional define que el número mínimo de estaciones que presentan de forma simultánea un indicador menor al umbral sea de 34. En la **Error! Reference source not found.** Figura 57 se muestra el número de estaciones que participa en cada escenario de sequía (eje horizontal). En 228 eventos se tiene que mínimo 101 de 103 estaciones incluidas en el análisis participan en la sequía. En total, 390 eventos tienen participación de 91 o más estaciones, lo que equivale al 52% de los eventos. Esto indica que los eventos cubren una amplia extensión del territorio.

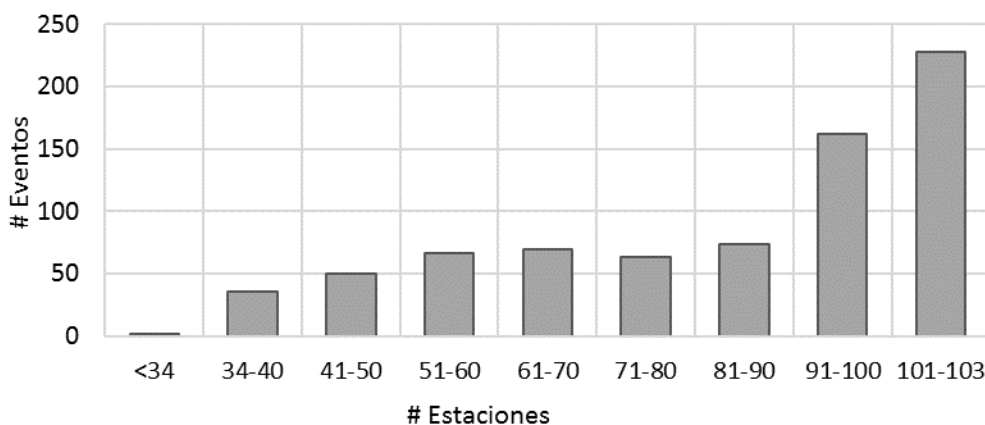


Figura 57. Número de estaciones que participan en un evento de sequía regional para escenarios estocásticos.

- Máximos valores de duración y severidad

Cada estación en la malla de análisis tiene un valor de duración y severidad. Los valores máximos para cada evento de duración y severidad, en cada estación, se muestran en los histogramas de la Figura 58**Error! Reference source not found.** En estos gráficos se puede ver la variedad de eventos estocásticos de sequía que se obtienen a partir de la generación de series climáticas, incluyendo eventos que no se han registrado en la historia. Por ejemplo, la duración máxima de eventos históricos de sequía es de 5 meses (*Ver Tabla 8*); con las sequías estocásticas se llega a eventos de mayor duración (hasta 18 meses en una estación). En cuanto a la severidad, se puede ver cómo la mitad de los eventos se concentra en un valor de severidad máxima de 5, pero al tener

una distribución de duraciones con valores muy parecidos entre la duración de dos a cuatro meses, se esperan eventos con intensidades diferentes.

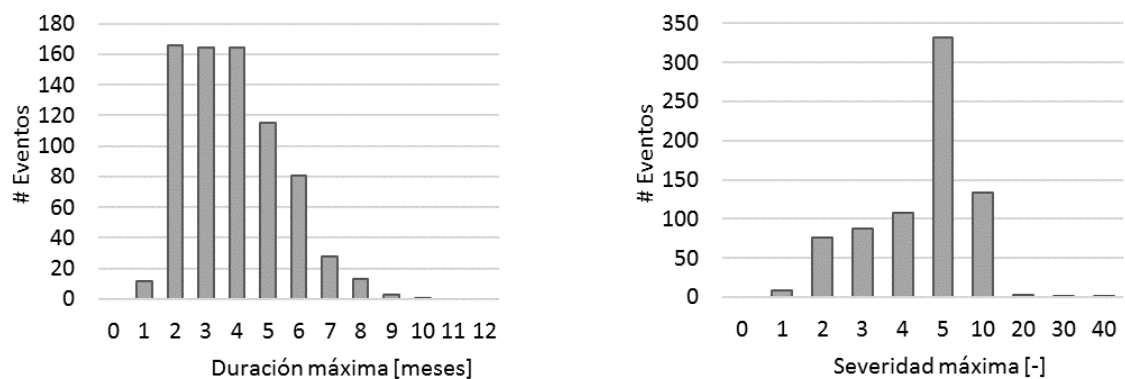


Figura 58 Duración máxima (izquierda) y severidad máxima (derecha) para 750 eventos estocásticos de sequía en Uruguay.

- Diferencias entre estaciones

Cada punto en la malla de análisis tiene diferente respuesta a las sequías regionales, que demuestra la variabilidad espacial de las condiciones climáticas y de amenaza por sequía. Para comprobar la diferencia de los eventos de sequía, en la Figura 59 y en la Figura 60 **Error! Reference source not found.** se muestran los histogramas de los valores de severidad y duración por evento, respectivamente, para dos puntos de la malla seleccionados al azar. En estos histogramas, los valores de cero (0) indican que no se presentó sequía en esta estación en particular, a pesar de ser un evento regional. Entonces, se puede ver como en el Punto 1 no se presenta sequía en casi el 50% de los eventos, mientras que en el Punto 48 esta proporción baja al 20% de los casos.

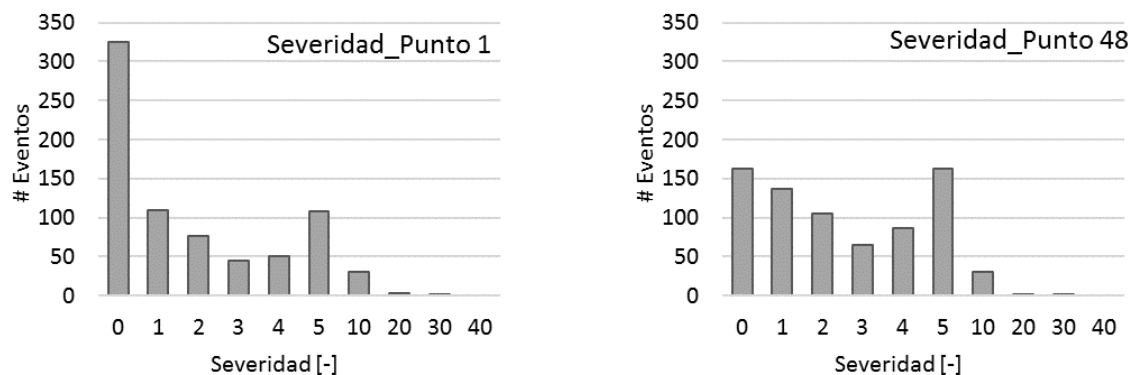




Figura 59 Severidad para 750 eventos estocásticos de sequía en Uruguay, comparando dos puntos aleatorios de la malla.

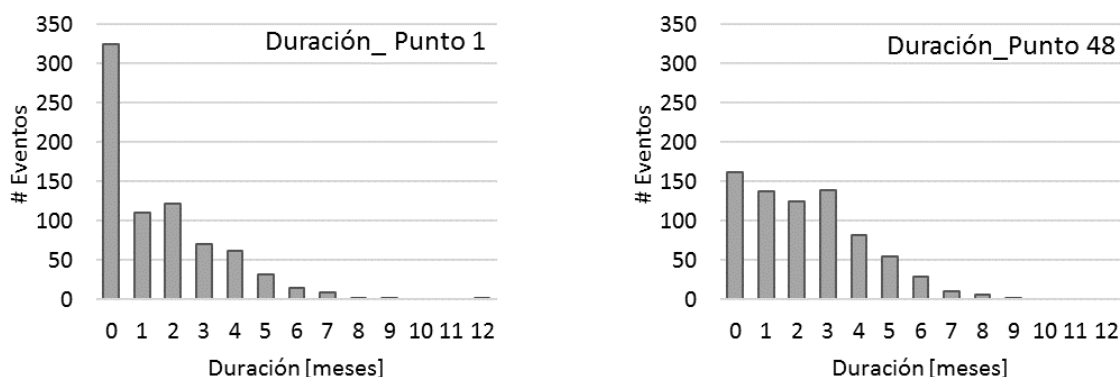


Figura 60. Duración en meses para 750 eventos estocásticos de sequía en Uruguay, comparando dos puntos aleatorios de la malla.

Estos histogramas muestran que cada estación de la malla de análisis tiene un comportamiento diferente. Es por esto por lo que se prefieren los mapas para difundir la información de amenaza de sequía. Los valores de los mapas se obtienen a partir de interpolaciones espaciales (tipo kriging) y se elaboran en software especializado en sistemas de información geográfica como ArcGIS y Surfer.

### 1.18 Curvas y mapas de amenaza por sequía

Los resultados de la modelación de la amenaza se presentan a continuación en formato de mapas de amenaza por escenario, y curvas y mapas de amenaza integrada para toda la región estudio en Uruguay. Los mapas de amenaza por escenario permiten comparar la intensidad y distribución espacial de los efectos de un único evento. Los mapas de amenaza integrada permiten comparar las intensidades según el periodo de retorno y establecer zonas que están más o menos expuestas a la amenaza de sequía dentro de la región.

La interpolación espacial se realiza utilizando el método kriging, que es método geoestadístico que supone una correlación espacial entre puntos y tienen la capacidad de proporcionar al modelador una medida de certeza o precisión de las predicciones (Verdin, Funk, Rajagopalan, & Kleiber, 2016). Este método permite obtener predicciones de valores de los parámetros que definen la sequía en ubicaciones diferentes a los

puntos donde se hicieron las mediciones (en este caso la malla de análisis sobre los tres países). Usando kriging se puede obtener un mapa de formato ráster, en la que se calcula el valor del parámetro en cada pixel. Kriging es un método conveniente porque permite interpolar espacialmente sin conocer la varianza de los parámetros de interés. Al comparar con otros métodos de interpolación espacial, el kriging se considera un método robusto, pero de alta demanda computacional ya que utiliza los datos medidos para modelar el variograma y hacer las predicciones. Por otro lado, métodos más sencillos, como el de la distancia inversa ponderada (IDW) que es un método determinista, no brindan información sobre la certeza de los resultados, o definen una covarianza generalizada sin considerar los datos medidos como el método spline. Para más información sobre metodologías de interpolación espacial se recomienda consultar el manual de ArcGIS disponible en línea (ArcGIS, s/f) en español que presenta una descripción detallada y sencilla de diferentes métodos, o documentos como el de Li & Heap (2008) que presenta un compilado de los diferentes métodos y sus respectivos alcances (en inglés). Una breve descripción del método de kriging se presenta en el Anexo A. 6.

Los resultados de severidad e intensidad se presentan como el valor absoluto del indicador, que define sequías cuando toma un valor menor a cero. Por su parte, las curvas de amenaza se presentan por sitio de cálculo, permitiendo ver la variación de la tasa de excedencia del indicador seleccionado para Uruguay.

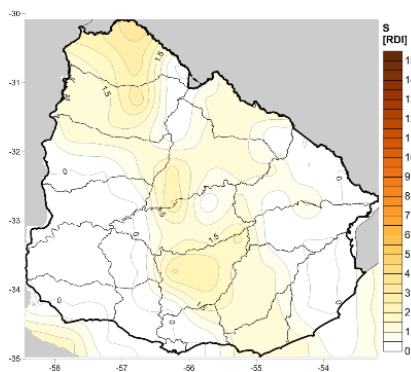
### 1.18.1 Mapas de amenaza por escenario

La Figura 61 **Error! Reference source not found.** muestra la distribución espacial de la severidad, duración e intensidad, de tres escenarios estocásticos de sequía, obtenido para Uruguay. Estos mapas muestran las diferencias que se pueden presentar en eventos generados estocásticamente. Los eventos estocásticos que componen la amenaza cumplen con las suposiciones de ser mutuamente excluyentes (dos eventos no pueden ocurrir al mismo tiempo) y colectivamente exhaustivos (cubren todas las intensidades posibles). Entonces, como se puede ver en los mapas, se pueden encontrar eventos de baja intensidad como los mapas de la izquierda que representan el evento 481, para el cual las condiciones de sequía se presentan únicamente en el centro del

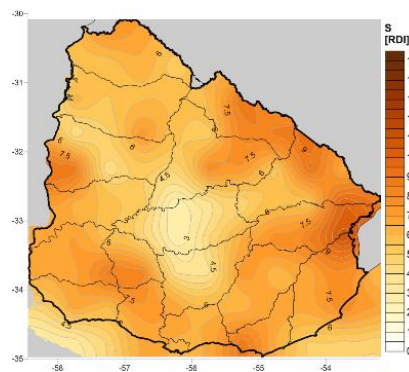
país, especialmente en los departamentos de Florida y Tacuarembó, con severidad que apenas supera el valor de 3. Por otro lado, se pueden ver casos más extremos como el evento 237 (a la derecha en los mapas) que muestra un evento de sequía más extenso con efectos en departamentos como Flores y Río Negro por el oeste y Rivera por el este. La duración de este evento alcanza los 7 meses. A diferencia del evento 481, el evento 237 tiene poca intensidad en el departamento de Flores. El evento 18 no alcanza valores de severidad o duración tan altos como el evento 237, sin embargo, alcanza mayores valores de intensidad de la sequía en los límites de los departamentos Treinta y Tres y Rocha, lo que indica que, aunque la duración de la sequía puede ser menor, su severidad media alcanza valores más altos, lo que puede inducir mayores pérdidas en cultivos al inducir a las plantas a condiciones extremas de déficit hídrico.

Los 750 eventos de sequía tienen diferentes configuraciones de intensidad, medida en términos de la severidad y la duración, lo que permite en la evaluación probabilista de riesgo, considerar todos los escenarios posibles.

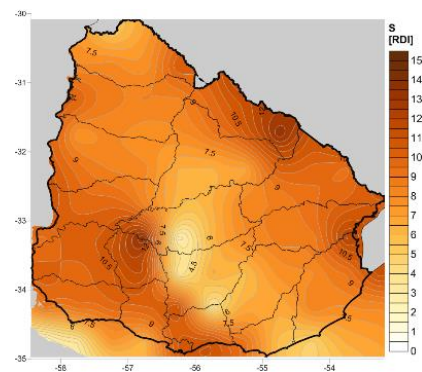
## Severidad



Evento 481

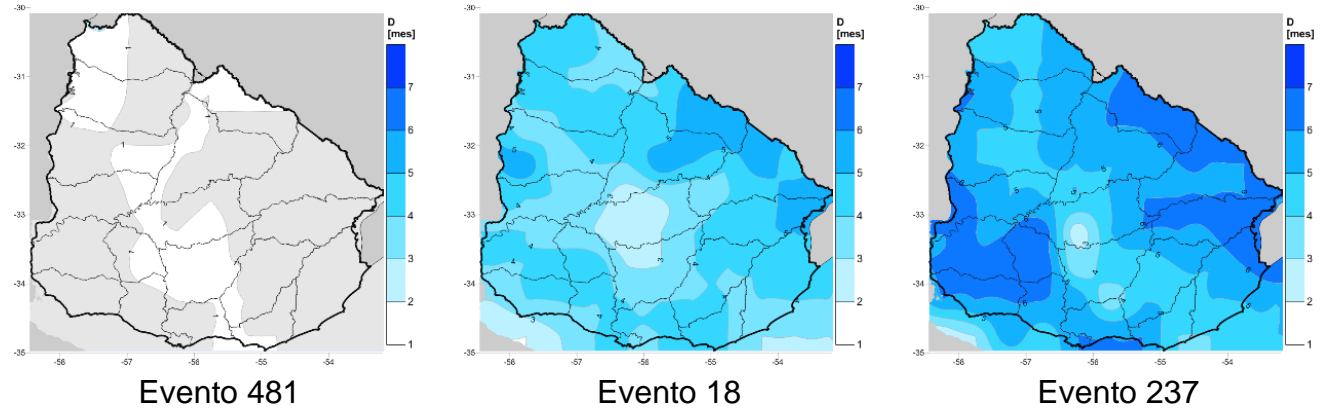


Evento 18



Evento 237

## Duración



## Intensidad

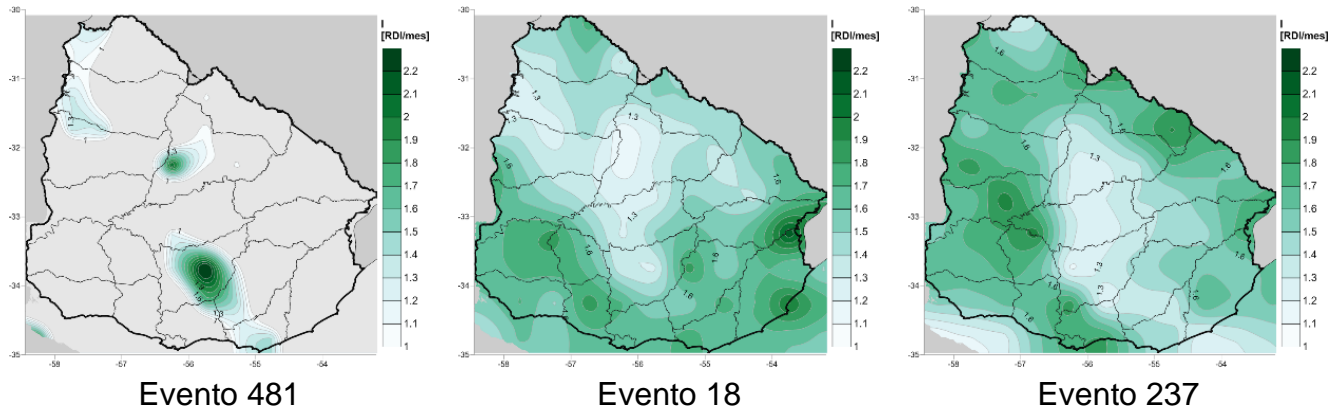


Figura 61 Mapas de severidad (arriba), duración en meses (medio) e intensidad (abajo) para tres eventos estocásticos de sequía.

### 1.18.2 Mapas de amenaza integrada

La amenaza se integra mediante un proceso matemático que permite definir las curvas de excedencia de intensidad en cada punto de la malla de cálculo. La tasa de excedencia es una cantidad que mide el número de veces al año que un valor de intensidad es igualado o excedido. Sea  $a$  la medida de intensidad calculada (e.g. RDI, severidad, duración, etc), su tasa de excedencia  $\nu(a)$ , para una ubicación en la malla de cálculo, se determina como:

$$\nu(a) = \sum_{i=1}^N P(A > a | E_i) F_i \quad (\text{Ec. 0-3})$$

En donde  $N$  es el número total de escenarios calculados,  $\Pr(A > a | E_i)$  es la probabilidad de exceder  $a$ , condicionada a la ocurrencia del escenario  $i$  y  $F_i$  es la frecuencia anual de ocurrencia del escenario  $i$ .

Teniendo las tasas de excedencia de la medida de intensidad en todos los puntos de la malla de cálculo, es posible generar mapas de igual periodo de retorno, por medio de la selección de una tasa de excedencia (que es inversa al periodo de retorno) y la lectura en cada curva del correspondiente valor de intensidad. Los valores leídos son entonces mapeados en una malla que tiene el mismo periodo de retorno en todas las ubicaciones. Estos mapas son una herramienta útil para la toma de decisiones, ya que no están representando un único evento de amenaza, sino que integran los efectos de todos los eventos que potencialmente pueden ocurrir en el futuro. También permiten comparar los niveles de amenaza con diferentes períodos de retorno y establecer cuáles ubicaciones o regiones en el territorio tienen una mayor o menor propensión a sufrir sequías. Por lo tanto, son un insumo fundamental en el diseño y ejecución de regulaciones de uso de la tierra o proyectos de sistemas de riego en la región de estudio. Los mapas de amenaza uniforme se calculan mediante la aplicación del teorema de la probabilidad total en la colección de escenarios estocásticos de sequía.

#### **1.18.2.1 Severidad**

De la Figura 62 a la Figura 68 **Error! Reference source not found.** presentan los mapas de amenaza integrada para la severidad de la sequía en Uruguay, para 2, 10, 25, 50 y 100 años de periodo de retorno; y representan los efectos de los múltiples escenarios de amenaza considerados. El término de severidad, que se puede entender como la gravedad de la sequía, es el nivel acumulado del indicador de sequía por debajo del umbral definido para el análisis. En los mapas se presenta la severidad como el valor absoluto del acumulado del indicador de sequía (RDI), indica la gravedad de las sequías.

Los mapas muestran que la severidad de la sequía refleja un gradiente que incrementa su valor de suroeste (Departamento de Colonia) a noreste (Departamento de Cerro Largo). Los valores de severidad incrementan de 1 para el periodo de retorno de 2 años hasta 15 para periodos de retorno de 100 años, en los límites de los Departamentos de Colonia, Soriano, Flores y San José. Estos departamentos parecen ser los que experimentan los niveles de severidad de sequía más altos en todo el país para todos los periodos de retorno.

Hay que tener en cuenta que la severidad por sí sola no puede definir la gravedad de una sequía, se requiere complementar con los parámetros de duración e intensidad (Mishra & Singh, 2010). Por ejemplo, el valor máximo de severidad que se muestra en los mapas igual a 15 se puede interpretar como una sequía severa y baja duración (5 meses de sequía con valores de  $RDI=-3$ ) o una sequía moderada con larga duración (10 meses de sequía con valores de  $RDI=-1.5$ ). Por esta razón, al interpretar los mapas de amenaza integrada se recomienda analizar en simultánea los indicadores de duración e intensidad, que complementan el análisis espacial de los resultados y brindan más información para la toma de decisiones.

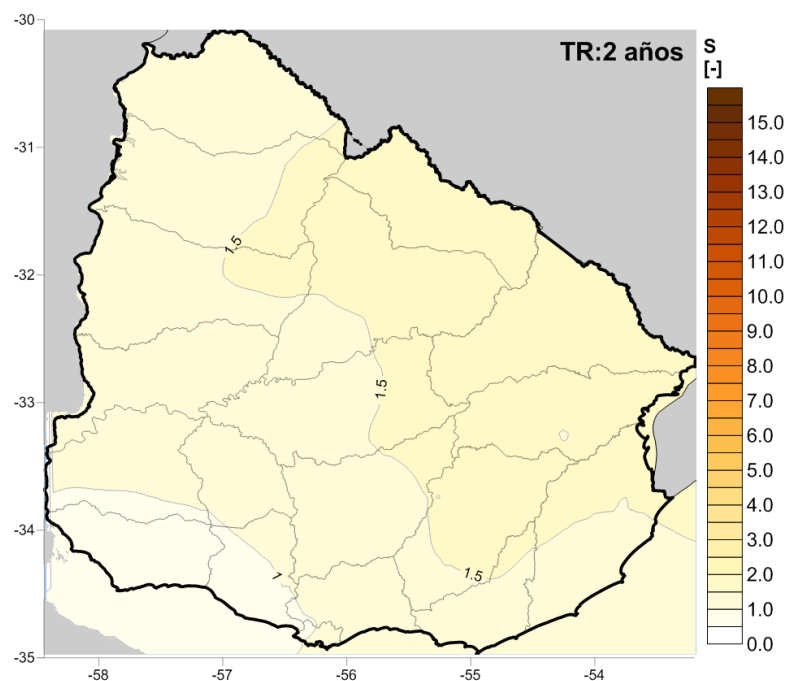


Figura 62 . Mapas de severidad de sequía para 2 años de periodo de retorno (sin unidades).

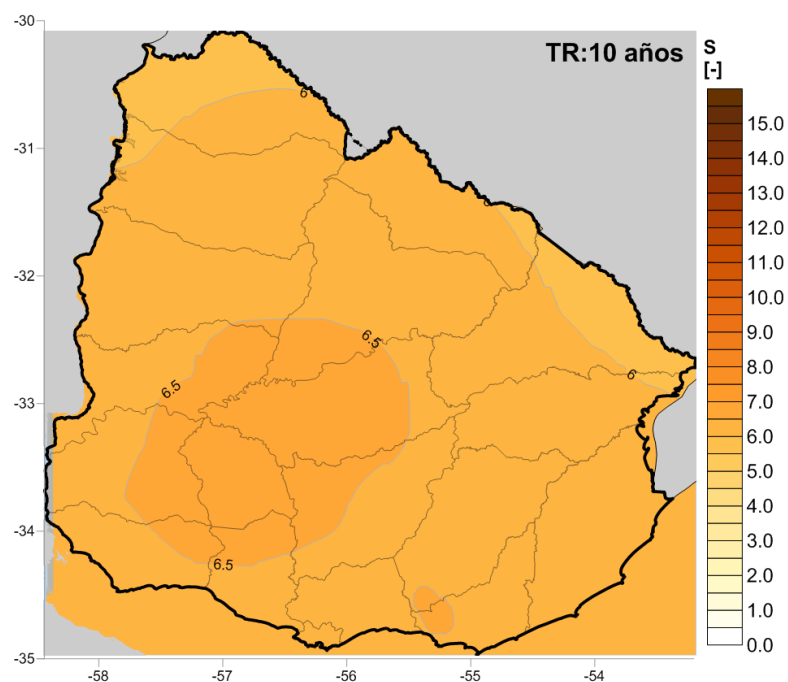


Figura 63 . Mapas de severidad de sequía para 10 años de periodo de retorno (sin unidades).

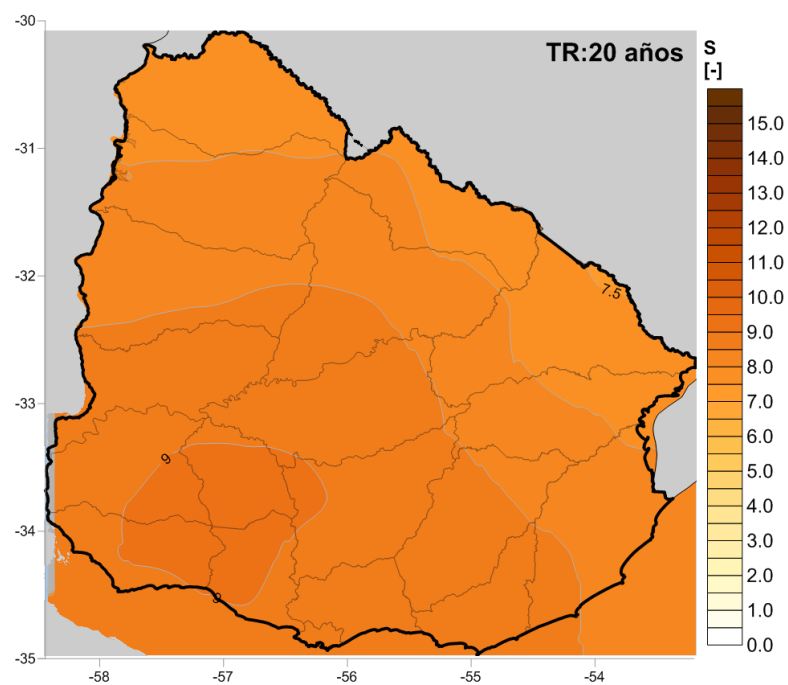


Figura 64. Mapas de severidad de sequía para 20 años de periodo de retorno (sin unidades).

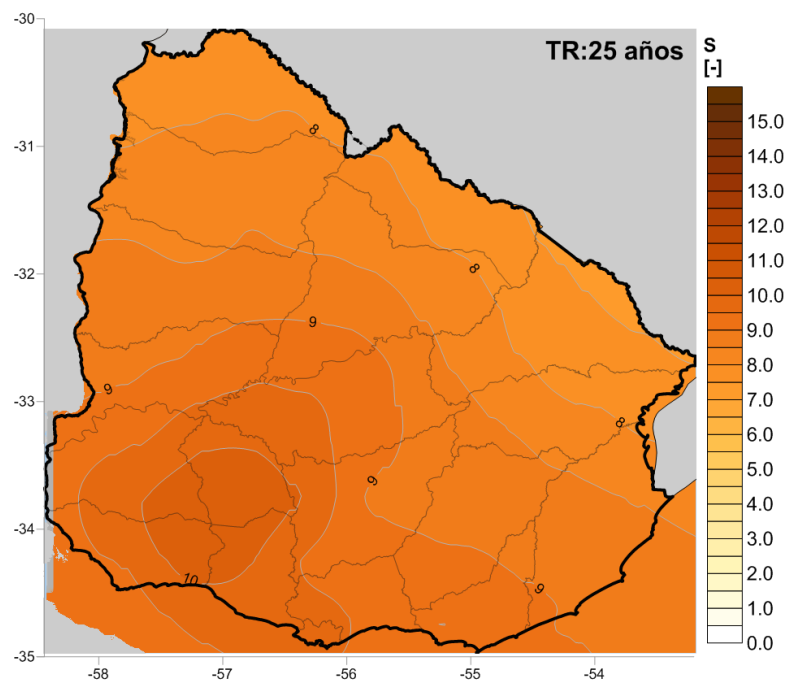


Figura 65. Mapas de severidad de sequía para 25 años de periodo de retorno (sin unidades).

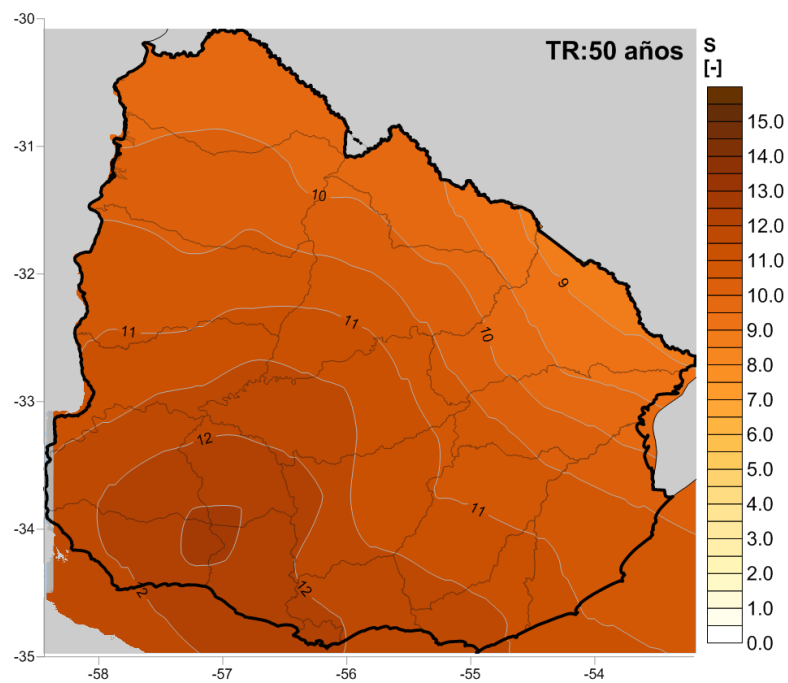


Figura 66. Mapas de severidad de sequía para 50 años de periodo de retorno (sin unidades).



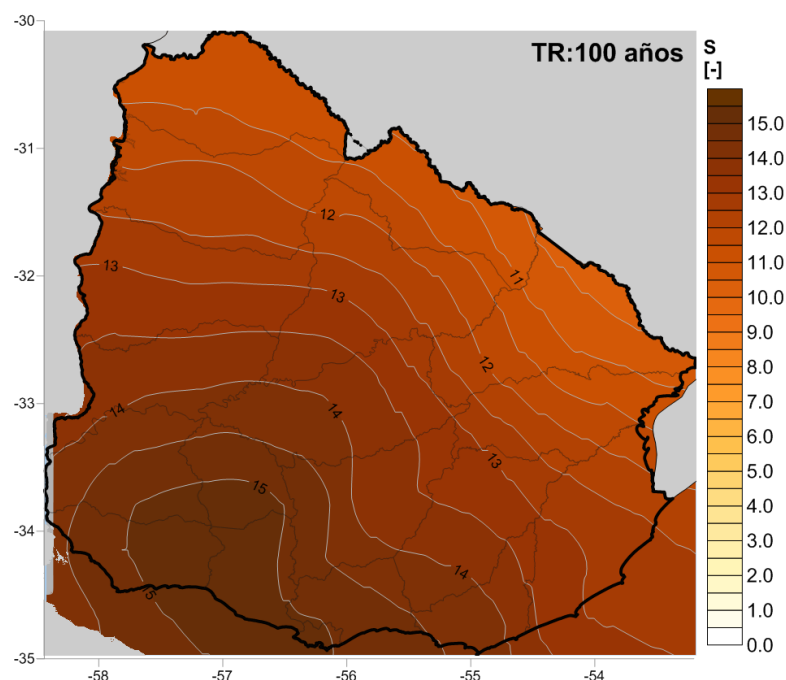


Figura 67. Mapas de severidad de sequía para 100 años de periodo de retorno (sin unidades).

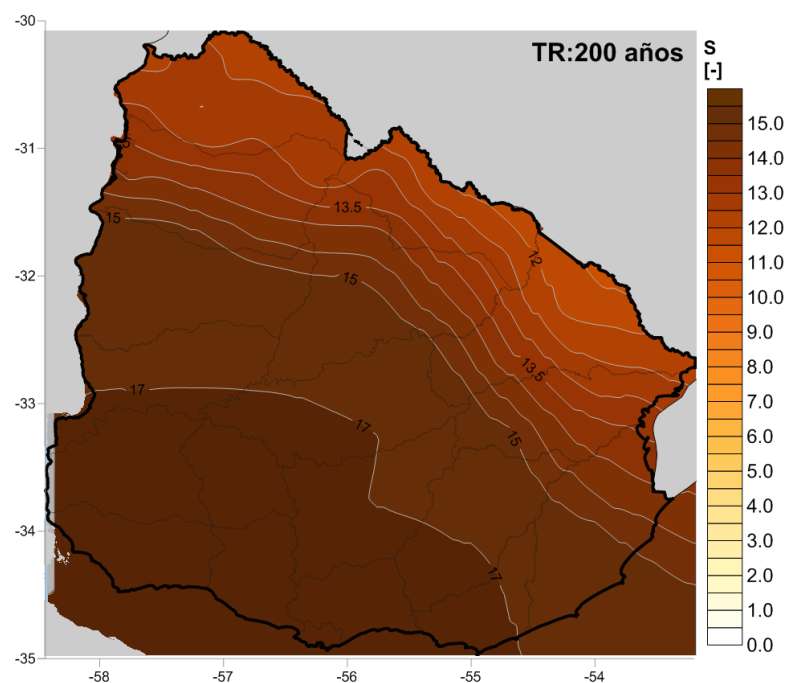


Figura 68. Mapas de severidad de sequía para 200 años de periodo de retorno (sin unidades).

### 1.18.2.2 Duración

De la Figura 69 a la Figura 74 presentan los mapas de amenaza integrada para la duración de la sequía en Uruguay. Estos mapas muestran la amenaza integrada para 2, 10, 25, 50 y 100 años de periodo de retorno; y representan los efectos de los múltiples

escenarios de amenaza considerados. El término de duración indica el número de meses en el que el indicador de sequía está por debajo del umbral definido para el análisis.

Los mapas muestran que se esperan sequías más cortas hacia el noreste del país, en los departamentos de Rivera y Cerro Largo, y sequías más largas hacia los departamentos de Colonia, San José, Soriano, Flores, Río Negro y Durazno; parte de las cuencas de Río Negro, Río Uruguay y Río de la Plata. Para periodos de retorno de 2 años, la duración esperada es de un mes que, al complementarlo con el mapa de severidad del mismo periodo de retorno, indica sequías leves. Este tipo de eventos de corto plazo se pueden mitigar con acciones locales que busquen asegurar el acceso al agua. Para el caso de 10 años de periodo de retorno, la duración de la sequía (4 meses) es homogénea para todo el país. Para periodos de retorno más altos, 50 y 100 años, las duraciones de los eventos aumentan hasta 8 meses hacia el suroeste del país. Las mayores duraciones concuerdan con las mayores severidades que se experimentan en esta zona del país para periodos de retorno de la amenaza altos. Medidas de adaptación y reducción de la vulnerabilidad a largo plazo se deben considerar para esta zona.

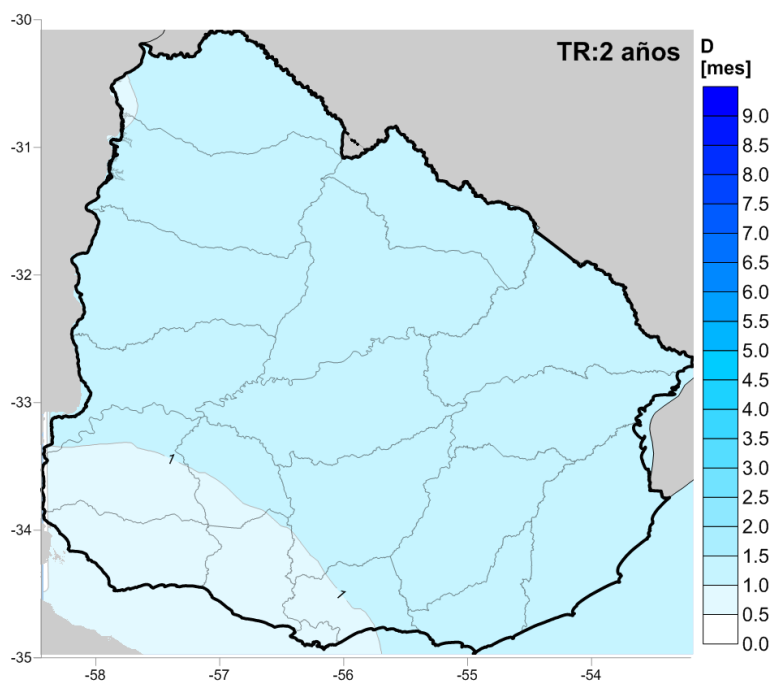


Figura 69. Mapas de duración de sequía para 2 años de periodo de retorno (en meses).

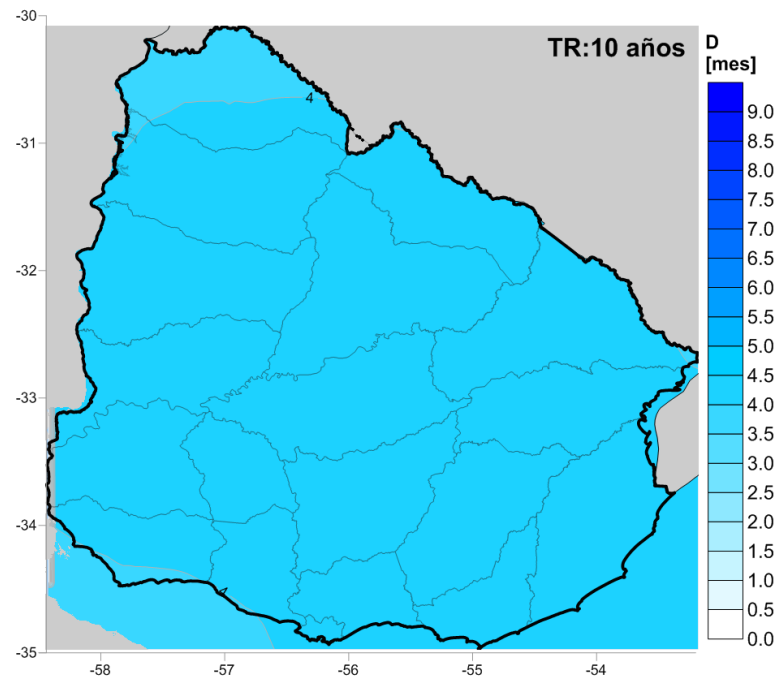


Figura 70. Mapas de duración de sequía para 10 años de periodo de retorno (en meses).

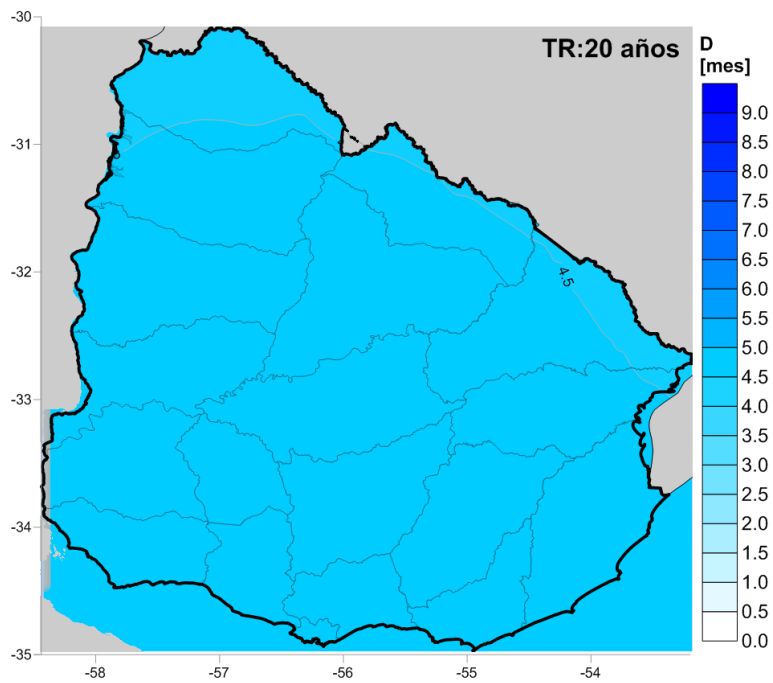


Figura 71. Mapas de duración de sequía para 20 años de periodo de retorno (en meses).

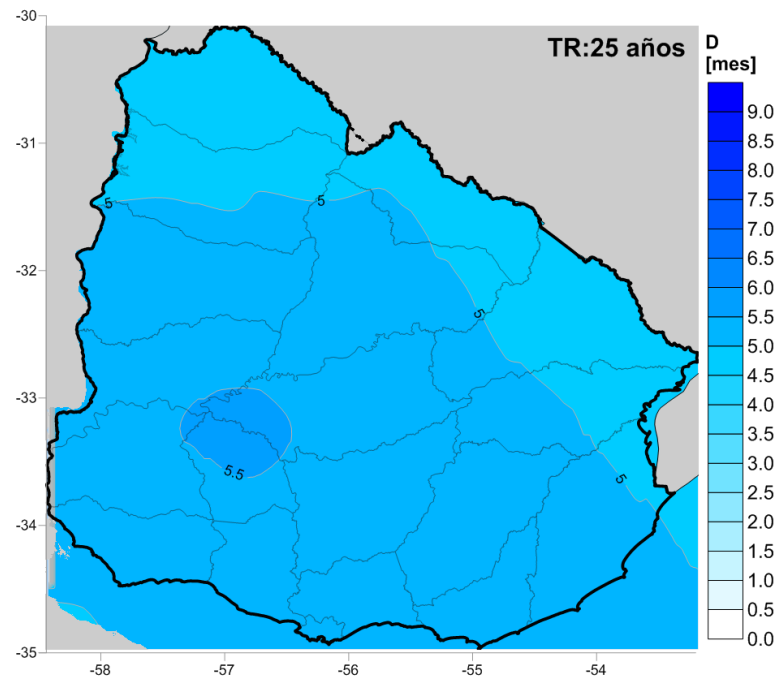


Figura 72. Mapas de duración de sequía para 25 años de periodo de retorno (en meses).

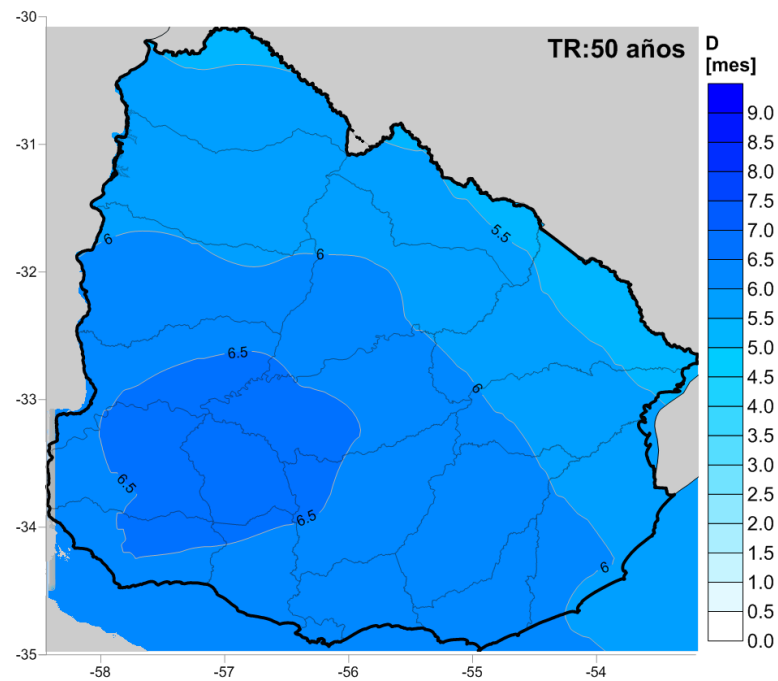


Figura 73. Mapas de duración de sequía para 50 años de periodo de retorno (en meses).

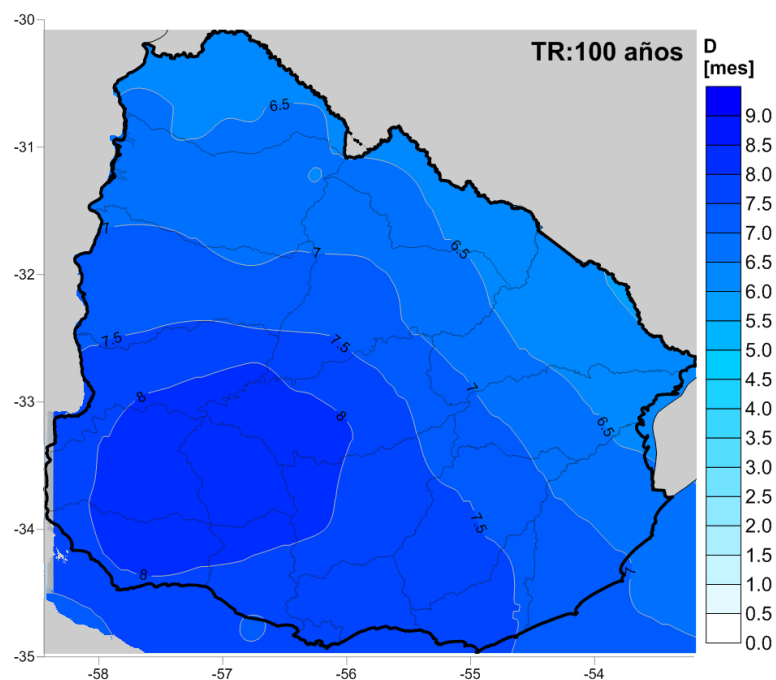


Figura 74. Mapas de duración de sequía para 100 años de periodo de retorno (en meses).

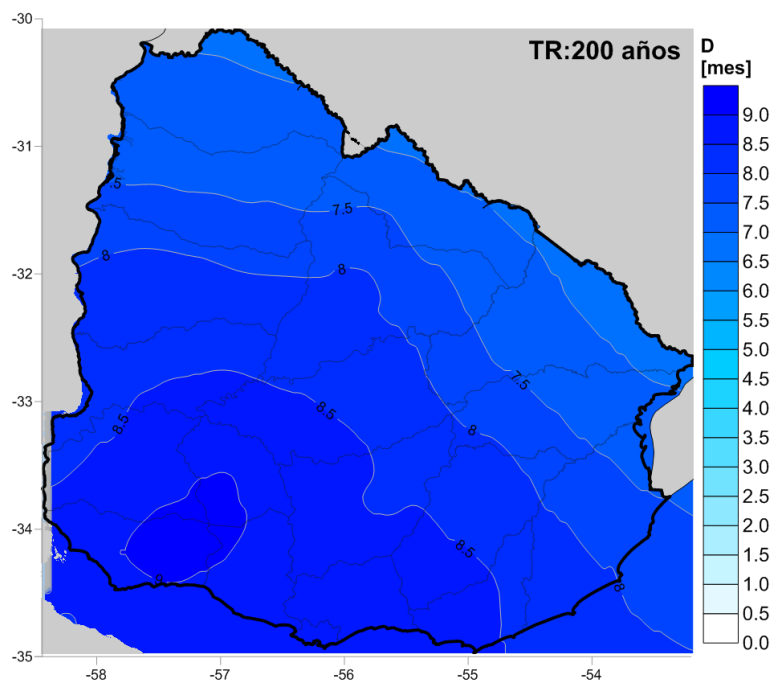


Figura 75. Mapas de duración de sequía para 200 años de periodo de retorno (en meses).

### 1.18.2.3 Intensidad

La Figura 76 a la Figura 81 **Error! Reference source not found.** presentan los mapas de amenaza integrada para la intensidad de la sequía en Uruguay. Estos mapas

muestran la amenaza integrada para 2, 10, 25, 50 y 100 años de periodo de retorno; y representan los efectos de los múltiples escenarios de amenaza considerados. El término de intensidad indica la relación entre la severidad y la duración de la sequía. En los mapas se presenta la intensidad como la división entre nivel acumulado del indicador de sequía por debajo del umbral definido para el análisis y el número de meses en que el indicador estuvo bajo el umbral.

El rango de intensidad de la sequía para Uruguay se ubica entre 0 y 2.5 (las unidades son  $1/\text{mes}$  o  $\text{mes}^{-1}$ ). Si se califican las sequías siguiendo la Tabla 6, las sequías para periodos de retorno de 2 años se consideran leves y para 10 años de periodo de retorno se consideran moderadas. Sequías con mayores periodos de retorno tienen intensidades por encima de 1.7 por mes, lo que indica que pasan a ser casos severos de déficit hídrico. Para 100 años de periodo de retorno, la intensidad de la sequía es mayor a 2 por mes y es homogénea para todo el país.

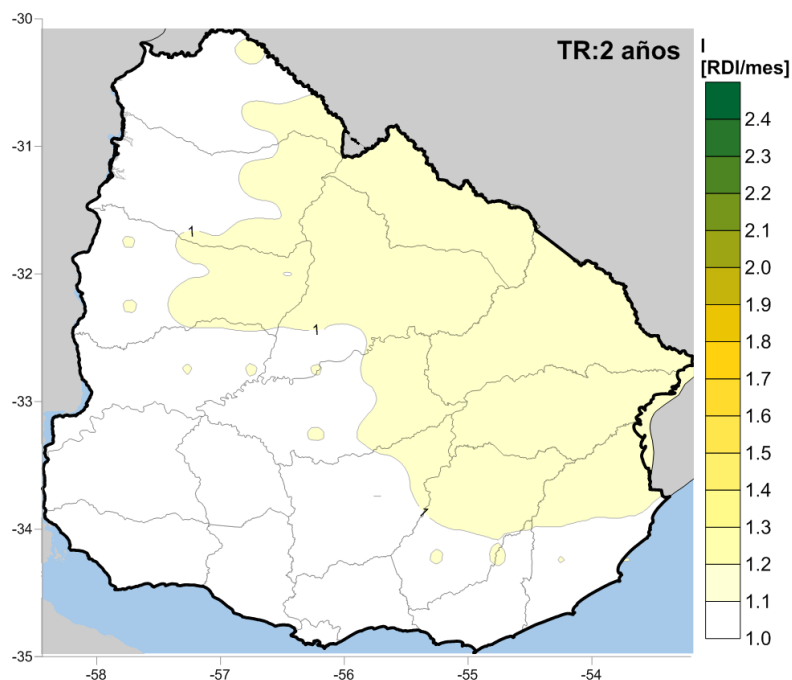


Figura 76. Mapas de intensidad de sequía para 2 años de periodo de retorno (en  $1/\text{meses}$ ).

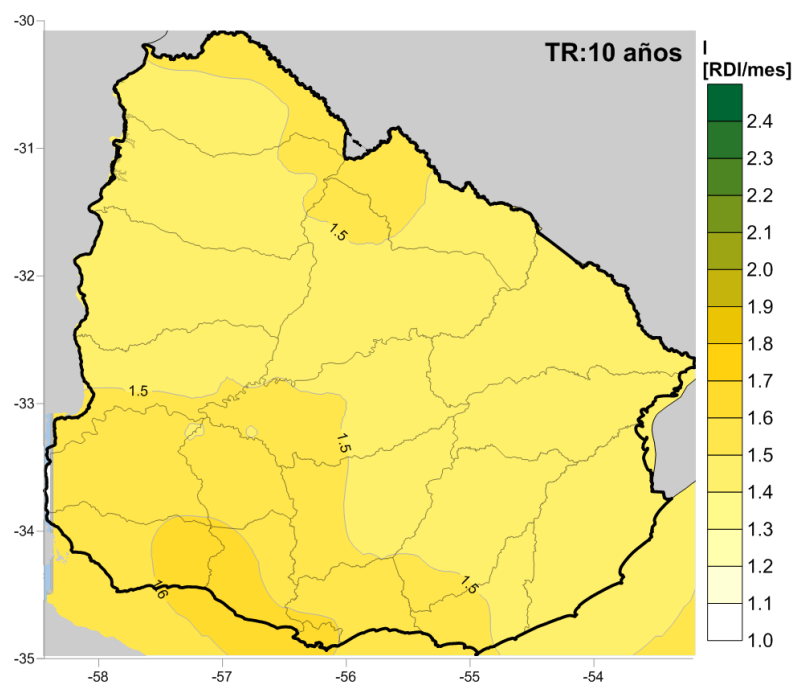


Figura 77. Mapas de intensidad de sequía para 10 años de periodo de retorno (en 1/meses).

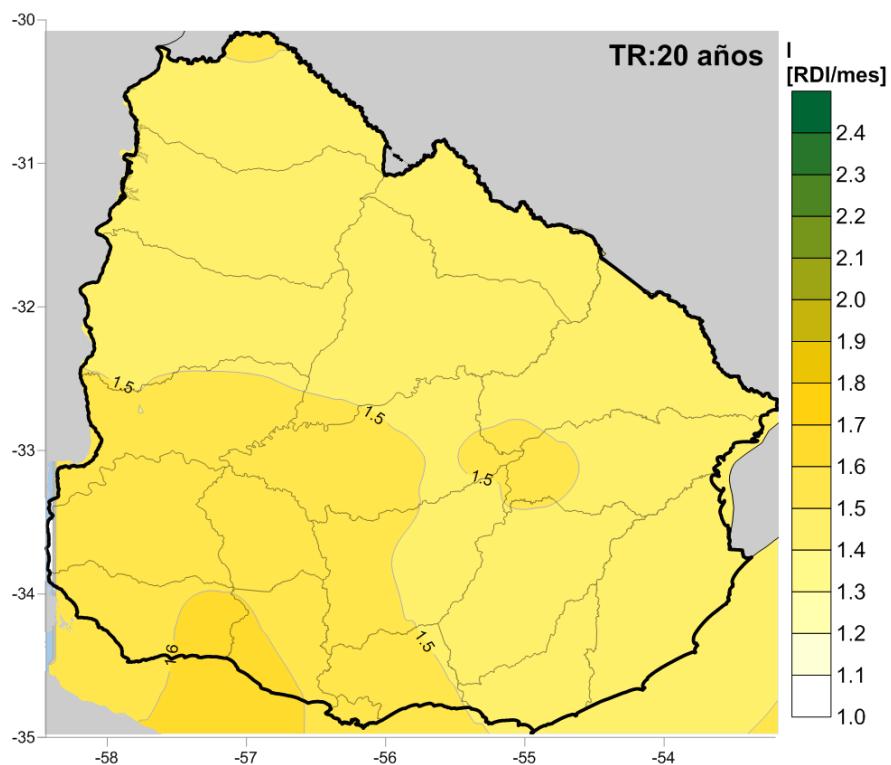


Figura 78. Mapas de intensidad de sequía para 20 años de periodo de retorno (en 1/meses).

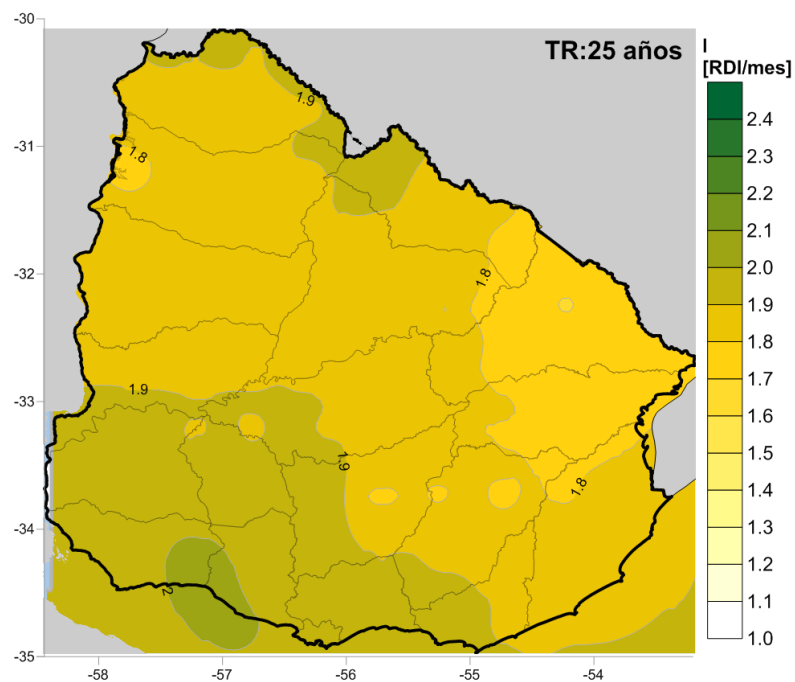


Figura 79. Mapas de intensidad de sequía para 25 años de periodo de retorno (en 1/meses).

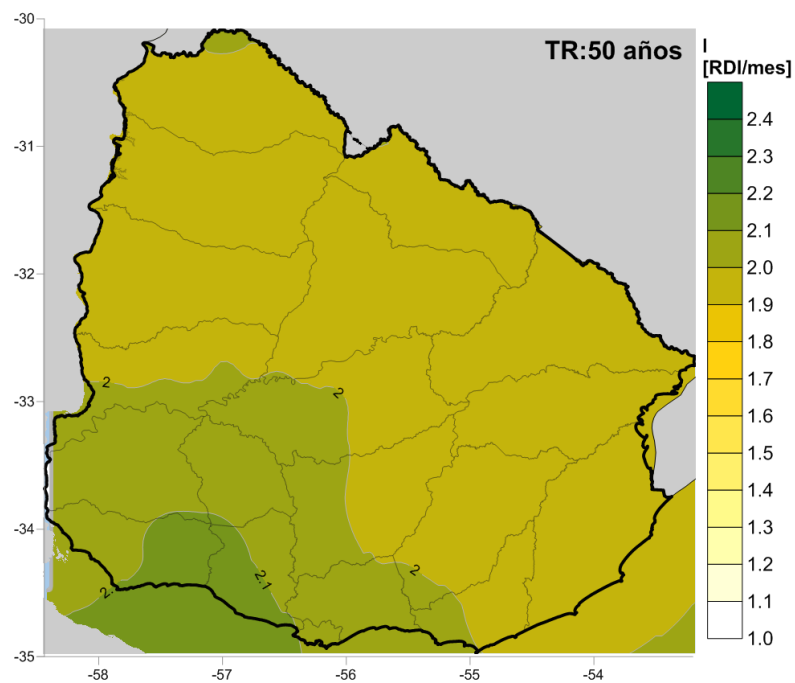


Figura 80. Mapas de intensidad de sequía para 50 años de periodo de retorno (en 1/meses).



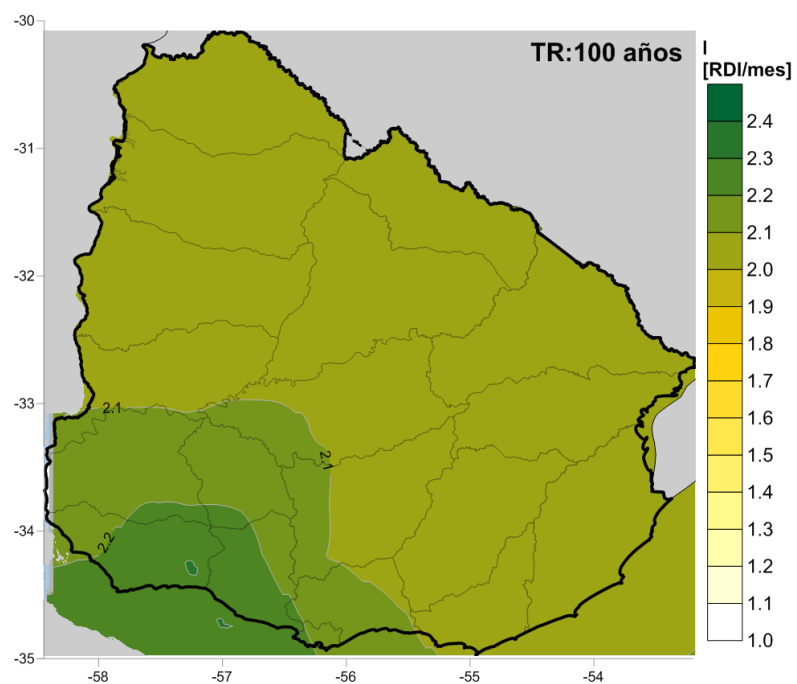


Figura 81. Mapas de intensidad de sequía para 100 años de periodo de retorno (en 1/meses).

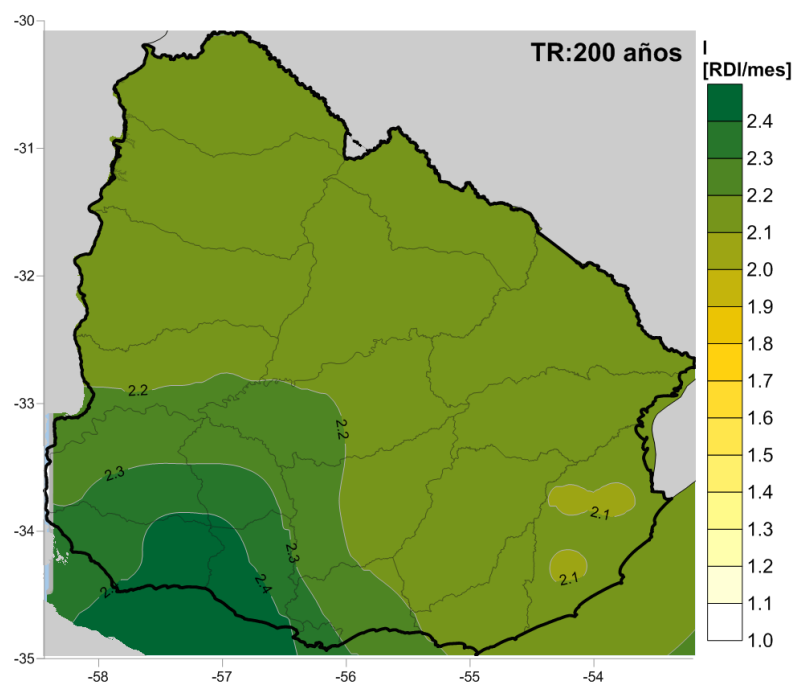


Figura 82. Mapas de intensidad de sequía para 200 años de periodo de retorno (en 1/meses).

### 1.18.3 Curvas de amenaza

Las curvas de amenaza presentan la variación de la tasa de excedencia de un indicador de sequía dado. En el caso de Uruguay, se calcularon para el RDI de 3 meses<sup>11</sup>, el cual fue seleccionado en las secciones anteriores de este documento como el que mejor representa la ocurrencia de sequías en el país. Se presentan curvas con la estimación analítica de la tasa de excedencia (i.e. aplicando la metodología de cálculo presentada en este informe) así como las tasas de excedencia estimadas de la información histórica (de manera análoga a lo presentado en el capítulo 3 de este informe para el cálculo de la curva empírica de excedencia de pérdidas).

La Figura 83 y la Figura 84 muestran las curvas de amenaza para los puntos 4 y 49 de la malla de cálculo, respectivamente. Se puede ver la curva analítica, es decir, la calculada haciendo uso de las sequías identificadas en el clima simulado, así como la curva empírica, calculada a partir de las sequías identificadas en las series climáticas históricas. Dado que la estimación histórica tiene incertidumbre, se presenta la correspondiente banda de incertidumbre (+/- una desviación estándar). Nótese que las simulaciones permiten reconstruir de manera acertada todo el espectro de valores de RDI.

---

<sup>11</sup> Las curvas se calculan para el valor absoluto de RDI, e incluyendo únicamente los RDI negativos obtenidos en las series simuladas e históricas.

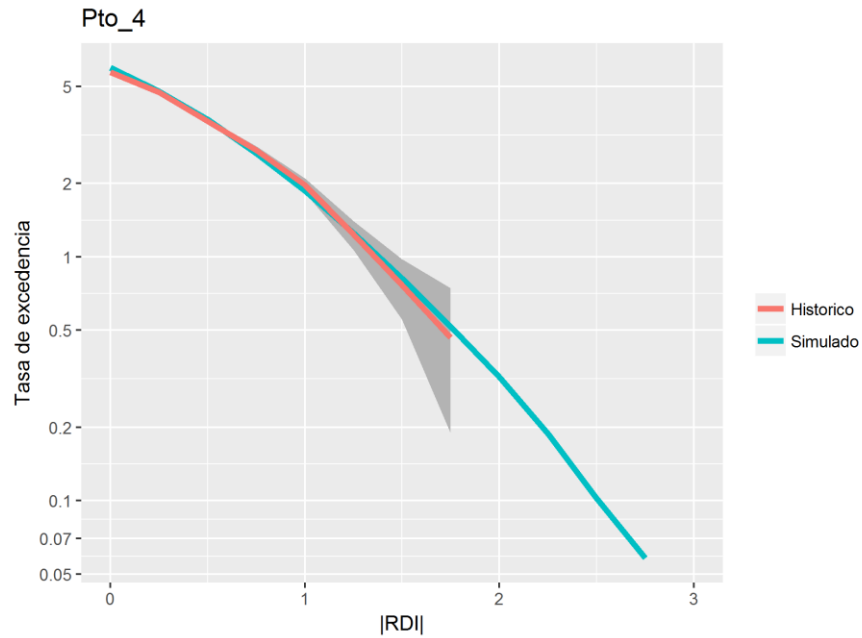


Figura 83. Curva de tasa de excedencia de amenaza, según indicador de sequía RDI.

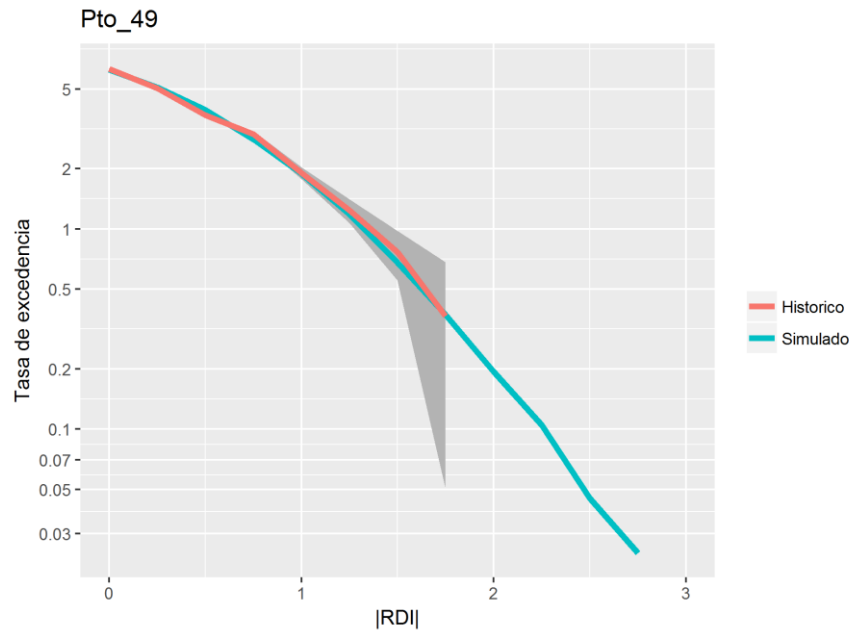


Figura 84. Curva de tasa de excedencia de amenaza, según indicador de sequía RDI

En el Anexo A. 5 se pueden consultar las curvas de amenaza para todos los puntos de la malla de cálculo sobre Uruguay. Se calculó la curva de amenaza (tanto la curva analítica como la curva empírica) para cada uno de los puntos de la malla de análisis (consultar la ubicación del punto con la Figura 17). Estas curvas permiten identificar la tasa de excedencia anual o periodo de retorno de cierto valor del indicador

de sequía RDI. Por ejemplo, para un valor de  $|RDI|=0$  (esto indica que en ese punto se espera una recurrencia de condiciones hídricas estables) la curva muestra el resultado de la tasa de excedencia anual cercana a 6, lo que es lo mismo que un periodo de retorno de 0.16 años o 2 meses. Para un valor de  $|RDI|=1.5$  (valor absoluto del indicador), que hace referencia a sequías severas, la curva para el Punto 49 muestra una tasa de excedencia anual de 0.75 que es lo mismo a 16 meses de periodo de retorno. Lo que implica que en ese punto se esperan sequías severas con una alta recurrencia, pero para considerarse sequías regionales se debe tener condiciones similares simultáneas en varias estaciones de la región.

## 1.19 Efecto del cambio climático en la amenaza por sequía

De acuerdo con el reporte AR5 del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): "el calentamiento del sistema climático es inequívoco, y desde 1950, muchos de los cambios observados son sin precedentes sobre décadas y hasta milenios. La atmósfera y océano se han calentado, las cantidades de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar ha aumentado, y la concentración de gases de efecto invernadero ha aumentado" (IPCC, 2013). Debido a esto es importante considerar los efectos de este cambio climático en la evaluación del riesgo por sequía.

Con este fin, se analizaron por lo menos 41 modelos circulación global<sup>12</sup> (Ver Anexo A. 6) y los cuatro diferentes escenarios de forcings antropogénicos (RCP o Representative Concentration Pathways) definidos en el informe AR5 del IPCC. Para seleccionar el modelo que mejor se ajusta al territorio analizado, se minimiza la diferencia entre la media de los registros históricos en el periodo 1981-2010 y la predicción de cada modelo para el mismo periodo histórico, tanto para precipitación como temperatura. Una vez se determina el modelo de cambio climático más adecuado, se fijan las proyecciones de temperatura y precipitación en el futuro para la región de estudio, y con esto se perturban las series estocásticas de temperatura y precipitación que se generan para la modelación de la sequía.

### 1.19.1 Dispersión de los modelos globales de circulación

La Figura 85Error! Reference source not found. y Figura 86Error! Reference source not found., muestran las proyecciones de cambio en precipitación y temperatura media en la ubicación del punto 50 en la malla de análisis de Uruguay. Estas proyecciones son

---

<sup>12</sup> Se usan los siguientes modelos de circulación GCM (incluyendo multiples versiones): Australian Community Climate and Earth System Simulator (ACCESS 1); Beijing Climate Center Climate System Model versión 1.1 (BCC-CSM 1.1); Beijing Normal University Earth System Model (BNU-ESM); Canadian Earth System Model (CanESM2); Community Climate System Model (CCSM4); Community Earth System Model Version 1 (CESM1); Centro Euro-Mediterráneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC); Centre National de Recherches Météorologiques - Coupled Model 5 (CNRM-CM5); Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO-Mk3-6-0); Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System, Gridpoint version 2 (FGOALS-g2); First Institute of Oceanography-Earth System Model (FIO-ESM); Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - Earth System Model 2G (GFDL-ESM2G); Goddard Institute for Space Studies-E2 (GISS-E2); Hadley Centre Coupled Model Version 3 (HadCM3); Hadley Centre Global Environmental Model, version 2 (HadGEM2-ES); Institute for Numerical Mathematics Climate Model 4 (INMCM4); Institut Pierre Simon Laplace Model (IPSL-CM5A); Model for Interdisciplinary Research on Climate 4 (MIROC4h); Model for Interdisciplinary Research on Climate Earth System Model (MIROC-ESM); Max Planck Institut fur Meteorologie Earth System Model (MPI-ESM); Meteorological Research Institute Global Climate Model 3 (MRI-CGCM3); Norwegian Earth System Model (NorESM1).

los resultados de la combinación de 41 modelos de circulación global, evaluados para cuatro RCP definidos en el AR5 del IPCC. En total se evalúan 311 proyecciones, considerando las diferentes corridas de cada modelo.

Debido a que existen múltiples predicciones, el rango de resultados es muy amplio. Para el ejemplo del punto 50, la variación en temperatura para el periodo más extenso (2070-2099) varía entre 0.3°C y 4°C. En el caso de la precipitación, la variación en este mismo periodo esta entre -6% y +12%. Esta situación hace que no sea fácil la selección de un modelo para determinar el cambio esperado en el clima en esta ubicación.

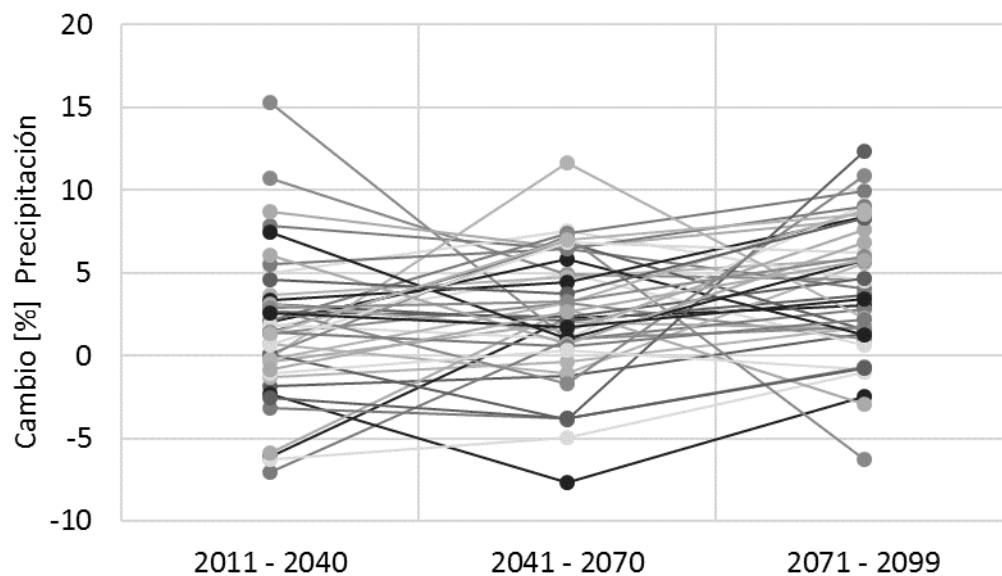


Figura 85. Proyecciones de cambio de precipitación según múltiples GCM y RCP

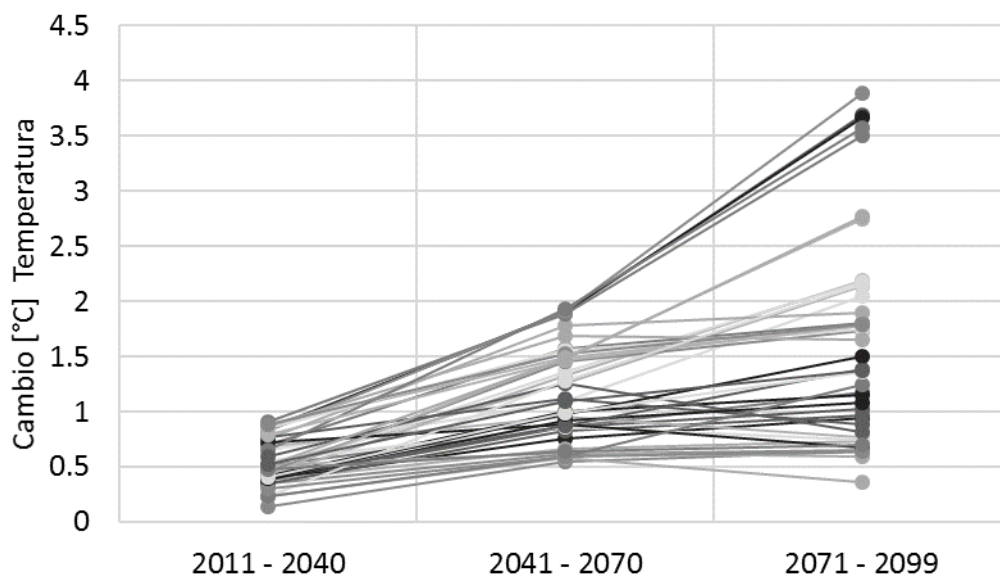


Figura 86. Proyecciones de cambio de temperatura promedio según múltiples GCM y RCP.

Con el fin de mostrar la variación y dispersión de los valores de línea base de la precipitación y la temperatura, se presentan diagramas de caja (Box-Whisker) de valores para 4 puntos seleccionados dentro de Uruguay (ver Figura 87). El punto 13 representa la zona suroeste, el 21 el sureste, el 50 zona central, y el 91 la zona norte, con el fin de mostrar su variación espacial dentro del territorio. El diagrama de caja de valores proporciona información importante acerca de la distribución y nivel de dispersión del conjunto de los datos de los modelos de circulación global. También se muestran los valores de media y mediana, los valores que se encuentran dentro y fuera de los percentiles 25 y 75, y además resalta los valores atípicos dentro del conjunto de datos. A estos diagramas de caja se sobrepone (línea negra) los valores promedio diarios multimensuales de la base de datos históricos.

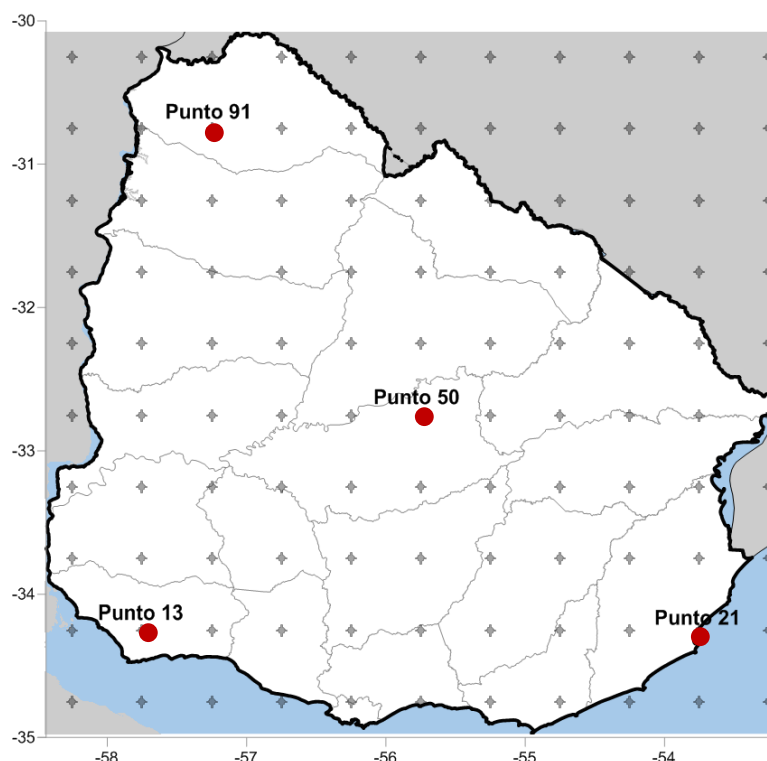


Figura 87. Ubicación de los 4 puntos seleccionados como ejemplo.

### ***Precipitación***

La Figura 88 presenta los diagramas de cajas de precipitación para los puntos seleccionados. Los diagramas de cajas muestran que los valores de precipitación de línea base de los modelos de circulación global para el periodo de 1981-2010, presentan pocos valores atípicos; sin embargo, se presenta una dispersión de los valores alta, que se evidencia en el tamaño de las cajas de cada uno de los meses. En general para todo el territorio uruguayo, los valores medios de precipitación diaria mensual de la base de datos históricos de CHIRPS, se encuentran por encima de los valores de la media y la mediana de los valores de línea base de los modelos de circulación global. En la mayoría de los meses y puntos, los promedios de los registros históricos se encuentran por encima o cercano al cuartil 75, a excepción de los meses de diciembre y enero que corresponden a la época de verano.

### ***Temperatura***

La Figura 89Figura 89. Diagrama de cajas de valores de promedio mensuales temperatura media



muestra los diagramas de cajas de temperatura media mensual para los puntos seleccionados. Los diagramas de cajas muestran que los valores de temperatura de línea base de los modelos de circulación global para el periodo de 1981-2010, presentan muy poca dispersión entre si (la diferencia de valores entre el cuartil 25 y el cuartil 75 es muy poca). En general, para los meses de verano (diciembre a febrero), la media de los registros históricos está por debajo de la media de los modelos de circulación global. Para el resto de los meses, la media histórica parece estar dentro del rango entre 25% y 75% de la línea base de los modelos de circulación global. Es decir, los modelos logran captar la tendencia de la temperatura a lo largo del año, encontrándose que los valores medios de temperatura diaria mensual de los datos históricos, se encuentra dentro del rango representado por las cajas de los valores de GCM.

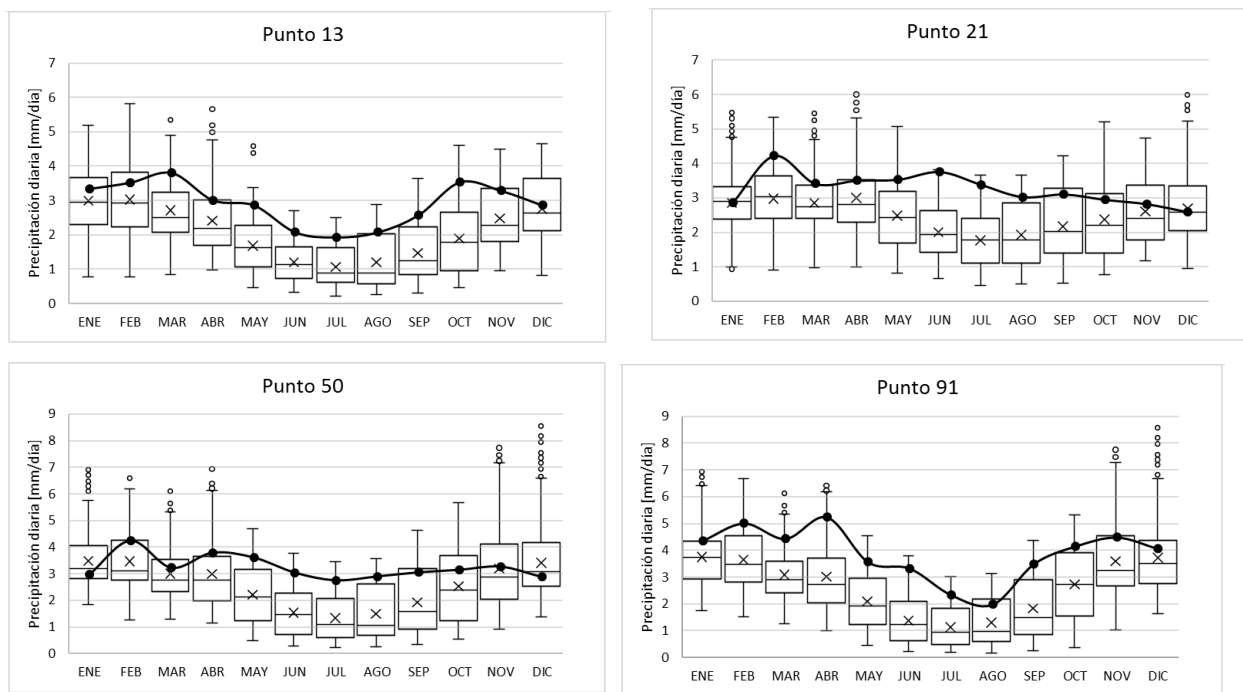


Figura 88 Diagrama de cajas de valores medios mensuales de precipitación total diaria

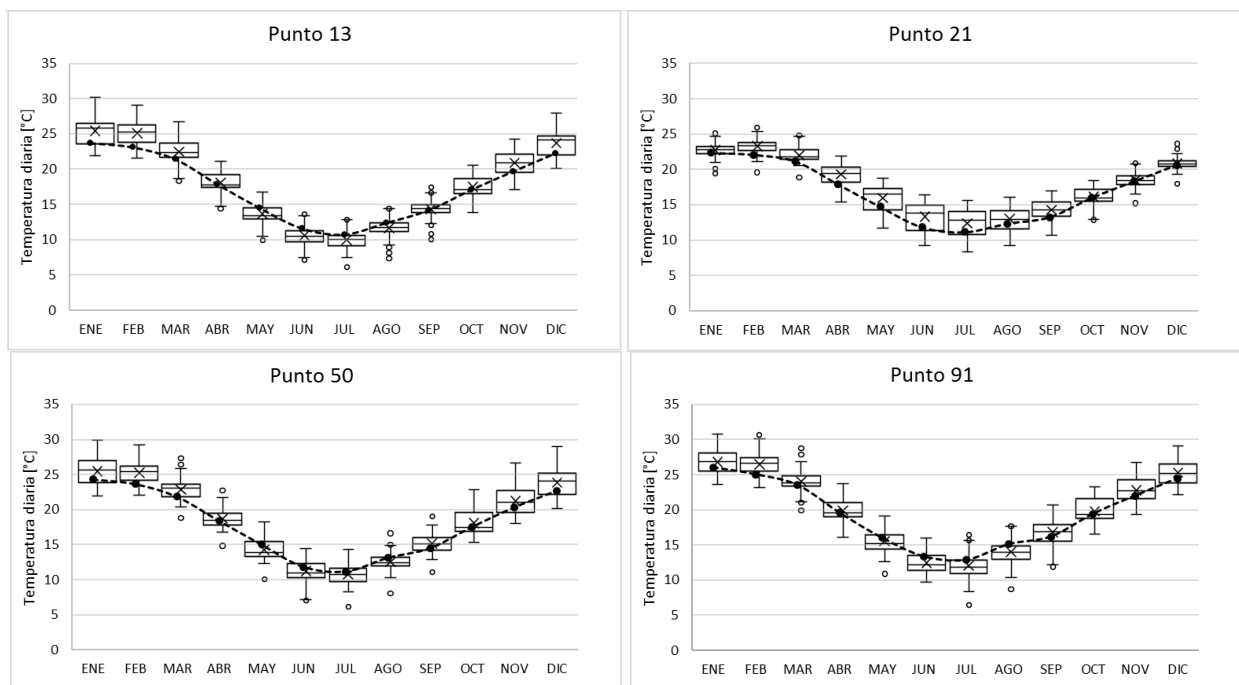


Figura 89. Diagrama de cajas de valores de promedio mensuales temperatura media

Este análisis permite concluir que:

- Los modelos de circulación global tienen una alta dispersión, lo que indica que las proyecciones para un mismo punto tienen un amplio rango de valores esperados.
- No hay un único modelo que se ajuste de forma precisa a los registros históricos para un punto o un área de análisis.
- No se recomienda utilizar el promedio de los resultados de los modelos de circulación global, ya que, en el caso de Uruguay, la serie media histórica de precipitación está siempre por encima de la media de los modelos.
- No se recomienda utilizar valores máximos ni mínimos de los modelos de circulación global, porque pueden subestimar o sobre estimar el clima histórico y aumentar la incertidumbre con las proyecciones de variabilidad climática en el futuro.

El alcance del estudio contempló evaluar el efecto del cambio climático en variaciones en precipitación y temperatura por los siguientes criterios:

- Los modelos de circulación global siempre brindan proyecciones de estas dos variables, y en pocos casos brindan información sobre otros parámetros climáticos (humedad, radiación, velocidad del viento) al ser parámetros complejos que

responden a interacciones físicas y químicas de los modelos acoplados de atmósfera-oceáno-superficie terrestre-hielo oceánico.

- La metodología de amenaza por sequía contempla en su alcance la generación estocástica de series de precipitación y temperatura (proceso estadístico de simulación del clima a partir de registros históricos). La modelación de otras variables climáticas (humedad, radiación, velocidad del viento) implica el uso de modelos complejos de circulación atmosférica e interacción de sistemas terrestres, que no está dentro del alcance de este estudio.

### **1.19.2 Selección del modelo global de circulación**

Dada la dispersión de los modelos de circulación global, se debe seleccionar el modelo que mejor se ajuste a la línea base de clima analizada, 1981-2010, para el territorio en estudio. La metodología propuesta y que se aplica en este estudio, consiste en identificar cuál es el modelo cuyos resultados de calibración en la historia mejor se ajustan a las condiciones históricas medidas en la zona. Lo que se busca es definir el modelo que mejor replica las condiciones pasadas para disminuir la incertidumbre de las proyecciones al futuro. Para realizar este proceso de validación se toman los valores de temperatura y precipitación correspondientes al periodo de tiempo base (1981-2010) dados por cada uno de los modelos, y se comparan con los valores de la base de datos climática (de CHIRPS y de la Universidad de Princeton) que se aplica en el modelo de amenaza por sequía. En este caso, se debe seleccionar el modelo que minimice, en la mayor extensión del territorio, las diferencias entre los registros históricos y las predicciones (es decir, en el mayor número de estaciones o puntos de la malla de análisis).

#### **1.19.2.1 Diferencias entre valores medios de registros históricos y modelos de circulación global**

Para considerar la estacionalidad de los parámetros de precipitación y temperatura, se hizo el análisis de diferencias (entre predicciones del modelo y registros históricos en el periodo 1981-2010) en escala mensual. Es decir, se tomaron los valores de las predicciones del modelo para precipitación diaria y temperatura media diaria de cada uno

de los meses y se comparó (para cada mes) con el promedio diario multianual y la temperatura media de los registros de CHIRPS y la Universidad de Princeton. La Figura 90 muestra, de forma gráfica, la dispersión de las diferencias de precipitación (eje y-vertical) y temperatura (eje x-horizontal) para el mes de abril del punto 50. Los puntos de color azul indican la diferencia de cada uno de los modelos, con sus respectivos RCP y múltiples corridas; en total hay 311 puntos azules en la gráfica. Las líneas punteadas en las gráficas indican el percentil 25, 50 y 75 de la serie de las diferencias. Estos límites permiten medir la dispersión de los datos y se usan como valores de referencia para seleccionar modelos que se encuentren dentro de un percentil definido por el modelador. Los puntos que se ubican por fuera del tercer anillo (percentil 75) y muy alejados del punto de origen, se pueden considerar como puntos extremos.

Considerando que el origen de los ejes de estas gráficas (punto 0,0) indica que no hay diferencia entre los registros históricos y los resultados del modelo de circulación global, se tiene que:

- Puntos hacia la derecha del eje vertical indican que los modelos de circulación global tienen temperaturas más elevadas, es decir, condiciones de clima más calurosas. Los puntos hacia la izquierda de este eje indican condiciones de clima más frías en los modelos de circulación global.
- Puntos hacia la parte superior del eje horizontal indican que los modelos de circulación global tienen precipitaciones más altas que los registros históricos usados en la modelación. Los puntos hacia la parte inferior de este eje indican menor precipitación en los modelos de circulación global.

Los puntos en morado (más grandes) indican la ubicación de las diferencias del modelo seleccionado, aplicando criterios de selección regional (escoger un único modelo para todos los puntos en la malla de análisis), que se explica más adelante. Se presenta más de un punto seleccionado, porque el análisis incluye los múltiples RCP de cada modelo. Es decir, para los modelos de sequía se consideran los diferentes escenarios de emisiones, desde el RCP2.6 (que considera medidas fuertes para la reducción de emisiones) hasta RCP8.5 (que no contempla políticas de reducción de emisiones lo que produce mayores concentraciones de gases efecto invernadero en el tiempo) según la disponibilidad de información. Con esto, se pueden calcular los efectos de mitigar el

cambio climático y cómo cambian las condiciones de sequías que se pueden presentar en el futuro.

Una forma equivalente de presentar estos resultados son los gráficos de cajas, como se muestra en la Figura 91 **Error! Reference source not found.** En este caso se puede ver, para cada mes, la dispersión de las diferencias de temperatura y precipitación de la serie de registros históricos y de modelos de circulación global. En el caso del ejemplo del punto 50, se puede ver como la diferencia es menor para meses más lluviosos (abril y octubre) con una menor dispersión y se presentan mayores diferencias y mayor dispersión en meses de mayor temperatura (noviembre, diciembre y enero). Este comportamiento es típico para los puntos de análisis en Uruguay.

La **Error! Reference source not found.**<sup>90</sup> muestra la dispersión de las diferencias en precipitación y temperatura, para todos los meses del año para el punto 50 de la malla de análisis. Se puede ver como algunos resultados reproducen condiciones más o menos lluviosas, o más o menos calurosas, considerando que el punto de origen de los ejes de las gráficas representa las condiciones de los registros históricos. Para meses de verano (noviembre-enero) se presentan diferencias positivas en temperatura, lo que indica que los modelos de circulación global están por encima de los registros históricos mientras que abril y octubre presentan alta dispersión en el eje vertical, lo que indica variabilidad en las diferencias en precipitación.

Esto muestra que la generación de modelos de circulación global es una tarea difícil y cómo el proceso de calibración no se ajusta a las diferentes regiones del planeta (razón por la que no existe un único modelo de cambio climático aceptado globalmente). Entonces, no existe un único modelo de circulación global que se ajuste de forma óptima a todo el territorio de Uruguay. Ahora bien, se puede seleccionar un modelo que cumpla con la condición de que sus predicciones se acerquen a los registros históricos en la mayor parte del territorio. Este procedimiento de selección se explica a continuación.

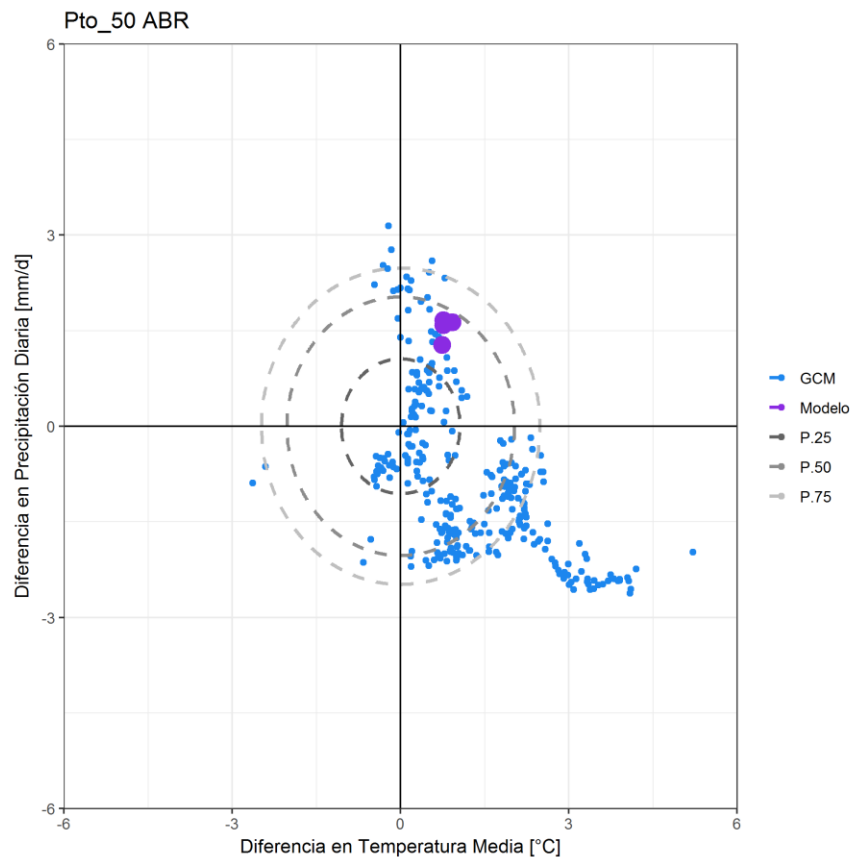


Figura 90. Dispersión de las diferencias en temperatura y precipitación para el mes de abril en el punto 50

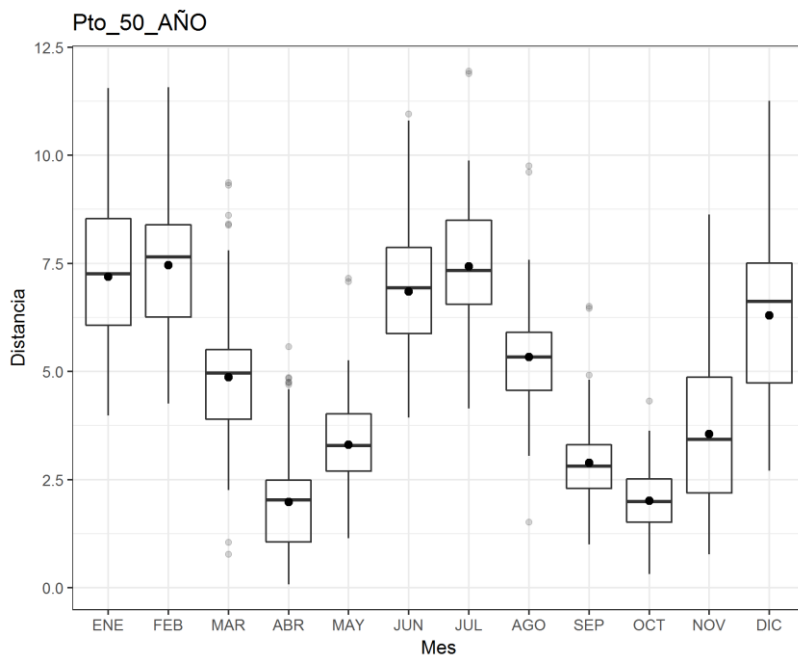


Figura 91. Diagrama de cajas para las diferencias en temperatura y precipitación en el punto 50

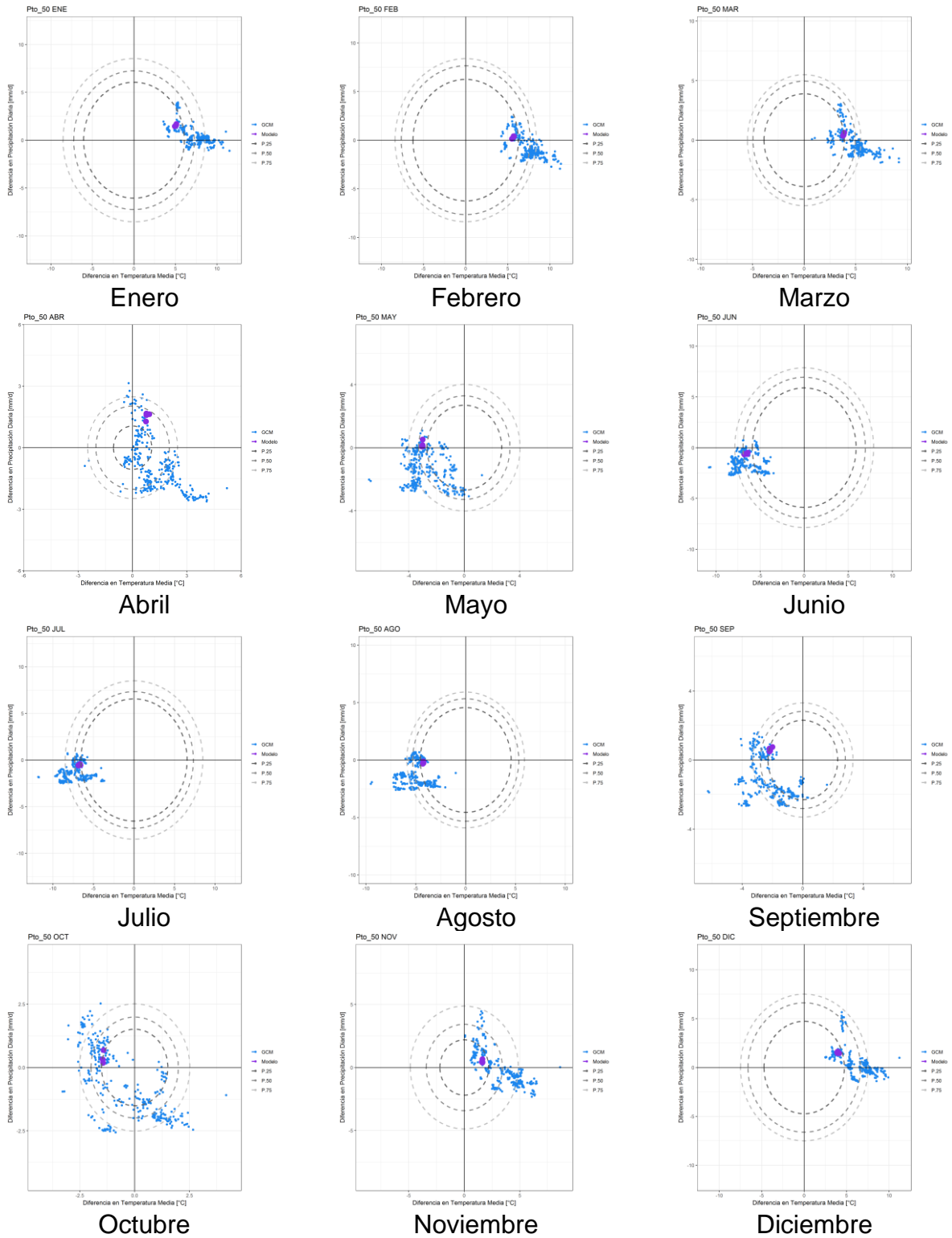


Figura 92. Dispersión de las diferencias en temperatura y precipitación

### 1.19.2.2 Selección de un único modelo de circulación global para la región de análisis

Luego de determinar las diferencias entre los registros históricos y las predicciones de cada modelo para la base 1981-2010, se procede a seleccionar el modelo que mejor se ajusta en el mayor número de puntos de la malla de análisis. Esto se hace para mantener la homogeneidad de las predicciones de cambio climático en la zona. La selección se hace con el criterio de minimizar la distancia entre el punto de las diferencias de precipitación y temperatura con el origen. Es decir, se selecciona el modelo que para el mayor número de meses y mayor número de puntos tenga la menor distancia (equivalente a menor diferencia) al punto de origen 0,0. La distancia de cada punto se calcula como:

$$d = \sqrt{t^2 + p^2} \quad (\text{Ec. 0-4})$$

Donde  $t = T_{GCM} - T_{Histórica}$  y  $p = P_{GCM} - P_{Histórica}$  para cada media diaria mensual de temperatura y precipitación, respectivamente. Una vez se calculan las distancias para todos los modelos de circulación global, con sus respectivos RCP y corridas, se calcula la media de distancias para cada mes y la media de distancias para el año. Los resultados para el análisis en Uruguay se muestran en la Tabla 9 **Error! Reference source not found..** Los resultados completos se muestran en la tabla del Anexo A. 5. Información más detallada sobre los modelos que se mencionan en la siguiente tabla, así como referencias para futuras consultas se presentan en el Anexo A. 5.

Tabla 9. Resultados de distancia media mínima para los primeros 6 modelos en Uruguay.

Modelo	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Media
CCSM4	5.36	5.92	4.31	1.20	2.26	5.93	6.39	4.29	1.64	1.03	1.95	4.15	3.70
NorESM1-ME	4.57	4.71	3.06	1.56	3.94	6.92	6.84	5.20	2.73	1.50	1.70	3.20	3.83
CESM1-BGC	5.41	6.10	4.03	1.51	2.98	6.62	6.57	4.39	1.76	1.00	2.10	3.84	3.86
MPI-ESM-LR	6.14	6.94	4.99	2.25	1.49	4.96	5.69	4.86	2.44	1.26	1.88	4.53	3.95
NorESM1-M	4.94	5.49	2.99	1.33	3.52	6.84	7.17	5.32	3.08	1.65	1.64	3.49	3.95
CESM1-CAM5	4.26	4.93	3.11	1.52	3.65	6.82	7.92	6.09	2.92	1.53	1.58	3.40	3.98



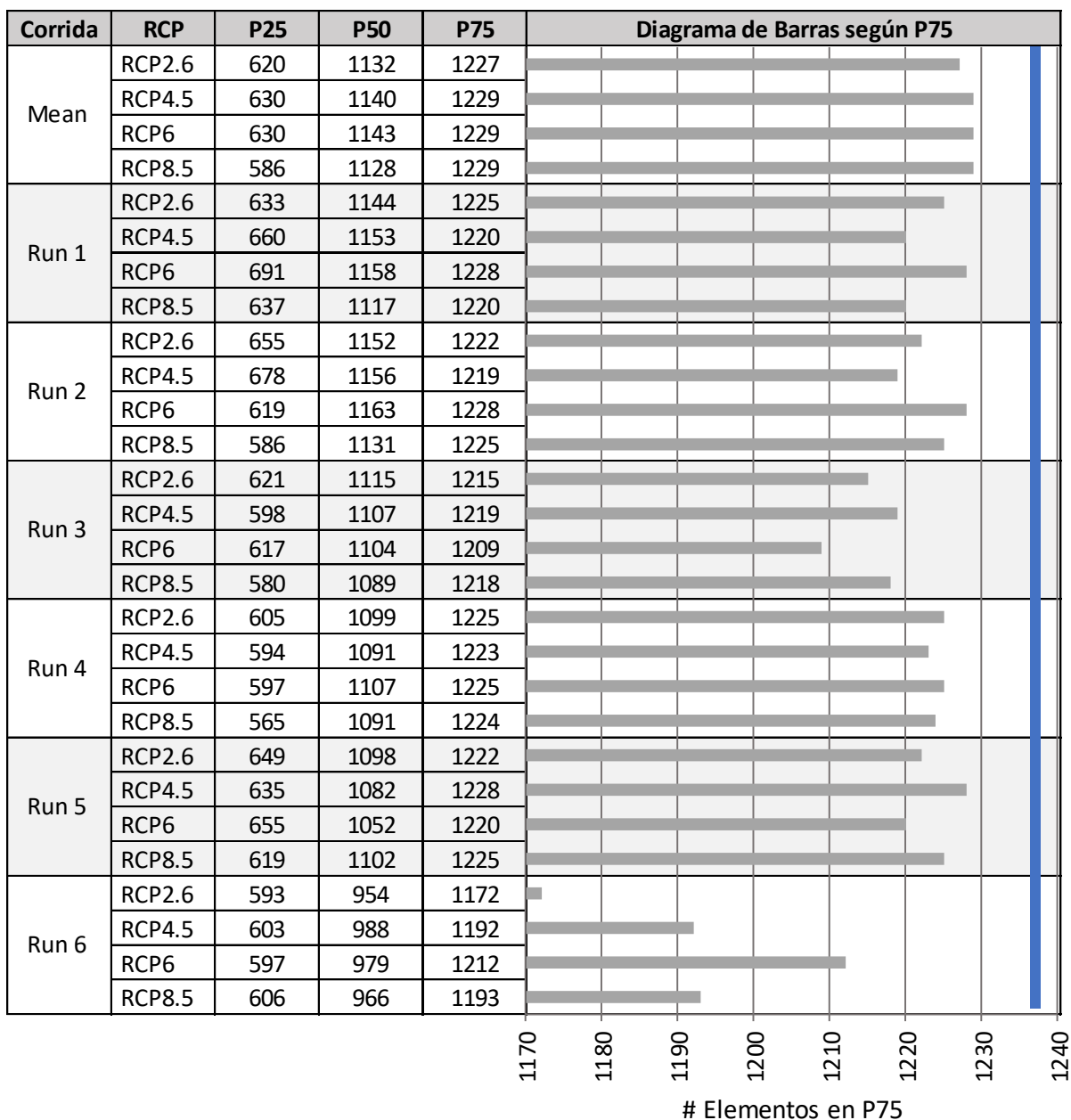
Según estos resultados, el modelo seleccionado para Uruguay es CCSM4 (Community Climate System Model<sup>13</sup>) para el modelo acoplado de cuatro componentes: atmósfera, océano, superficie terrestre y hielo oceánico. Este modelo es financiado y administrado por agencias de los Estados Unidos (NSF: National Science Foundation, DOE: US Department of Energy, CGD: Climate and Global Dynamics Laboratory y NCAR: National Center for Atmospheric Research). Dentro de la colección de modelos de circulación global del AR5 (IPCC), el modelo CCSM4 incluye 7 versiones o corridas: Mean, Run1, Run2, Run3, Run4, Run5, y Run6; cada una con RCP 2.6, 4.5, 6, y 8.5.

La Tabla 10 **Error! Reference source not found.** muestra el número de puntos del modelo que están dentro del percentil 25, percentil 50 y percentil 75. Esto quiere indicar cuántos puntos están cerca del punto de origen, minimizando la diferencia entre las predicciones del modelo y los registros históricos para el periodo 1981-2010. El número total de puntos es 1236 (que equivale a 12 meses por 103 estaciones de análisis). Como se puede ver en la siguiente tabla, la corrida media (Mean) del modelo CCSM4 es la que mayor número de puntos encierra en los tres percentiles analizados. Esto quiere decir que los valores de esta corrida del modelo se acercan en mayor número a los registros históricos, con un mínimo número de valores extremos. Por esta razón, para el cálculo del efecto del cambio climático en las sequías de Uruguay se utiliza la corrida media de este modelo.

---

<sup>13</sup> Para más información, consultar la página web <http://www.cesm.ucar.edu/models/ccsm4.0/>

Tabla 10 Resultados para modelo CCSM4. Puntos dentro del percentil 25, 50 y 75 según corrida y RCP.



### 1.19.3 Ajuste de series simuladas a predicciones de cambio climático

Los efectos asociados al cambio climático se incluyen en la generación de las series sintéticas de precipitación y temperatura. Estas perturbaciones se realizan según las estimaciones de modelos de cambio climático global. A continuación, se presentan los resultados de la incorporación de las predicciones del cambio porcentual en la

precipitación y total en la temperatura según el modelo de circulación global seleccionado. Los resultados se presentan para un punto en la malla de análisis y como mapas de la región completa, que permiten una comparación espacial con los mapas de parámetros climáticos de la serie histórica y la serie simulada base.

En el caso de el punto 50 de la malla de análisis de Uruguay, según las proyecciones del modelo validado (CCSM4), para el periodo 2070-2099 se espera un aumento en la temperatura de 3.4°C, y un aumento en la precipitación del 12.2%, para el RCP8.5. Los valores para otros periodos de tiempo y otros RCP se muestran en la Tabla 11 **Error! Reference source not found.** para temperatura y Tabla 12 para precipitación. A partir de estas proyecciones, se ajustan las series sintéticas de 1,000 años de temperatura y precipitación para obtener nuevas series perturbadas, representativas de condiciones de clima futuro incluyendo Cambio Climático. En la Figura 93 se muestra el promedio multianual de temperatura diaria para la serie modelada y las series que incluyen el efecto del aumento de la temperatura según el modelo seleccionado y para todos los RCP evaluados por el mismo. La Figura 94 muestra la precipitación total anual para 25 años simulados y las series que incluyen el cambio porcentual en la precipitación según los resultados del modelo seleccionado y los RCP evaluados por el mismo.

Tabla 11 Predicciones del cambio en la temperatura media del modelo CCSM4 para Punto 50 de la malla de análisis para Uruguay

<b>Modelo</b>	<b>2011 – 2040 Cambio [°C]</b>	<b>2041 – 2070 Cambio [°C]</b>	<b>2071 – 2099 Cambio [°C]</b>
AR5 (2011) - CCSM4(Mean) – RCP2.6	0.58	0.78	0.71
AR5 (2011) - CCSM4(Mean) – RCP4.5	0.66	1.27	1.63
AR5 (2011) - CCSM4(Mean) – RCP6	0.67	1.19	1.95
AR5 (2011) - CCSM4(Mean) – RCP8.5	0.83	1.98	3.45

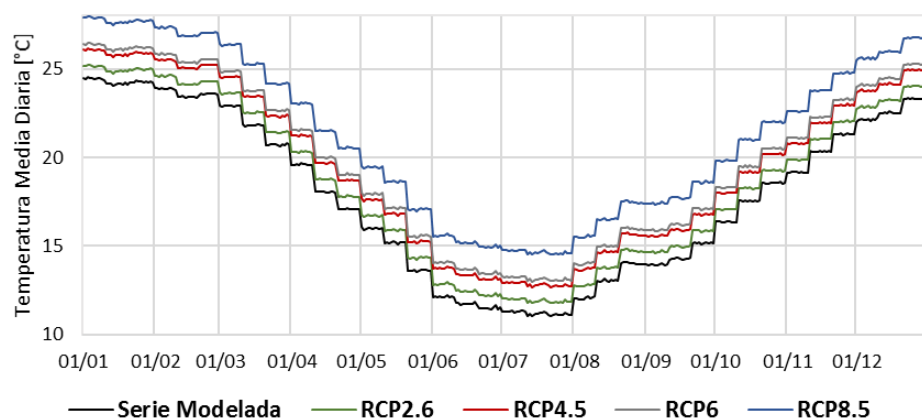


Figura 93. Promedio multianual de temperatura media para la serie histórica y las series sintéticas perturbadas por cambio climático

Tabla 12. Predicciones del cambio en precipitación del modelo CCSM4 para Punto 50 de la malla de análisis para Uruguay

Modelo	2011 – 2040 Cambio [%]	2041 – 2070 Cambio [%]	2071 – 2099 Cambio [%]
AR5 (2011) - CCSM4(Mean) – RCP2.6	-0.52	1.75	2.73
AR5 (2011) - CCSM4(Mean) – RCP4.5	1.48	3.18	1.90
AR5 (2011) - CCSM4(Mean) – RCP6	0.30	-0.03	2.54
AR5 (2011) - CCSM4(Mean) – RCP8.5	2.53	7.10	12.16

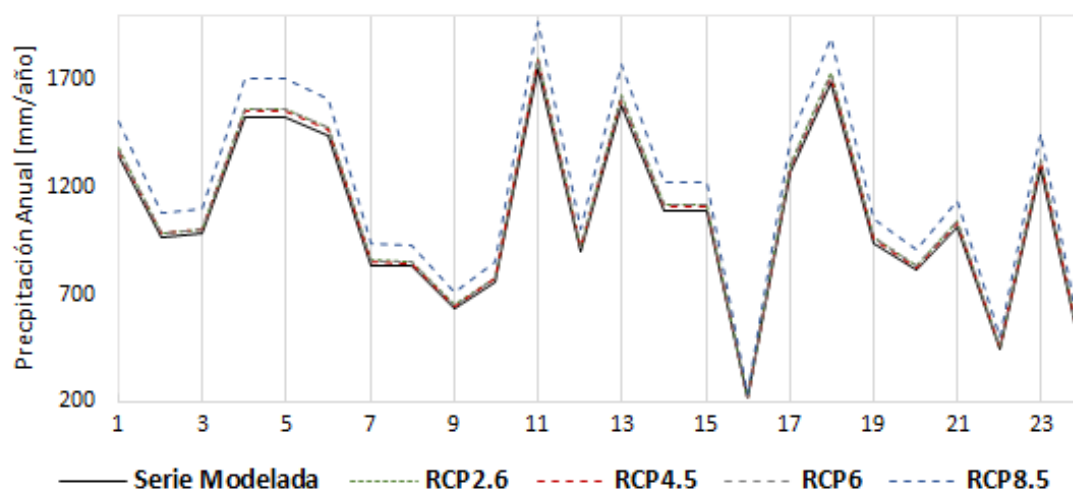


Figura 94. Precipitación anual para 25 años simulados y las series sintéticas perturbadas por cambio climático.

Este mismo procedimiento se realiza para todas las estaciones de registro de datos climáticos disponibles en el área de estudio. Según la resolución de los modelos de circulación global, cada punto de la malla de análisis puede tener una proyección diferente. Cada serie modelada debe ser perturbada según su ubicación y los resultados del modelo para ese mismo punto. Esto permite caracterizar completamente las condiciones futuras de ocurrencia de las sequías en todo el territorio de análisis.

#### **1.19.4 Mapas de parámetros climáticos incluyendo cambio climático**

Se generaron mapas de parámetros climáticos con el fin de mostrar los cambios que implica incorporar las predicciones de un modelo de circulación global. Estos mapas se generaron para los escenarios de RCP incluidos en el modelo (RCP 2.6, 4.5, 6, 8.5) y para tres décadas de proyección (2040s, 2070s, 2099). También se generaron mapas que muestran la variación porcentual (para precipitación) y absoluta en grados centígrados (para la temperatura) en la dimensión espacial. Esto permite ver cómo el modelo de circulación global distribuye las proyecciones del clima. Para el caso de Uruguay, se puede ver que las predicciones del cambio climático indican, en términos porcentuales, un leve aumento en la precipitación y aumento en la temperatura hasta de 3°C en el escenario RCP8.5 en el largo plazo. La metodología que se aplica considera que los cambios esperados en temperatura media se aplican de la misma forma a las series de temperatura máxima y temperatura mínima, por lo que se aplican estos mismos valores de incremento a las series sintéticas calculadas en pasos anteriores. El análisis de los mapas se presenta a continuación.

Los mapas de precipitación anual media, y de temperatura media, máxima y mínima promedio multianual sin proyecciones de cambio climático se presentan en la Figura 95 **Error! Reference source not found.** Estos mapas, resultado de la generación estocástica de series de precipitación presentados en la Sección 6, se presentan nuevamente para tener referencia y poder comparar con los resultados que incluyen las proyecciones de cambio climático.

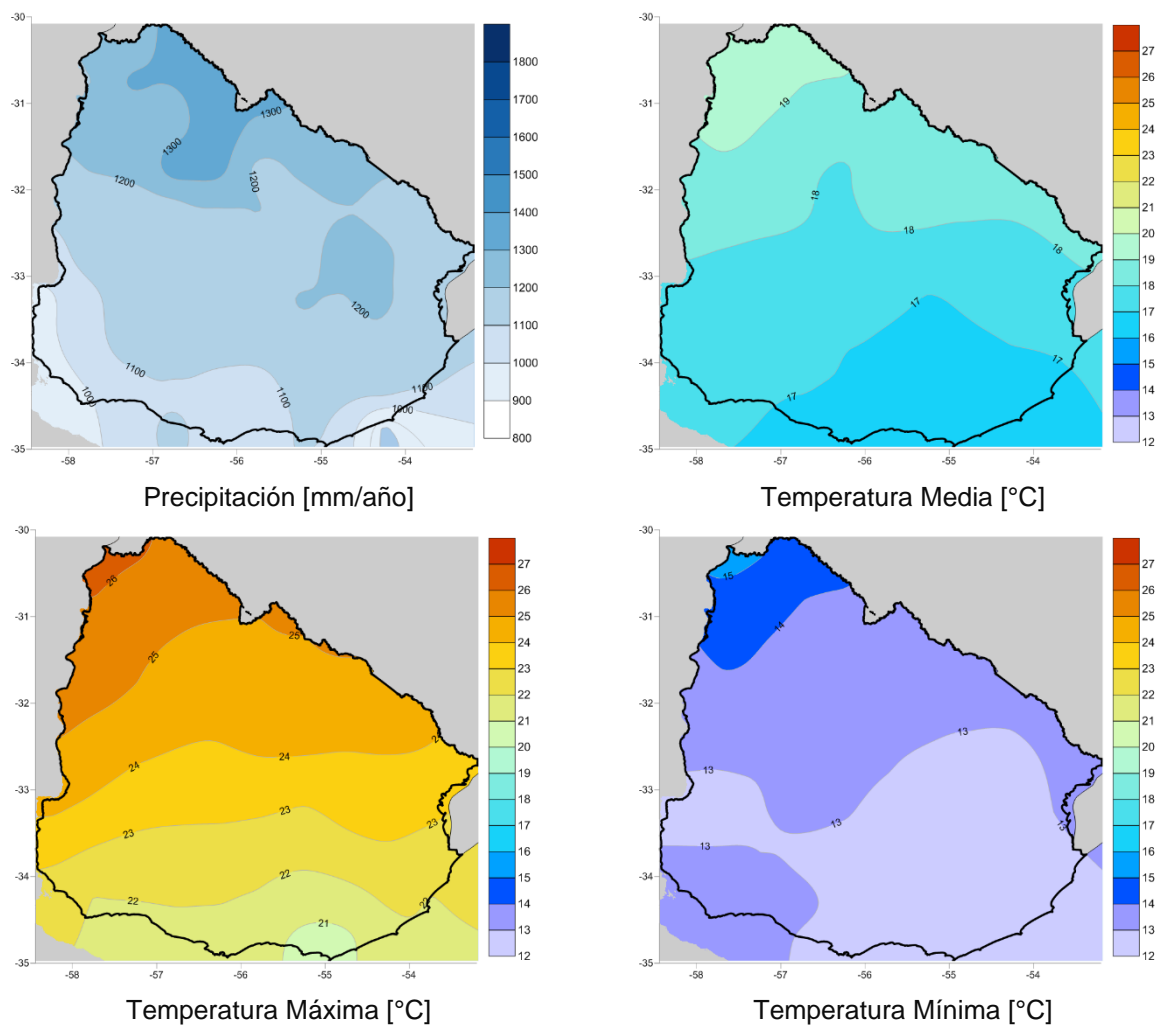
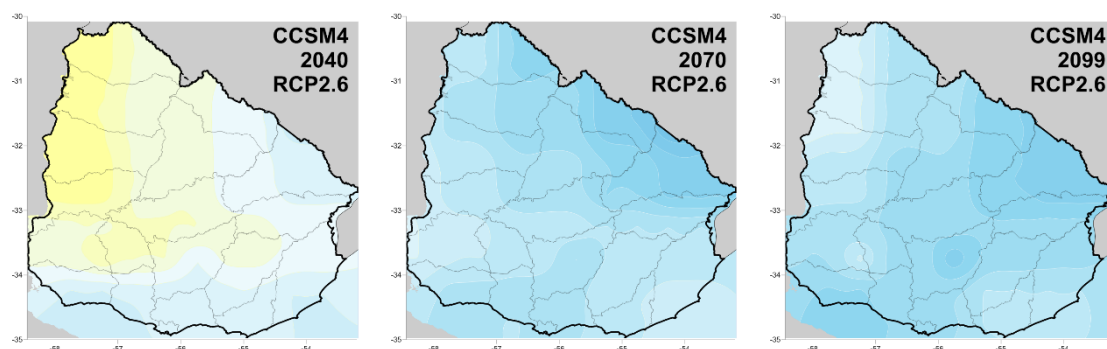


Figura 95. Resultados sin proyecciones de cambio climático – Se presentan nuevamente en esta sección como referencia

#### 1.19.4.1 Cambio porcentual en precipitación



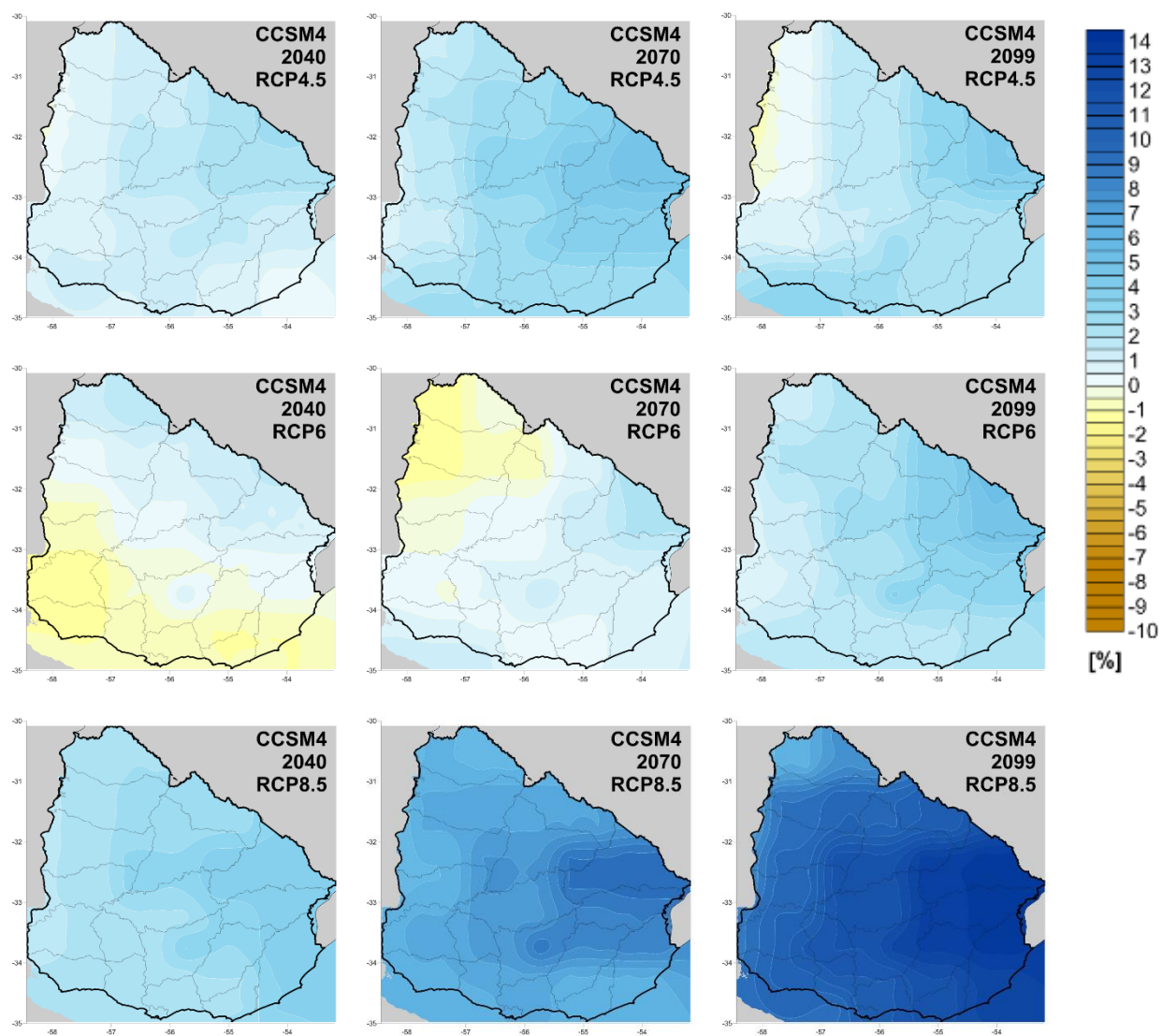
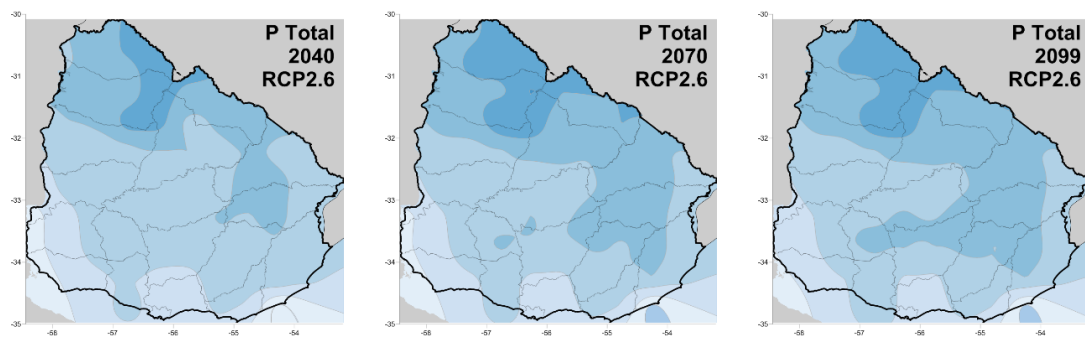


Figura 96. Mapas de cambio porcentual en la precipitación diaria según variaciones de cada RCP del modelo de circulación global CCSM4.

#### 1.19.4.2 Precipitación total anual



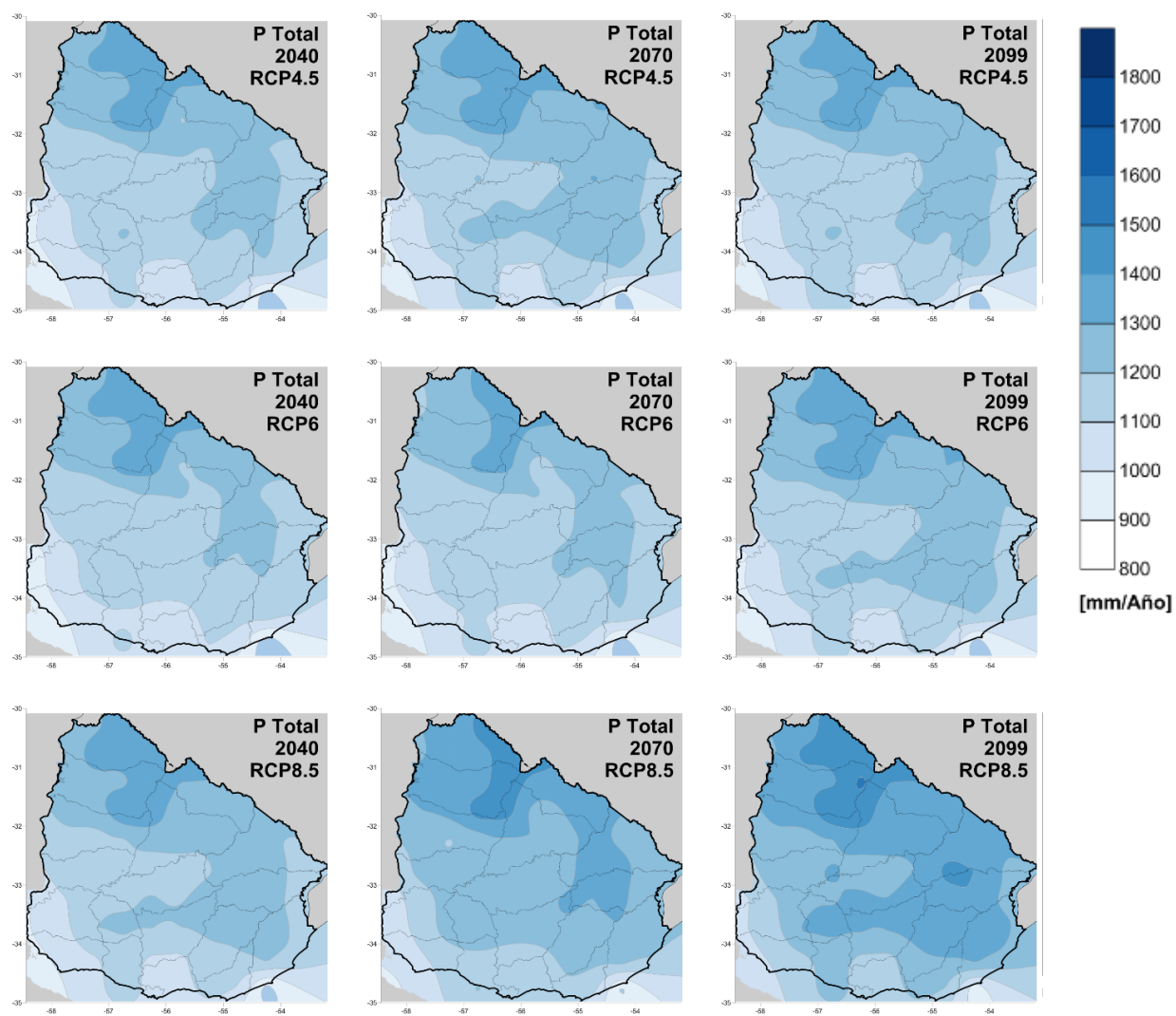


Figura 97. Mapas de precipitación total anual según variaciones de cada RCP del modelo de circulación global CCSM4



### 1.19.4.3 Cambio absoluto en temperatura

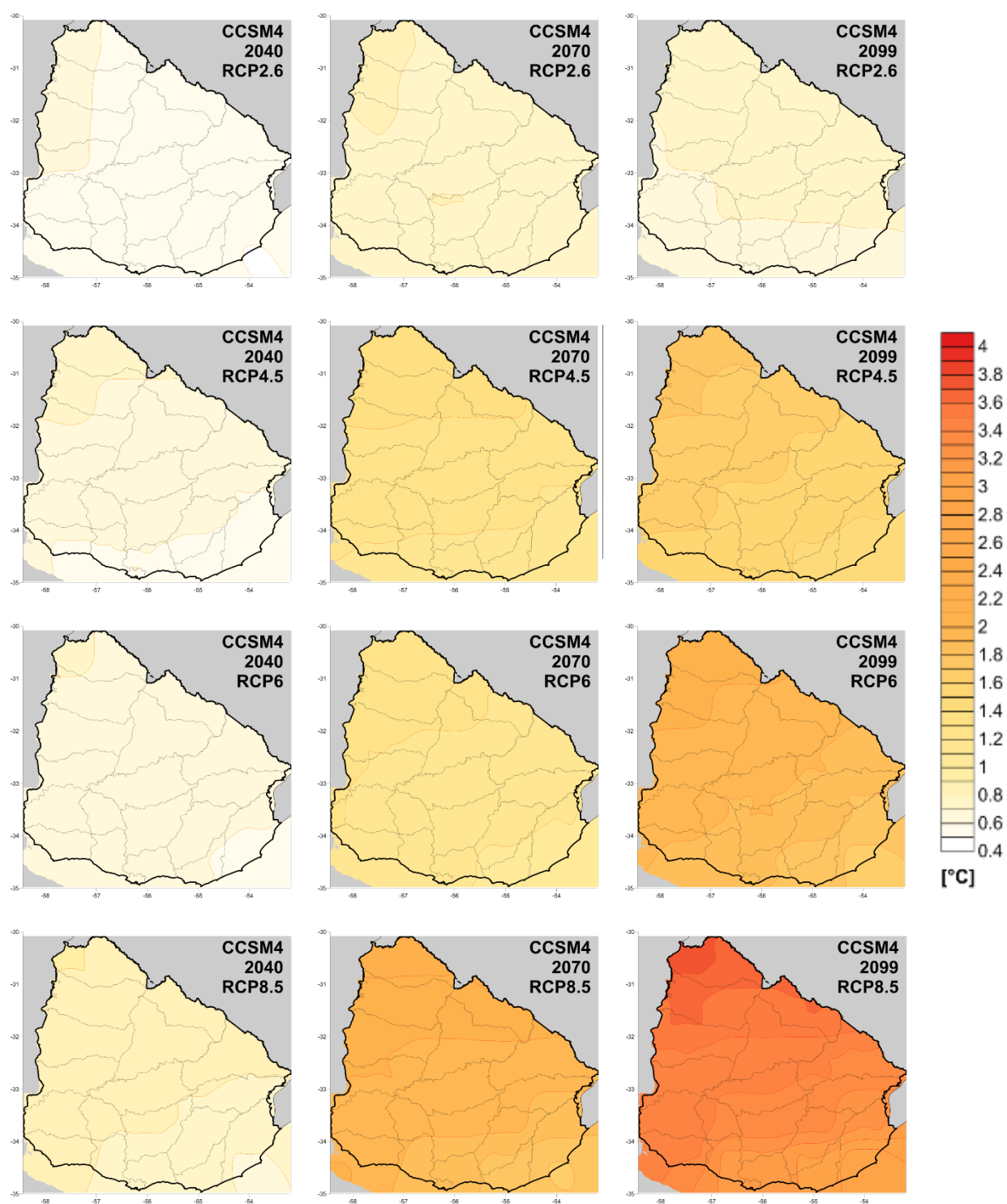


Figura 98. Mapas de cambio absoluto en la temperatura según variaciones de cada RCP del modelo de circulación global CCSM4.

#### 1.19.4.4 Temperatura media anual

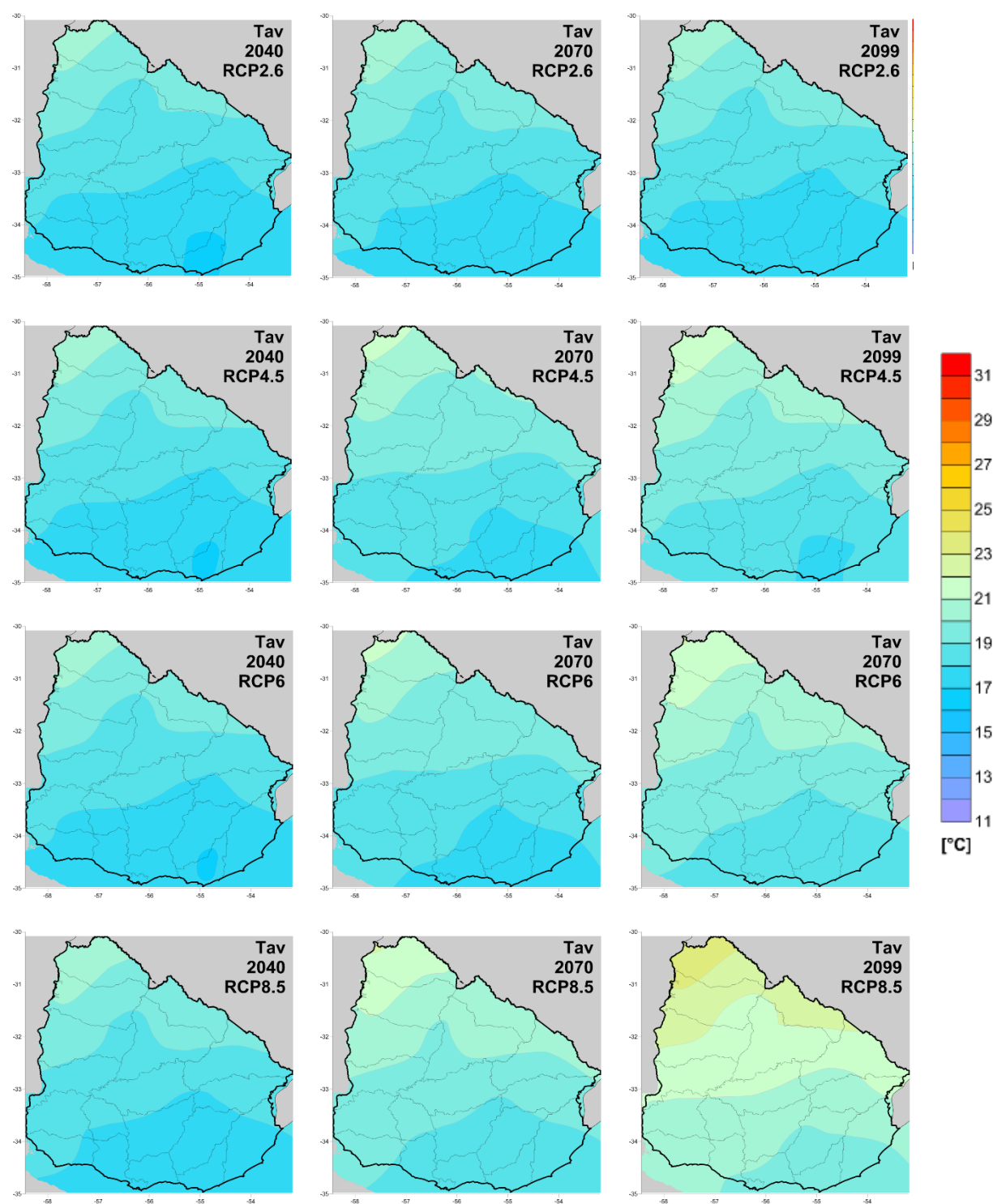


Figura 99. Mapas de temperatura media anual según variaciones de cada RCP del modelo de circulación global CCSM4.

### 1.19.4.5 Temperatura máxima anual

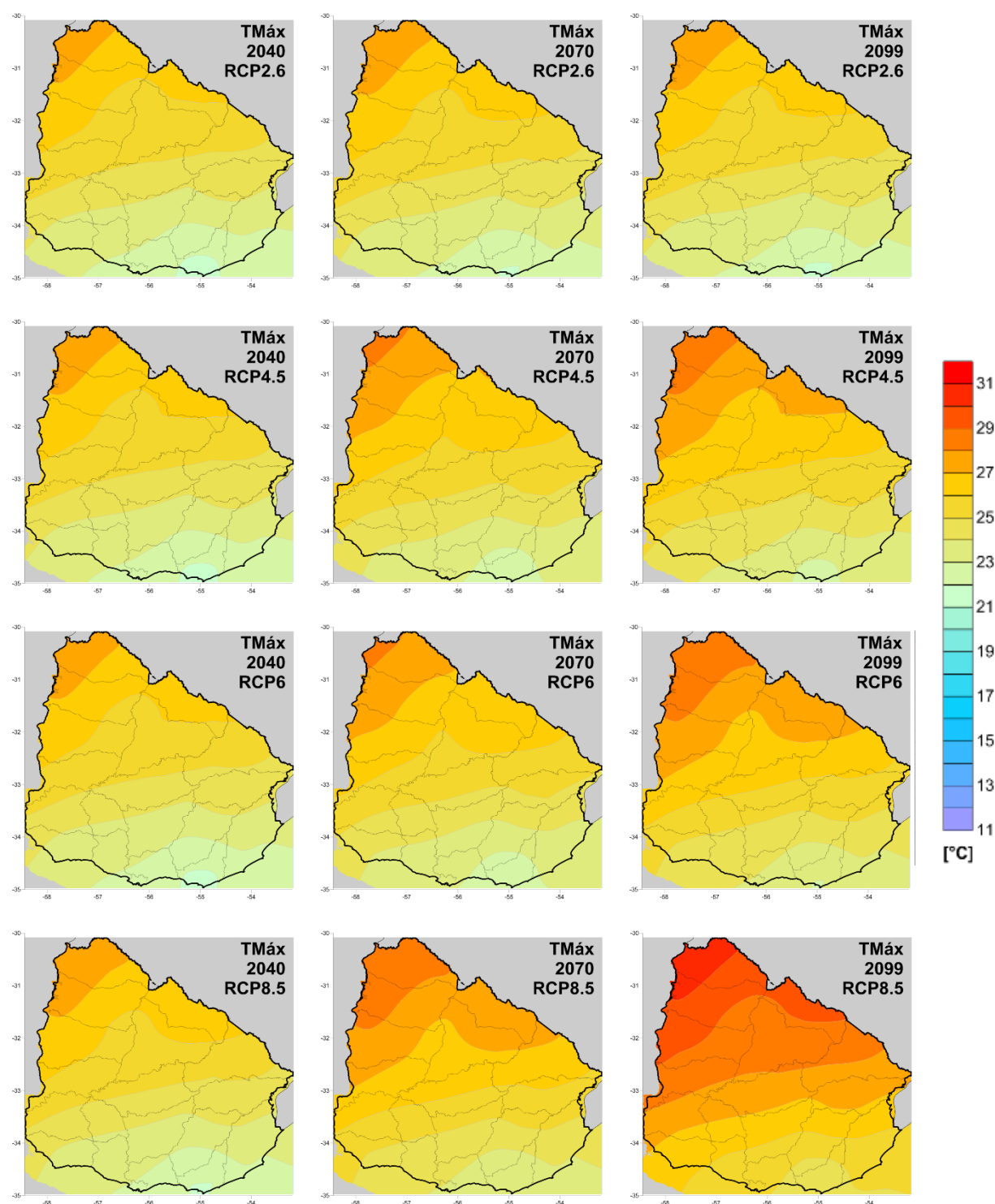


Figura 100. Mapas de temperatura máxima anual según variaciones de cada RCP del modelo de circulación global CCSM4.

#### 1.19.4.6 Temperatura mínima anual

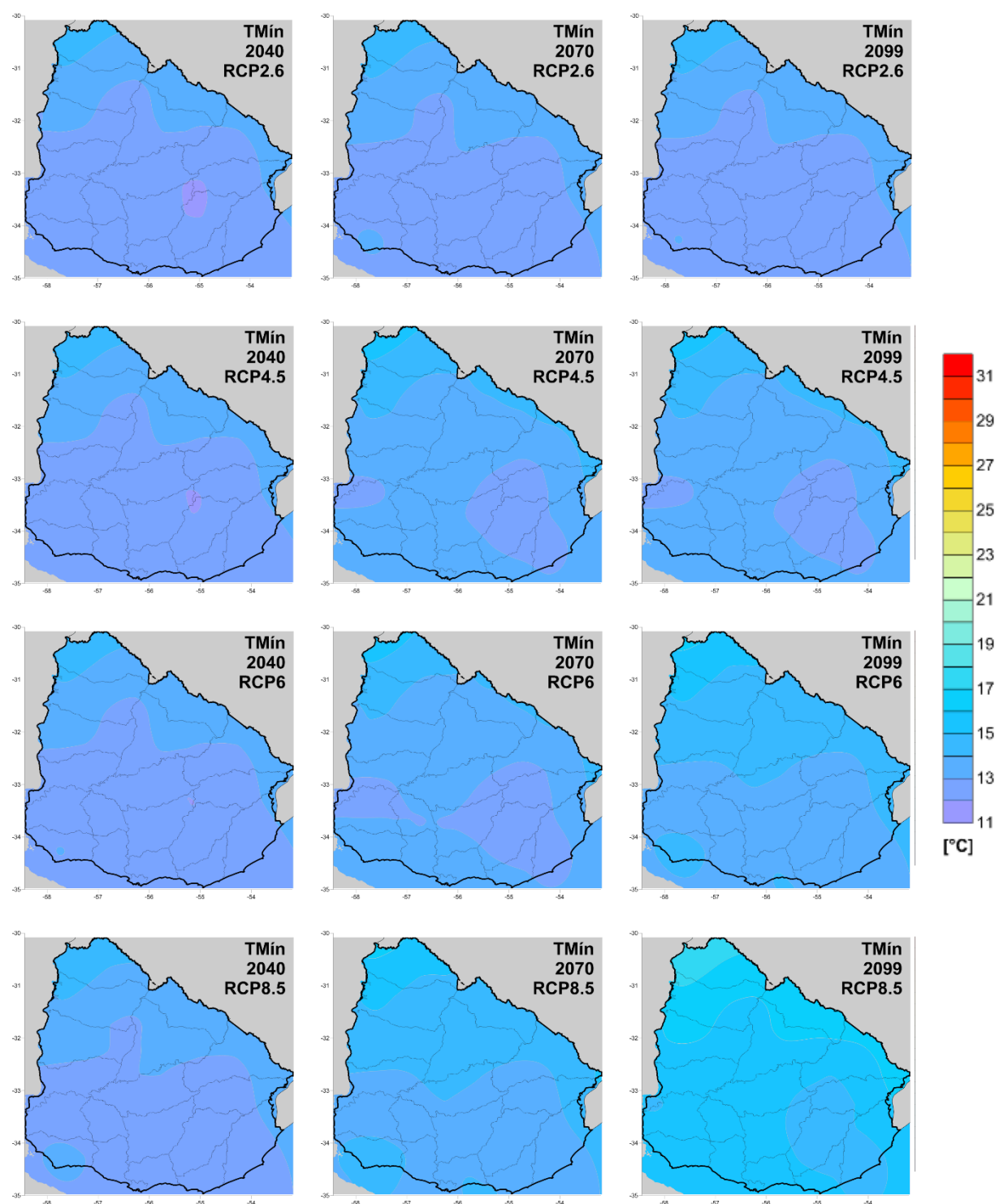


Figura 101. Mapas de temperatura mínima anual según variaciones de cada RCP del modelo de circulación global CCSM4.

Según los mapas anteriores, se puede concluir que:

- En cuanto a la variación porcentual de la precipitación, según el modelo CCSM4 para el territorio uruguayo se espera para 2040 reducciones menores al 3% en precipitación diaria. Por el contrario, al largo plazo se espera incrementos en la precipitación diaria hasta del 14% en el caso del RCP8.5. En general, los cambios en la precipitación no son fuertes en todo el territorio uruguayo. El caso de mayor incremento se presenta hacia la zona este del país, e incrementa gradualmente desde el RCP2.6 hacia el 8.5.
- En cuanto a los cambios en la precipitación total anual, se espera que las precipitaciones más altas del país se mantengan en los departamentos de Artigas, Salto, Rivera y Tacuarembó. En todos los casos (combinación de RCP y década), la precipitación total anual tiende a incrementar en el largo plazo y en mayor medida para el RCP8.5. Sin embargo, la distribución de la misma en el país se mantiene estable, con menores precipitaciones hacia el Río de la Plata en especial en el Departamento de Colonia.
- En cuanto a la variación en la temperatura diaria, según el modelo CCSM4 para el territorio uruguayo se espera un aumento generalizado de la temperatura para todos los escenarios considerados. En el largo plazo (predicción 2099) se espera un aumento entre 0.5 y 3°C dependiendo del RCP analizado. El incremento de la temperatura tiene un gradiente creciente desde la costa sur (en Maldonado) hacia el norte (Artigas), es decir, se esperan mayores aumentos de temperatura en el norte.
- En términos generales, la temperatura media anual mantiene un gradiente decreciente entre el noroeste del país (Artigas) y la costa sureste (Maldonado), es decir, se tienen mayores temperaturas medias hacia el norte del país. La temperatura máxima media anual sobrepasa el valor histórico de 26°C y alcanza valores superiores a los 30°C para el escenario de RCP8.5 proyectado a la década 2099.
- Dado que las predicciones para la precipitación establecen un incremento leve, los cambios en la amenaza por sequía se asocian en mayor medida a incrementos

en la temperatura, que impacta la demanda evaporativa de la atmósfera o evapotranspiración (a mayor temperatura mayor evaporación del suelo y transpiración de las plantas).

En este estudio, la evaluación de la amenaza por sequía se realiza para los escenarios de predicción del modelo de circulación global para el año 2099. Esto se hace considerando que las variaciones en el clima (mayor temperatura y mayores niveles de precipitación) son mayores en el largo plazo, condición que es interesante para el análisis comparativo de riesgo entre condiciones actuales y con efectos de cambio climático. La amenaza por sequía se considera para los diferentes RCP que cuentan con las predicciones del modelo seleccionado, para incluir en el análisis de amenaza los escenarios de concentraciones de emisiones (escenarios que se consideran más o menos pesimistas según capacidad de reducción de emisiones) y las variaciones en el clima asociado a estas concentraciones. En conclusión, la amenaza por sequía que incluye cambio climático para Uruguay considera las variaciones de clima según predicciones del modelo CCSM4 en su corrida media para los RCP 2.6, 4.5, 6 y 8.5; son 4 escenarios de análisis.

#### **1.19.4.7 Evapotranspiración Potencial media anual**

Una vez se modifica la serie de temperatura media, máxima y mínima diaria según la proyección del cambio de temperatura dada por el modelo de circulación global, se procede a realizar el cálculo de la evapotranspiración de referencia de acuerdo con la metodología explicada en la Sección 1.16 y el Anexo A. 4. Los resultados para los cuatro RCP analizados se muestran en la Figura 102 **Error! Reference source not found.** Se puede ver un incremento en la evapotranspiración en todos los casos, comparado con el mapa de evapotranspiración potencial que se presenta en la parte superior de la Figura 102. Para el RCP 8.5, que es el escenario que considera que las emisiones no sufren ninguna reducción en el tiempo, la evapotranspiración supera valores de 1600 mm/año que es considerablemente más alto que la precipitación media anual para la misma zona (entre 1200 y 1400 mm/año).

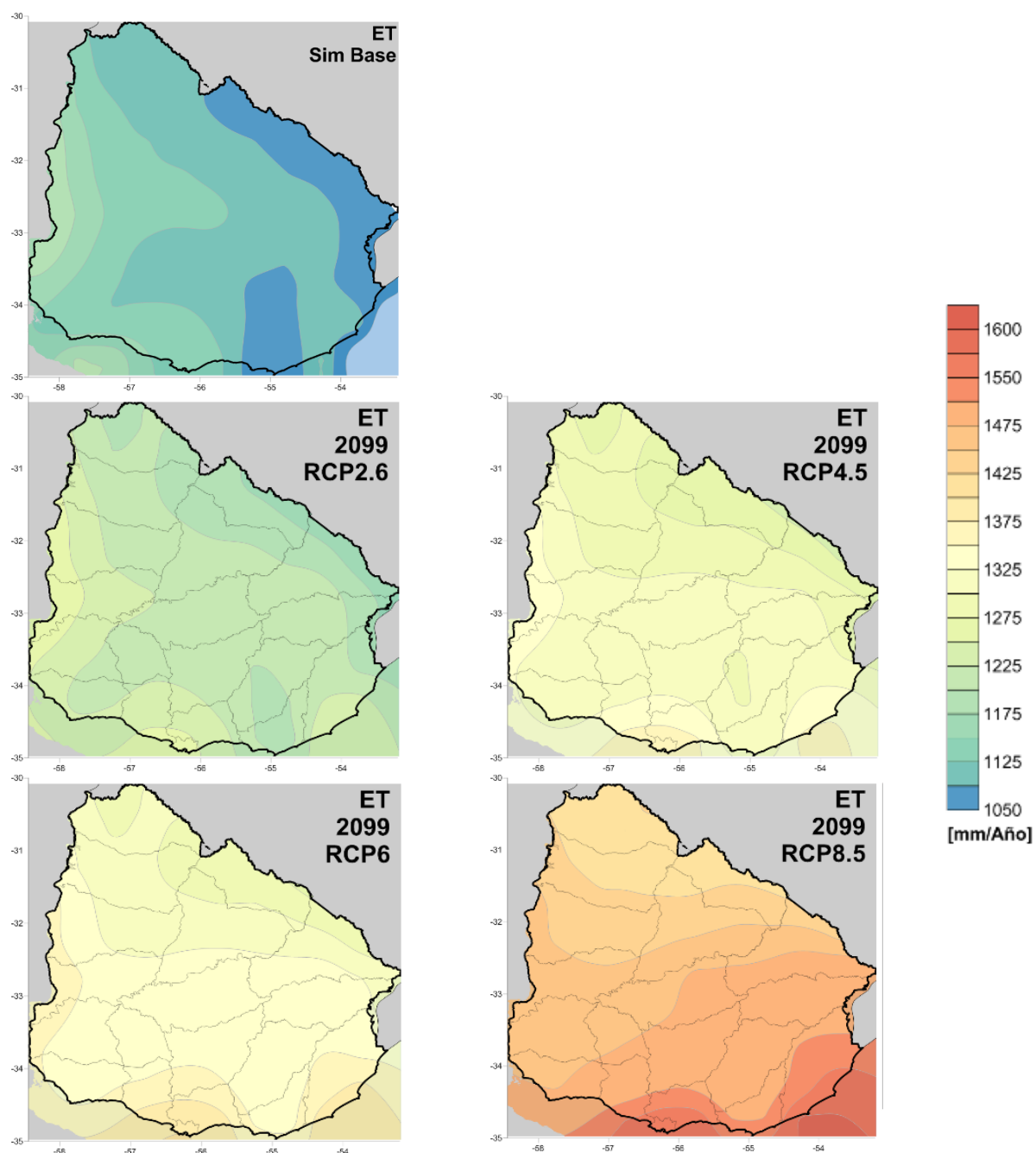


Figura 102. Mapas de evapotranspiración de referencia anual según variaciones de cada RCP del modelo de circulación global CCSM4.

### 1.19.5 Amenaza de sequía incluyendo cambio climático

A partir de las simulaciones perturbadas según cada RCP del modelo de circulación global, que equivale a un escenario de emisiones, se hace el cálculo del indicador de sequía para establecer la amenaza ante este fenómeno incluyendo los efectos del cambio climático. Para el caso de Uruguay, se hace el cálculo del indicador RDI

acumulado de tres meses, para comparar con los valores de la simulación base (es decir, sin perturbaciones por cambio climático). Los resultados del cálculo del indicador de sequía, los escenarios de amenaza y la amenaza integrada, para los escenarios de cambio climático, se muestra a continuación.

#### 1.19.5.1 Cálculo de los indicadores de sequía

El indicador seleccionado para el caso de Uruguay es el RDI (Reconnaissance Drought Index), propuesto por Tsakiris et al. (2007). Para más información sobre el procedimiento de cálculo ver el Anexo A. 4.1. La ventaja del uso de indicadores de sequía en función de la precipitación y la temperatura es que se acomodan fácil a las condiciones normales de la zona de estudio y reconocen las condiciones anómalas (de precipitación y temperatura para este caso) que pueden indicar exceso o déficit hídrico. Es decir, el indicador es capaz de reconocer condiciones de sequía (lluvias por debajo de lo normal y temperatura por encima de lo normal) en ambientes tan distintos como la costa o la selva, y su valor estandarizado permite su fácil interpretación.

Ahora bien, al calcular los indicadores de sequía para comparar el efecto del cambio climático en la amenaza, se deben incluir el efecto de la ocurrencia de sequías históricas en la zona y establecer las condiciones normales del sitio para luego establecer las anomalías bajo escenarios de cambio climático. De esta forma, la amenaza por sequía modificada según predicciones de modelos de circulación global se calcula a partir de la media y desviación estándar de las series simuladas base que se ajustan a las condiciones históricas. Esto se hace al usar los parámetros de estandarización de la serie simulada base (media y la desviación estándar) y no los parámetros resultantes de la serie modificada. Entonces, para el caso del cálculo del RDI para un escenario (RCP) de cambio climático, el RDI estandarizado ( $RDI_{st(k)(RCP)}$ ) se define como:

$$RDI_{st(k)(RCP)}^{(i)} = \frac{y_{kRCP}^{(i)} - \bar{y}_{kbase}}{\bar{\sigma}_{y_{kbase}}} \quad (\text{Ec. 0-5})$$

En donde  $\bar{y}_{kbase}$  es la media aritmética y  $\bar{\sigma}_{y_{kbase}}$  la desviación estándar de la serie simulada base y  $y_{kRCP}^{(i)}$  es la serie de parámetros que relacionan la precipitación y la evapotranspiración potencial para un RCP definido.



### 1.19.5.2 Comparación de resultados de sequías según RCP

Una vez calculados los indicadores RDI para cada uno de los escenarios de cambio climático que incluye el modelo de circulación global seleccionado (RCP2.6, 4.5, 6, 8.5), se procede a definir el número de eventos de sequía regional siguiendo el mismo procedimiento descrito en la sección 1.17.4. El análisis comparativo de los resultados de número de eventos de sequía en 1,000 años de simulaciones, duración de los eventos y mes de inicio de los mismos, para la simulación base y cuatro escenarios (RCP) de cambio climático se presentan a continuación.

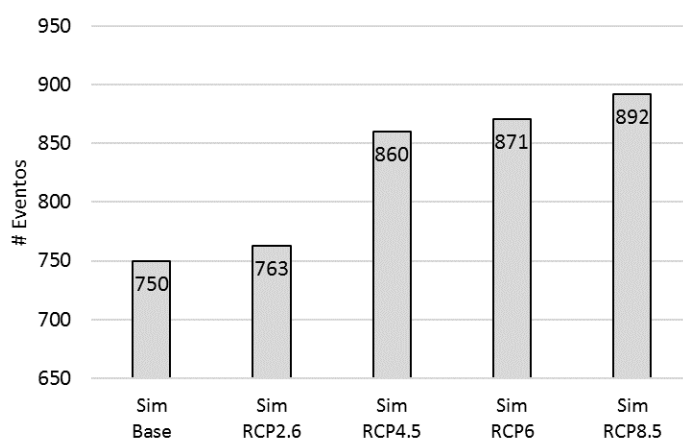


Figura 103. Número de eventos de sequía para 1,000 años de simulación para la simulación base y cuatro escenarios de cambio climático.

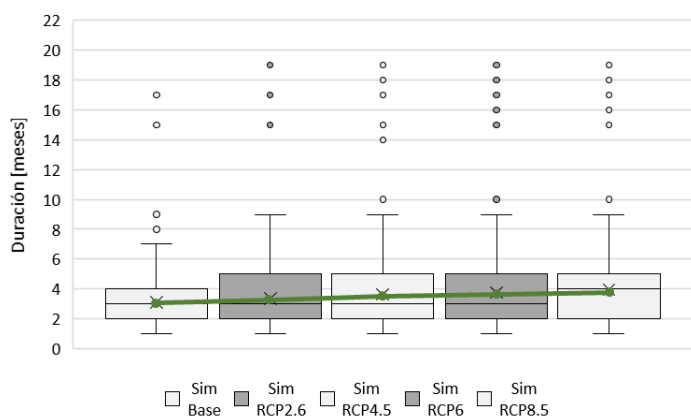


Figura 104. Diagramas de cajas para la serie de duración de las sequías [en meses] para la simulación base y cuatro escenarios de cambio climático.

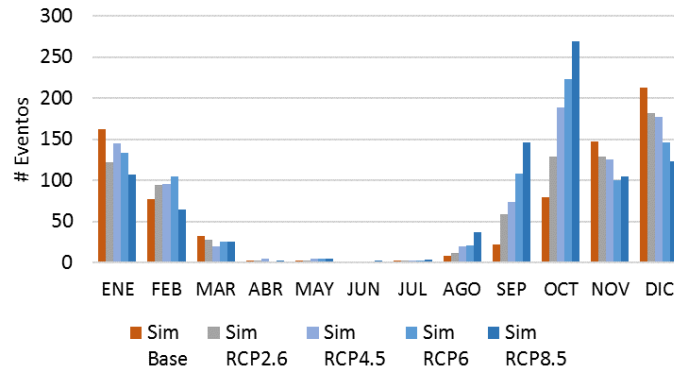


Figura 105. Histograma de meses de inicio de las sequías para la simulación base y cuatro escenarios de cambio climático.

Como se puede ver en la Figura 103 **Error! Reference source not found.**, el número de eventos de sequía incrementa con mayores concentraciones de gases efecto invernadero en la atmosfera (o mayor RCP), pasando de 750 eventos en la simulación base hasta 892 eventos en la simulación con las modificaciones del RCP 8.5, el más fuerte. En cuanto a la duración, la Figura 104 **Error! Reference source not found.** muestra el diagrama de cajas y bigotes para la serie base y cada una de las series perturbadas según las predicciones por RCP. Esta gráfica permite ver que las sequías simuladas mantienen una dispersión constante entre escenarios (tamaño de la caja que representa los percentiles 25 – límite inferior- y 75 – límite superior), con una media ascendente (línea verde) que indica que con mayor RCP se esperan sequías más largas. En todos los casos se presentan puntos por fuera de las cajas, que representan valores extremos con duraciones superiores a 12 meses, que por ser pocos representan eventos extremos de muy baja frecuencia. Finalmente, en cuanto al mes de inicio de las sequías, la Figura 105 muestra que en términos generales se mantiene el comportamiento de la ocurrencia de sequías, con mayor número de eventos hacia los meses de verano (noviembre a febrero). Sin embargo, para el caso del segundo semestre del año, el histograma parece indicar que las sequías empiezan en meses de septiembre y octubre con mayor frecuencia para RCP altos. Este efecto se puede asociar a variaciones temporales en la ocurrencia de las estaciones, como por ejemplo condiciones de verano que inicien más temprano en el año. Sin embargo, en los meses de invierno se mantiene la poca ocurrencia de sequías para todos los escenarios evaluados.

En conclusión, al integrar los efectos del cambio climático en la estimación de la amenaza por sequía en Uruguay, se puede decir que:

- Se espera un incremento en el número de eventos de sequías, es decir, pueden ocurrir sequías (de diferente intensidad, severidad y duración) con mayor frecuencia.
- Se espera un incremento en la media de las duraciones de los eventos, para escenarios con mayores RCP.
- Se esperan sequías con mayor frecuencia en temporada de verano, pero con una tendencia a que el verano inicie hacia el mes de octubre y no en noviembre como lo muestra la simulación base (que mantiene el comportamiento medio del clima histórico). Esto puede tener un efecto directo en el calendario de siembra y cosecha de cultivos.

#### **1.19.5.3 Efectos de los niveles de RCP en un evento de sequía**

Los efectos de las diferentes predicciones del modelo de circulación global para la precipitación y temperatura esperada para las próximas décadas se pueden ver en la definición de las sequías simuladas. La Figura 106 **Error! Reference source not found.** muestra el ejemplo para un evento simulado de sequía (que se presenta entre los años 15 y 17 según el orden definido por los modeladores) en el Punto 50 de la malla de análisis de Uruguay. La línea sólida negra representa la sequía en condiciones de clima simulado base y las líneas punteadas y de colores representan el efecto en el indicador RDI de los RCP 2.6, 6, 4.5 y 8.5 del modelo CCSM4 para la ubicación mencionada. Este ejemplo permite entender el efecto del cambio climático en las sequías. Por ejemplo, con mayores RCP se alcanza primero valores negativos del RDI, como se muestra hacia la izquierda de la gráfica, lo que indica que la sequía inicia meses antes que en condiciones de clima sin modificar. También se puede ver como a mayor valor de RCP el indicador RDI alcanza valores más negativos, que se entiende como sequías más severas. Es también interesante ver cómo el valor mínimo de RDI de este evento se mantiene para los diferentes RCP (o es superado por muy poco), lo que indica que aún sin los efectos del cambio climático se esperan eventos de sequía que alcancen niveles de severidad

muy altos. Los números en la gráfica representan el valor de RDI alcanzado con la simulación base del indicador.

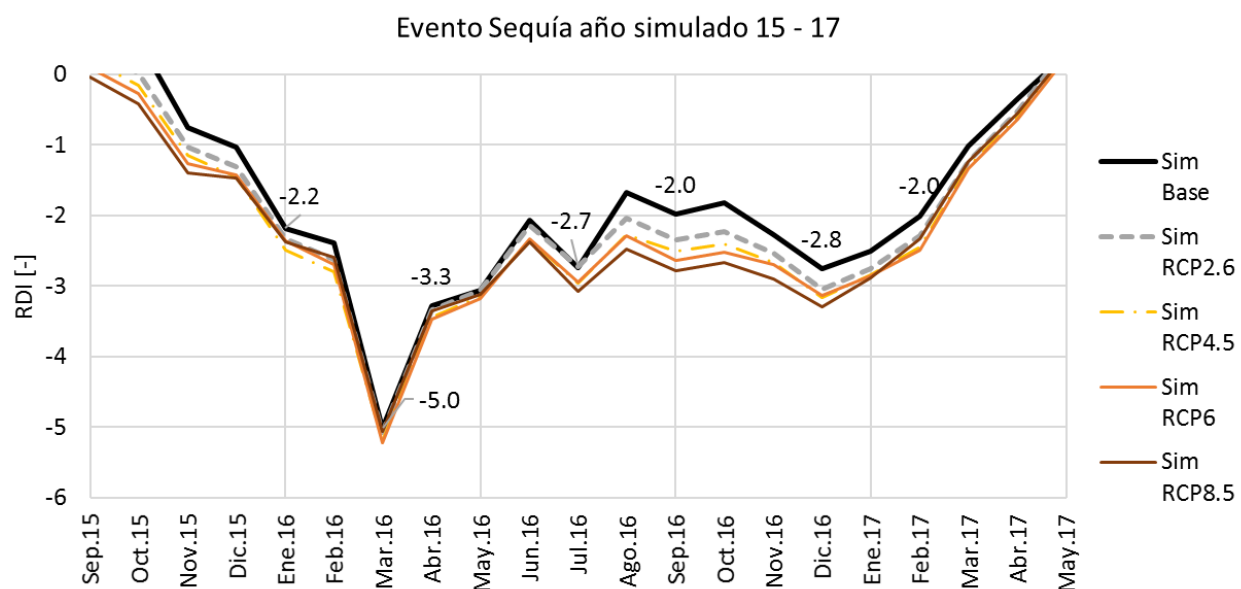


Figura 106. Valores del indicador RDI para evento simulado de sequía, para simulación de clima base y modificada según RCP para el Punto 50 de la malla de análisis.

Según el resumen del evento que se presenta en la Tabla 13, para las series que incluyen las predicciones del modelo de circulación global para 2099 se espera una sequía de mayor duración (pasa de 16 a 17 meses), de mayor severidad y de mayor intensidad (que aumenta con el RCP). Estos mismos cambios se pueden apreciar de forma espacial en mapas que se presentan a continuación.

Tabla 13. Predicciones del cambio en precipitación del modelo CCSM4 para Punto 50 de la malla de análisis para Uruguay

Serie	Duración [mes]	Severidad [-]	Intensidad [RDI/mes]
Sim Base	16	-37.8	-2.4
Sim RCP2.6	17	-42.1	-2.5
Sim RCP4.5	17	-44.6	-2.6
Sim RCP6	17	-44.9	-2.6
Sim RCP8.5	17	-45.4	-2.7

### **1.19.6 Mapas de amenaza integrada incluyendo cambio climático**

El análisis previo se puede hacer para cada uno de los eventos de sequía y cada uno de los puntos de análisis de la malla que se definió en las etapas preliminares. Sin embargo, se prefiere el uso de mapas como herramienta de comunicación de resultados. A continuación, se presentan los mapas de amenaza integrada que incluyen los efectos de las predicciones del modelo de circulación global CCSM4 para Uruguay, para los cuatro RCP para la predicción en 2099.

En cuanto a la severidad se puede ver como al incrementar el periodo de retorno se tienen valores más altos, lo que es consistente con sequías graves menos frecuentes. Es interesante ver que, en términos generales, el RCP6 tiende a valores de severidad menores que los escenarios RCP2.6 y 4.5, que se entienden como escenarios que incluyen políticas de reducción de emisiones; además el escenario RCP6 es el que presenta menores cambios en la precipitación para la década 2099. Es interesante ver que para los tres periodos de retorno (10, 50 y 100 años), los valores de severidad para la serie que incluye el escenario RCP6 tienen magnitudes muy cercanas a la simulación base, lo que indica que son pocos los cambios que induce el incremento de la temperatura en el periodo de retorno de magnitudes de severidad de la sequía.

Como se ha mencionado, es importante analizar los resultados de amenaza de sequía por severidad en conjunto con los mapas de periodo de retorno de duración. Como se puede ver en los mapas de 10, 50 y 100 años de periodo de retorno, a mayor RCP se esperan duraciones más altas de los eventos, superando 12 meses en el escenario de RCP8.5 en la zona suroeste del país. En el caso de la duración, el RCP6 presenta valores más altos que para el RCP2.6 y 4.5, lo que indica que, a pesar de no alcanzar valores de severidad muy altos, para este RCP se esperan duraciones de mayor duración. Al comparar con los mapas de duración obtenidos con la serie sin incluir el efecto del cambio climático, se puede ver que en todos los casos las duraciones aumentan, en un mes promedio para el periodo de retorno de 10 años y hasta 4 meses para el periodo de retorno de 100 años. Con esto se puede apreciar que el efecto de los cambios en precipitación y temperatura inducidos por el cambio climático, podrán

generar sequías considerablemente más largas; factores que se deben considerar al diseñar los planes de contingencia.

En cuanto a la intensidad, los mapas que se presentan a continuación muestran, de forma consistente, las regiones dentro del territorio uruguayo que presentan eventos de sequía más intensos. La intensidad es la relación entre la severidad y la duración de las sequías (que es lo mismo que la división entre nivel acumulado del indicador de sequía por debajo del umbral definido para el análisis y el número de meses en que el indicador estuvo bajo el umbral). El rango de intensidad de la sequía se ubica entre 0 y 2.5 (las unidades son 1/mes o mes<sup>-1</sup>). Si se califican las sequías siguiendo la Tabla 6, las sequías para periodos de retorno de 10 años se consideran moderadas y mayores años de periodo de retorno se consideran severas. Según el conjunto de mapas, la región de los departamentos de Colonia y San José presentan las mayores intensidades de sequía, en un gradiente que decrece hacia el este, en el departamento de Cerro Largo. Lo interesante es ver cómo estos mapas son una herramienta útil para establecer la prioridad de las regiones en términos de planes de adaptación a eventos de sequía o periodos de déficit hídrico, tanto en el sector agropecuario como en otros sectores que también se puede ver afectados por disminución en la cantidad de agua disponible (sector energético, suministro de agua para consumo, etc).

Según los resultados obtenidos, se puede concluir que las predicciones del modelo de circulación global CCSM4 derivan en un mayor número de eventos de sequía, de mayor severidad, duración y similar intensidad para diferentes periodos de retorno. Sin embargo, es importante anotar que incluso sin los efectos del cambio climático, la evaluación de amenaza por sequía indica que se pueden presentar eventos de una alta gravedad que tiene impactos directos en el sector de la agricultura y la ganadería.

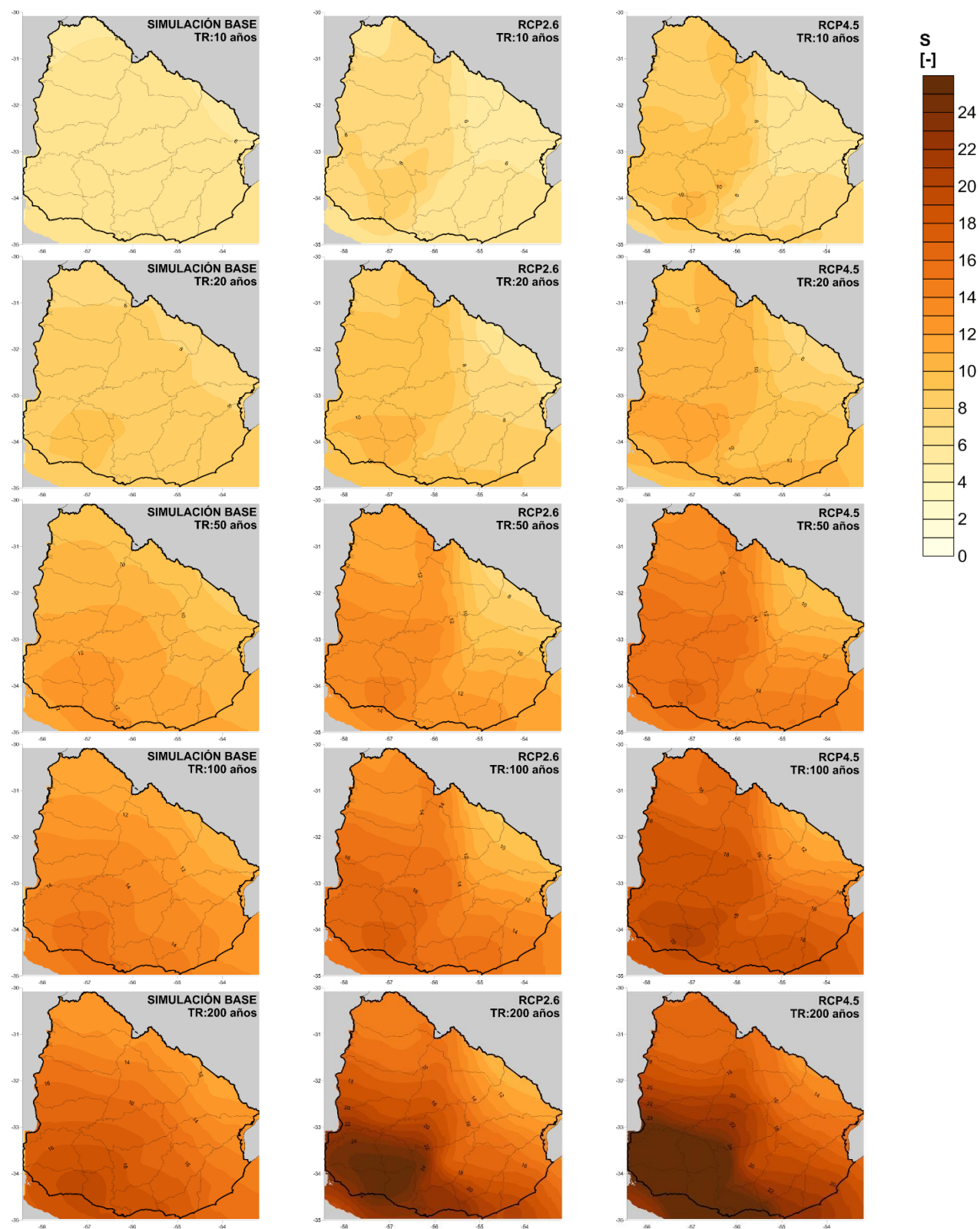


Figura 107. Mapas de severidad de sequía para simulación base, RCP2.6 y, 4.5; para 10, 20, 50, 100 y 200 años de periodo de retorno. El indicador SPEI no tiene unidades

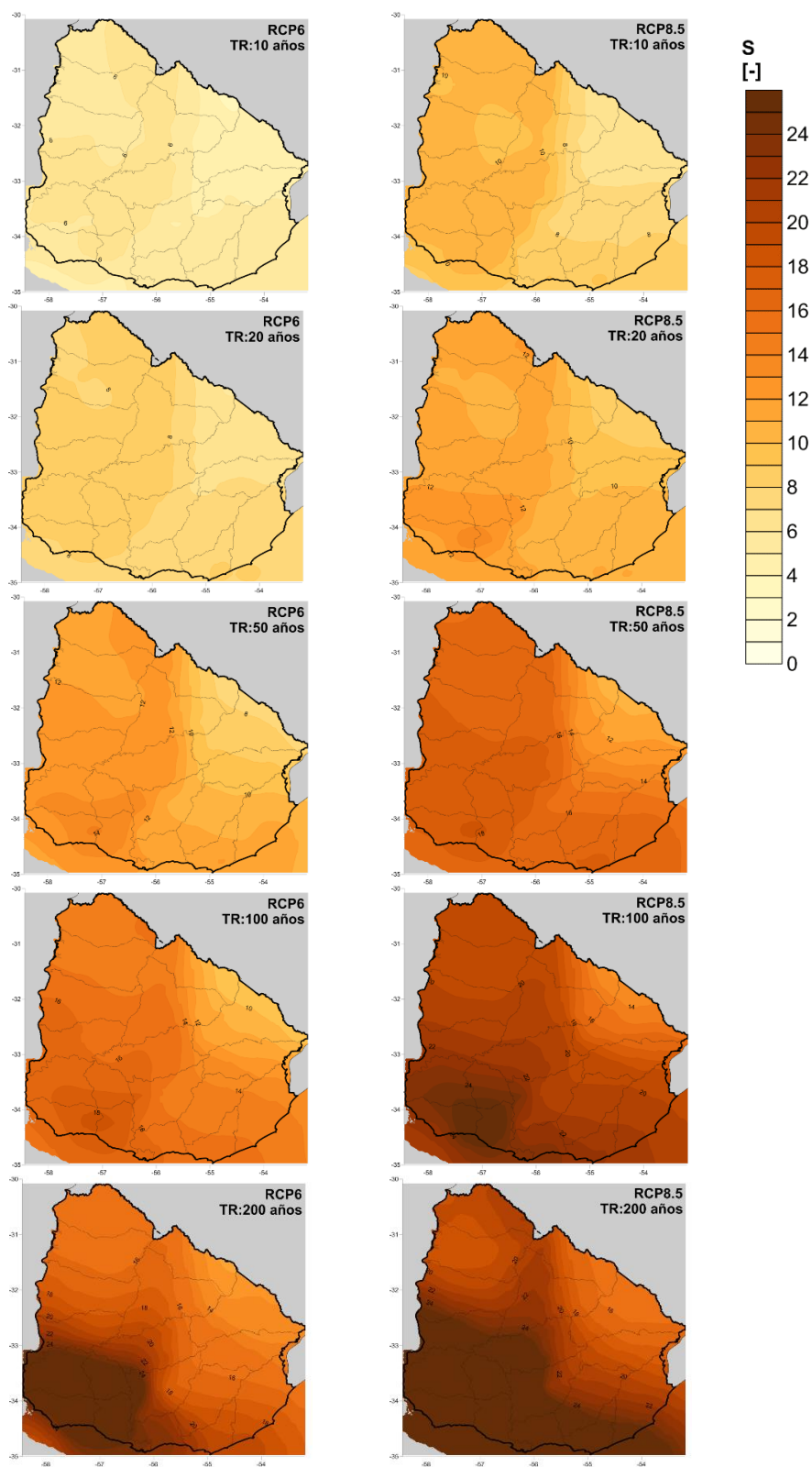


Figura 108. Mapas de severidad de sequía RCP6 y, 8.5; para 10, 20, 50, 100 y 200 años de periodo de retorno. El indicador SPEI no tiene unidades



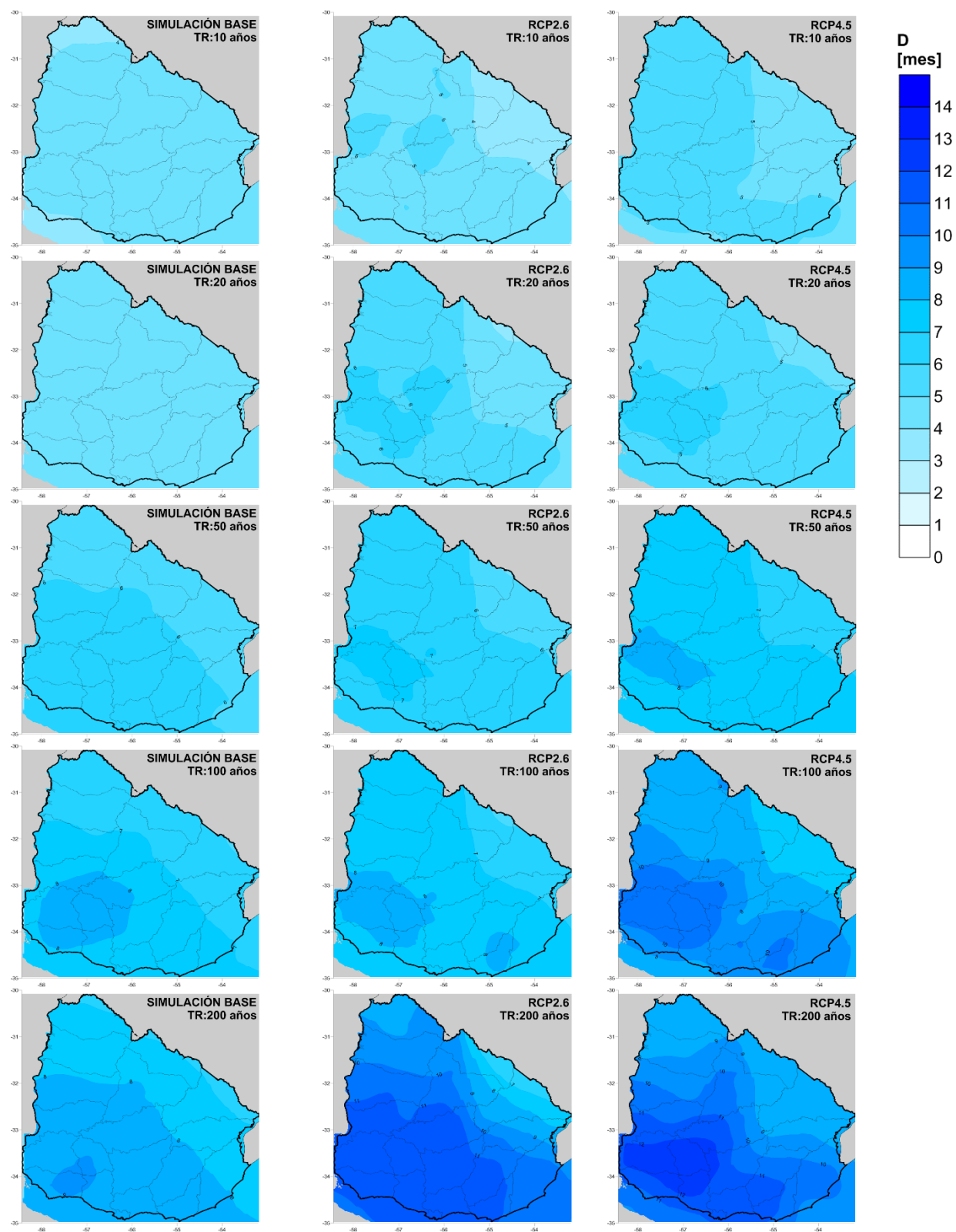


Figura 109. Mapas de duración de sequía para simulación base, RCP2.6 y, 4.5; para 10, 20, 50, 100 y 200 años de periodo de retorno.

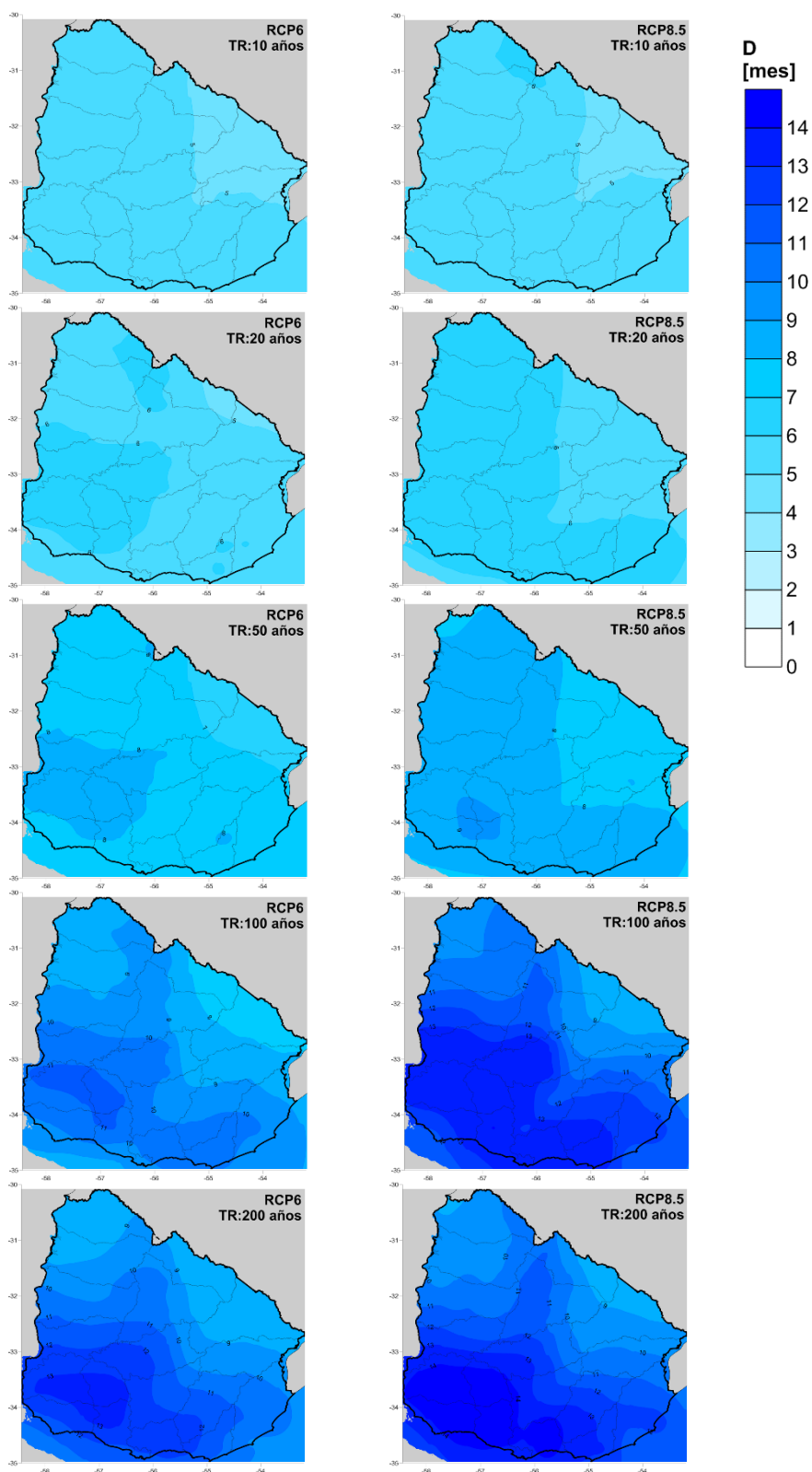


Figura 110. Mapas de duración de sequía para RCP6 y 8.5; para 10, 20, 50, 100 y 200 años de periodo de retorno.

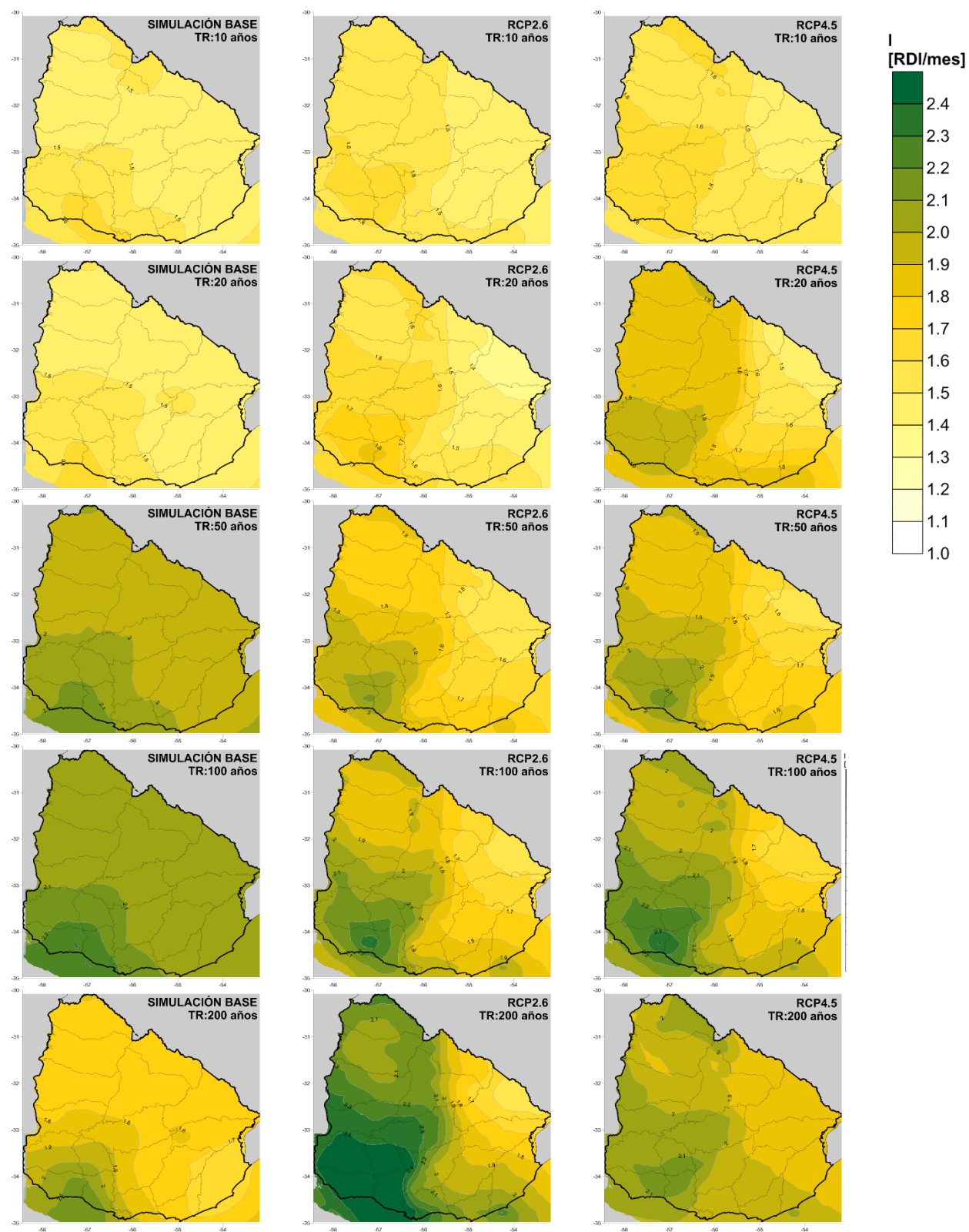


Figura 111. Mapas de intensidad de sequía para simulación base, RCP2.6 y 4.5; para 10, 20, 50, 100 y 200 años de periodo de retorno.

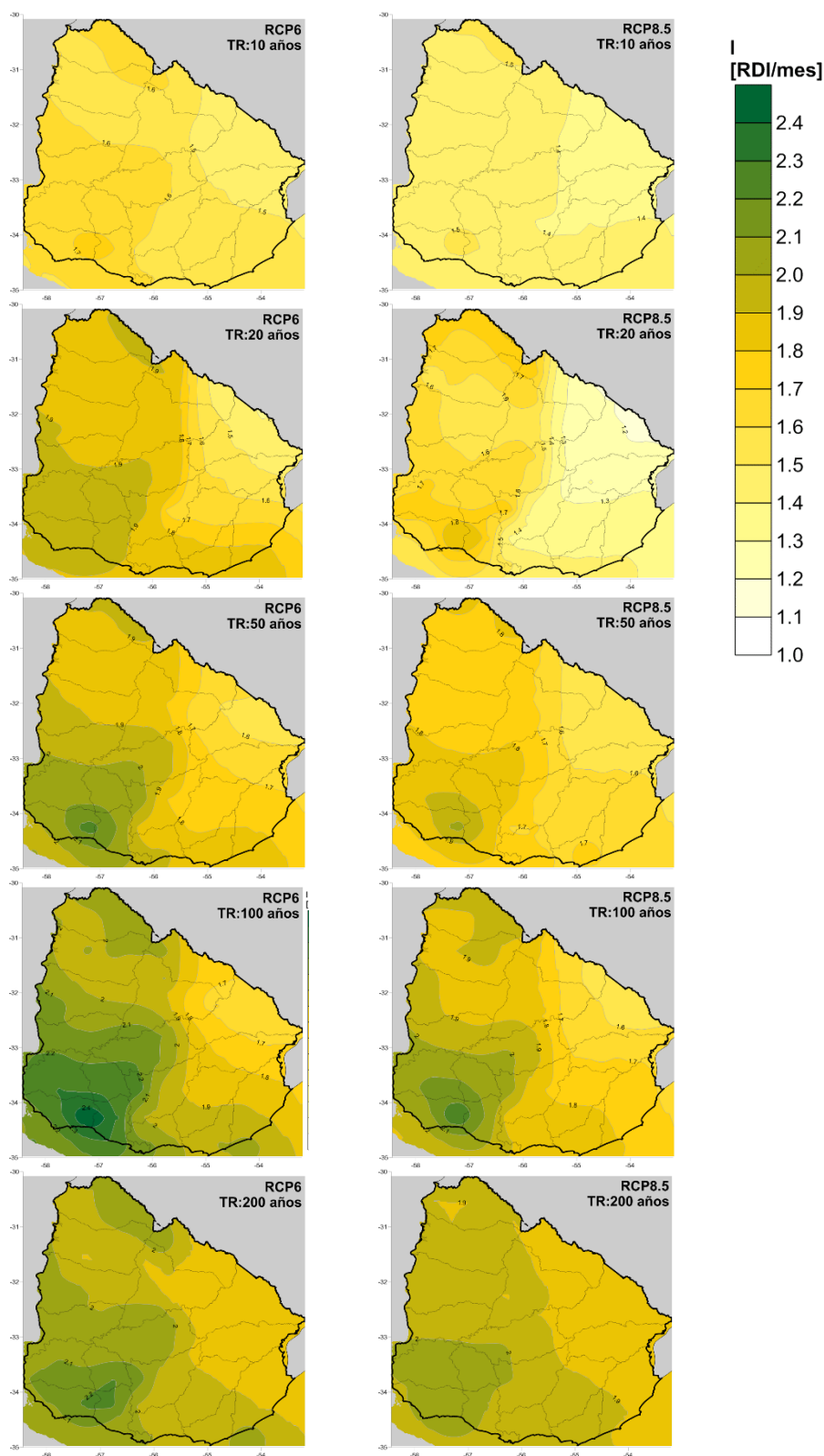


Figura 112. Mapas de intensidad de sequía para RCP6 y 8.5; para 10, 20, 50, 100 y 200 años de periodo de retorno.

### 1.19.7 Curvas de amenaza

Como se presenta en la Sección 1.18.3, las curvas de amenaza representan la variación de la tasa de excedencia del indicador de sequía RDI (en valores absolutos). Se presentan las curvas de tasas de excedencia estimadas para la información histórica (curva empírica) y las calculadas a partir de las sequías identificadas en las series climáticas simuladas (base y para los cuatro RCP analizados). Dado que la estimación histórica tiene incertidumbre, se presenta la correspondiente banda de incertidumbre (+/- una desviación estándar). El efecto del cambio climático implica “correr” las curvas hacia arriba y hacia la derecha. Por ejemplo, para un mismo RDI, bajo escenarios de cambio climático se espera una mayor tasa de excedencia, que es lo mismo que un menor periodo de retorno. Es decir, se alcanzan cierto valor de RDI con mayor frecuencia. Igualmente, para una misma tasa de excedencia, se espera un valor más alto de RDI, que implica mayor severidad de la amenaza. La Figura 113 **Error! Reference source not found.** muestra las curvas de amenaza calculadas para el punto 7 de la malla de análisis para Uruguay, e incluye las curvas para cada RCP evaluado.

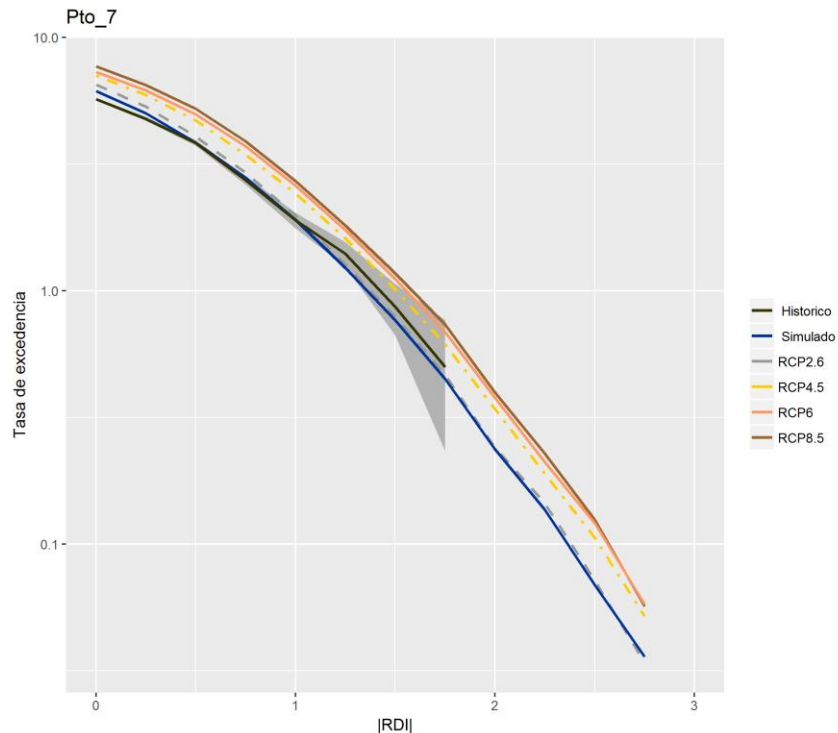


Figura 113. Curvas de amenaza incluyendo cambio climático para el Punto 7 de la malla de análisis de Uruguay.

La evaluación de amenaza por sequía para Uruguay permite concluir que la recurrencia de eventos puede incrementarse en las próximas décadas, derivado de aumentos en la temperatura global. Ahora bien, hay que resaltar que aún bajo las condiciones actuales de clima se pueden presentar eventos de sequía de alta gravedad, que derivan en pérdidas para el sector agropecuario en el país. El cambio climático puede incrementar la gravedad de estos eventos, que ya de por sí generan muchas pérdidas. Entonces, los resultados de la evaluación de la amenaza que aquí se presentan son una herramienta de gran utilidad para la planeación del territorio y el diseño de políticas que busquen reducir la vulnerabilidad de los sectores que se pueden ver perjudicados por desastres asociados con déficit hídrico.

## EXPOSICIÓN DEL SECTOR AGROPECUARIO

---

Un elemento expuesto es cualquier objeto, geográficamente referenciado, que es susceptible de ser afectado por la ocurrencia de un fenómeno amenazante. En la metodología propuesta, los elementos expuestos para la actividad agrícola son los cultivos, mientras que para la actividad pecuaria son las pasturas y el inventario de animales situados en el área donde se estima el riesgo de sequía. En esta sección se presenta la metodología para la conformación de la base de datos de elementos expuestos para Uruguay a partir de información suministrada por las instituciones locales e información oficial disponible y de libre acceso consultada por la firma consultora.

Para cada elemento expuesto o unidad de tierra cultivada en la región de análisis, es necesario conocer las características del cultivo que típicamente se siembra en esa ubicación. La información que se debe conocer incluye el tipo de cultivo, su estacionalidad y área sembrada. También se debe contar con información de rendimientos típicos (toneladas producidas por unidad de área). En la medida de lo posible, esta información debe ser obtenida de fuentes oficiales.

Según datos oficiales presentados en el Anuario Estadístico Agropecuario elaborado por la Dirección de Estadísticas Agropecuarias (DIEA) del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, en el año 2016 el sector agroindustrial tuvo una participación del 8.9% del Producto Interno Bruto (PIB), de los cuales el 6% corresponde al sector agropecuario, y el 2.9% restante a las industrias asociadas al agro. El país es clasificado en Regiones Agropecuarias de acuerdo con la actividad agropecuaria más representativa en la zona y la Tabla 14 **Error! Reference source not found.** muestra la superficie de las regiones en miles de hectáreas y el porcentaje de participación en el total del país, en donde se puede ver la gran importancia de la actividad pecuaria en el país, que según la información del mismo Anuario representó en 2016 el 48% de la producción agropecuaria del país, seguida de la agricultura con 44.6% y silvicultura con 7.4%.

En 2016 la producción de carnes y animales vivos, lácteos, cueros y lana representó el 39% del total de las exportaciones nacionales, y, según las Regiones Agropecuarias, estas actividades abarcan algo más del 40% de la superficie del territorio,

evidenciándose en la presencia de campo natural y pasturas en toda la extensión del país. Por otro lado, en el sector agrícola, el país tiene una importante producción de soja, principalmente para la exportación, al igual que la producción de arroz, trigo y cebada. Estas características de producción del país se consideran en la conformación de la base de elementos expuestos de cultivos para luego calcular riesgo por sequía.

Tabla 14. Superficie y porcentaje de uso de suelo asociado a las Regiones Agropecuarias del Uruguay en al año 2011. Fuente: (MGAP-DIEA, 2017a)

<b>Región Agropecuaria</b>	<b>Superficie territorio [miles de ha]</b>	<b>% del total</b>
Ganadera	6,467	40
Agrícola de secano	4,928	30
Arrocera	1,836	11
Forestal	2,448	15
Lechera	344	2
Con agricultura intensiva <sup>14</sup>	336	2
<b>Total</b>	<b>16,357</b>	<b>100</b>

. La siguiente tabla muestra la producción de los diferentes subsectores de la actividad agropecuaria en el país, y la participación en el total de la producción. Se identifican el sector pecuario y agrícola con una participación del 48% y 45% respectivamente, en donde los subsectores más representativos son el ganado en pie y otros productos de la cría de ganado con una participación del 32%, y la producción de soja y girasol con un 16% de participación.

---

<sup>14</sup> Incluye actividad citrícola, frutivíticola, hortícola y hortifrutivíticola.



Tabla 15. Producción agropecuaria por subsector en millones de dólares, en el año 2016.

Subsector	Producción [millones de USD]	Aporte a la producción total	Observaciones
<b>Agricultura</b>	<b>2,510</b>	<b>45%</b>	
Soja y girasol	888	16%	
Trigo	136	2%	
Maíz y sorgo	154	3%	
Cultivo de arroz	255	5%	
Cebada	111	2%	
Praderas	362	6%	
Hortalizas, legumbres; productos de viveros	360	6%	
Árboles frutales, uvas, plantas	244	4%	Plantas: cuyas hojas o frutas se utilizan para preparar bebidas o especias
<b>Silvicultura</b>	<b>417</b>	<b>7%</b>	Silvicultura, extracción de madera
<b>Pecuaria</b>	<b>2,705</b>	<b>48%</b>	
Ganado en pie y otros	1,819	32%	Otros productos de la cría de ganado
Producción de Leche	487	9%	
Lana y cueros	68	1%	
Otros	331	6%	Cría de otros animales y elaboración de sus productos

## 1.20 Metodología para determinar los elementos expuestos

A continuación, se presenta la metodología aplicada en este proyecto para identificar los cultivos más importantes del país y su ubicación geográfica. Como resultado se obtiene la localización georeferenciada de los cultivos, con sus características o atributos asociados en donde se definen las propiedades del tipo de cultivo, tipo de siembra, estacionalidad, valor económico de los cultivos, entre otros.

### 1.20.1 Insumos de entrada para la determinación de elementos expuestos

El modelamiento de la vulnerabilidad de los elementos expuestos, es decir de los cultivos presentes en Uruguay, para estimar el riesgo por sequía requiere de información detallada de localización y caracterización de dichos cultivos. Con el fin de obtener esta información de la forma más precisa se consultaron fuentes oficiales con datos de aquellos cultivos más importantes y representativos de la economía del país, incluyendo tanto cultivos de subsistencia como cultivos con fines comerciales.

La información utilizada proviene de diversas fuentes, las más destacadas y en las cuales se basó la determinación de la exposición de cultivos para el país se discuten a continuación.

### 1.20.1.1 Información suministrada por OPYPA-MGAP

Se recibió información proveniente de los registros administrativos del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP), procesados por la Oficina de Programación Y Política Agropecuaria (OPYPA), con datos de áreas de siembra de los cultivos más representativos de la economía uruguaya desagregados a nivel de Área de Enumeración Censal<sup>15</sup>. La información, recibida en formato shapefile, presenta la superficie total del Área de Enumeración Censal, y el área total sembrada de cada cultivo, en hectáreas. Se recibió información individual de cultivos de: soja, sorgo y maíz, cultivos de invierno (compuestos por trigo y cebada), arroz, cítricos y pastos naturales. Esta información se presenta en los mapas a continuación.

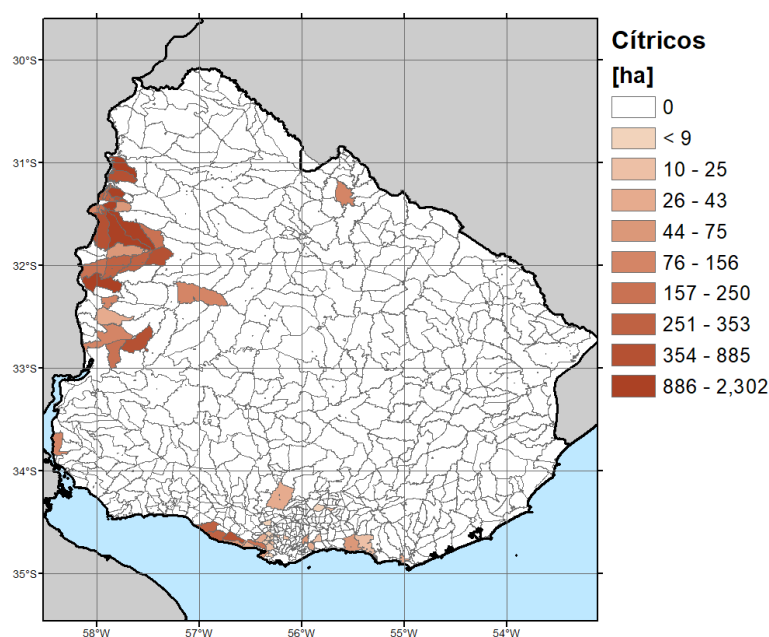


Figura 114. Área de cítricos sembrada, por Área de Enumeración Censal, en el año 2014. Fuente: (OPYPA). Consultar origen de la información en el Anexo A. 7

<sup>15</sup> En el Censo se define el Área de Enumeración Censal como la mínima unidad territorial usada y equivale al "área asignada a cada enumerador para la fase de campo en función de la carga de trabajo estimada a partir de información del censo de 2000".

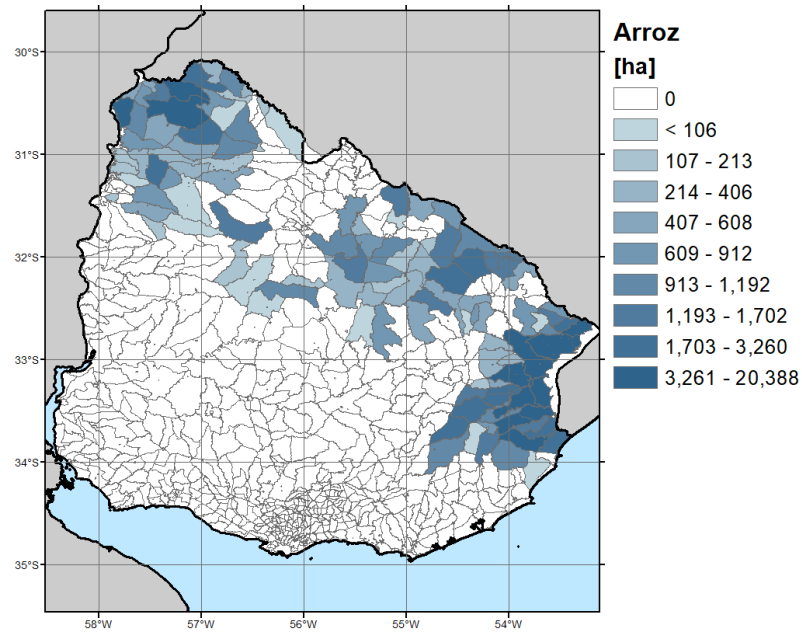


Figura 115. Área de arroz sembrada, por Área de Enumeración Censal, en el verano 2016-2017. Fuente: (OPYPA). Consultar origen de la información en el Anexo A. 7

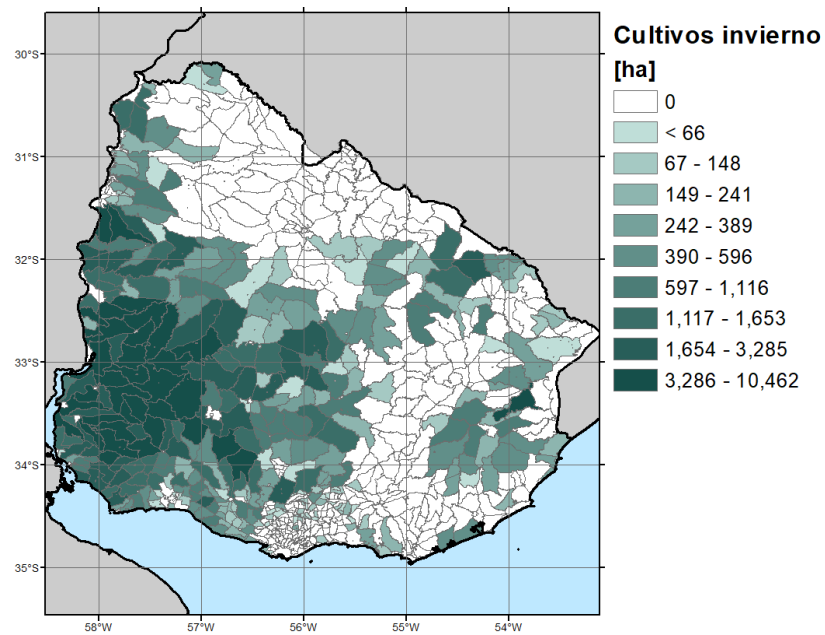


Figura 116. Área de cultivos de invierno (trigo y cebada) sembrada, por Área de Enumeración Censal, en el año 2017. Fuente: (OPYPA). Consultar origen de la información en el Anexo A. 7

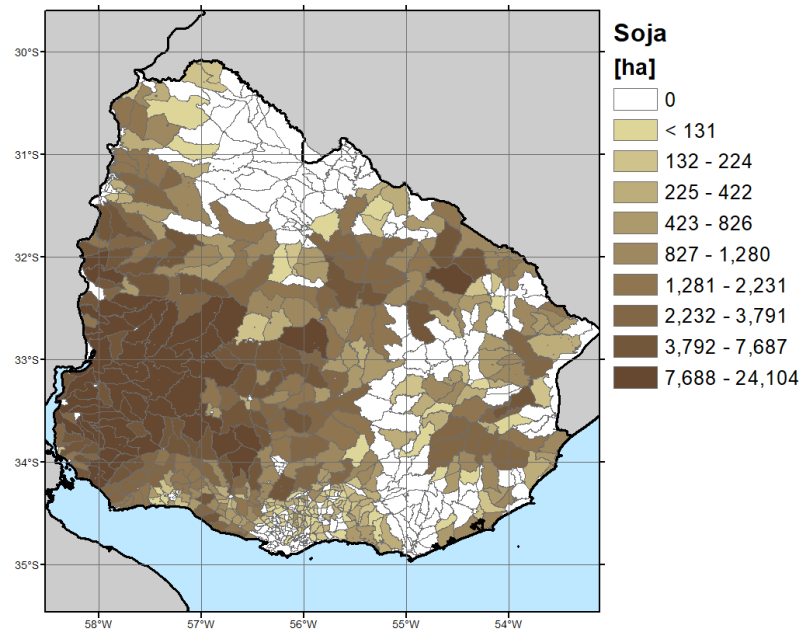


Figura 117. Área de soja sembrada, por Área de Enumeración Censal, en el año 2016-2017. Fuente: (OPYPA). Consultar origen de la información en el Anexo A. 7

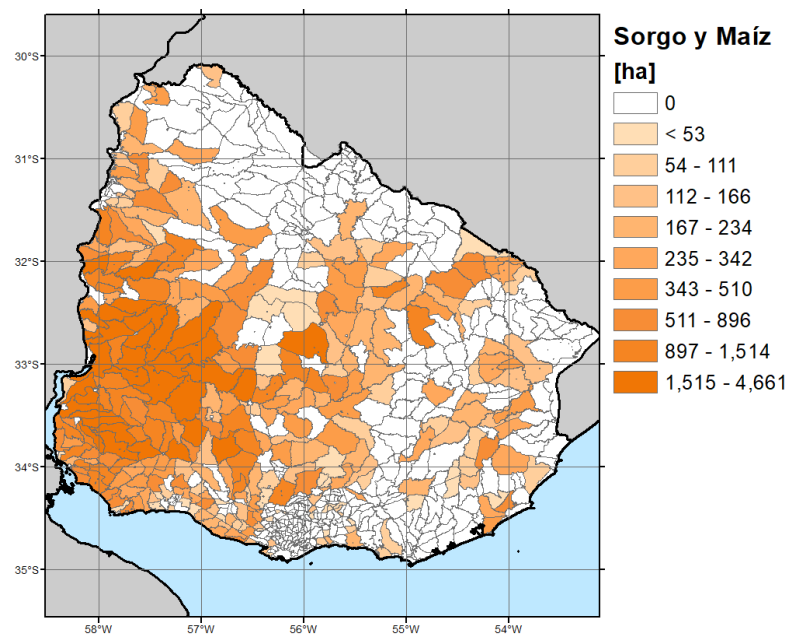


Figura 118. Área de sorgo y maíz sembrada, por Área de Enumeración Censal, en el año 2016-2017. Fuente: (OPYPA). Consultar origen de la información en el Anexo A. 7

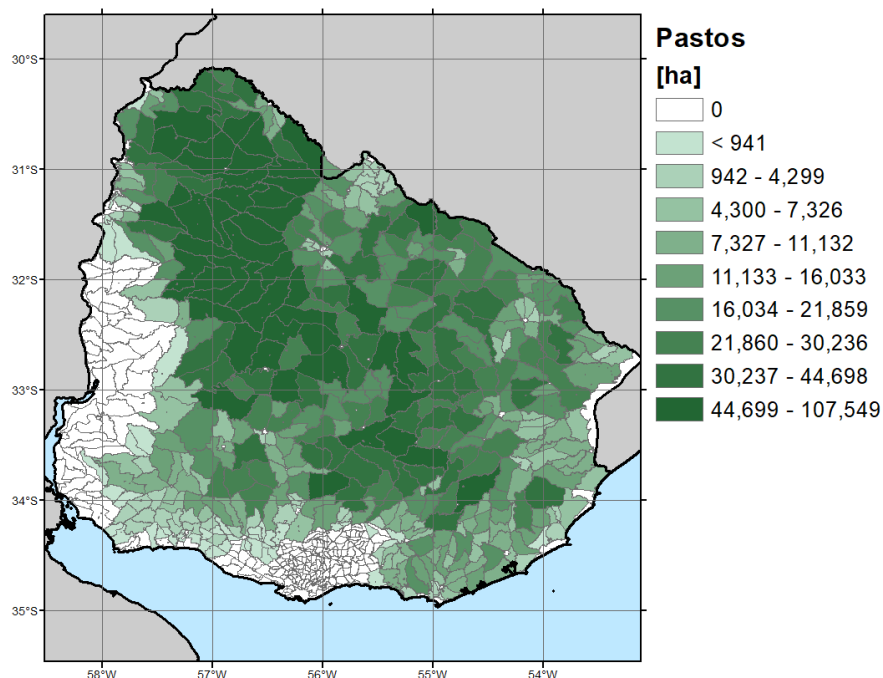


Figura 119. Área de pastos naturales, por Área de Enumeración Censal, en el año 2015-2016. Fuente: (OPYPA). Consultar origen de la información en el Anexo A. 7

Adicionalmente se recibió un archivo con series históricas a nivel nacional de área cultivada, producción y rendimiento de los cultivos de cereales ya mencionados, elaboradas por la DIEA del MGAP y procesado por OPYPA, para el período comprendido entre los años 1973 y 2017. En la Tabla 16 **Error! Reference source not found.** se presentan los datos reportados para los cereales seleccionados, para el año agrícola 2016/2017. Este período será usado de referencia para la estimación de las áreas y la conformación de la base de datos de los cultivos.

Tabla 16. Área sembrada, producción y rendimiento de granos seleccionados para el análisis. Año agrícola 2016-2017. Fuente: (OPYPA). Consultar origen de la información en el Anexo A. 7

Cultivo	Área sembrada [ha]	Área sembrada [%] <sup>1</sup>	Producción [ton]	Producción [%] <sup>1</sup>	Rendimiento [kg/ha sembrada]
Trigo	215,000	12%	757,015	11%	3,521
Cebada cervecera	190,000	11%	677,920	10%	3,568
Maíz	66,000	4%	470,976	7%	7,136
Sorgo	47,000	3%	211,500	3%	4,500
Soja	1,089,000	61%	3,213,639	48%	2,951
Arroz	164,500	9%	1,398,250	21%	8,500

<sup>1</sup>Porcentaje de área y producción respecto al total de los granos seleccionados

Por último, se contó con información local que presenta la producción y estacionalidad de las pasturas naturales en Uruguay, específicamente para las regiones

geomorfológicas: Areniscas, Basalto, Cristalino Central, Cristalino del Este y Noreste, donde se concentra la actividad ganadera del país. En la Tabla 17 se presenta la información recibida, que después será usada en la definición del modelo de vulnerabilidad de los pastos naturales.

Tabla 17. Producción de pastos naturales por región geomorfológica, en kg de materia seca por año

<b>Región</b>	<b>Otoño</b>	<b>Invierno</b>	<b>Primavera</b>	<b>Verano</b>
Basalto	786	562	1,179	1,217
Centro Sur (Cristalino)	770	385	1,225	1,120
Noreste	688	339	1,387	1,879
Este	598	171	648	954

### **1.20.1.2 Mapa de Cobertura del Suelo**

El geoservicio<sup>16</sup> de la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA) del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA) tiene entre sus recursos disponibles una capa SIG de Cobertura del Suelo actualizado para el año 2015, la cual contiene las diferentes categorías de uso del suelo, y gracias a la cual se pueden identificar las zonas destinadas a la siembra de los diferentes cultivos que serán analizados.

---

<sup>16</sup> Disponible en <https://www.dinama.gub.uy/geoservicios/>

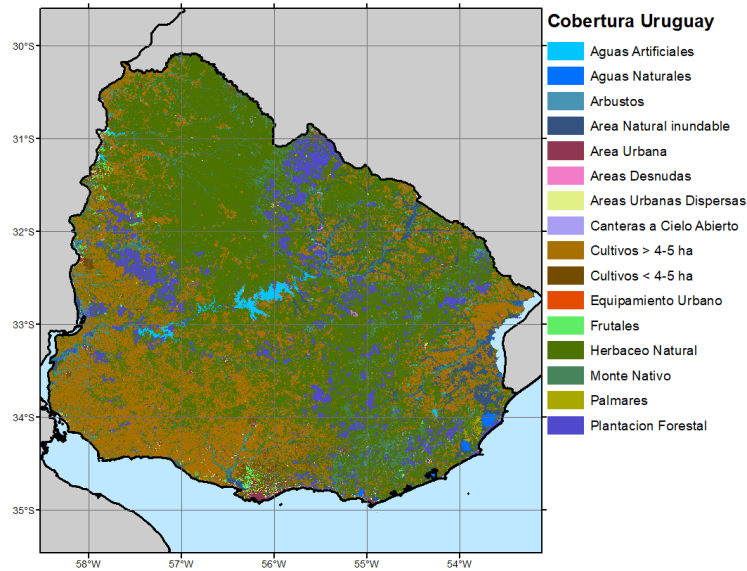


Figura 120. Mapa de Cobertura de Suelo, del año 2015. Fuente: (MVOTMA, 2018).

El mapa de cobertura presenta categorías generales como: *Aguas artificiales*, *Área urbana*, *Cultivos > 4-5 ha*, *Cultivos regados y de secano < 4-5 ha*, *Frutales*, *Herbáceo natural*, *Monte nativo*, y *Plantación forestal*, entre otras, que requieren ser llevadas a categorías individuales de cultivos, para que en el módulo de vulnerabilidad se pueda modelar su respuesta como elementos expuestos ante el estrés hídrico.

Es así como de esta capa de cobertura es posible identificar las áreas destinadas a todos los *cultivos* a partir de las categorías *Cultivos > 4-5 ha* y *Cultivos regados y de secano < 4-5 ha*. También es posible conocer las áreas destinadas a *cítricos* y *viñedos* a partir de la categoría *Frutales*. Por último, la categoría *Herbáceo natural* permite determinar aquellas zonas destinadas a *pastos* para alimentación de animales, dato que será necesario para calcular las pérdidas que se puedan observar en la ganadería en caso de sequía.

A continuación, se presentan los mapas de las zonas destinadas a diferentes clases generales de cultivos extraídas a partir de las categorías del mapa de cobertura.

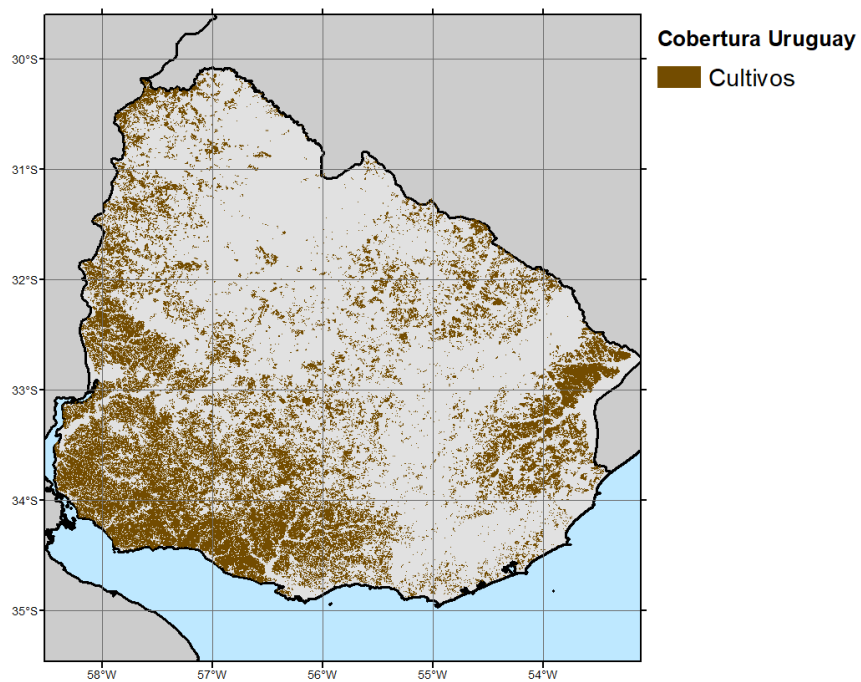


Figura 121. Mapa de Cobertura de Suelo, del año 2015. Zonas de cultivos. Fuente: (MVOTMA, 2011).

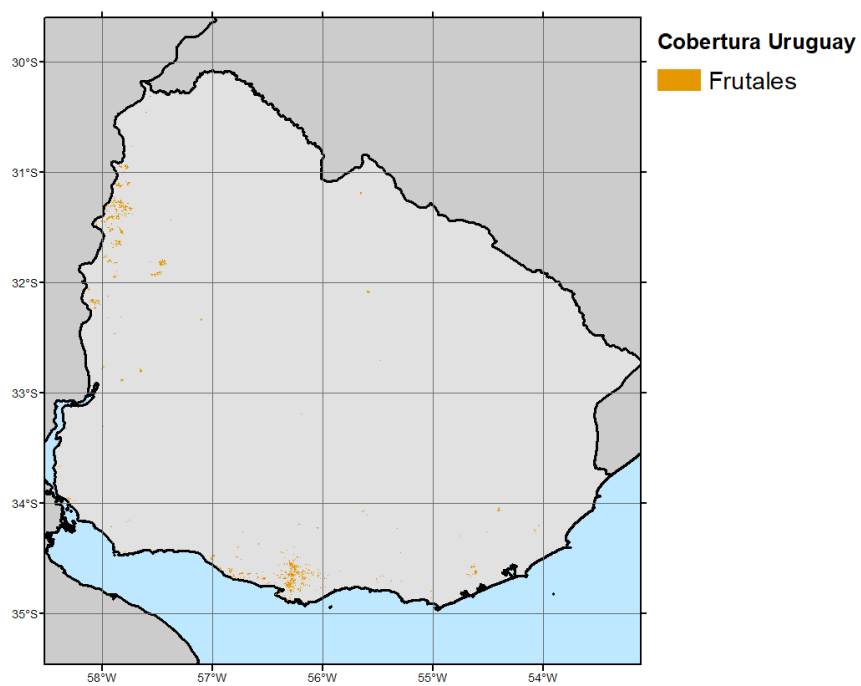


Figura 122. Mapa de Uso de Suelo, del año 2015. Frutales. Fuente: (MVOTMA, 2018)



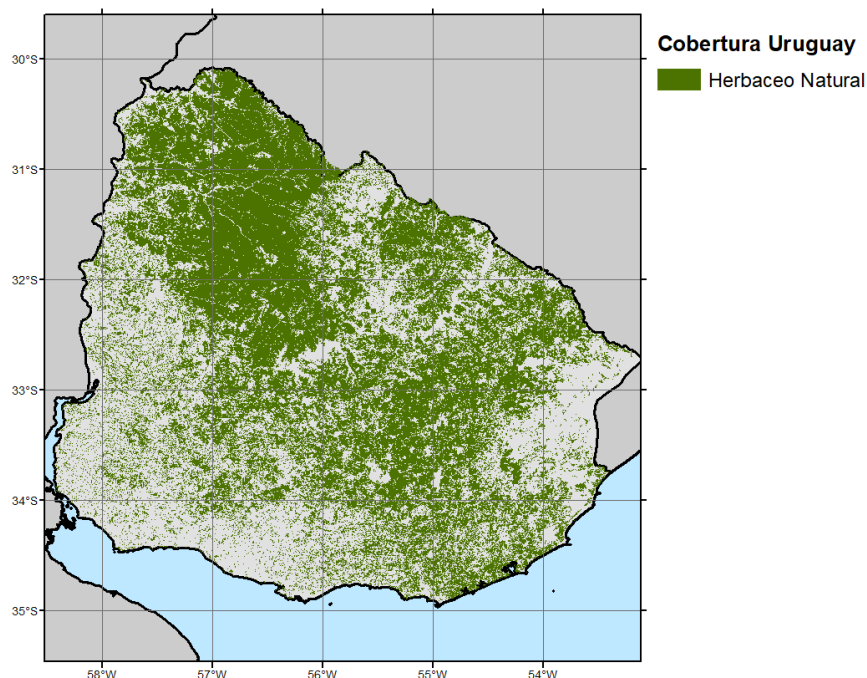


Figura 123. Mapa de Uso de Suelo, del año 2015. Zonas de pastos. Fuente: (MVOTMA, 2018)

### 1.20.1.3 Encuestas Agrícolas Nacionales

Las Encuestas Agrícolas se realizan dos veces en el año y presentan estimaciones de superficie sembrada, cosechada, producción y rendimiento para los diferentes cultivos de invierno y verano destinados a cosecha de grano seco. Esta fuente fue consultada ya que presenta la información oficial de área total sembrada de cereales más actualizada

De la Encuesta Agrícola “Primavera 2016” se obtuvo la superficie sembrada, el área cosechada, la producción y el rendimiento de los cultivos de trigo y cebada, que conforman los cultivos de invierno del país como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18. Área sembrada, producción y rendimiento de los cultivos de invierno. Fuente: (MGAP-DIEA, 2016a)

Cultivo	Área sembrada [miles de ha]	Área sembrada [%] <sup>1</sup>	Producción [miles de ton]	Producción [%] <sup>1</sup>	Rendimiento [kg/ha sembrada]
<b>Total</b>	<b>452,834</b>		<b>1,435</b>		
Trigo	214,730	47%	757	53%	3,521
Cebada	190,073	42%	678	47%	3,568

<sup>1</sup>Porcentaje de área y producción respecto al total de los cultivos de invierno

De la Encuesta Agrícola “Invierno 2017” se obtuvo la misma información para los cultivos de soja, maíz y sorgo, que corresponden a los cultivos de verano y se presenta en la Tabla 19 **Error! Reference source not found.** a continuación. Adicionalmente esta encuesta presenta discriminadas las áreas por cultivos de primera y segunda fecha de siembra, información que será de gran utilidad ya que el calendario de siembra de los cultivos es considerado en el modelo de vulnerabilidad.

Tabla 19. Área sembrada, producción y rendimiento de los cultivos de verano. Fuente: (MGAP-DIEA, 2017b)

Cultivo	Área sembrada [miles de ha]	Área sembrada [%] <sup>1</sup>	Producción [miles de ton]	Producción [%] <sup>1</sup>	Rendimiento [kg/ha sembrada]
<b>Total</b>	<b>1,202</b>		<b>3,897</b>		
<b>Soja total</b>	<b>1,089</b>	<b>91%</b>	<b>3,212</b>	<b>82%</b>	<b>2,951</b>
Soja de 1ra	735	61%	2,218	57%	3,020
Soja de 2da	354	29%	994	26%	2,808
<b>Maíz total</b>	<b>66</b>	<b>5%</b>	<b>471</b>	<b>12%</b>	<b>7,136</b>
Maíz de 1ra	46	4%	345	9%	7,500
Maíz de 2da	20	2%	126	3%	6,300
<b>Sorgo total</b>	<b>47</b>	<b>4%</b>	<b>214</b>	<b>5%</b>	<b>4,553</b>
Sorgo de 1ra	27	2%	127	3%	4,704
Sorgo de 2da	20	2%	87	2%	4,350

<sup>1</sup>Porcentaje de área y producción respecto al total de los cultivos de verano

De la Encuesta Citrícola “Primavera 2016” se obtuvo la información de superficie total y producción de los cultivos de frutas cítricas que corresponden a naranja, mandarina, limón y pomelo y se presenta en la Tabla 20 a continuación.

Tabla 20. Área sembrada y producción de los cultivos de frutas cítricas. Fuente: (MGAP-DIEA, 2016a)

Especie	Superficie efectiva total [ha]	Superficie efectiva total [%] <sup>1</sup>	Producción [ton]	Producción [%] <sup>1</sup>
<b>Total</b>	<b>14,848</b>		<b>271,114</b>	
Naranja	7,418	50%	139,100	51%
Mandarina	5,760	39%	95,095	35%
Limón	1,585	11%	35,688	13%
Pomelo	85	1%	1,231	0.5%

<sup>1</sup>Porcentaje de área y producción respecto al total de los cultivos de frutas cítricas

Se pudo verificar que la información disponible en las encuestas coincidía con los valores reportados en la serie histórica de datos de superficie y rendimientos obtenida a partir de las Encuestas de DIEA recibida de parte de OPYPA-MGAP, lo que permitió

confirmar el uso de dichos valores como los totales nacionales por cultivo para conformar la base de elementos expuestos.

#### 1.20.1.4 Censo General Agropecuario

El Censo General Agropecuario del año 2011 suministra datos básicos sobre el sector agropecuario. El área censada en 2011 corresponde a una superficie de 16,357,298 hectáreas y comprende una población agrícola de 106,961 habitantes. La Tabla 21 **Error! Reference source not found.** presenta los diferentes usos del suelo identificados en el censo y el porcentaje de la superficie nacional dedicada a dicho uso. Se evidencia, nuevamente, la importancia de la actividad pecuaria representada en los usos asociados al *campo natural* y que según estos datos representa casi el 70% de la superficie uruguaya. Le sigue, con un porcentaje cercano al 10%, la superficie dedicada a cultivos cerealeros e industriales dentro de los cuales se encuentran la soja, trigo, cebada, maíz y sorgo.

Tabla 21. Porcentaje de uso del suelo, según el Censo General Agropecuario del 2011

Uso del suelo	Superficie explotada
	(%)
Campo natural	64.3
Cultivos cerealeros e industriales	9.5
Bosques artificiales	6.5
Praderas artificiales	5.7
Cultivos forrajeros anuales	3.6
Bosques naturales	3.4
Campo natural sembrado en cobertura	2.7
Campo natural fertilizado	1.5
Tierras improductivas y espejos de agua	1.2
Tierra preparada al 30/06/2011	0.6
Tierras de rastrojo	0.6
Frutas cítricas	0.1
Otros frutales	0.1
Cultivos de huerta	0.1
Viñedos	0.05

La información consignada en el documento del censo, tal como área sembrada, producción y rendimiento de los cultivos existentes, y stock animal a nivel del país está disponible para diferentes niveles geográficos llegando a nivel de Área de Enumeración Censal a través de la herramienta Redatam<sup>17</sup> de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). De esta forma se pudo obtener la distribución porcentual de algunos cultivos por Área de Enumeración Censal que no se encontraban disponibles en otra fuente, como en el caso de los viñedos.

#### **1.20.1.5 Anuario Estadístico Agropecuario**

Las estadísticas agropecuarias nacionales consignadas en el Anuario Estadístico Agropecuario 2017 elaborado por la DIEA del MGAP, se consideraron como otra fuente confiable para conformar la base de elementos expuestos a la amenaza de sequía. El Anuario proporciona información pertinente de área sembrada, producción y rendimiento a nivel nacional, para los cultivos más representativos del país.

A partir de la información aquí consignada fue posible seleccionar los cultivos a analizar teniendo en cuenta la importancia que representan en la economía del país, entendida como área sembrada, total de producción y total de exportaciones.

La siguiente tabla presenta la producción agropecuaria por subsector y el respectivo aporte en la producción nacional. Se observa que el rubro con mayor aporte económico es la actividad pecuaria, liderado por la ya conocida importancia del subsector del ganado en pie en la economía uruguaya. Lo sigue la agricultura, con una marcada jerarquía de la producción de soja. El valor de la producción de todos los subsectores incluye la producción de los servicios asociados.

A partir de la información consignada en esta tabla se determinarán los cultivos a evaluar ya que da cuenta de la importancia de cada subsector agropecuario en la economía uruguaya.

---

<sup>17</sup> <https://redatam.org/binurl/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=CGA2011&lang=esp>

Tabla 22. Producción agropecuaria, según subsector, para el año 2016. Fuente: (MGAP-DIEA, 2017a)

Subsector	Producción [USD Millones]	Producción [%]
<b>Agricultura y Silvicultura</b>	<b>2,927</b>	<b>52%</b>
<b>Subtotal Agricultura</b>	<b>2,510</b>	<b>45%</b>
<b>Cultivos</b>	<b>1,906</b>	<b>34%</b>
Soja y girasol; y servicios	888	16%
Trigo; y servicios	136	2%
Maíz y sorgo; y servicios	154	3%
Cultivo de arroz; y servicios	255	5%
Cebada; y servicios	111	2%
Praderas; y servicios	362	6%
<b>Hortalizas, Frutales, Viñedos y Otros</b>	<b>604</b>	<b>11%</b>
Hortalizas, legumbres; productos de viveros; y servicios	360	6%
Árboles frutales, uvas, plantas y servicios	244	4%
<b>Subtotal Silvicultura</b>	<b>417</b>	<b>7%</b>
<b>Pecuaria</b>	<b>2,705</b>	<b>48%</b>
Ganado en pie y otros	1,819	32%
Producción de Leche	487	9%
Lana, cueros y servicios	68	1%
Otros	331	6%
<b>TOTAL</b>	<b>5,632</b>	<b>100%</b>

### 1.20.2 Definición de la unidad de análisis

La resolución espacial de la información de entrada depende de la fuente a partir de la cual se obtuvo dicha información. Por esta razón fue necesario definir una resolución espacial consistente en todo el territorio de análisis. El objetivo es definir una unidad de análisis que fuera lo suficientemente detallada para no perder la resolución del módulo de amenaza, pero tampoco demasiado detallada que genere excesos computacionales en el momento de calcular riesgo.

La geometría de los cultivos obtenida a partir del Mapa de Cobertura del Suelo 2015 estaba compuesta por polígonos de tamaños muy distintos. En este caso tomar como referencia el polígono de menor tamaño como la unidad base resultaba en un gran número de unidades que hacen el cálculo impráctico (en términos de demanda computacional). De otro lado, tomar como referencia áreas demasiado grandes puede

desconocer diferencias espaciales en las variables meteorológicas de la amenaza. Entonces, se decidió crear una malla que cubriera todo el país, cuya unidad de análisis corresponde a un píxel de 5 km por 5 km.

Los polígonos que representaban los diferentes cultivos en la información de entrada fueron redistribuidos en la malla con resolución de 5 km por 5 km que se presenta en la Figura 124**Error! Reference source not found..** En el mapa se ven las áreas definidas como cultivos, según el uso de la tierra del país, y las líneas de la malla de análisis.

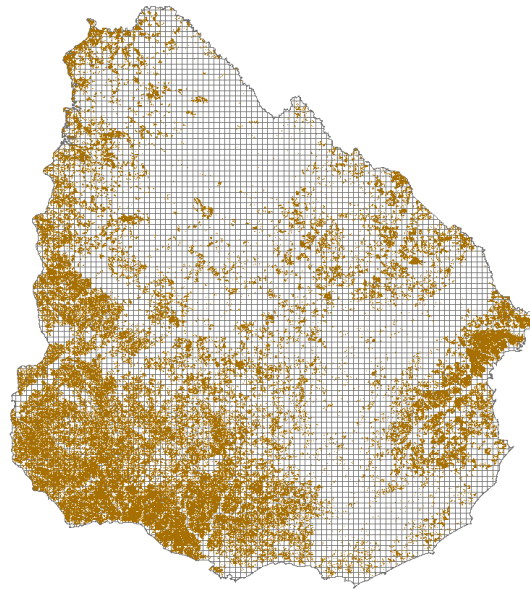


Figura 124. Malla con resolución de 5 km por 5 km, para Uruguay.

A partir de la información de entrada, fue pertinente seleccionar con cuáles cultivos se debía trabajar en el país como elementos expuestos. La selección de los cultivos se hizo a partir del nivel de detalle de la información que se tenía disponible, además de considerar los cultivos más importantes y representativos de la economía uruguaya, tanto en términos de subsistencia como producción con fines comerciales. A continuación, se presenta la información base más relevante para conformar el módulo de exposición y los resultados obtenidos para Uruguay.

### 1.20.3 Base de datos de elementos expuestos en la actividad agrícola

A partir de la información consignada en las fuentes mencionadas en la sección 1.20.1 se conformó la base de datos de elementos expuestos al riesgo de sequía en la actividad agrícola del país. Como ya se ha mencionado, los elementos que se consideran expuestos a esta amenaza, en este sector de la economía, son las siembras o cultivos.

El primer paso para construir la base de datos fue definir los cultivos que serían incluidos en el análisis, y para esto se consultaron cifras de área sembrada en el año agrícola 2016/2017, producción de cada cultivo durante el mismo año de referencia y de la importancia en la economía medida como el porcentaje de producción exportada, que permitieran identificar los cultivos más representativos de la economía uruguaya. En la Tabla 15 se presentó la producción agropecuaria por subsector, y a partir de dichos datos se seleccionaron los cultivos sobre los cuales se evaluará el riesgo de sequía. La Tabla 23 presenta estas cifras para los cultivos finalmente seleccionados, donde predominan los granos que son sembrados ampliamente en el país, y en donde también se incluyeron los frutales cítricos y los viñedos, que son sembrados mayormente en el área de Montevideo y alrededores.

Tabla 23. Área sembrada, producción y porcentaje exportado de los cultivos seleccionados para el modelo de riesgo por sequía.

Cultivos para análisis	Área sembrada [ha]	Producción [ton]	Producción exportada [%]
Soja (de primera siembra)	735,000	2,218,000	71%
Soja (de segunda siembra)	354,000	994,000	
Trigo	215,000	757,015	80%
Cebada	190,000	677,920	50%
Arroz	164,500	1,398,250	67%
Maíz (de primera siembra)	46,000	345,000	0.01%
Maíz (de segunda siembra)	20,000	126,000	
Sorgo (de primera siembra)	27,000	127,000	3%
Sorgo (de segunda siembra)	20,000	87,000	

Cultivos para análisis	Área sembrada [ha]	Producción [ton]	Producción exportada [%]
Cítricos	14,848	271,114	38%
Viñedos	6,563	95,690	8% <sup>18</sup>

La Tabla 24 **Error! Reference source not found.** resume la justificación encontrada para la selección de cada uno de los cultivos, basada en la información consultada.

Tabla 24. Cultivos seleccionados como elementos expuestos para Uruguay.

Cultivo	Importancia
Soja	Cultivo con mayor porcentaje de área sembrada – primer grano de exportación
Trigo	Porcentaje de área sembrada - producto principalmente de exportación
Cebada	Porcentaje de área sembrada - producto de exportación y consumo interno
Arroz	Porcentaje de área sembrada – segundo cereal de exportación
Maíz	Consumo interno
Sorgo	Consumo interno. Grano y forraje para alimento animal
Cítricos	Exportación y consumo interno
Viñedos	Cultivo tradicional, importancia histórica

Una vez seleccionados los cultivos para incluir en el modelo de riesgo por sequía, y una vez definidas las áreas totales nacionales actualizadas para el año de referencia se procedió a distribuir espacialmente cada cultivo haciendo uso de las categorías del Mapa de Cobertura del Suelo 2015 previamente identificadas en la sección 1.20.1.2 debido a la ausencia de información específica para cada uno de ellos.

A partir de la cobertura para la categoría *cultivos* se distribuyeron los cultivos de soja, trigo, cebada, arroz, maíz y sorgo, mientras que a partir de la cobertura *frutales* se distribuyeron los cultivos de frutas cítricas y viñedos. La distribución de áreas se hizo respetando las áreas totales nacionales.

Tabla 25. Comparación de área nacional sembrada por cultivo y área final asignada en el modelo de exposición

<sup>18</sup> Las exportaciones de los viñedos se presentan en litros de vino. Dato obtenido de las estadísticas del INAVI para el año 2017.



<b>Cultivos para análisis</b>	<b>Área sembrada [ha]</b>	<b>Área asignada [ha]</b>
Soja (de primera siembra)	735,000	735,000
Soja (de segunda siembra)	354,000	354,000
Trigo	215,000	215,000
Cebada	190,000	190,000
Arroz	164,500	164,500
Maíz (de primera siembra)	46,000	46,000
Maíz (de segunda siembra)	20,000	20,000
Sorgo (de primera siembra)	27,000	27,000
Sorgo (de segunda siembra)	20,000	20,000
Cítricos	14,848	14,848
Viñedos	6,563	6,563

A continuación, se presentan los mapas de localización para cada uno de los productos priorizados para Uruguay. En cada mapa se presenta el área, en hectáreas, de cultivo por cada píxel de 5km de la malla de resolución.

### **1.20.3.1 Soja**

La soja es considerada como el cultivo motor de la agricultura uruguaya al ser el primer producto agrícola de exportación. La superficie total sembrada a nivel nacional fue de 1,089,000 ha en el año agrícola 2016/2017, de las cuales el 67.5% corresponden a las siembras de primera y el 32.5% restante a las siembras de segunda, y se constituye como el cultivo de verano más importante, aportando el 90% del total de área sembrada. Según el Anuario Estadístico Agropecuario 2017 elaborado por DIEA-MGAP, durante el 2016 se exportaron 2,264,872 toneladas de soja (\$852,820 miles de dólares) lo que corresponde al 55% de exportaciones del sector agrícola y al 12% de las exportaciones totales del país en ese año.

Es cultivada en gran parte del territorio uruguayo, principalmente en los departamentos de Paysandú, Río Negro, Soriano, Colonia y San José y en menor área en el este del país en los departamentos de Lavalleja, Treinta y Tres, Cerro Largo y Tacuarembó.

La distribución espacial de la soja fue tomada de la cobertura “Cultivos” del Mapa de Cobertura del Suelo de Uruguay, del año 2015 y de la capa SIG suministrada por OPYPA-MGAP que contiene valores de superficie de cultivo por Área de Enumeración Censal. La superficie nacional sembrada fue actualizada a los valores reportados en la

Encuesta Agrícola “Invierno 2017” que coincide con las series históricas presentadas en la información suministrada, pero conservando la distribución por unidad territorial de las fuentes antes mencionadas. En la Figura 125 se presenta la localización y área sembrada del cultivo de soja de primera y en la Figura 126 se presenta la localización y área sembrada del cultivo de soja de segunda.

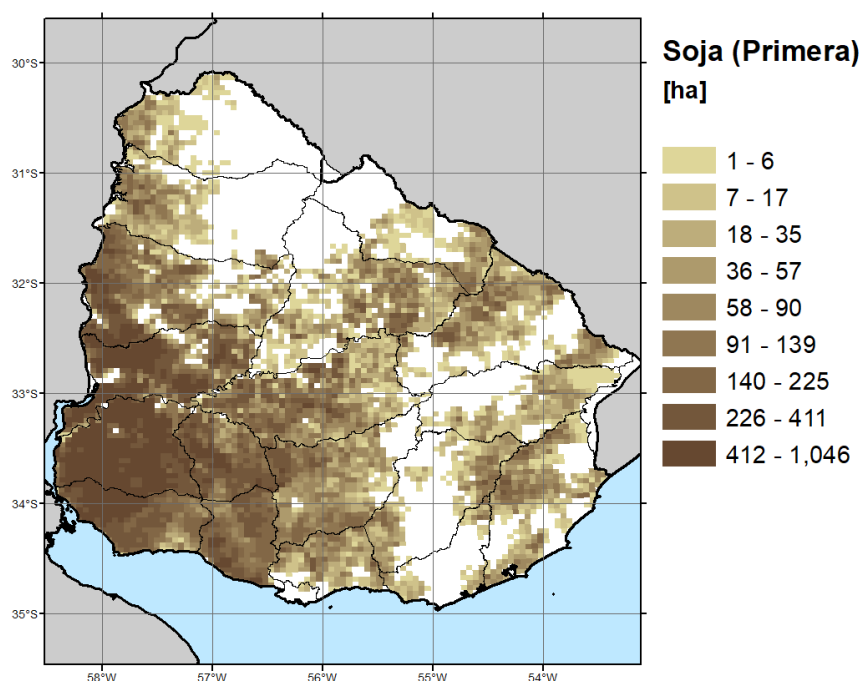


Figura 125. Mapa de localización de siembras de soja de primera en Uruguay, por departamento.  
Fuente: Elaboración propia

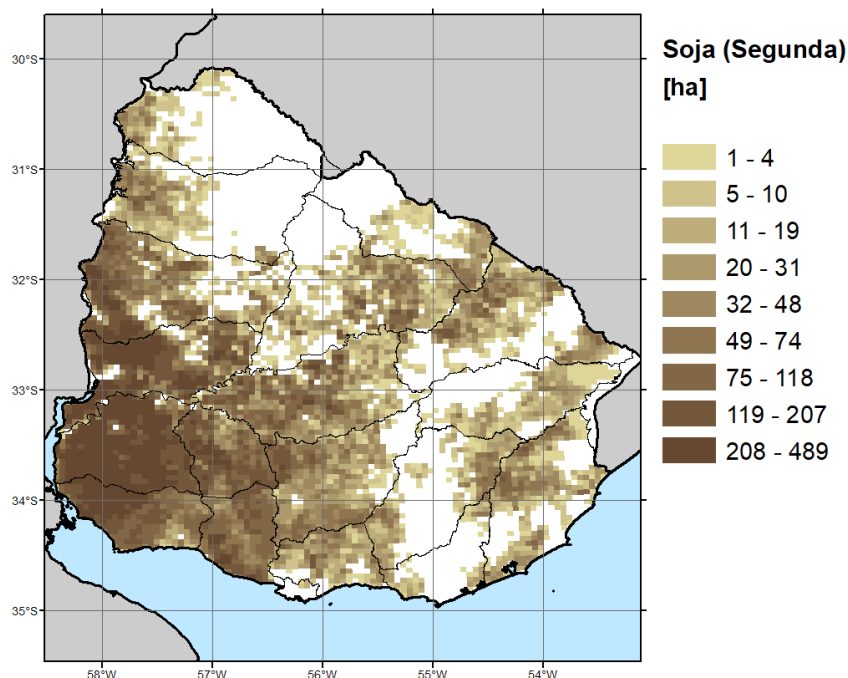


Figura 126. Mapa de localización de siembras de soja de segunda en Uruguay, por departamento.  
Fuente: Elaboración propia

### 1.20.3.2 Trigo

Se identificó el trigo como el segundo cultivo más importante en la economía uruguaya debido a que tiene la segunda mayor área dedica a su siembra y su producción es mayormente exportada. Según el Anuario Estadístico Agropecuario 2017 elaborado por DIEA, durante el 2016 se exportaron 606,680 toneladas de trigo (\$113,194 miles de dólares) que corresponden aproximadamente al 80% de la producción anual.

La superficie total sembrada a nivel nacional fue de 215,000 ha en el año agrícola 2016/2017. El departamento con mayor área sembrada de trigo es Soriano, seguido de Colonia, Río Negro, Paysandú y San José.

La distribución espacial del trigo fue tomada de la cobertura “Cultivos” del Mapa de Cobertura del Suelo de Uruguay, del año 2015 y de la capa SIG suministrada por OPYPA-MGAP que contiene valores de superficie para los dos cultivos de invierno (trigo y cebada) por Área de Enumeración Censal. La superficie nacional sembrada fue obtenida de los valores reportados en la Encuesta Agrícola “Primavera 2016” que coincide con las series históricas presentadas en la información suministrada, pero conservando la distribución por unidad territorial de las fuentes antes mencionadas.

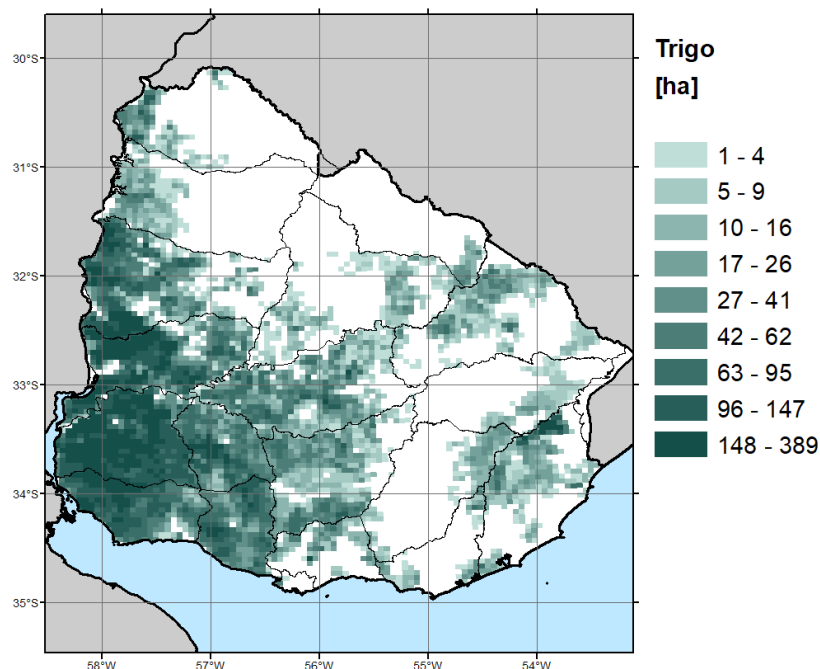


Figura 127. Mapa de localización de siembras totales de trigo en Uruguay, por departamento. Fuente: Elaboración propia

### 1.20.3.3 Cebada

La cebada se constituye como el tercer cultivo con mayor área sembrada del país y según las cifras oficiales adoptadas la superficie total sembrada a nivel nacional fue de 190,000 ha en el año agrícola 2016/2017. La importancia de este cultivo además de la extensión es que tiene fines tanto de consumo interno como de exportación. Según el Anuario Estadístico Agropecuario 2017 elaborado por DIEA, durante el 2016 se exportaron 338,434 toneladas de trigo (\$158,273 miles de dólares) que corresponden aproximadamente al 50% de la producción anual.

La distribución espacial de la cebada fue tomada de la cobertura “Cultivos” del Mapa de Cobertura del Suelo de Uruguay, del año 2015 y de la capa SIG suministrada por OPYPA-MGAP que contiene valores de superficie para los dos cultivos de invierno (cebada y trigo) por Área de Enumeración Censal. La superficie nacional sembrada fue obtenida de los valores reportados en la Encuesta Agrícola “Primavera 2016” que coincide con las series históricas presentadas en la información suministrada, pero conservando la distribución por unidad territorial de las fuentes antes mencionadas.

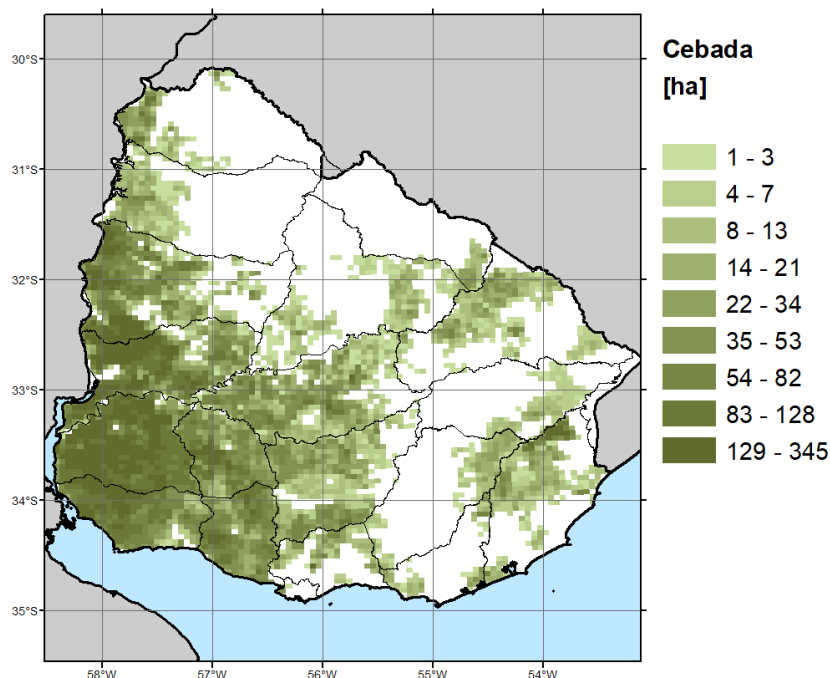


Figura 128. Mapa de localización de siembras totales de cebada en Uruguay, por departamento. Fuente: Elaboración propia

#### 1.20.3.4 Arroz

El arroz fue incluido como uno de los cultivos más representativos ya que es el segundo cultivo con mayor producción anual, después de la soja. La superficie total sembrada a nivel nacional fue de 164,500 ha en el año agrícola 2016/2017 y según el Anuario Estadístico Agropecuario 2017 elaborado por DIEA, durante el 2016 se exportaron 938,038 toneladas de arroz (412,700 miles de dólares) que corresponden aproximadamente al 70% del total producido en el país.

De acuerdo con el informe “Información requerida para el Análisis de Riesgo de Plagas para el ingreso de grano de arroz (*Oryza sativa*) de Uruguay” (MGAP, 2015) la principal zona de producción de arroz es el litoral este en la cuenca de la Laguna Merín en el límite de Brasil, donde se cultiva aproximadamente el 70% del arroz total del país en los departamentos de Rocha, Lavalleja, Treinta y Tres y en el este del departamento de Cerro Largo. El total del cultivo de arroz se realiza bajo riego, con una inundación permanente de diez centímetros.

La distribución espacial del cultivo de arroz fue tomada de la cobertura “Cultivos” del Mapa de Cobertura del Suelo de Uruguay, del año 2015 y de la capa SIG suministrada

por OPYPA-MGAP que contiene valores de superficie para el cultivo de arroz por Área de Enumeración Censal. La superficie nacional sembrada fue obtenida de los valores reportados en las series históricas presentadas en la información suministrada por OPYPA-MGAP, pero conservando la distribución por unidad territorial de las fuentes antes mencionadas.

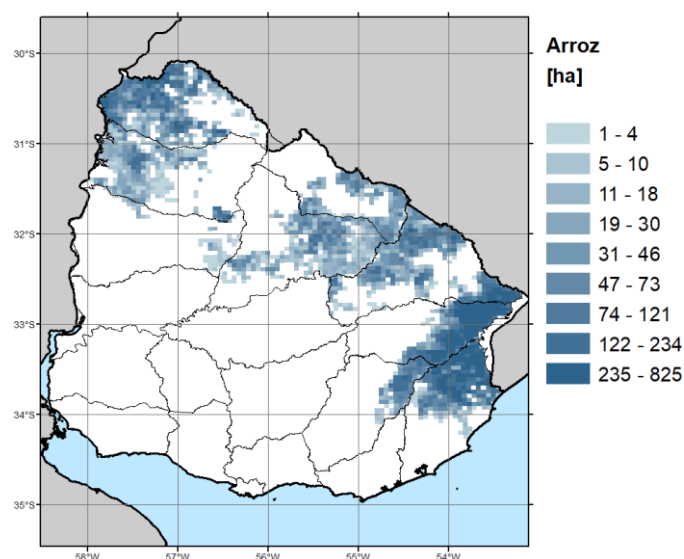


Figura 129. Mapa de localización de siembras de arroz en Uruguay, por departamento. Fuente: Elaboración propia

### 1.20.3.5 Maíz

El maíz es uno de los cultivos de verano y es básicamente de consumo interno. La superficie total sembrada a nivel nacional fue de 66,000 ha en el año agrícola 2016/2017 de las cuales el 70% corresponden a las siembras de primera y el 30% restante a las siembras de segunda y según el Anuario Estadístico Agropecuario 2017 elaborado por DIEA, durante el 2016 se exportaron únicamente 28 toneladas de maíz (\$8,175 dólares). De acuerdo con el informe “Información requerida para el Análisis de Riesgo de Plagas para el ingreso de grano de maíz (*Zea mays*) procedente de Uruguay” (MGAP, 2014) la principal zona de producción de maíz se encuentra en los departamentos de Paysandú, Río Negro, Soriano, Colonia, San José, y recientemente en Durazno, Flores y Florida y reporta que la siembra se hace en su mayoría en seco.

La distribución espacial del maíz fue tomada de la cobertura “Cultivos” del Mapa de Cobertura del Suelo de Uruguay, del año 2015 y de la capa SIG suministrada por entidades locales que contiene valores de superficie para los cultivos de maíz y sorgo

como una única categoría, por Área de Enumeración Censal. La superficie nacional sembrada fue actualizada a los valores reportados en la Encuesta Agrícola “Invierno 2017” que coincide con las series históricas presentadas en la información suministrada, pero conservando la distribución por unidad territorial de las fuentes antes mencionadas.

En la Figura 130 **Error! Reference source not found.** se presenta la localización y área sembrada del cultivo de maíz de primera siembra y en la Figura 131 **Error! Reference source not found.** se presenta la localización y área sembrada del cultivo de maíz de segunda siembra.

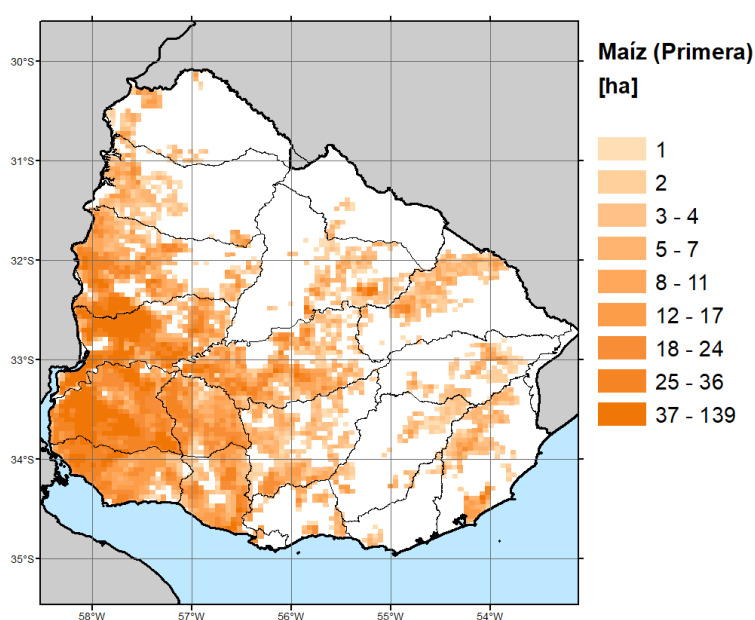


Figura 130. Mapa de localización de siembras de maíz de primera en Uruguay, por departamento.  
Fuente: Elaboración propia

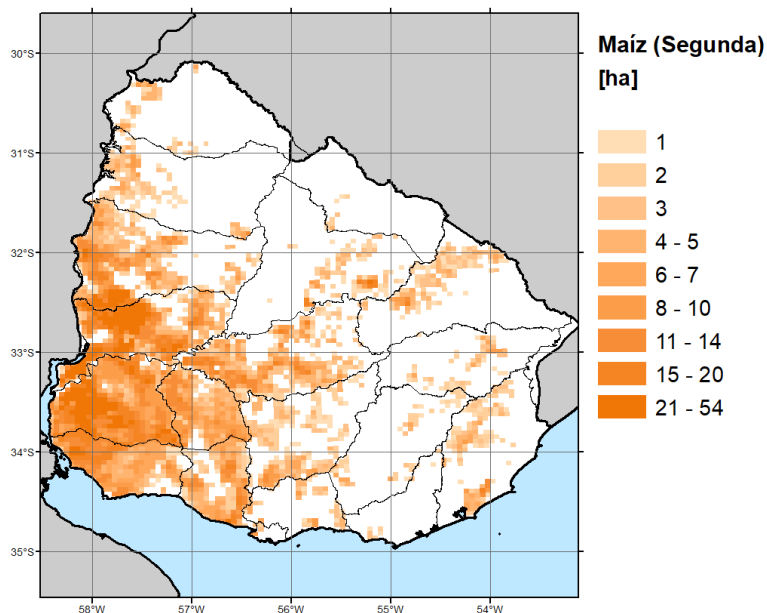


Figura 131. Mapa de localización de siembras de maíz de segunda en Uruguay, por departamento.  
Fuente: Elaboración propia

### 1.20.3.6 Sorgo

El sorgo completa los cultivos de verano del país y es básicamente para consumo interno como grano o forraje para animales. La superficie total sembrada a nivel nacional fue de 47,000 ha en el año agrícola 2016/2017 de las cuales el 57% corresponden a las siembras de primera y el 43% restante a las siembras de segunda y según el Anuario Estadístico Agropecuario 2017 elaborado por DIEA, durante el 2016 se exportaron 7,182 toneladas de sorgo (\$1,395 miles de dólares).

La distribución espacial del sorgo fue tomada de la cobertura “Cultivos” del Mapa de Cobertura del Suelo de Uruguay, del año 2015 y de la capa SIG suministrada por entidades locales que contiene valores de superficie para los cultivos de maíz y sorgo como una única categoría, por Área de Enumeración Censal. La superficie nacional sembrada fue actualizada a los valores reportados en la Encuesta Agrícola “Invierno 2017” que coincide con las series históricas presentadas en la información suministrada, pero conservando la distribución por unidad territorial de las fuentes antes mencionadas.

En la Figura 132 **Error! Reference source not found.** se presenta la localización y área sembrada del cultivo de sorgo de primera siembra y en la Figura 133 **Error!**



**Reference source not found.** se presenta la localización y área sembrada del cultivo de sorgo de segunda siembra.

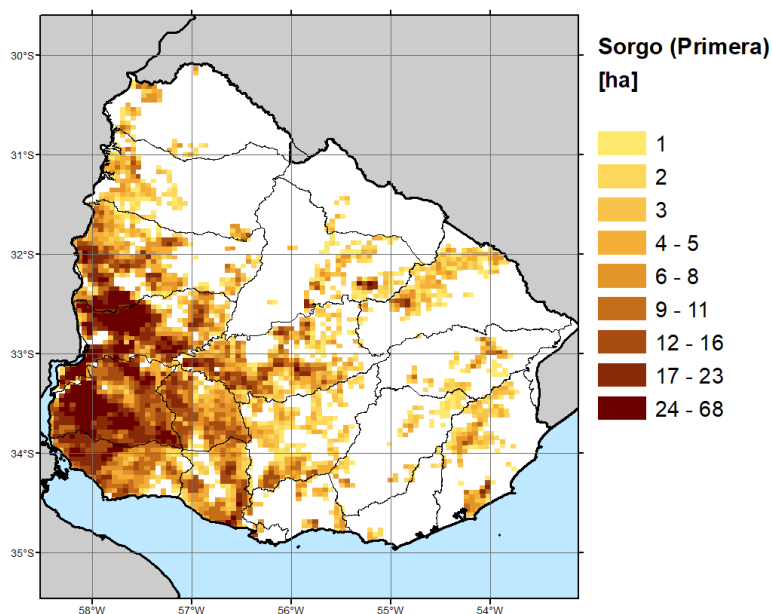


Figura 132. Mapa de localización de siembras de sorgo de primera en Uruguay, por departamento.  
Fuente: Elaboración propia

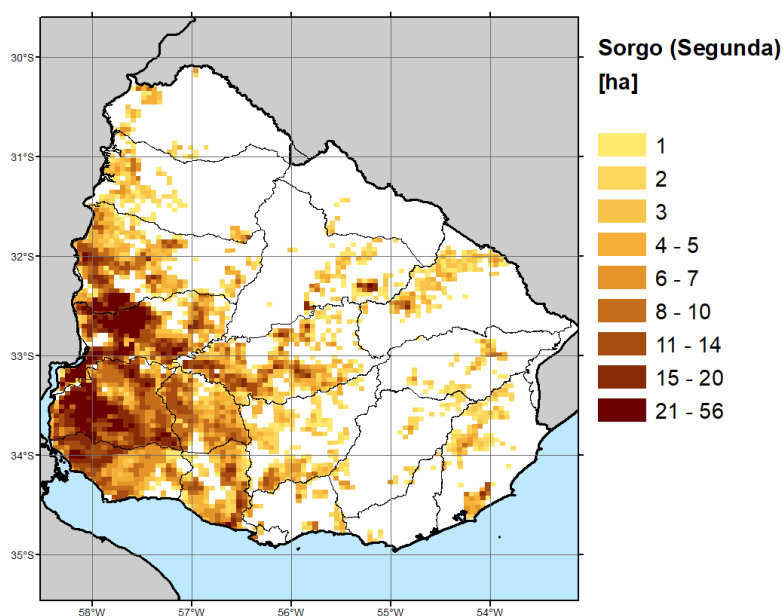


Figura 133. Mapa de localización de siembras de sorgo de segunda en Uruguay, por departamento.  
Fuente: Elaboración propia

### 1.20.3.7 Cítricos

Las frutas cítricas, que hacen referencia a la naranja, mandarina, pomelo y limón, se incluyen en el análisis por su importancia en la producción y exportación nacional. Según

las cifras oficiales aportadas, la superficie total sembrada a nivel nacional fue de 14,848 ha en el año agrícola 2016/2017. Según la encuesta citrícola “Primavera 2016”, durante el 2016 se exportaron como fruta fresca 103,524 toneladas de cítricos que corresponden al 38% de la producción anual, mientras que 83,400 toneladas se distribuyeron en el mercado interno (31% de la producción anual).

La principal zona de producción se encuentra en los departamentos de Salto y Paysandú, al noroeste del país, que comprende el 92% de la superficie total de cítricos del país (naranja, mandarina y pomelo), mientras que en los departamentos de San José, Colonia, Canelones y Montevideo al sur del país se concentra la producción de limones. Para efectos de la modelación de la amenaza por sequía todas las especies se analizan como en una misma categoría.

La distribución espacial del cultivo de frutas cítricas fue determinada a través de la cobertura de “Frutales” dispuesta en el mapa de Cobertura del Suelo de Uruguay, del año 2015. La superficie nacional sembrada fue actualizada a los valores reportados por las estadísticas presentadas en la Encuesta Citrícola “Primavera 2016”, conservando la distribución porcentual por Área de Enumeración Censal consignada en la información recibida de entidades oficiales locales.

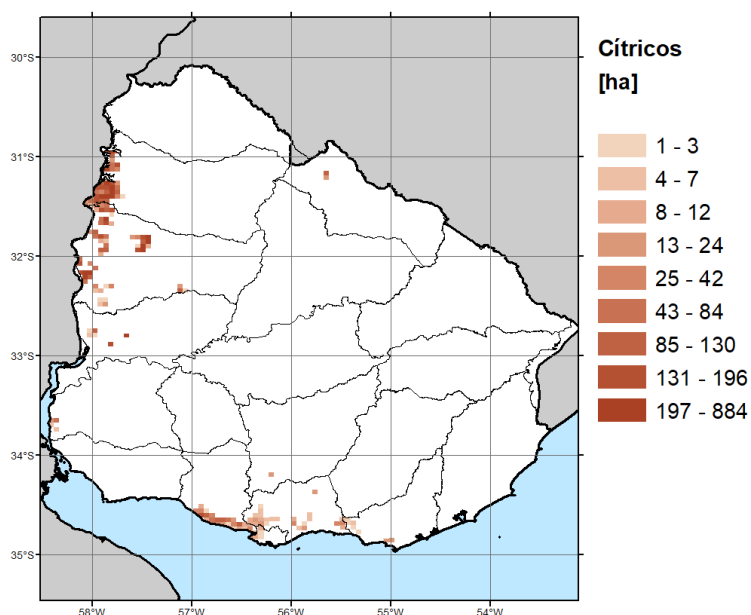


Figura 134. Mapa de localización de siembras de cítricos en Uruguay, por departamento. Fuente: Elaboración propia

### 1.20.3.8 Viñedos

La ubicación geográfica del país en una zona templada austral hace que tenga un gran potencial vitinícola, en donde la cepa Tannat es la más representativa. La mayor parte de este cultivo se encuentra en el sur del país, en los departamentos de Canelones, Montevideo, San José, y hacia el suroeste de Colonia. Según cifras del Instituto Nacional de Vitivinicultura (INAVI), el departamento de Canelones es mayoritariamente vinícola y concentra más del 60% de la superficie nacional dedicada a esta actividad y más del 70% de la producción de uva del país. A este, le sigue Montevideo que aporta algo más del 10% de la producción de uva nacional.

La localización del cultivo de viñedos fue determinada a través de la cobertura de “Frutales” dispuesta en el mapa de Cobertura del Suelo de Uruguay, del año 2015. La superficie nacional sembrada fue actualizada a los valores reportados por las estadísticas de viñedos del INAVI correspondientes al año 2017, conservando la distribución porcentual por Área de Enumeración Censal presentada en el Censo Agropecuario de 2011.

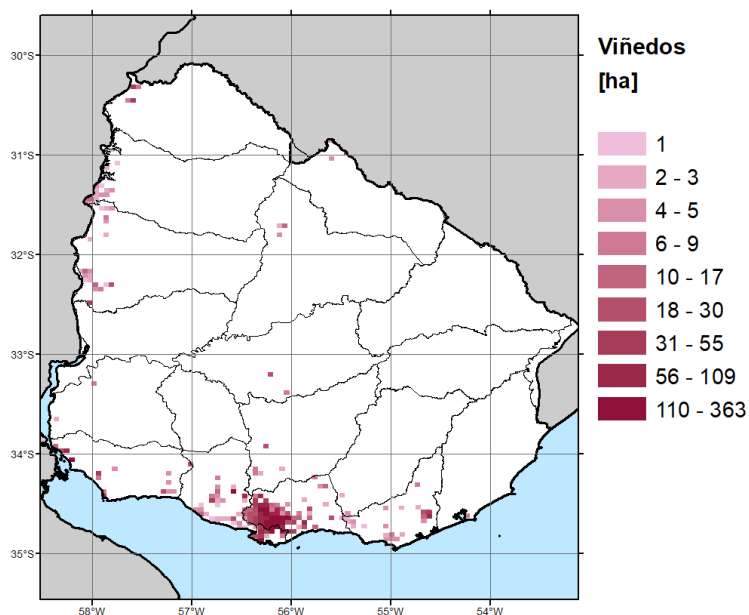


Figura 135. Mapa de localización de siembras de viñedos en Uruguay, por departamento. Fuente: Elaboración propia

#### 1.20.4 Base de datos de elementos expuestos en la actividad pecuaria

A partir de la información disponible en las fuentes mencionadas en la sección 1.20.1 se conformó la base de datos de elementos expuestos al riesgo de sequía en la actividad pecuaria del país. Como ya se ha mencionado, los elementos que se consideran expuestos a esta amenaza, en este sector de la economía, son las pasturas y el inventario de animales situados en el área donde se estima el riesgo.

En las siguientes secciones se resume el proceso de conformación de la base de datos de pastos naturales, ganado bovino y ganado ovino, incluidos en la estimación de riesgo por sequía.

##### 1.20.4.1 Pastos

Las pasturas, como ya se mencionó, constituyen la base del sistema pastoril por ser el alimento principal para el ganado bovino y ovino, y de allí la importancia de modelar el impacto de la sequía en su crecimiento que finalmente resulta en la producción de materia seca disponible para el consumo animal. La ganadería en Uruguay se desarrolla principalmente sobre campo natural, y según la información recibida de OPYPA-MGAP el campo natural corresponde al 62% de la superficie total de las cuatro regiones geomorfológicas predominantemente ganaderas en el país: ***Cuenca Sedimentaria del Noreste, Cuenca Basáltica, Región Centro Sur y Sierras del Este***. Por otro lado, el Anuario Estadístico Agropecuario 2017 reporta que en el año agrícola 2015/2016 el 17.8% de la superficie nacional destinada a pastoreo está destinada a mejoramientos forrajeros incluyendo praderas artificiales, campos mejorados y fertilizados y cultivos forrajeros anuales y que el 8.3% corresponde a praderas artificiales, es decir la mayoría de la superficie destinada a pastoreo la conforma el campo natural. Viendo la importancia que tiene este recurso, al ser la principal fuente alimenticia y nutricional en la ganadería uruguaya se selecciona este “cultivo” para conformar el modelo de exposición de pasturas para estimar las pérdidas en el sector pecuario ante el fenómeno de sequía.

La distribución espacial de los pastos naturales fue tomada de la clase “Herbáceo natural” del Mapa de Cobertura del Suelo, del año 2015, según la cual el área nacional de pasturas corresponde a 9,226,112 hectáreas (ver Figura 123**Error! Reference source not found.**). Se mantuvo este valor, calculado a partir de los polígonos de la clase,

como total nacional ya que la información recibida que hace referencia al área de pastos naturales en el país solo estaba disponible para las cuatro regiones geomorfológicas mencionadas. Se verificó que la diferencia entre el área de pastos reportado en el shape suministrado por OPYPA-MGAP para dichas regiones y el área de pastos que se obtuvo a partir de la categoría “Herbáceo natural” dentro de las cuatro regiones es aproximadamente del 2% por lo que se consideró acertado definir de esta forma el área total nacional de pastos naturales.

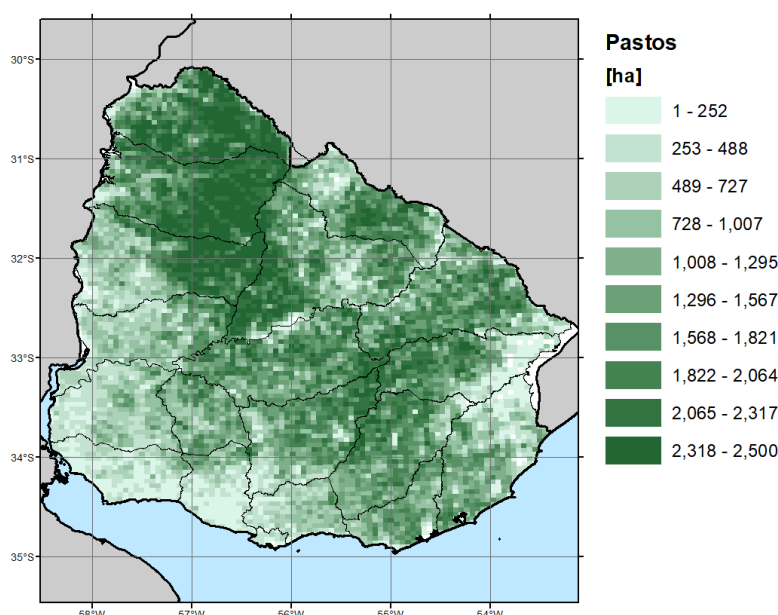


Figura 136. Mapa de localización de pastos naturales en Uruguay, por departamento. Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la información aportada por OPYPA-MGAP, los pastos tienen una producción que varía según la región en la cual se ubican y según la estación del año. Para simular de una manera más acertada el comportamiento de los pastos naturales se generaron cuatro tipos de pastos a partir de las cuatro regiones geomorfológicas y aquellas pasturas ubicadas por fuera de las regiones mencionadas fueron asignadas a la región más cercana para caracterizar todo el territorio nacional. De esta forma se obtiene una distribución de tipo de pasto, asociada a la producción, como se presenta en la Figura 137.

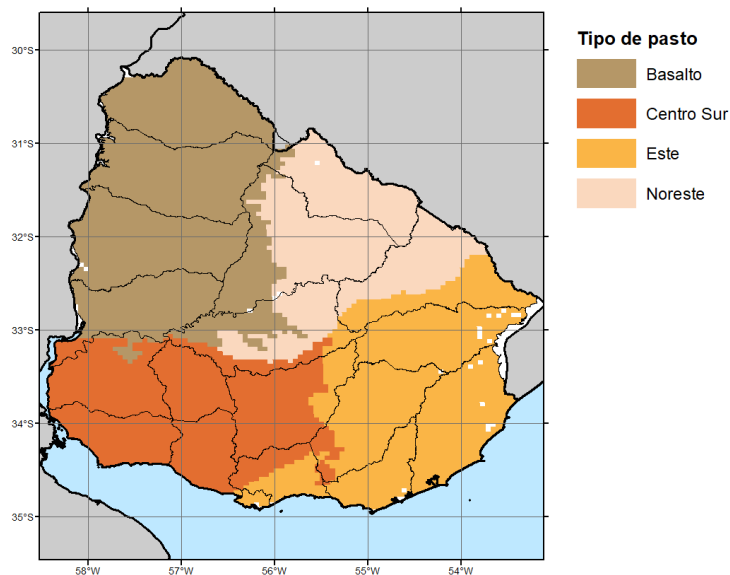


Figura 137. Clasificación de unidades de análisis de acuerdo con las regiones geomorfológicas, por departamento. Fuente: Elaboración propia

Más adelante, en la sección 1.21.2, se presenta la información referente a la estacionalidad de los pastos que incluye las regiones geomorfológicas a partir de las cuáles se hizo la clasificación de los pastos y los valores de producción para cada región.

#### 1.20.4.2 Stock de ganadería

Para completar el modelo de elementos expuestos del sector pecuario es necesario conocer el número de cabezas de ganado bovino y ovino y su distribución geográfica, en el área donde se evaluará el riesgo por sequía, para tener los insumos requeridos para estimar las pérdidas en la producción de este subsector fundamental en la economía uruguaya. Adicionalmente es necesario clasificar los animales de acuerdo con parámetros como el sexo, edad, peso de referencia, peso al nacer, proporción de la dieta basada en leche y estado fisiológico para poder modelar adecuadamente el crecimiento de cada “clase animal” de acuerdo con sus requerimientos de alimento.

#### Ganado bovino

A partir de la información consignada en el Anuario Estadístico 2017 del Instituto Nacional de Carnes (INAC) se obtuvo el total de cabezas de ganado bovino a junio 30 de 2017 como se muestra en la Tabla 26. El Anuario reporta un total de 11,732,201

cabezas de ganado, de las cuales el 40.4% corresponde a vacas, el 23% a terneros y terneras menores de un año, el 20% a novillos, el 15.1% a vaquillonas y el 1.5% a toros.

Tabla 26. Stock bovino. Fuente: (INAC, 2017)

<b>Categoría y Edad</b>	<b>Número de cabezas, 2017</b>	<b>%</b>
<b>Toros</b>	<b>174,414</b>	<b>1.5</b>
Vacas de cría (entoradas)	4,291,584	36.6
Vacas de internada	450,566	3.8
<b>Total de vacas</b>	<b>4,742,150</b>	<b>40.4</b>
Novillos de 1 a 2 años	987,291	8.4
Novillos de 2 a 3 años	787,588	6.7
Novillos de más de 3 años	568,159	4.8
<b>Total de novillos</b>	<b>2,343,038</b>	<b>20.0</b>
Vaquillonas de 1 a 2 años	1,253,756	10.7
Vaquillonas + 2 años sin entorar	518,337	4.4
<b>Total de vaquillonas</b>	<b>1,772,093</b>	<b>15.1</b>
<b>Terneros y terneras</b>	<b>2,700,506</b>	<b>23.0</b>
<b>Total</b>	<b>11,732,201</b>	<b>100.0</b>

El modelo de exposición de ganado requiere la clasificación de los animales que lo componen según algunas características propias que se describen a continuación:

- Clase: categoría usada por el INAC, que coincide con las clases reportadas en el Censo Agropecuario de 2011. En algunos casos las categorías deben ser desagrupadas para diferenciar por otros parámetros como el sexo. Por ejemplo, la clase “terneros y terneras de menos de un año” fue desagregada en dos clases: una para machos y otra para hembras.
- Sexo: macho o hembra dependiendo de la clase.
- UG equivalente: Una unidad ganadera (UG) es el equivalente a una cabeza de ganado de referencia, dado por un factor de ponderación para establecer equivalencias entre categorías bovinas e incluso entre especies. Se usaron los valores de UG reportados por el Instituto Plan Agropecuario en el documento “Pautas para el manejo de campo natural”. En Uruguay una UG representa los requerimientos de una vaca de 380 kg de peso vivo en mantenimiento (Crempien, 1982).

- **Peso referencia:** Peso en kilogramos asignado a la clase animal. El peso de referencia se obtuvo de multiplicar las UG equivalentes de la clase por 380 kg.
- **Peso al nacer:** Peso en kilogramos de la clase animal al momento de su nacimiento. En el caso de bovinos se asumió un valor de 37.9 kg. Este valor es estimado por Koots y Gibson (1998) a partir de 218 registros de peso de 103 vacas Hereford.
- **Proporción de la dieta basada en leche:** Porcentaje del requerimiento de leche en la dieta de la clase animal. En el caso de bovinos se considera que únicamente los terneros y terneras menores de un año requieren ingesta de leche y se asumió que esta clase requiere un 50% dado que los terneros son destetados antes de cumplir esa edad.
- **Edad:** Valor en meses, estimado como un promedio del rango de edad reportado por el INAC para aquellas clases que lo reportan. Para aquellas clases donde no se reporta un rango de edad se asumen valores típicos.
- **Estado fisiológico:** Indicador de si se encuentra en estado de embarazo o lactancia en el caso de las vacas, o de si se encuentra en un estado “joven” para representar las clases que requieren leche en su dieta.

La Tabla 27 **Error! Reference source not found.** presenta la caracterización de las diferentes clases de bovinos reportadas por el INAC de acuerdo con los parámetros ya explicados.

Tabla 27. Clasificación de ganado bovino y parámetros.

Clase	Sexo	UG Equivalente	Peso referencia [kg]	Peso al nacer [kg]	Proporción dieta basada en leche	Edad [meses]	Estado fisiológico
Terneros -1 año	Macho	0.4	152	37.9	50%	6	Joven
Terneras -1 año	Hembra	0.4	152	37.9	50%	6	Joven
Novillos 1-2 años	Macho	0.7	266	37.9	0%	18	Ninguno
Novillos 2-3 años	Macho	1	380	37.9	0%	30	Ninguno
Novillos +3 años	Macho	1	380	37.9	0%	42	Ninguno
Vaquillonas 1-2 años sin entorar	Hembra	0.7	266	37.9	0%	18	Ninguno
Vaquillonas +2 años sin entorar	Hembra	1	380	37.9	0%	30	Ninguno
Vacas - preñadas	Hembra	1	380	37.9	0%	42	Embarazo
Vacas - lactando	Hembra	1	380	37.9	0%	42	Lactancia
Vacas de refugio o internada	Hembra	1	380	37.9	0%	96	Ninguno



Clase	Sexo	UG Equivalente	Peso referencia [kg]	Peso al nacer [kg]	Proporción dieta basada en leche	Edad [meses]	Estado fisiológico
Toros	Macho	1.2	456	37.9	0%	60	Ninguno

La ubicación espacial del ganado bovino fue asignada a partir de la cobertura “Herbáceo natural” del mapa de Cobertura del Suelo de Uruguay, del año 2015, es decir corresponde a la misma distribución espacial de las pasturas naturales. El número total de animales fue ajustado a los valores reportados en el Anuario Estadístico del INAC de 2017, conservando la distribución porcentual por categoría de animal reportada en el Censo del 2011 a nivel de Área de Enumeración. La Figura 138 presenta el número de cabezas de ganado bovino por unidad de análisis en el territorio nacional.

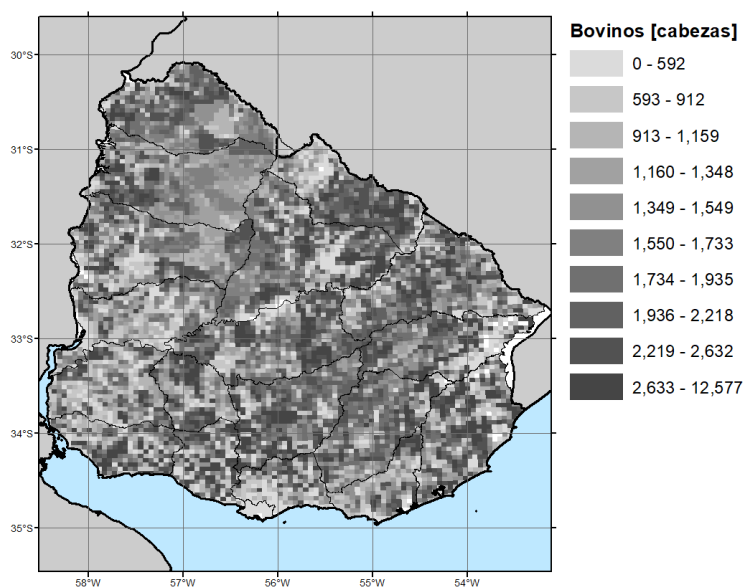


Figura 138. Mapa de localización de stock bovino en Uruguay, por departamento. Fuente: Elaboración propia

En el marco de este proyecto se evaluarán las pérdidas en peso del ganado bovino en pie y la disminución en la producción de leche ocasionadas por la variación de ingesta de materia seca como consecuencia de la disminución de oferta de pastos naturales durante los períodos de sequía. No se tendrán en cuenta las pérdidas asociadas a la producción de lana.

### Ganado ovino

A partir de la información consignada en el Anuario Estadístico 2017 del INAC se obtuvo el total de cabezas de ganado ovino a junio 30 de 2017 como se muestra en la

Tabla 28 **Error! Reference source not found..** El Anuario reporta un total de 6,561,491 cabezas de ganado, de las cuales el 56.8% corresponde a ovejas, el 23.4% a corderos y corderas diente de leche, y el 2.1% a carneros.

Tabla 28. Stock ovino. Fuente: (INAC, 2017).

<b>Categoría y Edad</b>	<b>Número de cabezas, 2017</b>	<b>%</b>
<b>Carneros</b>	<b>139,957</b>	<b>2.1</b>
Ovejas de cría (encarneradas)	3,494,958	53.3
Ovejas de descarte (consumo)	233,558	3.6
<b>Total ovejas</b>	<b>3,728,516</b>	<b>56.8</b>
Capones	492,792	7.5
Borregas 2 a 4 dientes sin encarnerar	341,515	5.2
Corderas diente de leche	833,102	12.7
Corderos diente de leche	699,349	10.7
Corderos y corderas mamones	326,260	5.0
<b>Total</b>	<b>6,561,491</b>	<b>100</b>

El modelo de exposición de ganado ovino también requiere la clasificación de los animales que lo componen según los parámetros que se describieron en la sección Ganado bovino. Se establecieron los mismos parámetros con la excepción de los que se describen a continuación:

- **Peso al nacer:** En el caso de *ovinos* se asignó un valor de 4.5 kg. Este valor es estimado a partir de rangos presentados en el documento “Reproducción ovina: recientes avances realizados por el INIA” (INIA Treinta y Tres, INIA Tacuarembó, 2005).
- **Proporción de la dieta basada en leche:** En el caso de *ovinos* se considera que únicamente la clase “corderos y corderas mamones” requiere ingesta de leche como fuente primordial de su dieta y como su nombre lo indica al no haber sido destetados se asumió un requerimiento del 100%.
- **Edad:** En el caso de *ovinos* el valor fue estimado a partir de valores típicos reportados por el Secretariado Uruguayo de la Lana (SUL).

La Tabla 29 **Error! Reference source not found.** presenta la caracterización de las diferentes clases de ovinos reportadas por el INAC de acuerdo con los parámetros ya explicados.

Tabla 29. Clasificación de ganado ovino y características.

Clase	Sexo	UG Equivalente	Peso referencia [kg]	Peso al nacer [kg]	Proporción dieta basada en leche	Edad [meses]	Estado fisiológico
Carneros	Macho	0.17	64.6	4.5	0%	12	Ninguno
Ovejas - preñadas	Hembra	0.17	64.6	4.5	0%	24	Embarazo
Ovejas - lactando	Hembra	0.17	64.6	4.5	0%	24	Lactancia
Ovejas de descarte	Hembra	0.15	57	4.5	0%	60	Ninguno
Capones	Macho	0.15	57	4.5	0%	24	Ninguno
Borregas 2-4 dientes s/e	Hembra	0.13	49.4	4.5	0%	12	Ninguno
Corderas dientes de leche	Hembra	0.11	41.8	4.5	0%	5.5	Ninguno
Corderos dientes de leche	Macho	0.11	41.8	4.5	0%	5.5	Ninguno
Corderos Mamonos	Macho	0.08	30.4	4.5	100%	2	Joven
Corderas Mamonas	Hembra	0.08	30.4	4.5	100%	2	Joven

La ubicación espacial del ganado ovino fue asignada a partir de la cobertura “Herbáceo natural” del mapa de Cobertura del Suelo de Uruguay, del año 2015, es decir corresponde a la misma distribución espacial de las pasturas naturales. El número total de animales fue ajustado a los valores reportados en el Anuario Estadístico del INAC de 2017, conservando la distribución porcentual por categoría de animal reportada en el Censo del 2011 a nivel de Área de Enumeración. La Figura 139 **Error! Reference source not found.** presenta el número de cabezas de ganado ovino por unidad de análisis en el territorio nacional.

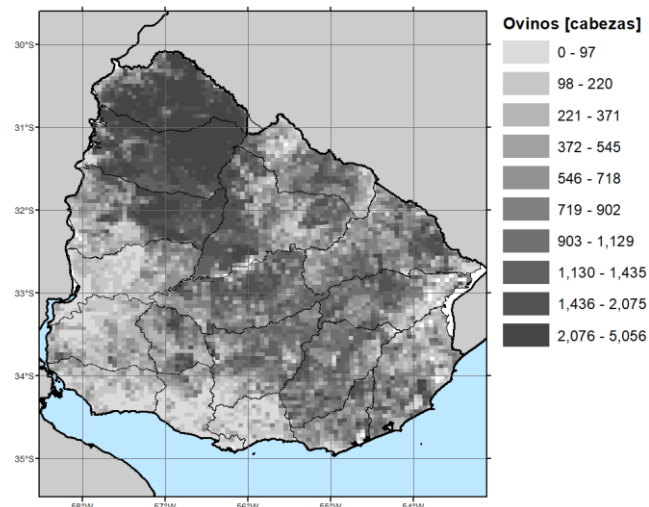


Figura 139. Mapa de localización de stock ovino en Uruguay, por departamento. Fuente: Elaboración propia

En el marco de este proyecto se evaluarán únicamente las pérdidas en peso del ganado ovino en pie ocasionadas por la variación en la ingesta de materia seca como consecuencia de la disminución de oferta de pastos naturales durante períodos de sequía. No se tendrán en cuenta las pérdidas asociadas a la producción de lana.

### 1.21 Estacionalidad de cultivos

Un parámetro de entrada específico para cada región de análisis y tipo de planta es el tiempo en el cual se completa el ciclo de desarrollo del cultivo. Dentro de la modelación de la vulnerabilidad de las plantas, es importante definir, en términos de días calendario, las diferentes etapas de crecimiento del cultivo, desde su siembra hasta la madurez, como se muestra en la Figura 140 **Error! Reference source not found.** Además, se debe contar con información sobre la fecha típica de siembra y cosecha de cada producto. Estos datos van a ser luego utilizados en el módulo de vulnerabilidad, que relaciona el desarrollo día a día del cultivo con las series diarias de precipitación y temperatura, para evaluar posibles reducciones en el rendimiento de la cosecha debido a condiciones de déficit de agua.



Figura 140. Esquema de etapas de crecimiento de una planta.

El clima en Uruguay es templado subtropical húmedo, con precipitaciones distribuidas a lo largo del año que acumulan 1000 mm al sur y 1600 mm en el norte. Estas condiciones permiten el cultivo de productos agrícolas durante todo el año, así como mantener oferta de pasturas naturales de buena calidad para el sector ganadero. En términos generales, los cultivos seleccionados para la evaluación de riesgo por sequía se pueden dividir en cultivos de verano (arroz, maíz, soja, sorgo) cultivos de invierno (trigo y cebada) y cultivos permanentes (pastos, cítricos y viñedos). Para cada uno de estos productos se hizo una extensa búsqueda de información de prácticas locales. A continuación, se presentan las épocas típicas de siembra y cosecha para cada uno de los cultivos con los que se está trabajando.

### 1.21.1 Cultivos Transitorios

Los cultivos transitorios se caracterizan porque su ciclo de crecimiento tiende ser menor a un año, y después de la cosecha deben volver a sembrarse para producir nuevamente. Los cultivos transitorios considerados en este estudio son el arroz, la soja, el maíz, el sorgo, el trigo y la cebada. En el caso de Uruguay, los cultivos de verano (arroz, maíz, soja y sorgo) se siembran en primavera y su desarrollo se da durante los meses de verano. Los cultivos de invierno (trigo y cebada) se siembran de mayo a julio y su desarrollo se da en los meses de invierno y primavera. Los calendarios de crecimiento para estos cultivos se presentan a continuación.

#### **Cultivos de verano**

La información sobre los calendarios de cultivos de verano se obtuvo a partir del estudio "*Predicción de estados fenológicos para Soja, Girasol, Maíz, Sorgo granífero,*

*forrajero, dulce y silero*” del INIA (Fassio et al., n.d.) y los estudios fenológicos particulares de cada cultivo realizados por la Facultad de Agronomía de la Universidad de La República. (“Fenología cereales y oleaginoso-duración estadios,” n.d.). En la Figura 141 se muestra el resumen de las fechas de siembra, desarrollo del cultivo y cosecha para el arroz, maíz, soja y sorgo. A continuación, se detallan las fechas por cultivo.

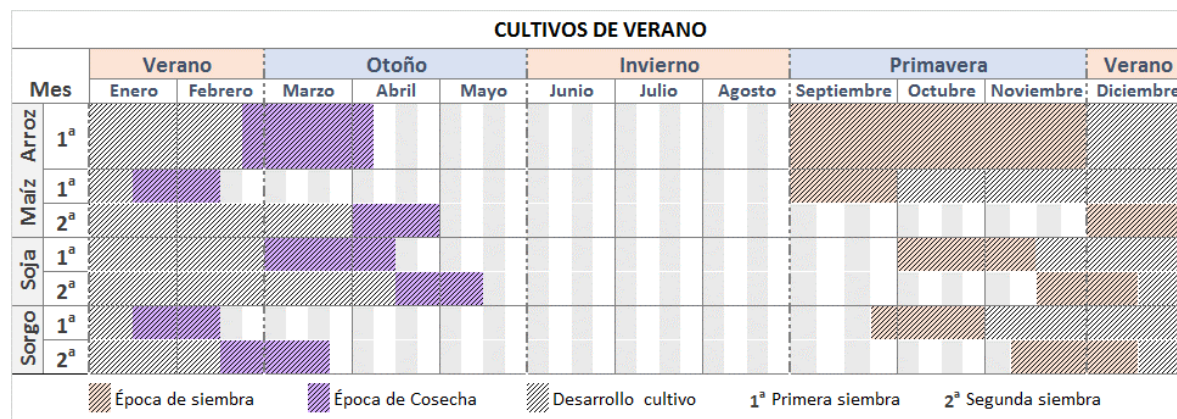


Figura 141. Calendario de cultivos de verano para Uruguay.

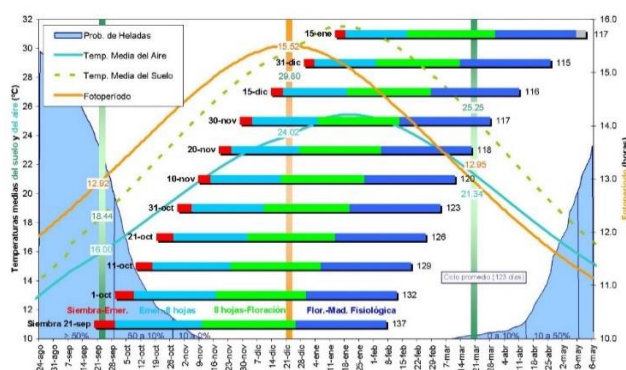
- **Arroz**

En Uruguay, el arroz se siembra en primavera, entre los meses de septiembre a noviembre. Este cultivo alcanza la madurez fisiológica de 120 a 130 días después de la siembra. La cosecha se hace en el mes de marzo, con algunas variaciones entre las últimas semanas de febrero y la primera de abril (MGAP, 2017, p. 13).

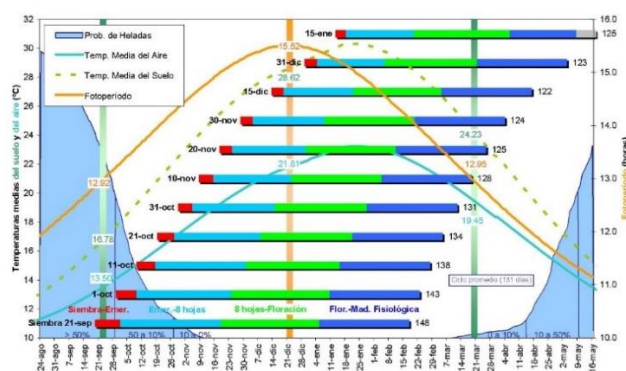
- **Maíz**

La duración del ciclo del maíz está asociado al uso del producto (alimento humano, producto forrajero o semilla). En términos generales, la cosecha se alcanza entre 150 y 180 días después de la fecha de siembra (MGAP, 2014, p. 8). Típicamente, en Uruguay se tienen dos momentos de siembra del maíz, el cultivo temprano y el tardío. En los cultivos de maíz temprano la siembra se hace en septiembre y se cosecha en enero en la zona norte del país o en febrero en la zona sur. El cultivo de maíz tardío se siembra en diciembre y se cosecha en abril (Fassio et al., n.d.). En la Figura 142 **Error! Reference source not found.** se muestran los estados fenológicos del maíz, y las fechas estimadas

de siembra y cosecha para la zona norte y sur del país. Las fechas de los estados fenológicos están relacionadas con variables climáticas como heladas, fotoperiodo y ciclos de temperatura media del aire y suelo. De acuerdo con información publicada por la División de Protección Agrícola del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, la fecha óptima de cultivos “de primera” es en septiembre y en el caso de cultivos tardíos se recomienda sembrar variedades de ciclo medio-corto entre noviembre y diciembre (MGAP, 2014).



a. **Zona Norte de Uruguay**



b. **Zona Sur de Uruguay**

Figura 142. Fenología del cultivo de maíz y su relación con el clima en Uruguay (Fassio et al., n.d.)

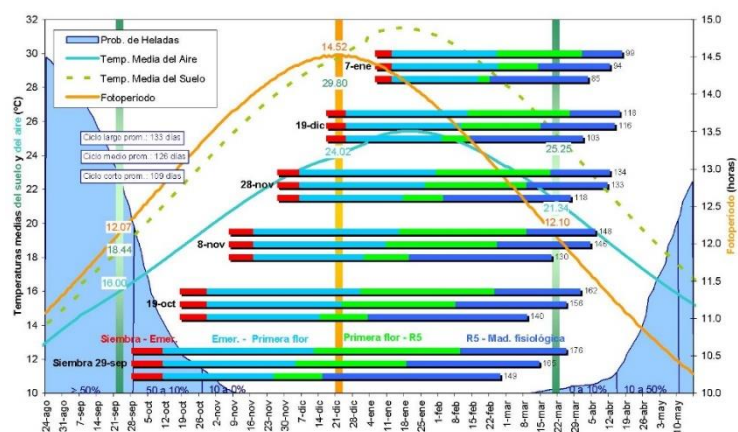
- **Soja**

Típicamente, en Uruguay la soja se siembra entre octubre y diciembre y cosecha entre marzo y mayo (MGAP, 2015b, p. 7). En particular, los cultivos tempranos se siembran en las primeras semanas de octubre y se cosechan a mediados de marzo, mientras que los cultivos tardíos se siembran a finales de noviembre y principios de diciembre y se esperan cosechas entre mediados de marzo y abril (Gaso & Nuñez, 2015). En la Figura 143

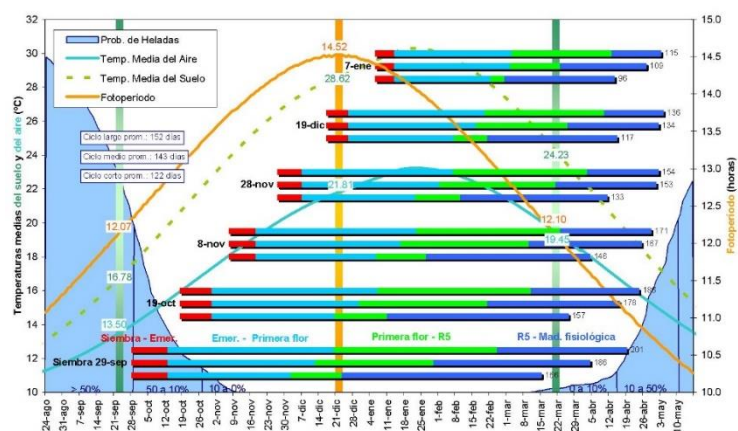
Figura 143. Fenología del cultivo de soja y su relación con el clima en Uruguay (Fassio et al., n.d.).



se muestran los estados fenológicos de la soja y las fechas estimadas de siembra y cosecha para la zona norte y sur del país. Las fechas de los estados fenológicos están relacionadas con variables climáticas como heladas, fotoperiodo y ciclos de temperatura media del aire y suelo.



a. **Zona Norte de Uruguay**



b. **Zona Sur de Uruguay**

Figura 143. Fenología del cultivo de soja y su relación con el clima en Uruguay (Fassio et al., n.d.).

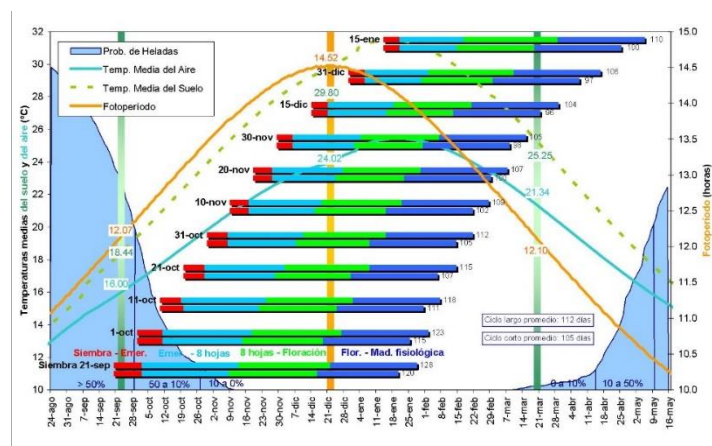
## • **Sorgo**

El sorgo en Uruguay se siembra entre octubre y diciembre (Calistro, 2015) para cultivos tempranos y tardíos. Irigoyen y Perrachón (2002, p. 53) recomiendan establecer la fecha de siembra cuando la temperatura del suelo está por encima de los 18°C, valor que típicamente se alcanza a mediados de noviembre. La fecha límite del sorgo de segunda no se recomienda que sea después del 15 de diciembre, porque la

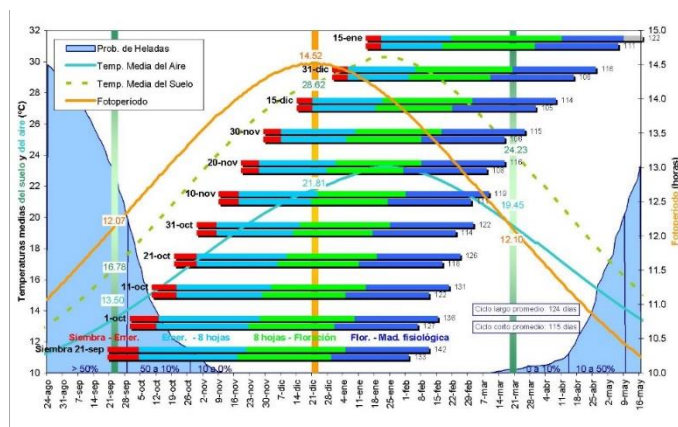


temperatura estimada en la época de floración no debe ser menor a 16°C . En la Figura 144 Figura 144. Fenología del cultivo de sorgo y su relación con el clima en Uruguay (Fassio et al., n.d.).

se muestran los estados fenológicos del sorgo y las fechas estimadas de siembra y cosecha para la zona norte y sur del país. Las fechas de los estados fenológicos están relacionadas con variables climáticas como heladas, fotoperiodo y ciclos de temperatura media del aire y suelo.



a. **Zona Norte de Uruguay**



b. **Zona Sur de Uruguay**

Figura 144. Fenología del cultivo de sorgo y su relación con el clima en Uruguay (Fassio et al., n.d.).

## Cultivos de invierno

En la Figura 141 se muestra el resumen de las fechas de siembra, desarrollo del cultivo y cosecha para el trigo y la cebada. La información sobre los calendarios de

cultivos de invierno se obtuvo a partir de estudios fenológicos particulares de cada cultivo. A continuación, se detallan las fechas por cultivo.

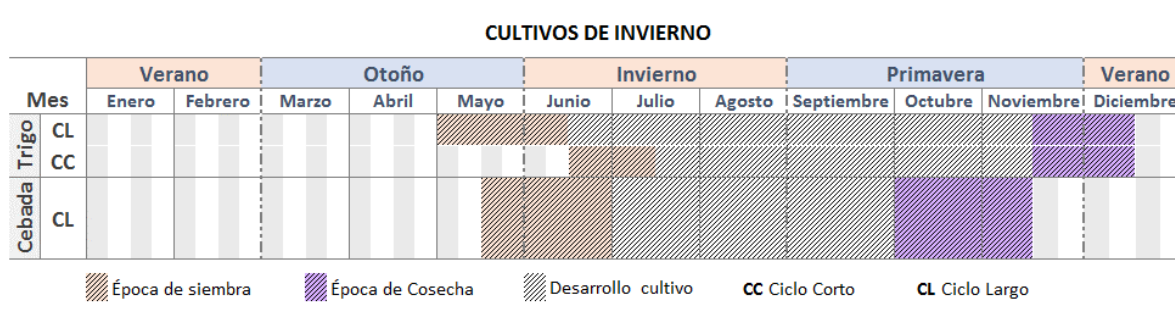


Figura 145. Calendario de cultivos de invierno para Uruguay.

- **Trigo**

Los cultivos de trigo se pueden diferenciar si la variedad es de ciclo corto o de ciclo largo. Para los cultivos de ciclo largo, la fecha de siembra recomendada está entre mayo a junio mientras que para variedades de ciclo corto la fecha de siembra recomendada es entre junio y julio. En los dos casos, la cosecha se espera entre noviembre y diciembre (MGAP, 2017).

- **Cebada**

La cebada se siembra en un único ciclo, entre los meses de mayo y junio con fecha esperada de cosecha entre octubre y noviembre. Cada vez más se adelanta la fecha de siembra buscando incrementar el rendimiento del cultivo (Esteban Hoffman et al., 2015; Esteban Hoffman & Castro, 2012).

### 1.21.2 Cultivos Permanentes

Los cultivos permanentes o perennes, una vez alcanzan la edad productiva, desarrollan las fases de brotación, foliación, floración, fructificación, maduración, caída de hojas y de frutos para luego pasar a la etapa de reposo. En este estudio, se consideran los cultivos de vid y cítricos dentro de la categoría de cultivos permanentes.

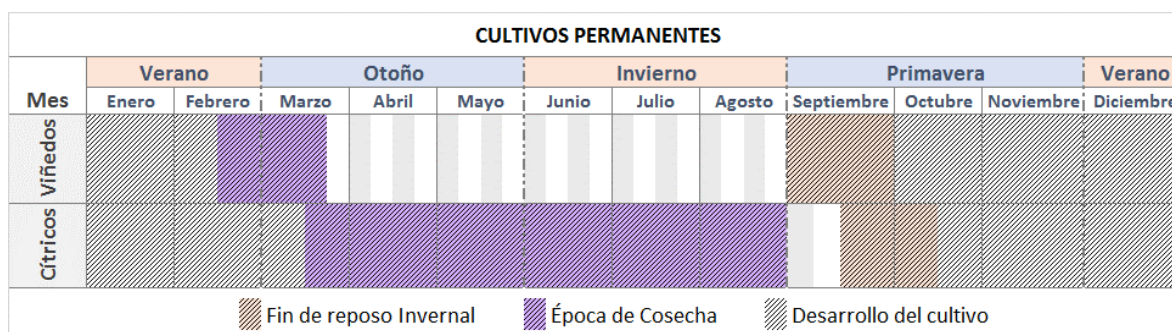


Figura 146. Calendario de cultivos de perennes para Uruguay.

- **Viñedos**

En el hemisferio sur, los cultivos de vid despiertan del letargo invernal en septiembre con el inicio de la primavera; y la cosecha, o vendimia, se espera a finales de febrero y mediados de marzo (Vinetur, 2016). En el norte y litoral oeste de Uruguay los frutos maduran en diciembre mientras que en el sur la maduración se alcanza en enero (Spínola, 1997, p. 14).

- **Cítricos**

La categoría de cítricos de este estudio incluye cultivos de naranja, mandarina, limón y pomelo, que se consideran comparten características fenológicas entre especies. La Figura 147Error! Reference source not found. muestra un diagrama de las principales etapas fenológicas de los cítricos en el litoral norte del país (INIA Salto Grande, 2009). En la imagen se puede ver que la floración inicia en primavera, en el mes de septiembre, y el desarrollo del fruto se extiende hasta principios de julio. Entonces, las plantas de este tipo de cultivos entran en reposo invernal en julio. En la zona Norte de Uruguay la maduración de la naranja y la mandarina es más temprana, considerando que en este zona se presentan veranos más calurosos e inviernos más fríos que en la zona Sur del país (Bruno, Casares, Grasso, & Tommasino, 2003, p. 14)

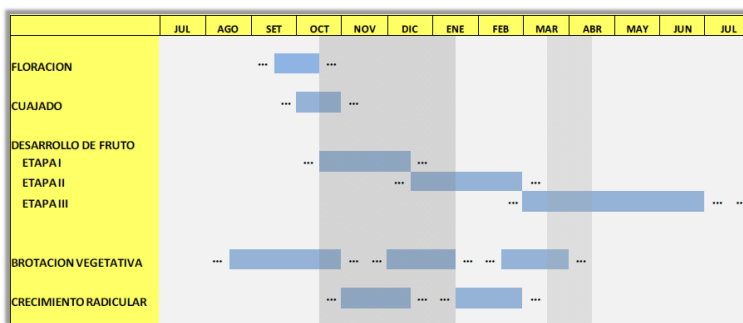


Figura 147. Principales etapas fenológicas de los cítricos en el litoral norte de Uruguay (INIA Salto Grande, 2009).

### • **Pastos**

En este estudio se consideran que las áreas sembradas con pastos se pueden asimilar a cultivos herbáceos permanentes. Ahora bien, no se considera que los pastos siguen una definición fenológica como los otros cultivos permanentes, ya que para producción forrajera se busca maximizar la producción de materia seca y no la producción de un fruto o tubérculo. Entonces, se considera que a medida que crece el pasto hay producción para alimentar una carga animal definida según uso del suelo de la unidad de pastizal analizada. Según información enviada por el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, en Uruguay los pastizales se dividen en cuatro zonas representativas: la Cuenca Sedimentaria del Noreste, la Cuenca Basáltica, la Región Centro Sur y las Sierras del Este. Estas regiones se pueden ver en la Figura 148 **Error! Reference source not found..** La producción de pastos en el país está asociada a la región y estación del año, como se muestra en la Tabla 30 **Error! Reference source not found..**

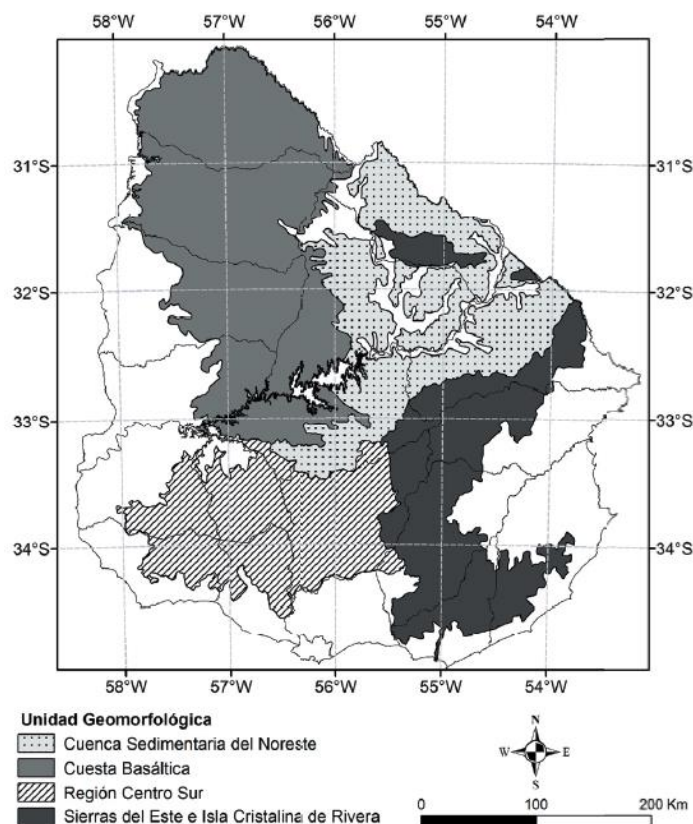


Figura 148. Regiones geomorfológicas de Uruguay que definen producción de pastizales (Tomado de Bresciano, Rodríguez, Lezama, & Altesor, 2014, fig. 1).

Tabla 30. Producción de materia seca de pasto por región y estación del año (Fuente: OPYPA con base a Berreta (1998), Bemhaja (1991), Carámbula (1987), Formoso (1991), Ayala et. al (1999) y Altesor et al. (2017))

Región Ganadera	% país	Superficie (ha)	% Cobertura Nativa CN	Superficie estimada CN puro	kg de materia seca por año				
					Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Total
Basalto	23.8%	4,190,800	80%	3,352,640	1,217	786	562	1,179	3,744
					33%	21%	15%	32%	
Centro sur (Cristalino)	12.8%	2,248,986	40%	899,594	1,120	770	385	1,225	3,500
					32%	22%	11%	35%	
Noreste	19.3%	3,402,721	55%	1,871,497	1,879	688	339	1,387	4,300
					44%	16%	8%	32%	
Este	24%	4,284,790	60%	2,570,874	954	598	171	648	2,370
					40%	25%	7%	27%	
<b>Total</b>	<b>80.3%</b>	<b>14,127,297</b>		<b>8,694,605</b>					

A partir de esta información, se puede definir un ciclo de producción de materia seca en el año, como se muestra en la Figura 149. En todas las regiones en verano y primavera se produce el mayor porcentaje de masa seca, mientras que en invierno la producción es la menor del año. Este ciclo de producción se toma como referencia para estimar la cantidad de pasto producido para uso forrajero y evaluar la disponibilidad de alimento en la vulnerabilidad del sector pecuario en la evaluación de riesgo por sequía.

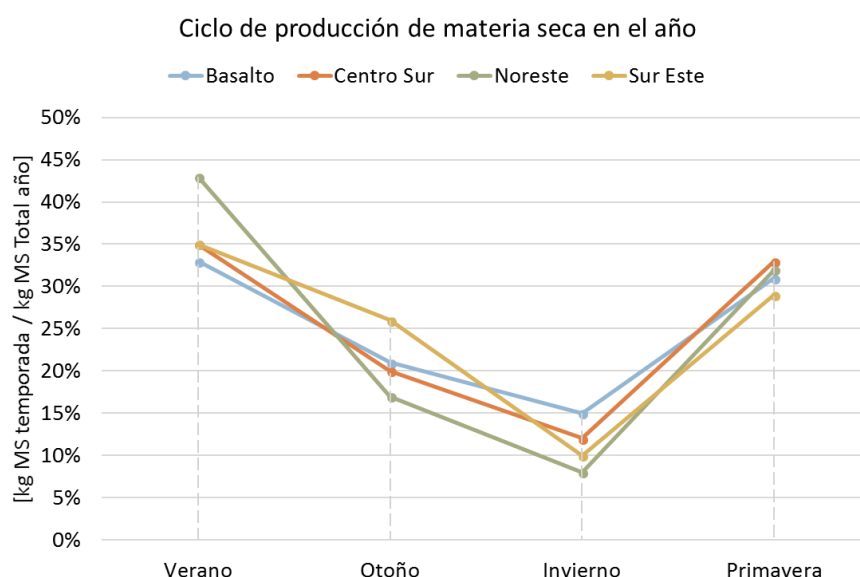


Figura 149. Ciclo de producción de materia seca de pasto en Uruguay (Realizado a partir de datos de la Tabla 30).

Con la información de localización de cultivos, su área sembrada y su estacionalidad, se completa la base de datos de elementos expuestos para el caso de evaluación del riesgo por sequía en el sector agrícola de Uruguay.

## 1.22 Rendimientos de cultivos

Dentro de la información que se debe conocer en el modelo de exposición se incluye el rendimiento típico de cada cultivo, que dentro del modelo se define como la producción total en toneladas de un cultivo por hectárea de terreno sembrada. Estos datos son utilizados en el módulo de vulnerabilidad, que relaciona el desarrollo día a día del cultivo con las series diarias de precipitación y temperatura, para evaluar posibles reducciones en el rendimiento de la cosecha debido a condiciones de déficit de agua.

La Tabla 31 **Error! Reference source not found.** muestra los valores de rendimiento, a escala nacional, de los cultivos seleccionados para la evaluación de riesgo, obtenidos a partir de las Encuestas Agrícolas Nacionales. Los valores aquí reportados corresponden al año agrícola 2016/2017, plazo en el que se produce un ciclo completo de la producción anual del país, el cual está asociado a las áreas sembradas utilizadas dentro del análisis.

Tabla 31. Rendimientos de referencia (Ton/ha) utilizados en el modelo de exposición. 1Fuente: (MGAP-DIEA, 2017a). 2Fuente: (MGAP-DIEA, 2016a). 3Fuente: (MGAP-DIEA, 2016b). 4Fuente: (MGAP-DIEA, 2017b). 5Fuente: (INAVI, 2017).

Producto	Rendimiento [Ton/ha]
Soja - Primera siembra <sup>4</sup>	3.0
Soja - Segunda siembra <sup>4</sup>	2.8
Trigo <sup>2</sup>	3.5
Cebada <sup>2</sup>	3.6
Arroz <sup>1</sup>	8.5
Maíz - Primera siembra <sup>4</sup>	7.5
Maíz - Segunda siembra <sup>4</sup>	6.3
Sorgo - Primera siembra <sup>4</sup>	4.7
Sorgo - Segunda siembra <sup>4</sup>	4.4
Cítricos <sup>3</sup>	18.3
Viñedos	14.6

Estos rendimientos, obtenidos de fuentes oficiales, son rendimientos de referencia que permiten verificar los resultados de rendimiento obtenidos con el modelo para estimar las pérdidas. Sin embargo, cabe resaltar que dichos rendimientos se asumen estáticos en el modelo dado que no se tienen en cuenta las mejores prácticas agrícolas que en un futuro puedan adoptarse y que resulten en un incremento del rendimiento de los cultivos.

Sobre las condiciones de clima para el año de referencia, se puede considerar que son años sin evidencia de eventos de sequía extremos. En el caso de la precipitación, la Figura 150 **Error! Reference source not found.** muestra la precipitación anual promedio para Uruguay y los valores para el año 2016, que corresponde a una

precipitación de 1,104 mm. Es importante recordar que estos valores de precipitación anual promedio para la región se obtuvieron de la base de datos CHIRPS. Entonces, la precipitación para el año 2016, que es el año de referencia de los rendimientos para Uruguay, está por encima de la media y por encima del percentil 25, lo que indica que fue un año más lluvioso de lo normal y los rendimientos de este año que se usen como referencia pueden reflejar condiciones de más lluvia.

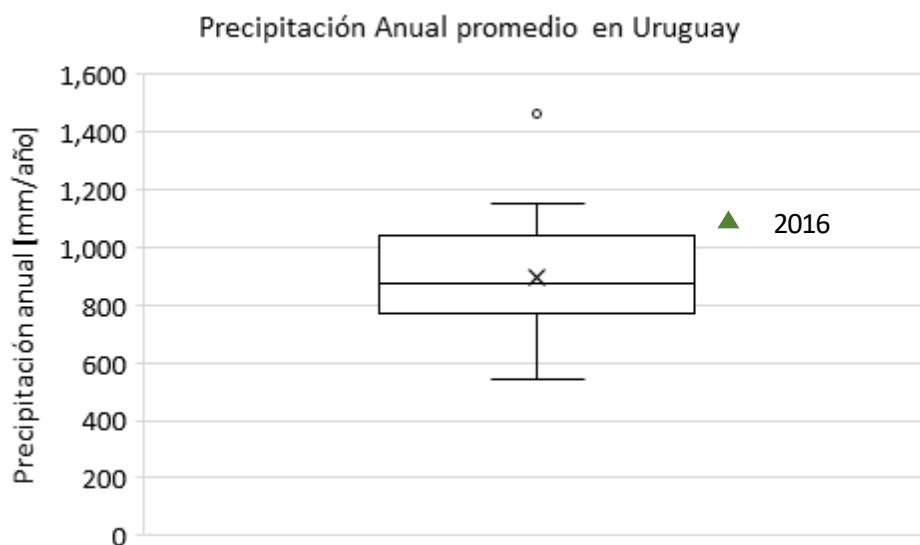


Figura 150. Diagrama de caja para precipitación anual promedio de Uruguay y valores de precipitación del año 2016. (Fuente: elaborado a partir de información de base de datos de CHIRPS para el rango 1981-2010).

La Figura 151 **Error! Reference source not found.** muestra el análisis de los registros históricos de rendimiento de los cereales y su comparación con el rendimiento de referencia seleccionado para Uruguay. Para Uruguay se cuenta con registros de rendimiento entre el año agrícola 1973/74 y 2016/2017 (series históricas recibidas de OPYPA-MGAP). Los diagramas de caja muestran que los rendimientos de referencia de soja, trigo, cebada, maíz y arroz están por encima de la media de los valores reportados desde el año agrícola 2000/2001; en el caso del sorgo, el rendimiento de referencia está sobre la media. La variación temporal de los rendimientos muestra como los rendimientos no muestran una tendencia clara (de incremento o disminución con el tiempo), sin embargo, se mantienen cercanos al rendimiento de referencia seleccionado.



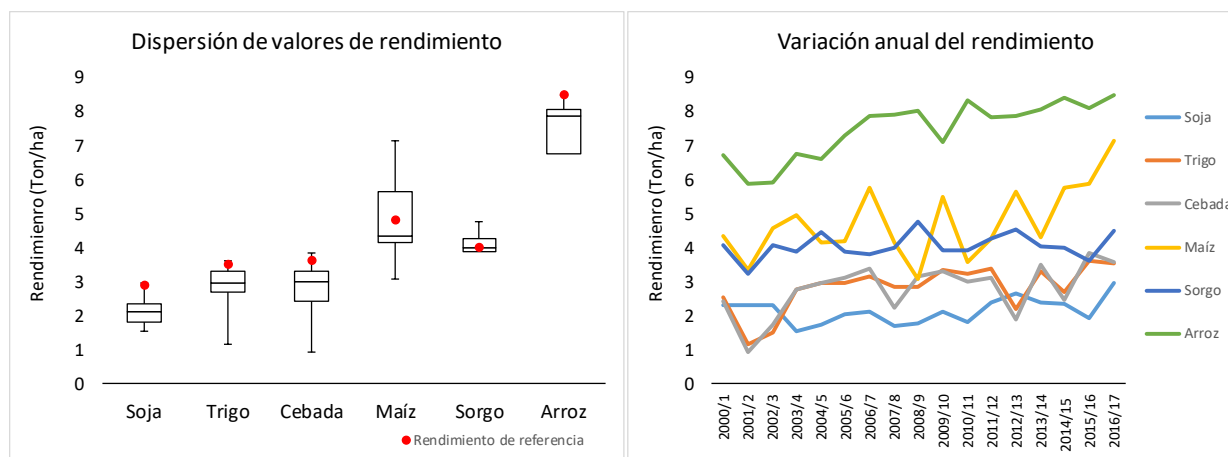


Figura 151. Dispersión y variación temporal de valores de rendimiento a escala nacional para cultivos seleccionados en Uruguay (Fuente: Elaborado a partir de información del MGAP).

En el caso de los cultivos diferentes a cereales y granos básicos, se contó con la información reportada en las Encuestas Agrícolas para el año agrícola 2016/2017. La selección del rendimiento de referencia se hace a partir de la información reportada en los censos o encuestas agrícolas, ya que se considera la información más completa que refleja los rendimientos según prácticas agrícolas locales. Los censos y encuestas agrícolas son esfuerzos importantes que hacen los países para consolidar la información del sector con la más alta resolución posible.

### 1.23 Rendimiento de pasturas naturales

Entendiendo que en la materia seca del alimento se concentran sus nutrientes, es necesario conocer el porcentaje de masa seca de la pastura para saber cuál es la proporción total del alimento que es aprovechable por el animal. En la Tabla 32 **Error! Reference source not found.** se presenta la producción de materia seca desagregada por estaciones del año para cuatro regiones geomorfológicas de Uruguay. En general, en verano y primavera se produce el mayor porcentaje de masa seca, mientras que en invierno la producción es la más baja del año. Este ciclo de producción se toma como referencia para estimar la cantidad de pasto producido para uso forrajero y evaluar la disponibilidad de alimento a partir de la respuesta de pasturas naturales a la disponibilidad de agua, que puede verse reducida en condiciones de déficit hídrico.

Tabla 32. Producción de materia seca de pasto por región y estación del año (Fuente: OPYPA con base a Berreta (1998), Bemhaja (1991), Carámbula (1987), Formoso (1991), Ayala et. al (1999) y Altesor et al. (2017).

Región Ganadera	% país	Superficie (ha)	% Cobertura Nativa CN	Superficie estimada a CN puro	kg de materia seca por año				
					Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Total
Basalto	23.8%	4,190,800	80%	3,352,640	1,217	786	562	1,179	3,744
					33%	21%	15%	32%	
Centro sur (Cristalino)	12.8%	2,248,986	40%	899,594	1,120	770	385	1,225	3,500
					32%	22%	11%	35%	
Noreste	19.3%	3,402,721	55%	1,871,497	1,879	688	339	1,387	4,300
					44%	16%	8%	32%	
Este	24%	4,284,790	60%	2,570,874	954	598	171	648	2,370
					40%	25%	7%	27%	
<b>Total</b>	<b>80.3%</b>	<b>14,127,297</b>		<b>8,694,605</b>					

## 1.24 Avalúos sector agrícola

Para cuantificar las pérdidas generadas al momento de exponer los cultivos a los escenarios que definen la amenaza por sequía, es necesario realizar una valoración económica de la producción obtenida por cultivo, para ello se consideró el valor unitario en dólares (USD) de una tonelada producida para cada cultivo, sin considerar los costos de transporte, almacenamiento, procesamiento, comercialización ni impuestos.

Las estructuras de costos en chacra recibidas de parte de OPYPA-MGAP para la ejecución de este proyecto de consultoría cumplen con los criterios anteriormente mencionados y fueron seleccionadas como el valor de referencia para el avalúo de los cultivos para los cuales estaban disponibles. Sin embargo, esta información no se encontró disponible para los cultivos de cebada, cítricos ni viñedos siendo necesario considerar otra fuente de información para determinar el costo de producción de una tonelada de estos productos agrícolas como valor de referencia para el país.

El resultado de la estimación realizada se presenta en la Tabla 33 **Error! Reference source not found.** y en el anexo **A. 11** se describe detalladamente la metodología utilizada para calcular los avalúos por tonelada de los cultivos seleccionados

para el análisis donde también se consideró la variación de los precios con el paso del tiempo en los casos donde se reportaban valores para años anteriores al año de referencia.

Tabla 33. Resumen del avalúo en USD/tonelada por producto en el modelo de exposición para el año agrícola 2016/2017. 1Fuente: Información recibida de OPYPA-MGAP. 2Fuente: (Codina, 2017). 3Fuente: (FAOSTAT, 2018).

Producto	Avalúo [USD/ton]
Arroz <sup>1</sup>	180
Cebada <sup>1</sup>	196
Cítricos <sup>2</sup>	478
Maíz – Primera siembra <sup>1</sup>	113
Maíz – Segunda siembra <sup>1</sup>	127
Soja - Primera siembra <sup>1</sup>	210
Soja - Segunda siembra <sup>1</sup>	216
Sorgo - Primera siembra <sup>1</sup>	149
Sorgo - Segunda siembra <sup>1</sup>	135
Trigo <sup>1</sup>	195
Viñedo <sup>3</sup>	1503

## 1.25 Avalúos sector pecuario

Para cuantificar las pérdidas generadas en la ganadería uruguaya a causa de los escenarios que definen la amenaza por sequía, es necesario realizar una valoración económica del stock animal, y para ello se consideró el valor unitario en dólares (USD) de un kilogramo de peso vivo para cada especie animal incluida en el análisis. La valoración económica es considerada como el precio en el que se tasa un kilogramo de animal en pie, sin considerar los costos de transporte, frigorífico, procesamiento, comercialización ni impuestos.

Los precios de kilogramo de peso vivo de cada especie animal se consultaron en el Anuario Estadístico 2017 del INAC, quienes reportan para 2017 los valores que se presentan la Tabla 34

Tabla 34. Avalúo en USD/kg por especie en el modelo de exposición ganadero para el año 2017.

Especie	Avalúo [USD/kg]
Bovino	1.53
Ovino	1.44

## VULNERABILIDAD DE CULTIVOS A LA SEQUÍA

---

Según la UNISDR, el concepto de vulnerabilidad incluye las condiciones determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos y ambientales, que aumentan la susceptibilidad de un elemento expuesto al impacto de las amenazas (UNISDR, 2015b). Dentro de la metodología propuesta, la vulnerabilidad de los cultivos evalúa las características fenológicas de las plantas que determinan su respuesta biológica a la falta de agua. Generalmente, para enfrentar eventos de disminución de humedad en el suelo, las plantas cierran los estomas de sus hojas para reducir la pérdida de agua por transpiración, lo que implica reducir su nivel de fotosíntesis, ritmo de crecimiento y rendimiento final (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2, 2015). La susceptibilidad de los cultivos determina su respuesta biológica a la falta de agua, por lo que cultivos resistentes a sequía tienen una tasa de pérdida de rendimiento menor que cultivos que demandan mucha agua en su ciclo de crecimiento. En otras palabras, la susceptibilidad de los cultivos define su rendimiento ante una situación de déficit hídrico.

La modelación de la vulnerabilidad se realiza siguiendo la metodología de cálculo del rendimiento definida por la FAO. La vulnerabilidad se define en términos de la pérdida de rendimiento que sufre el cultivo durante un período prolongado de escasez de agua. Dado que se aplica un modelo agronómico de respuesta de cultivos, no se emplearán curvas o funciones de vulnerabilidad. El modelo de respuesta de cultivos al consumo de agua de FAO ha sido ampliamente utilizado en el desarrollo de los programas de riego y en general en la administración de cultivos.

### 1.26 Rendimiento como función del consumo de agua

Con el objetivo de mejorar la eficiencia y la productividad del uso del agua en cultivos, la división de Tierra y Agua de la FAO ha desarrollado una línea de investigación sobre la gestión eficaz del agua en la agricultura de secano e irrigada. El objetivo general es aumentar los ingresos de los agricultores mejorando el rendimiento agrícola,

respondiendo a la creciente demanda de alimentos y a los limitados recursos hídricos. El enfoque inicial para modelar la relación entre el rendimiento de los cultivos y el consumo de agua se encuentra publicado en el documento de FAO: *Irrigation and Drainage paper No. 33 Yield response to water* (Doorenbos, Kassam, Bentvelsen, Branscheid, & Plusje, 1979). Este es un enfoque simplificado, en donde la pérdida relativa de rendimiento en cualquier cultivo  $\left(1 - \frac{Y}{Y_x}\right)$ , se relaciona proporcionalmente a la reducción relativa en el consumo de agua en términos de la evapotranspiración  $\left(1 - \frac{ET}{ET_x}\right)$ , por medio de un coeficiente de proporcionalidad ( $K_y$ ), que es específico para cada tipo de cultivo y fase fenológica.

$$\left(1 - \frac{Y}{Y_x}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_x}\right) \quad \text{Ec. 0-1}$$

En donde  $Y$  es el rendimiento real,  $Y_x$  es el máximo rendimiento, el cual depende de la genética del cultivo y las condiciones climáticas, y se calcula asumiendo que los factores agronómicos (agua, fertilizantes, plagas y enfermedades) no son limitantes.  $ET$  es la evapotranspiración real, calculada para condiciones específicas de precipitación y temperatura, y  $ET_x$  es la máxima evapotranspiración, calculada asumiendo que los requerimientos de agua del cultivo están totalmente satisfechos.

Este es un enfoque apropiado para propósitos de planificación general y evaluación rápida (Steduto, Hsiao, Fereres, & Raes, 2012) y puede aplicarse a todos los cultivos agrícolas (herbáceos, árboles y vides), usando el valor apropiado de  $K_y$ . Este coeficiente, que es específico de los cultivos y varía a lo largo de la temporada de crecimiento, incluye los procesos biológicos, físicos y químicos involucrados en la producción de biomasa. La Figura 152 **Error! Reference source not found.** muestra la función lineal de producción de agua para el maíz. En términos generales, si  $K_y > 1$ , se trata de un cultivo muy sensible al estrés hídrico, mientras que si  $K_y < 1$ , se trata de un cultivo más tolerante al déficit de agua. Adicionalmente, los cultivos en estado vegetativo o de maduración son más resistentes que los cultivos en etapas de floración o de formación de rendimiento.

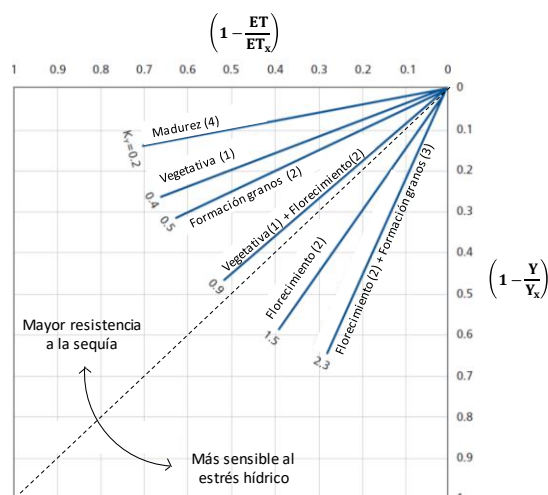


Figura 152. Funciones de agua-rendimiento para el maíz (Adaptado de Steduto et al., 2012, p. 8)

Utilizando la Ec. 0-1 como punto de partida, la FAO desarrolló un modelo avanzado de respuesta de rendimiento como función del consumo de agua, el cual se encuentra publicado en el documento *Irrigation and Drainage Paper No. 66 Crop yield response to water* (Steduto et al., 2012). Este nuevo enfoque permite calcular la biomasa de los cultivos con base en la cantidad de agua transpirada y el rendimiento del cultivo como la proporción de biomasa que entra en las partes cosechables de las plantas. Algunas de las características del modelo de la FAO, que son interesantes para la evaluación del riesgo de sequía, son:

- El modelo considera la relación proporcional entre el estrés hídrico y la reducción de la producción de biomasa. En consecuencia, la reducción de la producción de biomasa está relacionada con la reducción de los rendimientos y las pérdidas económicas asociadas con el peligro de sequía.
- El modelo de la FAO incluye el efecto de las anomalías de la humedad del suelo y la respuesta fisiológica de los cultivos al déficit hídrico.
- El modelo calcula la producción de biomasa en una escala de tiempo diaria, para representar mejor la dinámica de la respuesta del cultivo al agua en diferentes etapas de crecimiento. Esta característica es conveniente porque los parámetros meteorológicos, utilizados para calcular el riesgo de sequía, también tienen una escala de tiempo diaria.

- Como la producción de biomasa se calcula a partir de las series de precipitación y temperatura, el modelo puede introducir el efecto de los escenarios de cambio climático. Se incluye también la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera.
- La FAO ha establecido parámetros estándar para los cultivos, con sus correspondientes procedimientos de calibración y validación.
- Es posible incorporar modificadores asociados a prácticas agrícolas (por ejemplo, riego o fertilización), en función de la información disponible.

El modelo de respuesta de cultivos tiene cuatro componentes principales: el clima (en términos de temperatura, precipitación, demanda por evaporación y concentración de dióxido de carbono), los cultivos (procesos de desarrollo, crecimiento y rendimiento), el suelo (balance de agua y sal) y el manejo y administración (prácticas agrícolas). Cada uno de los componentes se explica brevemente a continuación, según lo contenido en Steduto et al. (Steduto et al., 2012).

### **1.26.1 Clima**

La temperatura influye en el desarrollo de los cultivos y la precipitación es determinante para el balance hídrico del suelo en la zona radicular y el estrés hídrico. Por lo tanto, las principales variables climáticas para el modelo son las temperaturas máximas y mínimas diarias del aire, las precipitaciones diarias totales y la demanda evaporativa de la atmósfera, expresadas como evapotranspiración. Para el caso del modelo de evaluación del riesgo de sequía aplicado en este estudio, todas estas variables climáticas se calculan previamente en la evaluación de la amenaza y se utilizan para calcular los indicadores de sequía.

Adicionalmente, la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) se incluye en la evaluación, ya que es un aspecto que afecta la expansión del cultivo y la conductancia estomática. Los valores por defecto de las concentraciones anuales de CO<sub>2</sub> se miden en el Observatorio Mauna Loa, en Hawái ([www.esrl.noaa.gov/gmd/obop/mlo/](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/obop/mlo/)). Para el caso de la evaluación prospectiva de riesgo, se utiliza la concentración de dióxido de carbono para el último año disponible en la evaluación base y para la evaluación de los modelos

con cambio climático se usan las proyecciones de concentración de dióxido de carbono según el escenario de RCP (trayectoria representativa de concentración) analizada.

### 1.26.2 Cultivo

Los cultivos se modelan en términos de los procesos biológicos, físicos y químicos que determinan su rendimiento. El modelo permite evaluar cómo los cultivos crecen y se desarrollan a lo largo de su ciclo de crecimiento específico, creciendo el follaje, profundizando sus raíces y acumulando biomasa. Todas las etapas fenológicas (o etapas de crecimiento) se consideran en el modelo: vegetativo, floración, formación de rendimiento y maduración (como se muestra en la Figura 152), incluyendo etapas fenológicas distintas para cultivos herbáceos o forrajeros.

La fenología se refiere a las etapas de desarrollo de los cultivos y su duración, que se puede definir en días de grado de crecimiento (GDD – *Growing Degree Days*) o días calendario. La cobertura vegetal (CC – *Canopy Cover*) es la representación de la cantidad de follaje, la cual se considera proporcional a la cantidad de agua transpirada y la cantidad de biomasa producida. El subcomponente de profundidad de enraizamiento modela el proceso en el cual las raíces se profundizan a una tasa relativa constante mientras que la planta está creciendo hasta la fase de formación de rendimiento. El modelo puede incluir los efectos de capas de suelo o nivel freático superficial que restringen de crecimiento de las raíces.

En la Figura 153 **Error! Reference source not found.** se muestran las curvas de la cobertura vegetal y profundidad de la raíz. La curva en la parte superior representa el desarrollo de la cobertura vegetal a partir de la expansión (CGC: coeficiente de crecimiento vegetal – *Canopy Growth Coefficient*) y la disminución (CDC: coeficiente de disminución vegetal – *Canopy Decline Coefficient*). La cobertura vegetal se expresa como una fracción de suelo sombreado por las hojas o partes aéreas de las plantas, siendo su nivel máximo (CCx) específico del cultivo. La segunda curva representa la profundidad de enraizamiento efectiva, desde su valor mínimo (Zn) en el momento de la siembra hasta su valor máximo (Zx) en la fecha que se alcanza la madurez del cultivo. Este conjunto de curvas representa el desarrollo del cultivo y su interacción con los sistemas de suelo y aire.



El modelo permite calcular la transpiración de los cultivos separadamente de la evaporación del suelo. El subcomponente de transpiración de cultivos determina el uso de agua de la planta cuando no hay estrés que limite la apertura estomática, característica que es específica del tipo de cultivo y cambia durante su desarrollo. La evaporación del suelo considera la pérdida de agua de la superficie del suelo húmedo no sombreado por la vegetación. Los dos últimos subcomponentes, producción de biomasa y rendimiento cosechable, se pueden resumir en las ecuaciones Ec. 0-2 y Ec. 0-3.

La producción de biomasa se define como:

$$B = WP * \sum Tr \quad \text{Ec. 0-2}$$

En donde  $B$  es la biomasa producida acumulada,  $Tr$  es la transpiración del cultivo sumada durante el período de producción de la biomasa y  $WP$  es el parámetro de productividad del agua medido como la cantidad de biomasa seca (kilogramos) por unidad de área ( $m^2$ ) y de agua transpirada (mm). La robustez del modelo depende de la naturaleza conservadora del  $WP$  que permanece constante en un rango de ambientes, cuando se normaliza para demandas evaporativas.

Finalmente, se utiliza un índice de cosecha  $HI$  para estimar el rendimiento  $Y$  de la biomasa producida  $B$ . Al hacer esta distinción entre la biomasa y el rendimiento, se pueden evaluar por separado los efectos de las condiciones climáticas sobre la producción de biomasa y la cosecha.

$$Y = HI * B \quad \text{Ec. 0-3}$$

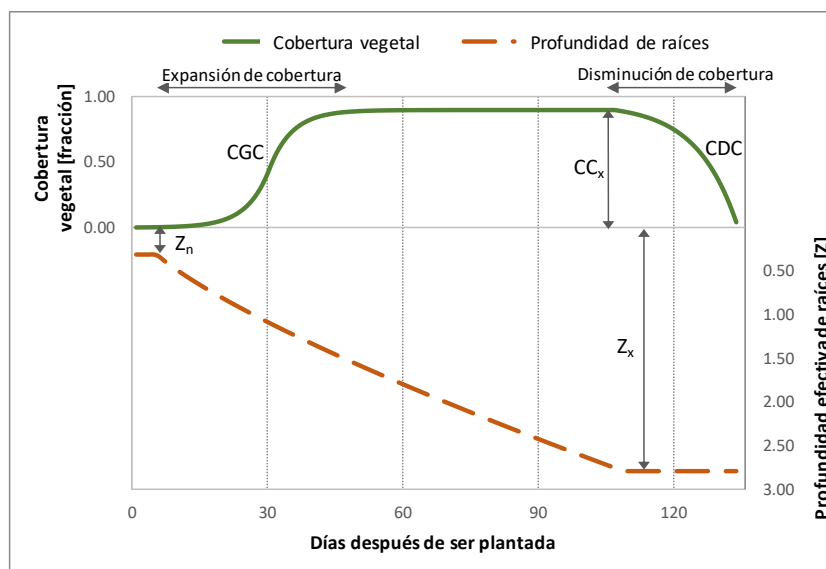


Figura 153. Representación esquemática del desarrollo en el tiempo de la cobertura vegetal y la profundidad de enraizamiento (Adaptado de Steduto et al., 2012, p. 23).

La Figura 154 **Error! Reference source not found.** muestra la función del cambio del índice de cosecha  $HI$  en el tiempo para cultivos de frutas o granos, para el período de formación del rendimiento (fase de floración hasta la madurez fisiológica).  $HI$  comienza a partir de cero, en un crecimiento lento pero acelerado seguido por una tasa de aumento constante hasta que se alcanza el rango superior  $HI_o$ . Este nivel superior es el índice de cosecha de los cultivos en condiciones óptimas, es específico del tipo de cultivo y se dispone de datos para su calibración.

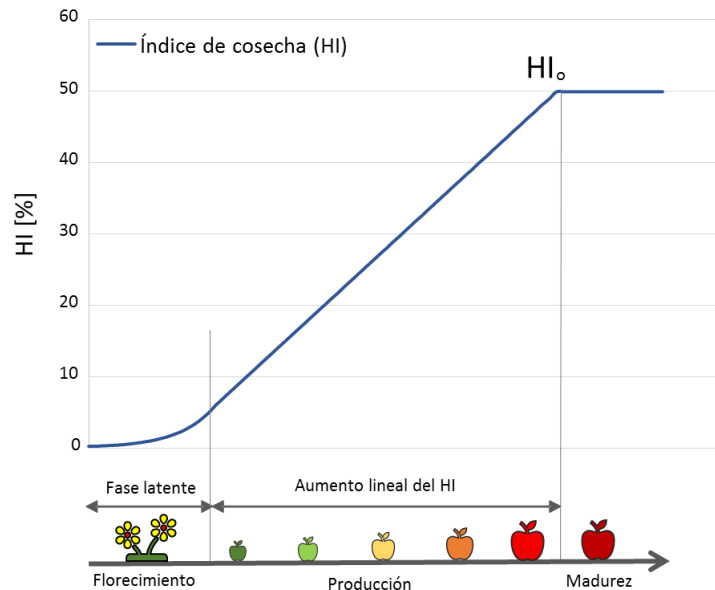


Figura 154. Representación esquemática del cambio en el tiempo del índice de cosecha (HI) para cultivos de frutas o granos (Adaptado de Steduto et al., 2012, p. 27).

### 1.26.3 Suelo

El componente de suelo incluye su perfil en profundidad y las características del nivel freático dentro del sistema radicular de la planta, expresando la región radicular como un volumen de control en donde se estiman los balances de agua y sal. El suelo puede ser subdividido en capas de profundidad variable, cada una con diferentes características físicas como el contenido de agua en el suelo saturado, el límite superior de agua contenida o capacidad de campo (FC – *Field Capacity*), el punto de marchitamiento permanente (PWP – *Permanent Wilting Point*) o límite inferior del nivel de agua, y la conductividad hidráulica del suelo saturado ( $K_{sat}$ ). Estos valores son las entradas para determinar la evaporación del suelo, el drenaje interno, la percolación profunda, el escurrimiento superficial y la capilaridad. El nivel freático debe caracterizarse en términos de su profundidad y salinidad.

La Figura 155 **Error! Reference source not found.** muestra una representación simplificada del modelo del sistema radicular, donde  $D_r$  representa el agotamiento de la raíz y  $W_r$  es la profundidad equivalente del agua. El agua disponible total (TAW – *Total Available Water*) es la cantidad de agua retenida en la zona de raíces entre la capacidad de campo (límite superior) y el punto de marchitamiento permanente (límite inferior).

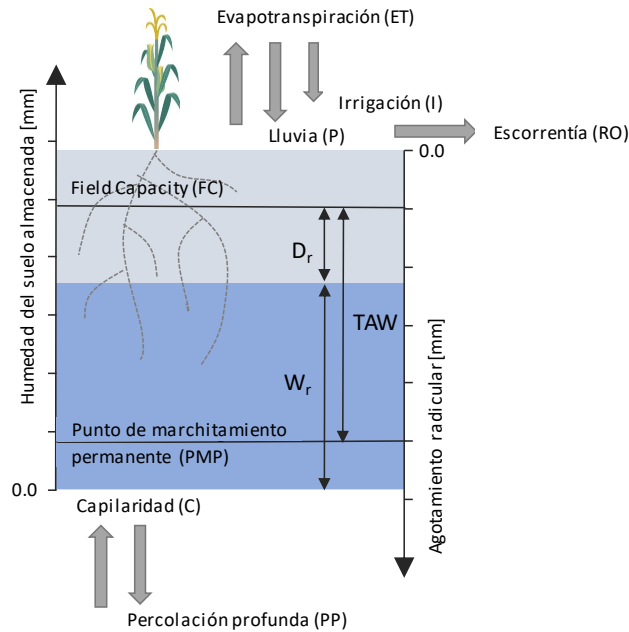


Figura 155. Representación esquemática del volumen de control de la zona radicular (Adaptado de Steduto et al., 2012, p. 28).

El balance hídrico dentro de la zona radicular se calcula día a día, y para cualquier momento del desarrollo del cultivo. Los caudales de agua entrantes considerados en el modelo son provistos por las lluvias, el riego y la capilaridad. Por otro lado, los flujos de agua salientes considerados en el modelo son el escurrimiento, la evapotranspiración y la percolación profunda.

#### 1.26.4 Manejo

El modelo tiene la capacidad de incorporar las prácticas de manejo en la respuesta del rendimiento de los cultivos al agua, incluyendo el riego y manejo de campo. Las opciones de manejo de riego incluyen la selección de métodos de aplicación de agua y la definición de programas de riego. Las opciones de manejo de campo incluyen la fertilización del suelo, la cobertura del suelo para evitar la evaporación y el uso de protecciones para controlar el escurrimiento superficial. Este tipo de características serán incluidas en la modelación en la medida en que la información necesaria esté disponible.

## 1.27 La dinámica de la respuesta de los cultivos al estrés hídrico

Las condiciones de estrés hídrico son representadas por un coeficiente de estrés ( $K_s$ ) y un umbral para los indicadores de estrés.  $K_s$  es un modificador que cuantifica la intensidad del efecto que produce el estrés hídrico en los procesos de crecimiento específicos para un cultivo y etapa de crecimiento. Como se observa en la Figura 156, los valores de  $K_s$  varían entre 0 (estrés total) y 1 (sin estrés), siguiendo una función lineal o convexa (el grado de curvatura se establece durante la calibración del modelo). Los umbrales para el estrés hídrico están relacionados con el agotamiento del agua del suelo, mientras que los umbrales asociados al estrés por temperatura del aire están relacionados con los grados de crecimiento.

El modelo permite calcular los efectos del déficit hídrico (entendido como falta de agua en la región radicular del suelo) en el crecimiento de la cobertura vegetal, la conductancia estomática, la senescencia temprana, la profundización de la raíz y el índice de cosecha.

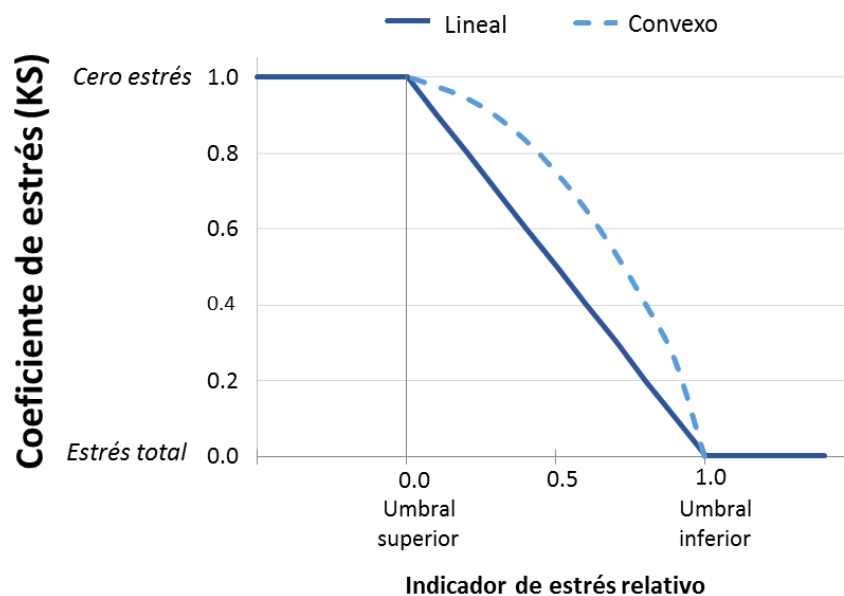


Figura 156. Función del coeficiente de estrés ( $K_s$ ) (Adaptado de Steduto et al., 2012, p. 32).

La Figura 157 muestra estos cinco procesos (líneas punteadas), dentro del esquema general de desarrollo de rendimiento bajo estrés

hídrico. Un resumen general del proceso de cálculo se presenta a continuación. Nótese que todos los pasos del proceso se calculan en intervalos de tiempo diarios.

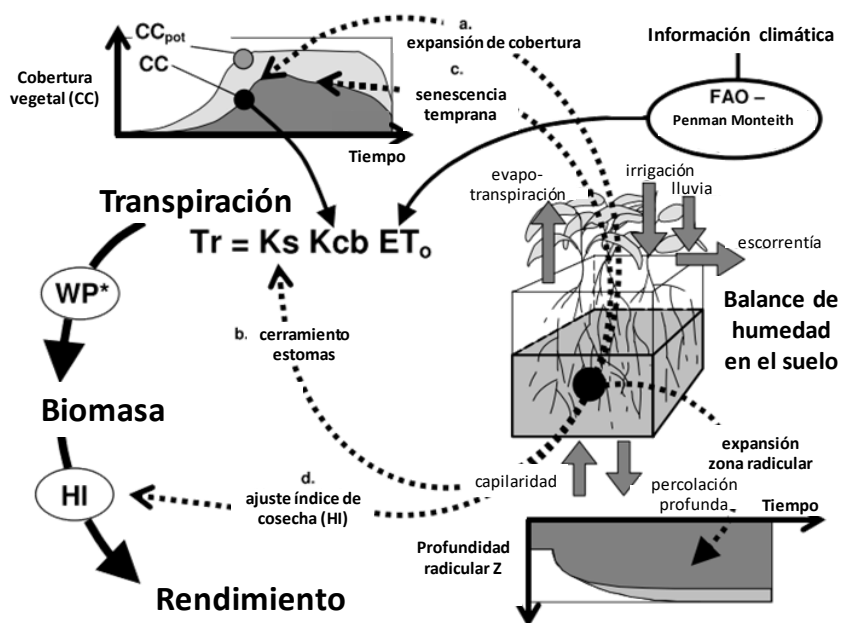


Figura 157. Representación esquemática de la respuesta del cultivo al estrés hídrico (Adaptado de Raes et al., 2011).

1. *Balance del agua en el suelo:* determina la cantidad de agua almacenada en la zona radicular, contabilizando los flujos de agua entrante y saliente. El crecimiento del cultivo no se ve afectado y no hay estrés hídrico ( $K_s = 1$ ) entre el nivel de capacidad de campo (FC) y el nivel superior de agotamiento de la zona de raíz. En el otro extremo, entre el umbral inferior en el agotamiento de la zona de raíz y el punto de marchitamiento permanente hay tensión total ( $K_s = 0$ ) y el crecimiento del cultivo se ve completamente impactado. A medida que se reduce el agua almacenada en el volumen de control del suelo, el coeficiente de estrés disminuye.
2. *Expansión de la cobertura vegetal:* Se simula el efecto del déficit hídrico en la expansión de la cobertura, mediante la reducción del coeficiente de crecimiento vegetal (CGC) por el coeficiente de estrés hídrico para la expansión de cobertura  $K_{s,exp,w}$ , y modificando el coeficiente de disminución de cobertura por coeficiente de estrés hídrico de senescencia temprana  $K_{s,sen}$ .

Por una parte, cuando el agotamiento de la zona radicular está por debajo de los umbrales superiores de contenido de agua,  $K_{s,exp,w}$  se hace menor que 1 y la cobertura reduce su tasa de expansión. Cuando el agotamiento de la zona radicular está por debajo del límite inferior,  $K_{s,exp,w} = 0$  y se detiene el desarrollo de la cobertura. Por otra parte, cuando el estrés hídrico es severo (agotamiento de la zona radicular cerca del punto de marchitamiento permanente), se desencadena la senescencia temprana. El grado de senescencia está descrito por  $K_{s,sen}$ . La cobertura vegetal máxima no puede ser alcanzada bajo condiciones de estrés hídrico, o podría alcanzarse en una última etapa de la temporada, como se muestra en la Figura 159 **Error! Reference source not found..**

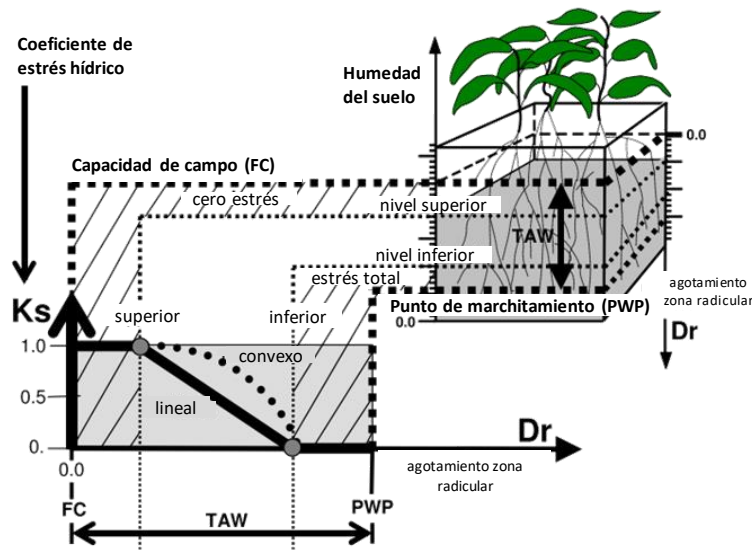


Figura 158. Representación esquemática del coeficiente de estrés hídrico (Adaptado de Raes et al., 2011).

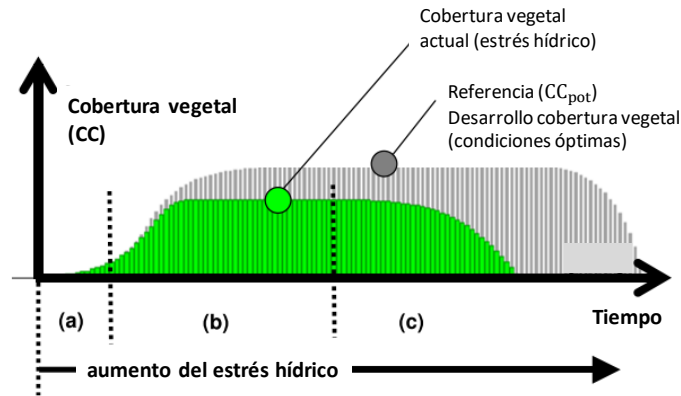


Figura 159. Representación esquemática de la expansión de la cobertura vegetal, bajo condiciones óptimas (gris) y bajo estrés hídrico (verde). (Adaptado de Raes et al., 2011).

3. *Transpiración*: se calcula la potencia de evaporación de la atmósfera considerando un coeficiente de cultivo  $K_{cb}$  y el coeficiente de estrés hídrico  $K_s$ , como se muestra en la ecuación Ec. 0-4. La evapotranspiración potencial ( $ET_o$ ) se calcula usando la ecuación de Penman-Monteith de FAO (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998).

$$Tr = K_s(K_{cb}CC^*)ET_o \quad \text{Ec. 0-4}$$

El coeficiente de transpiración del cultivo  $K_{cb}$  es un parámetro que debe ser ajustado continuamente en función de la cobertura vegetal simulada, con el fin de considerar los efectos de envejecimiento y senescencia. El coeficiente de estrés hídrico  $K_s$ , utilizado en caso de escasez de agua es un coeficiente de estrés por cierre estomático  $K_{s,sto}$ , también con valores entre 1 (sin estrés) y 0 (total estrés).

4. *Biomasa arriba de la superficie*: La relación entre la biomasa producida y el agua consumida por un cultivo específico se conoce es la productividad del agua (WP), la cual tiende a ser lineal para una condición climática dada, como se muestra en la ecuación Ec. 0-5. Para incluir condiciones climáticas alteradas, se emplea la productividad del agua normalizada  $WP^{**}$  en la simulación del desarrollo de biomasa sobre el suelo. Utilizando el parámetro normalizado, el modelo puede aplicarse a diferentes regiones y estaciones. La normalización se realiza para la concentración atmosférica de  $CO_2$  y la demanda evaporativa de la atmósfera (Dirk Raes, Steduto, Hsiao, & Fereres, 2011).



La producción de biomasa arriba de la superficie se calcula, para un paso de tiempo diario, de la siguiente manera:

$$B = K_{sb} WP^* \sum_i \frac{Tr_i}{ET_{o_i}} \quad \text{Ec. 0-5}$$

en donde la productividad del agua normalizada  $WP^*$  se multiplica por la relación entre la transpiración del cultivo y la evapotranspiración de referencia del día de cálculo  $\frac{Tr_i}{ET_{o_i}}$  (expresión que se agrega durante todo el periodo de desarrollo del cultivo), y por el coeficiente de estrés por temperatura  $K_{sb}$ . Este coeficiente decrece a medida que la temperatura disminuye, y alcanza un valor de cero cuando hace demasiado frío y se detiene el crecimiento vegetal.

5. *Rendimiento*: Como se mencionó anteriormente, el rendimiento se calcula de multiplicar la biomasa sobre el suelo por un índice de cosecha, que depende del tipo de cultivo. Para considerar el estrés hídrico, debe ajustarse el índice de cosecha de su valor de referencia  $HI_o$  en condiciones óptimas, a su valor en condiciones reales, mediante la inclusión del factor  $f_{HI}$ :

$$Y = f_{HI} * HI_o * B \quad \text{Ec. 0-6}$$

El índice de cosecha puede ajustarse al déficit hídrico y a las variaciones de la temperatura del aire, y depende de la etapa del cultivo y la intensidad del estrés durante la temporada de crecimiento.

## 1.28 Información de entrada al modelo de vulnerabilidad

En esta sección se describe la información requerida para aplicar el modelo de respuesta al agua de los cultivos, que define la vulnerabilidad en esta metodología de evaluación de riesgo por sequía en Uruguay. La información de entrada se agrupa en variables climáticas, variables del cultivo y suelo.

### **1.28.1 Clima: Series meteorológicas diarias**

Las variables climáticas requeridas por el modelo de vulnerabilidad son series diarias de precipitación, temperatura máxima, media y mínima, evapotranspiración y concentración anual estimada de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la atmósfera. Las variables climáticas que usar en el módulo de vulnerabilidad son el resultado de la simulación estocástica de variables climáticas del módulo de amenaza, de esta misma metodología. A continuación, se hace un breve resumen de la metodología.

#### **1.28.1.1 Series diarias de precipitación y temperatura**

La metodología de generación estocástica de series de clima propuesta utiliza distribuciones paramétricas de probabilidad para definir conjuntos de datos climáticos históricos y estimar la probabilidad de ocurrencia de un determinado valor de precipitación o temperatura fuera del rango de observaciones históricas. La metodología toma cada día o grupo de 10 días del año hidrológico en un análisis separado, y encuentra la distribución de probabilidad que se ajusta mejor a los registros históricos. Posteriormente, se generan números aleatorios para la precipitación diaria y la temperatura para un determinado número de años de simulación, usando los parámetros de las distribuciones seleccionadas. Estas series generadas aleatoriamente se correlacionan en el tiempo y en el espacio para representar las condiciones climáticas de la región de análisis.

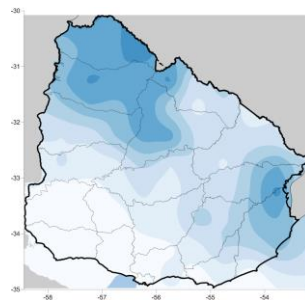
Para el caso de Uruguay, se generaron series estocásticas de precipitación y temperatura para 1,000 años equivalentes. Estos 1,000 años de series de precipitación y temperatura (máxima, mínima y media) no corresponden a un pronóstico, son valores aleatorios que han sido correlacionados para que se ajusten y representen el clima del área de estudio y brinden más información (comparado con la poca información histórica) sobre posibles eventos de sequía, que no se han presentado aún. Una de las ventajas de la metodología de generación estocástica de series climáticas es la obtención de valores atípicos extremos, que hacen referencia a valores de precipitación por encima de los máximos de los registros históricos, y valores de temperatura por fuera del rango medio registrado en estaciones. Esto quiere decir que las series modeladas incluyen

valores de precipitación y temperatura que no se han presentado, pero pueden ocurrir con una baja probabilidad, en el futuro.

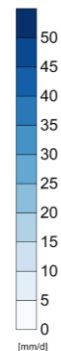
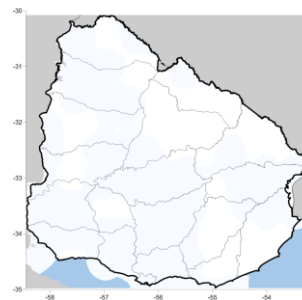
El resultado de las series de clima generadas estocásticamente se puede representar en forma de mapa, al hacer una interpolación espacial utilizando la metodología kriging. Con esto se puede obtener un mapa diario donde se define un valor de precipitación total diaria o temperatura media, máxima o mínima en cualquier punto dentro de los límites de Uruguay. En la Figura 160 **Error! Reference source not found.** se muestran los mapas de parámetros de clima para dos días aleatorios, que son ejemplos de los mapas que se usan como base en el modelo de vulnerabilidad. Para cada unidad cultivada se determina el valor de precipitación y temperatura a partir de su ubicación.

Simulación para Enero 15

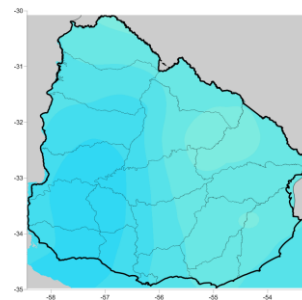
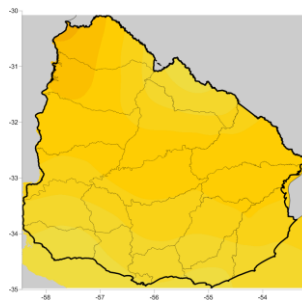
Precipitación



Simulación para Julio 15



Temperatura Media



Temperatura máxima

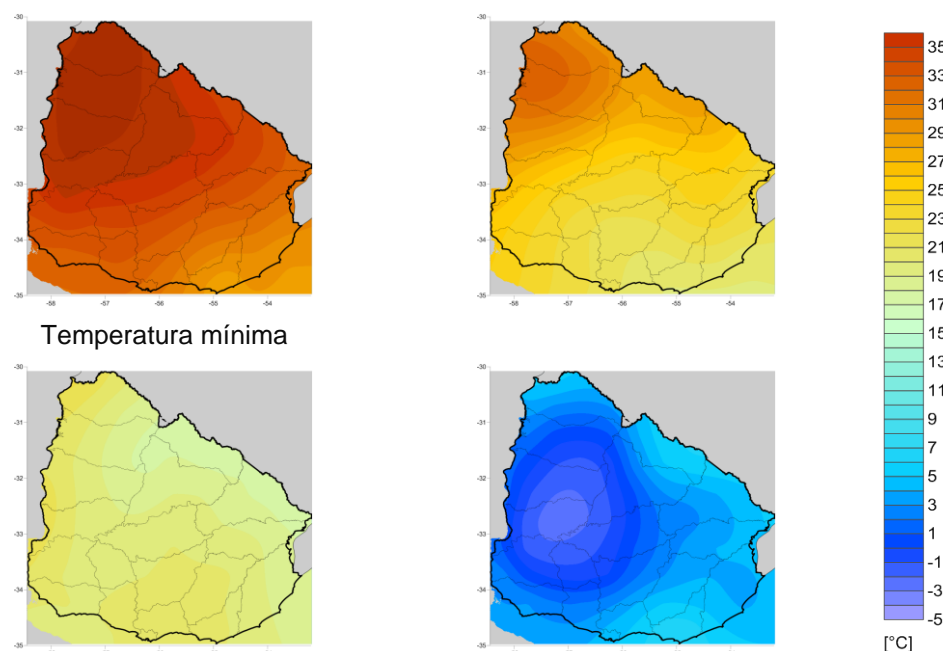


Figura 160. Comparación de mapas de valores diarios de parámetros climáticos para dos días simulados: precipitación total diaria, temperatura media, máxima y mínima de referencia total diaria.

### 1.28.1.2 Series diarias de evapotranspiración

El cálculo de la evapotranspiración de referencia, que también es un parámetro de entrada al modelo de vulnerabilidad, se hace siguiendo el Manual *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements* (Allen et al., 1998), que es considerado un método estándar y es el más recomendado. Incluso es el método que la FAO tiene implementado en su modelo AquaCrop. En la Figura 161 **Error! Reference source not found.** se muestra el mapa de evapotranspiración de referencia total diaria para dos días aleatorios calculados a partir de las series de temperatura diaria generadas estocásticamente. Para cada unidad cultivada se determina el valor evapotranspiración a partir de su ubicación.

La evapotranspiración de referencia es el potencial de evaporación de la atmósfera; se calcula en una superficie vegetal uniforme sin restricciones hídricas. La superficie de referencia es un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, una resistencia superficial fija de 70 s/m y un albedo de 0,23 (Allen et al., 1998); es independiente del tipo de cultivo, de su desarrollo o de su manejo. Al no tener

restricciones en el contenido de agua, las características del suelo tampoco influyen en su resultado.

Es importante señalar que la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) es diferente a la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ( $ET_c$ ) y a la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ( $ET_{c\ aj}$ ). La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ( $ET_c$ ) considera características particulares según el tipo de cultivo que se esté evaluando (resistencia del cultivo, albedo, anatomía de las hojas, características de los estomas, propiedades aerodinámicas, entre otros). Por otro lado, la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ( $ET_{c\ aj}$ ) considera cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes a condiciones óptimas de suelo y agua, presencia de enfermedades o fertilización que implican cambios en el rendimiento de la cosecha.

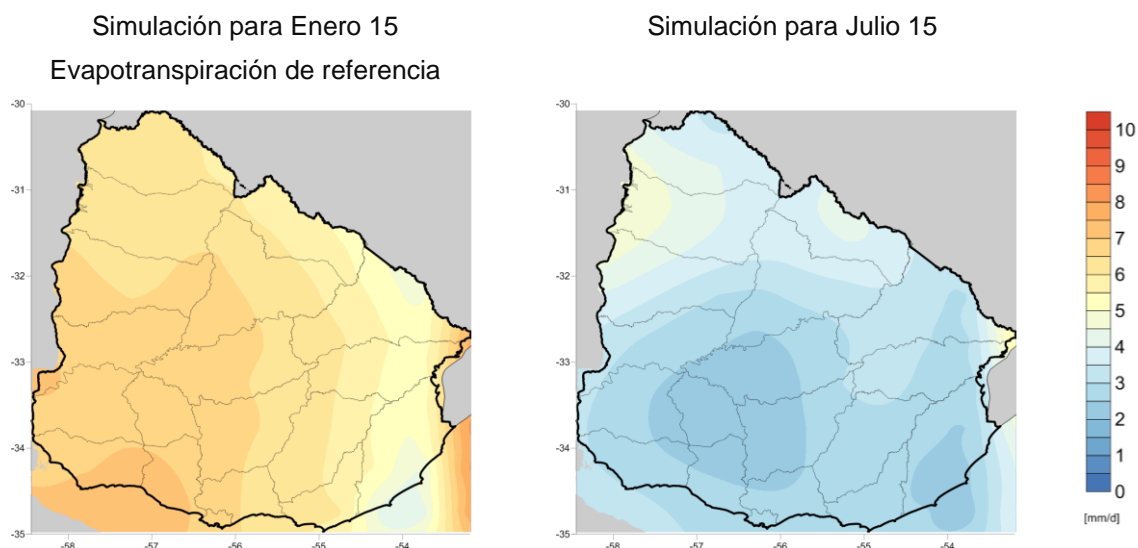


Figura 161. Comparación de mapas de valores diarios de evapotranspiración para dos días simulados.

### 1.28.1.3 Concentración de dióxido de carbono

Como se mencionó en la Sección 1.26.1, el modelo de AquaCrop considera el efecto de la concentración de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) en la atmósfera por ser parte del metabolismo de las plantas. En el proceso de fotosíntesis, las plantas capturan el  $CO_2$  de la atmósfera y lo reducen a carbono, que usan como sustento (junto con hidrógeno y oxígeno). Bajo concentraciones más altas de  $CO_2$ , la mayoría de las especies de plantas

muestran un incremento en su tasa de fotosíntesis, mayor crecimiento, menor uso de agua y menor concentración de nitrógeno y proteínas en sus tejidos (Taub, 2010). Entonces, con el aumento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, el efecto en la agricultura será en términos de producción que puede ser mayor y calidad del producto que puede disminuir.

La información requerida para proveer al modelo de respuesta de cultivos es el valor de la concentración anual media de CO<sub>2</sub> medida en partes por millón (ppm). Para el caso de la evaluación prospectiva de riesgo, se utiliza la concentración de CO<sub>2</sub> media anual para 2017 que es 404.99 ppm<sup>19</sup> (Dlugokencky & Tans, 2018). Para la evaluación de los modelos con cambio climático se usan las proyecciones de concentración de dióxido de carbono según el escenario de RCP (trayectoria representativa de concentración) analizada, según las proyecciones del IPCC, como se muestra en la Figura 162 **Error! Reference source not found..**

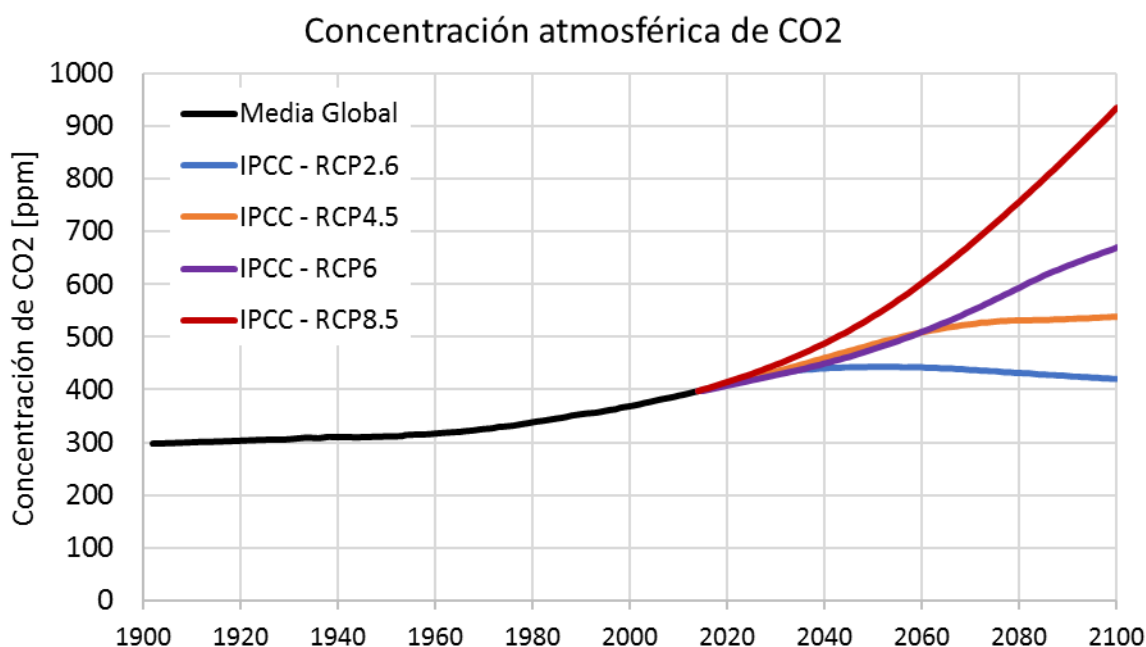


Figura 162. Concentraciones medias anuales de CO<sub>2</sub> proyectadas según escenarios del Assessment Report 5 del IPCC (Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IPCC AR5 (Dlugokencky & Tans, 2018)).

<sup>19</sup> Ver [ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/co2\\_annmean\\_gl.txt](ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/co2_annmean_gl.txt)

En el Anexo A. 7 se presentan los valores de concentración de dióxido de carbono media global para la serie medida entre 1980 y 2017 y las proyecciones hasta el año 2100. Los valores de concentración media global de CO<sub>2</sub> en la atmósfera son medidos en el observatorio Mauna Loa en Hawái por su ubicación, que asegura un aire puro alejado de fuentes de contaminación (está ubicado en un área remota del Océano Pacífico a una altitud de 3397 msnm). Estudios de clima global y cambio climático prefieren este tipo de mediciones para incluirlos en modelos de circulación, porque reflejan las concentraciones promedio de la atmósfera global.

### **1.28.2 Cultivos: Parámetros agronómicos**

La información de entrada también incluye las variables necesarias para parametrizar cada tipo de cultivo, según los requerimientos del modelo de AquaCrop. Esta información ingresa al modelo en archivos de texto plano, uno para cada tipo de cultivo, manteniendo el orden de la lista de los parámetros. A continuación, se presenta una descripción detallada de los diferentes parámetros y sus unidades. También se incluyen valores por defecto para aquellos parámetros que son independientes del tipo de cultivo o suelo. Para mayor información sobre los parámetros que utilizar Aquacrop se recomienda consultar el manual de usuario y artículos publicados por los autores del modelo (Allen et al., 1998; FAO, 2017; D. Raes, Steduto, Hsiao, & Fereres, 2017; Dirk Raes et al., 2011; Steduto et al., 2012).

#### **1.28.2.1 Tipo de parámetros de cultivos**

Los parámetros de los cultivos utilizados en el modelo de respuesta al agua se clasifican como parámetros conservativos y parámetros no conservativos, como se explica a continuación.

##### **Parámetros conservativos:**

Son aquellos que no sufren variaciones considerables en el tiempo, bajo diferentes condiciones de manejo, por ubicación geográfica o clima. Se supone que no cambian entre tipo de cultivos. Algunos de estos parámetros incluyen los umbrales de estrés y productividad hídrica normalizada de biomasa.

En la

Tabla 35 **Error! Reference source not found.** se muestra la lista de parámetros conservativos que definen las condiciones iniciales del modelo de AquaCrop. Para este estudio el modelo de respuesta del cultivo al agua se limita a evaluar condiciones de estrés hídrico (falta de agua en el desarrollo de la planta, y no incluye procesos de estrés por fertilidad o salinidad del suelo); aunque el modelo de AquaCrop está en capacidad de evaluarlo si la información está disponible. Es por esta razón que los parámetros asociados a la respuesta del cultivo a fertilidad y salinidad del suelo no se consideran en este estudio y el campo de estos parámetros se establece en 25 y -9, respectivamente, para que el modelo reconozca que no se incluyen estas evaluaciones en el momento de ejecutar el análisis. Los demás parámetros incluidos en esta tabla indican al modelo qué tipo de cultivo está evaluando y si la unidad de tiempo del análisis está en términos de días calendario o grados de crecimiento.

En cuanto al tipo de cultivo, se considera que:

- Vegetales de hoja: no se considera la etapa de florecimiento. Incluye cultivos como espinaca o lechuga. En esta categoría se incluyen las pasturas naturales y mejorados.
- Frutales/Granos: Si cuentan con una etapa de florecimiento. Incluye cultivos como el maíz o cítricos.
- Tubérculos y raíces: se considera un periodo de formación de la raíz o tubérculo. Incluye cultivos como la papa.

Tabla 35. Parámetros que definen el modelo de AquaCrop.

Variable	Descripción	Valor
Tipo del cultivo	1: Vegetales de hoja 2: Frutales/Granos 3: Tubérculos y raíces	
Determinación del ciclo de crecimiento	0: Grados crecimiento GDD 1: Días calendario	
Método de siembra	0: Trasplante 1: Siembra directa	
Respuesta de la expansión de la cobertura Respuesta de la expansión máxima de la cobertura Respuesta de la productividad hídrica Respuesta del declive de la cobertura Respuesta del cierre de estomas	Aplica para modelación de la fertilidad del suelo	25 (Si no se considera)



Variable	Descripción	Valor
Conductividad eléctrica del suelo en la que el cultivo empieza a afectarse	Aplica para modelación de la salinidad del suelo	-9 (Si no se considera)
Conductividad eléctrica del suelo en la que el cultivo detiene su desarrollo		

La

Tabla 36 **Error! Reference source not found.** muestra otro conjunto de parámetros que son independientes del tipo de cultivo o método de siembra. Para todos estos parámetros se presentan los valores adoptados por defecto que se aplican en este estudio, según las recomendaciones publicadas por los autores del modelo de AquaCrop, por la FAO e investigadores (Allen et al., 1998; D. Raes, P. Steduto, T. C. Hsiao, 2017; FAO, 2018; Monfreda, Ramankutty, & Foley, 2008).

Tabla 36. Parámetros conservativos de cultivos considerados en este estudio.

Variable	Descripción	Valor
Disminución de factores de agua en suelo se ajusta por ETo	1: Ajuste por ETo	1
Acumulado de ETo durante periodo de estrés a ser excedido antes que se dispare la senescencia	0: No se considera	0
Estrés por fertilidad del suelo considerado para la calibración	Porcentaje [0,100]	50
Máxima extracción de agua en el cuarto superior de la zona radicular	m3/m3/día	0.048
Máxima extracción de agua en el cuarto interior de la zona radicular	m3/m3/día	0.012
Máxima disminución de CGC entre estaciones	-9: No aplica	-9
Número de estaciones en el que se alcanza la máxima disminución de CGC	-9: No aplica	-9
Factor de forma para la disminución del CGC	-9: No aplica	-9
Productividad hídrica normalizada por ETo y CO2 durante formación de cosecha	Porcentaje [0,100]	100 frijol: 90
Desempeño del cultivo bajo concentraciones elevadas de CO2	Porcentaje [0,100]	50
Distorsión de la cobertura por estrés debido a salinidad del suelo	Rango: 0: ninguno a 100: muy fuerte	25
Respuesta calibrada del estrés de estomas por salinidad del suelo	Rango: 0: ninguno a 200: extremo	100

Los valores asignados a los parámetros conservativos del cultivo son aquellos que los autores de la metodología de la FAO recomiendan y se consideran los valores de referencia para aplicar la metodología. Estos son valores que han demostrado buenos resultados en múltiples evaluaciones en el mundo al calibrar los resultados del modelo con mediciones en campo.

### Parámetros específicos y no conservativos:

Son aquellos que requieren un ajuste según tipo de cultivo o condiciones ambientales diferentes a los definidos en la calibración. Estos son los parámetros que se deben conocer para conformar la base de datos de cultivos que mejor se ajusta a las condiciones del área de estudio. Ahora bien, no siempre es posible encontrar información oficial o de fuentes confiables que reporten valores tan específicos, por lo que en caso de no encontrar información específica de cultivos y su adaptación a las condiciones de suelo y ambientales de la región, se hará uso de parámetros reportados en la literatura y publicados por la FAO (Ver <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/en/>).

La Tabla 37 **Error! Reference source not found.** muestra los parámetros específicos del cultivo agrupados por categorías: parámetros afectados por el método de siembra, parámetros fenológicos o parámetros afectados por las condiciones del suelo. Estos mismos parámetros se presentan de forma esquemática en la Figura 163 **Error! Reference source not found.**, en un diagrama que representa la curva del crecimiento en el tiempo, de la cobertura verde de la planta (zona verde) y del sistema radicular (zona anaranjada). En este diagrama se señalan los tiempos para alcanzar cada una de las etapas fenológicas medidas desde el momento de la siembra. También se señalan los valores de crecimiento máximo potencial de la cobertura ( $CC_x$ ) y la profundidad máxima potencial que pueden alcanzar las raíces ( $Z_x$ ).

Tabla 37. Parámetros específicos del cultivo por categoría.

<b>Parámetros afectados por método de siembra y manejo</b>	Método de siembra: Siembra directa o trasplante.
	Densidad de plantas: determina la cobertura inicial ( $CC_0$ ) y máxima ( $CC_x$ )
	Tiempo para alcanzar el 90% de germinación.
<b>Fenología de cultivos</b>	Tiempo para alcanzar la cobertura máxima ( $CC_x$ )
	Tiempo para inicial senescencia
	Tiempo para alcanzar la madurez fisiológica
	Tiempo para el inicio de floración/formación de cosecha
	Duración de la floración
	Profundidad máxima efectiva de zona radicular ( $Z_x$ )

<b>Parámetros afectados por las condiciones del suelo</b>	Tasa de profundización de raíces o tiempo para alcanzar profundidad máxima ( $Z_x$ )
---	--

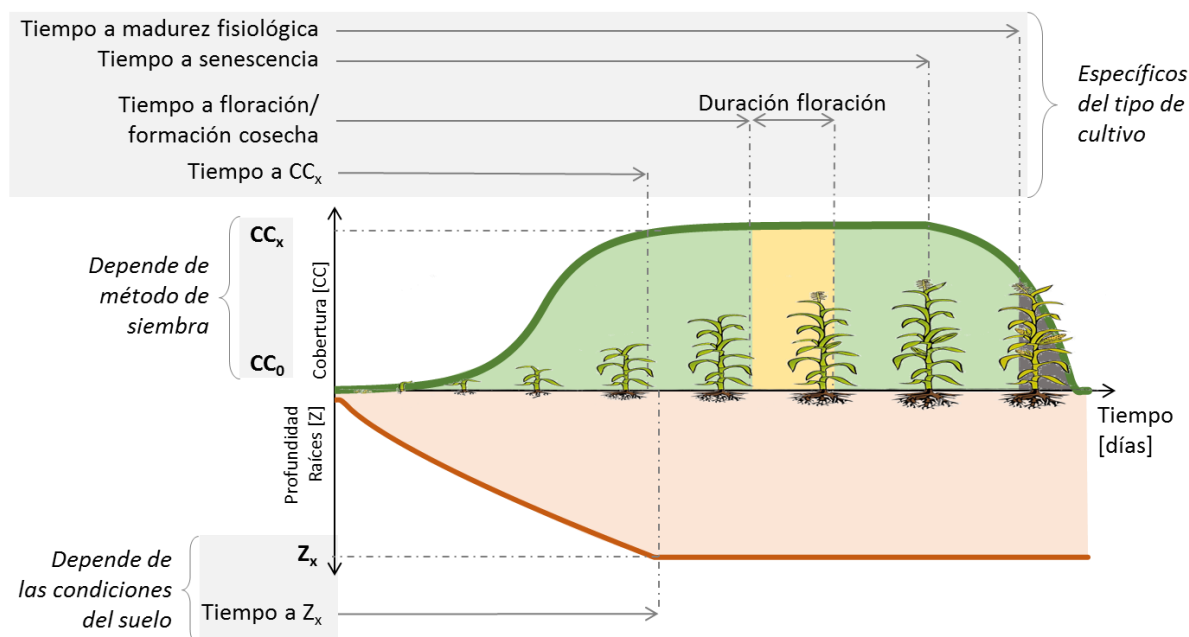


Figura 163. Parámetros de cultivos que dependen del tipo de planta y condiciones ambientales (FAO, 2017).

Otros parámetros específicos del tipo de cultivo se presentan en la Tabla 38. Estos parámetros se deben definir para cada tipo de cultivo que se considera en el análisis de vulnerabilidad. Los tipos de cultivo de interés para el estudio se definen a partir de criterios de seguridad alimentaria, importancia para la economía del país y área sembrada; los cultivos seleccionados para Uruguay se presentan en la Sección 1.20.3.

Tabla 38. Parámetros específicos según tipo de cultivo.

Símbolo	Variable	Descripción
	Producción del cultivo asociada a floración	0: No asociado 1: Asociado
Tbase	Temperatura base, por debajo no crece el cultivo (estrés frío)	en °C
Tupper	Temperatura máxima, por encima no crece el cultivo (estrés calor)	en °C
GDD_lo	Mínimos grados de crecimiento para transpiración completa	en GDD (grado crecimiento)
Do	Plantas por hectárea	# plantas/ha
Ao	Superficie de suelo cubierta por una planta a 90% de germinación	cm <sup>2</sup> /ha
CCx	Cobertura verde máxima	fracción [0,1]
dT.GDD	Duración del ciclo de crecimiento completo	en GDD (grado crecimiento)

Símbolo	Variable	Descripción
d.germinacion	Tiempo desde siembra hasta germinación	-9: Si modelo usa días calendario
d.flor d.flores d.sen d.mad d.Zx	Tiempo desde siembra hasta floración Duración de etapa de floración Tiempo desde siembra hasta inicio de senescencia Tiempo desde siembra hasta madurez Tiempo desde siembra hasta máxima profundidad radicular	En # días calendario o GDD (grado crecimiento) -1: Cultivos permanentes
Zn Zx n	Profundidad de raíces mínima efectiva Profundidad de raíces máxima efectiva Factor de forma para el crecimiento radicular	en metros en metros [-]
Kcbx	Coeficiente del cultivo Factor de disminución de coeficiente del cultivo, como resultado de edad, deficiencia de nitrógeno, etc.	Sin unidades # %/día 0.15 o 0.3
CGC	Coeficiente de crecimiento de la cobertura	En # días calendario o GDD (grado crecimiento)
CDC	Coeficiente de decrecimiento de la cobertura	En # días calendario o GDD (grado crecimiento)
HI <sub>0</sub> dHI	Índice de Cosecha de referencia Aumento potencial del Índice de cosecha	Porcentaje [0,100] Porcentaje [0,100] -9: No aplica
p exp,upper p exp,lower Ks exp,w	Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por expansión de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1] Umbral inferior fracción [0,1] > 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta
p sto	Factor de disminución de agua en suelo para control de estomas	Umbral superior fracción [0,1]
Ks sto	Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por control de estomas	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta
p sen Ks sen	Factor de disminución de agua en suelo para senescencia de la cobertura Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por senescencia de cobertura	Umbral superior fracción [0,1] > 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta
p pol	Factor de disminución de agua en suelo por polinización	Umbral superior fracción [0,1]
	Punto anaerobio en el cual ocurre aireación deficiente	%Vol 0: Arroz 5: Otros cultivos tolerantes a encharcamiento
f cc	Efecto de la cobertura en la reducción de evaporación del suelo en la etapa final	Porcentaje [0,100]
	Exceso de frutas potenciales	Porcentaje [0,100]
d.cos WP*	Tiempo desde floración hasta alcanzar el índice de cosecha Productividad hídrica normalizada por ETo y CO2	# días g/m2

Símbolo	Variable	Descripción
f yield	<p>Coeficiente que describe el impacto positivo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha</p> <p>Coeficiente que describe el impacto negativo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha</p> <p>Incremento máximo permitido de in HI especificado</p>	<p>Cultivo tipo</p> <p>C3: entre 13 y 18</p> <p>C4: entre 28 y 33</p> <p>[-]</p> <p>-9: No aplica</p> <p>[-]</p> <p>-9: No aplica</p> <p>Porcentaje [0,100]</p> <p>-9: No aplica</p>

Los valores de los parámetros no conservativos se determinan a partir de estudios en campo, en los que se evalúan las condiciones de crecimiento de la planta bajo diferentes escenarios de disponibilidad hídrica. Este tipo de ensayos en campo están por fuera del alcance de este proyecto. Por esta razón, para la evaluación de pérdidas en el sector agrícola de Uruguay se utilizan parámetros calibrados y validados por fuentes externas. Algunas fuentes de información global consultadas son:

- **FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación:** Es la organización que fomenta el uso de AquaCrop para evaluar el impacto del ambiente y la gestión de cultivos en la producción de alimentos. Esta organización publica parámetros de diferentes cultivos que han sido previamente utilizados en modelos de AquaCrop en el mundo. Para más información consultar: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/en/>
- **Manual de Usuario AquaCrop (Steduto et al., 2012):** En las Secciones 3.4 y 4.1 de este manual se presentan valores de cultivos parametrizados que han sido usados previamente en modelos de AquaCrop.
- **Artículos académicos publicados en revistas especializadas y tesis de investigación** (Monfreda et al., 2008; Poppe, 2016)

Para el caso específico del país, se consultó el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) que es el ministerio encargado del sector agrícola, así como publicaciones de los centros de investigación en agricultura locales como la revista Plan Agropecuario y gremios de productores. Algunas de estas fuentes consultadas, por producto, se muestra en la Tabla 39 **Error! Reference source not found..**

Tabla 39. Lista de referencias específicas consultadas por cultivo.

Producto	Referencia
Arroz	(Bonilla, 2013; MGAP, 2015)

<b>Cebada</b>	(Esteban Hoffman et al., 2015; MGAP, Mesa Nacional de Trigo, Mesa Tecnológica de Oleaginosas, & Mesa Nacional de Entidades de Cebada Cervejera, 2013; Romero, n.d.)
<b>Cítricos</b>	(Bruno et al., 2003; INIA Salto Grande, 2009; Micheloud, 2012; Otero, 2004)
<b>Maíz</b>	(INIA, Facultad de Agronomía, JUNAGRA, & AHPI, 2004; MGAP, 2014; Paullier, Arboleda, Campelo, Maeso, & Giménez, 2014)
<b>Papa</b>	(Vilaró, Pereira, & Rodríguez, 2004)
<b>Pastos</b>	(Bartaburu, 2010; Berretta, 2003; Carámbula, 1993; Irigoyen, 2009, 2011; Stricevic, Simic, Kusvuran, & Cosic, 2017)
<b>Soja</b>	(Gasó & Nuñez, 2015; INIA, n.d.)
<b>Sorgo</b>	(Carrasco, Zamora, & Melin, 2011; Mari, 2003)
<b>Trigo</b>	(Esteban Hoffman, Fernández, Baeten, & Cadenazzil, 2009; MGAP, 2017)
<b>Viñedo</b>	(Almanza Merchán, 2011; FAO, 2018; Spínola, 1997; Vyenieli, 2014; Williams & Ayars, 2005)

En los Anexos se presentan los parámetros para cada uno de los productos de interés para este estudio y que son utilizados para implementar el módulo de vulnerabilidad. Estos productos se seleccionaron a partir de los criterios presentados en la Sección 1.20.3.

Tabla 40. Parámetros de cultivos y su participación en la base de datos de elementos expuestos por país.

<b>Producto</b>	<b>Anexo</b>
<b>Arroz</b>	A. 10.3.1
<b>Cebada</b>	A. 10.3.2
<b>Cítricos</b>	A. 10.3.3
<b>Maíz</b>	A. 10.3.4
<b>Pastos</b>	A. 10.3.5
<b>Soja</b>	A. 10.3.6
<b>Sorgo</b>	A. 10.3.7
<b>Trigo</b>	A. 10.3.8
<b>Viñedo</b>	A. 10.3.9

### **Pastos**

El caso de los pastos se debe tener una consideración especial para vincular la producción de pasturas naturales con el rendimiento de producción en el sector pecuario. La metodología que se presenta considera que el principal sustento de la ganadería extensiva en Uruguay son los pastizales naturales (Bresciano et al., 2014) y por

limitaciones en el alcance del modelo de vulnerabilidad se diferentes clases de pasturas se agrupan en una única clase.

El rendimiento de producción de pastos se relaciona con el rendimiento de productos pecuarios a partir de la presupuestación forrajera (Irigoyen, 2011). Esta metodología considera que el agua es un elemento básico para el sostenimiento del animal, por lo que no se considera limitaciones en el suministro de agua. Sin embargo, la pérdida de rendimiento de productos pecuarios está relacionada con una menor ingesta de nutrientes presentes en el alimento o materia seca. Entonces una reducción en la cantidad de alimento que obtiene cada animal se relaciona con una reducción en el crecimiento del animal y menor producción de productos tipo leche, lácteos o lana. Es por esto por lo que el modelo de vulnerabilidad de pastos incluye parámetros adicionales que permiten relacionar la producción de pastura natural con el crecimiento de los animales. Los parámetros adicionales se presentan a continuación:

Tabla 41. Parámetros específicos para asociar la producción de pasturas con la producción pecuaria.

<b>Símbolo</b>	<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>
%MS	Contenido promedio de materia seca del alimento	Fracción [0,1]
CON	Consumo voluntario de MS para el peso promedio del stock animal	Kg MS/día
Ut	Porcentaje de utilización de la pastura – Proporción del alimento ofrecido que es efectivamente consumido	Fracción [0,1]
R_Pastura	Producción de pastura por unidad de área	Kg MS/ha
Stock_an	Número promedio de animales por hectárea de pastura	# animales/ha

#### **1.28.2.2 Comparación preliminar de los modelos de vulnerabilidad de cultivos**

A partir de los modelos de vulnerabilidad de cultivos, presentados en el Anexo A. 10, se hizo una prueba preliminar para evaluar la respuesta de los cultivos al agua. En este caso, se evaluaron los cultivos de algunos cereales (soja, cebada, trigo y sorgo) y cítricos considerando que fueron sembrados bajo las mismas condiciones de clima (se usaron las mismas series de precipitación, temperatura y evapotranspiración de referencia) y en el mismo tipo de suelo, asumiendo que estaba en condiciones de capacidad de campo al inicio de la modelación. Con los resultados de estas pruebas se puede identificar el papel que juegan los parámetros de cultivos de entrada, para diferenciar los diferentes

cultivos y sus particulares ciclos de desarrollo. A continuación, se muestran los efectos de modelar estos cultivos en términos del crecimiento de la cobertura, la generación de biomasa, la variación del índice de cosecha con el tiempo, el aumento de la cosecha y la relación entre la productividad de agua y el tipo de cultivo.

### **Coeficientes Cobertura**

La Figura 164 muestra el ciclo de crecimiento y decaimiento de la cobertura para los cereales de cebada, trigo y sorgo (izquierda) y para la soja y los cítricos (derecha), y la

Tabla 42Figura 164. Desarrollo la cobertura verde con el tiempo. A la derecha, comparación entre cultivos de cereales de ciclo corto y a la izquierda la comparación entre cultivos de ciclo corto y ciclo largo.

Tabla 42. Parámetros que definen el crecimiento de la cobertura y sus valores para cebada, trigo, sorgo y cítricos.

presenta los parámetros que definen la curva de crecimiento y decaimiento, y muestra los valores para los cultivos incluidos en la comparación. De estas gráficas se puede ver como para los cereales, cada producto tiene una forma de crecimiento de la cobertura diferente. La cebada tiene el ciclo más corto y la cobertura máxima es menor; mientras que para el sorgo su ciclo dura casi 5 meses y su cobertura máxima supera a la de la cebada. Por el contrario, el trigo tiene un crecimiento más lento, asociado con un valor de CGC menor. En el caso de los cítricos, al ser un cultivo permanente, el modelo considera que alcanza la cobertura máxima rápidamente y lo mantienen por el tiempo que requiere el producto en generar un fruto. La soja alcanza valores de fracción de cobertura verde más altos que los cítricos, y el corte recto de la curva a la derecha indica que la planta es removida completamente del sitio una vez alcanza el momento de maduración.



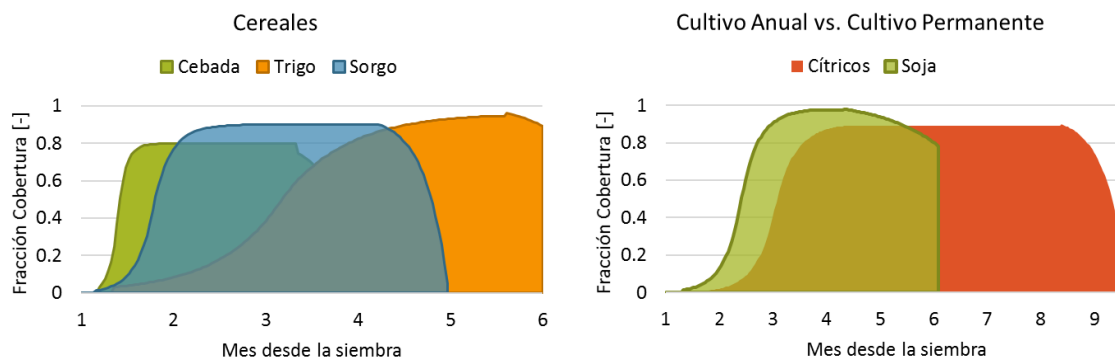


Figura 164. Desarrollo la cobertura verde con el tiempo. A la derecha, comparación entre cultivos de cereales de ciclo corto y a la izquierda la comparación entre cultivos de ciclo corto y ciclo largo.

Tabla 42. Parámetros que definen el crecimiento de la cobertura y sus valores para cebada, trigo, sorgo y cítricos.

Símbolo	Variable	Descripción	Cebada	Trigo	Sorgo	Cítricos
CGC	Coeficiente de crecimiento de la cobertura	1/día	0.1241	0.04901	0.1815	0.10417
CDC	Coeficiente de decrecimiento de la cobertura	1/día	0.07697	0.07179	0.117	0.08
CCx	Cobertura verde máxima	fracción [0,1]	0.8	0.96	0.9	0.9

## Generación de Biomasa

La Figura 165 **Error! Reference source not found.** muestra el ciclo de desarrollo de la biomasa para los cereales (izquierda) y para la soja y los cítricos (derecha). La generación de biomasa depende de su valor de productividad hídrica  $WP^*$ , que indica cuántos gramos de biomasa acumula la planta por cada milímetro de agua que transpira.

Para cultivos de ciclo corto como el sorgo, la producción de biomasa es mayor que para la cebada o el trigo. Eso indica que en general las plantas de sorgo crecen de forma acelerada, ya que tienen mayor tamaño que alcanzan en un tiempo menor, comparado con otros cereales como el trigo. El corte vertical a la derecha de las curvas de todos los cultivos indica que la planta ha llegado a su punto de madurez y se retira completamente del área, por lo que la biomasa alcanza el valor de cero. Para el caso de los cultivos permanentes como los cítricos, el corte a la derecha de las curvas indica que

el árbol pierde biomasa por la pérdida de hojas asociado con el inicio de la época invernal.

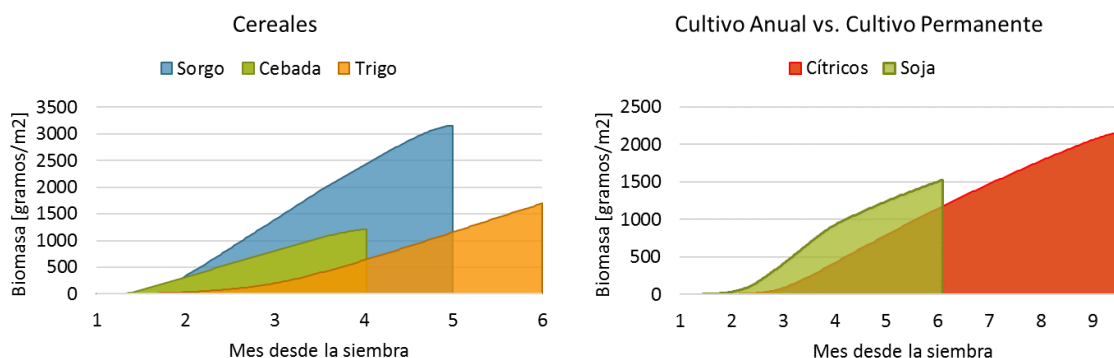


Figura 165. Desarrollo la biomasa con el tiempo. A la derecha, comparación entre cultivos de ciclo corto y a la izquierda la comparación entre cultivos de ciclo corto y ciclo largo.

### Desarrollo Índice de Cosecha (HI)

En cuanto al desarrollo del Índice de Cosecha, el incremento del índice hasta alcanzar el valor de referencia ( $HI_0$ ) se muestra en la Figura 166. A la derecha, comparación entre cultivos de ciclo corto y a la izquierda la comparación entre cultivos de ciclo corto y ciclo largo.

Tabla 43. Parámetros que definen el desarrollo del Índice de Cosecha y sus valores para maíz, frijol y palma.

. La Tabla 43 **Error! Reference source not found.** incluye los parámetros que definen este índice. Por ejemplo, como se puede ver en la tabla, el índice de cosecha de referencia para los cereales es muy parecido (valores entre 39 y 42 para  $HI_0$ ), sin embargo en la gráfica se muestra que ocurren en momentos diferentes por las diferencias en la temporalidad del ciclo fenológico de estos tres cultivos. El trigo tiene un ciclo más largo, es decir le toma más días desde la siembra hasta alcanzar la madurez, comparado con la cebada y el sorgo.

Por otro lado, al comparar el desarrollo del HI de la soja y los cítricos, se puede ver como los cítricos requieren casi de tres veces de tiempo para llegar al índice de cosecha de referencia, comparado con la soja, lo que genera que la pendiente de la curva sea menor para cítricos.

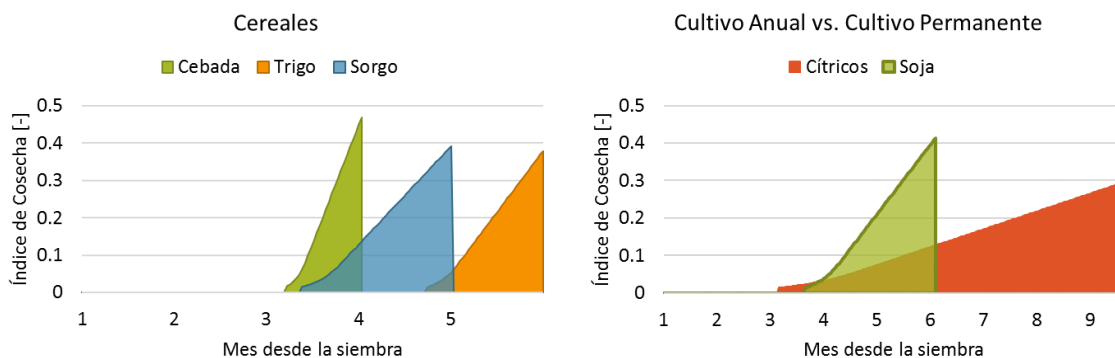


Figura 166. Desarrollo del Índice de Cosecha con el tiempo. A la derecha, comparación entre cultivos de ciclo corto y a la izquierda la comparación entre cultivos de ciclo corto y ciclo largo.

Tabla 43. Parámetros que definen el desarrollo del Índice de Cosecha y sus valores para maíz, frijol y palma.

Símbolo	Variable	Descripción	Cebada	Trigo	Sorgo	Soja	Cítricos
Hlo	Índice de Cosecha de referencia	Porcentaje [0,100]	49	39	40	<b>42</b>	30

## Rendimiento

El rendimiento del cultivo depende directamente de la biomasa acumulada y el Índice de Cosecha. En la Figura 167 **Error! Reference source not found.** se muestra cómo va incrementando el rendimiento del cultivo con el tiempo, medido desde el momento de la siembra. En el caso los cereales, el máximo rendimiento se alcanza en menos de cinco meses para sorgo y cebada y en menos de seis meses para trigo y soja, mientras que cultivos de ciclo largo toman hasta 10 meses como es el caso de los cítricos. El corte vertical a la derecha de las curvas de todos los cultivos indica que la planta ha llegado a su punto de madurez y se retira completamente del área, por lo que el rendimiento alcanza el valor de cero.

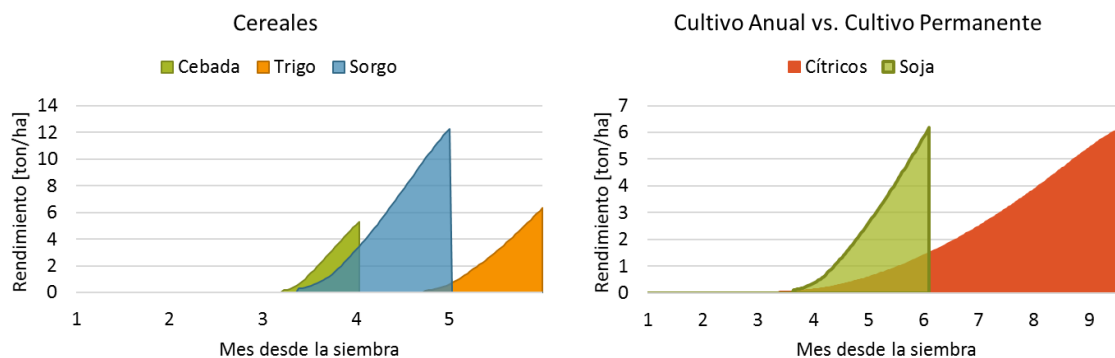


Figura 167. Acumulación de rendimiento con el tiempo. A la derecha, comparación entre cultivos de ciclo corto y a la izquierda la comparación entre cultivos de ciclo corto y ciclo largo.

Estos valores de rendimiento son de referencia, son el resultado de una prueba bajo supuestos de condiciones climáticas y del suelo que no necesariamente se ajustan a las condiciones en el área de estudio. No se deben tomar como valores reales para el caso de Uruguay. En el modelo de evaluación de riesgo, el rendimiento se calibra con los valores reportados en censos o encuestas nacionales agropecuarias para representar de forma precisa las condiciones locales del estudio.

### Relación entre productividad hídrica y transpiración

La relación entre la biomasa producida y el agua consumida por un cultivo específico se conoce como la productividad del agua (WP), la cual tiende a ser lineal para una condición climática dada. Al normalizar este valor (WP\*), a partir de la concentración de CO<sub>2</sub> y la demanda evaporativa de la atmósfera, se puede aplicar el modelo en diferentes regiones o zonas climáticas. Diferentes estudios reportados en el Manual de Usuario de AquaCrop (D. Raes et al., 2017) han mostrado como a partir de los valores de WP\* se pueden agrupar los cultivos en dos clases principales. La clasificación corresponde a la distinción hecha para cultivos tipo C4 con valores de WP entre 30 y 35 g/m<sup>2</sup> y cultivos tipo C3 con valores de WP\* entre 15 y 20 g/m<sup>2</sup>. La clasificación de plantas tipo C3 y C4 está relacionada con los procesos de fotosíntesis. Las plantas tipo C3, como el arroz y la soja, deben transpirar mayor cantidad de agua para aumentar su biomasa, ya que el proceso de fotosíntesis es menos eficiente que en las plantas tipo C4 como son el maíz y el sorgo. Es así como plantas tipo C4 son más eficientes en condiciones climáticas secas y de alta temperatura.

La Figura 168 **Error! Reference source not found.** muestra la relación lineal que hay entre la biomasa acumulada (eje vertical) y la transpiración acumulada del cultivo (eje horizontal). La gráfica permite ver el comportamiento conservativo del parámetro  $WP^*$  y diferencias cultivos como el maíz y el sorgo, tipo C4, de cultivos como la soja y el arroz, tipo C3.

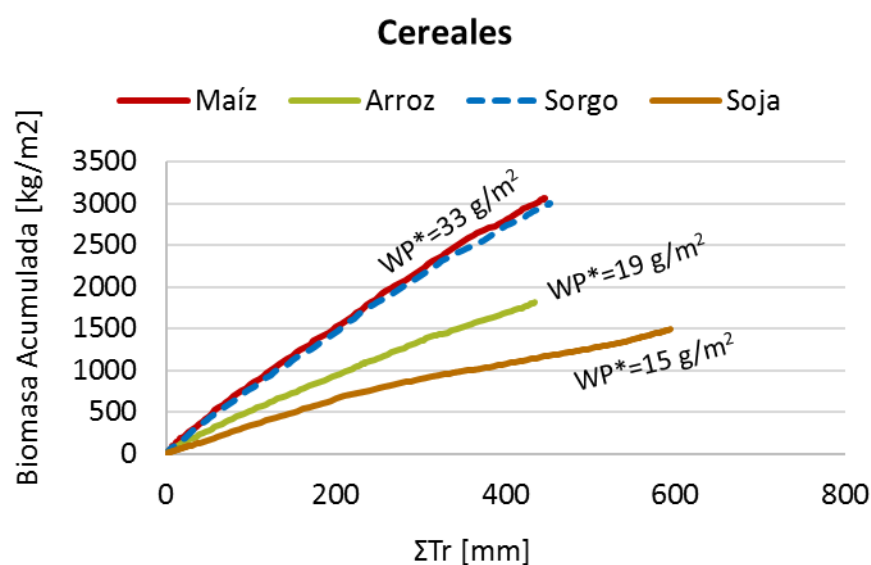


Figura 168. Relación entre biomasa acumulada y transpiración acumulada, por cultivo. Se resalta el valor de la  $WP^*$  o productividad hídrica normalizada por  $ETo$  y  $CO_2$ .

Es importante notar que los resultados presentados en esta sección son resultados preliminares para un caso hipotético de modelo de vulnerabilidad en condiciones climáticas y de propiedades del suelo iguales para todos los cultivos, que no necesariamente corresponden a las condiciones locales de Uruguay. Estos resultados no son producto de la evaluación de riesgo completa.

### 1.28.3 Suelo: Características agronómicas

La información de entrada al modelo de vulnerabilidad de cultivos incluye las variables necesarias para parametrizar el suelo, que sirve de soporte para el crecimiento de las plantas. El modelo que se aplica en este estudio toma un volumen de referencia del suelo, en la que se ubica la zona radicular, y estima su balance hídrico para determinar la cantidad de agua que tiene disponible la planta. Con esto se evalúan las interacciones

suelo-planta-atmósfera que permiten modelar el crecimiento de cultivos y su rendimiento. La información requerida incluye el tipo de suelo, textura, perfil en profundidad y nivel freático. Para el cálculo de la escorrentía se calcula el número de curva a partir de la información de uso y tipo de suelo. Este procedimiento se muestra de forma esquemática en la Figura 169 **Error! Reference source not found.**, en la que también se indica el tipo de información de entrada y los resultados.

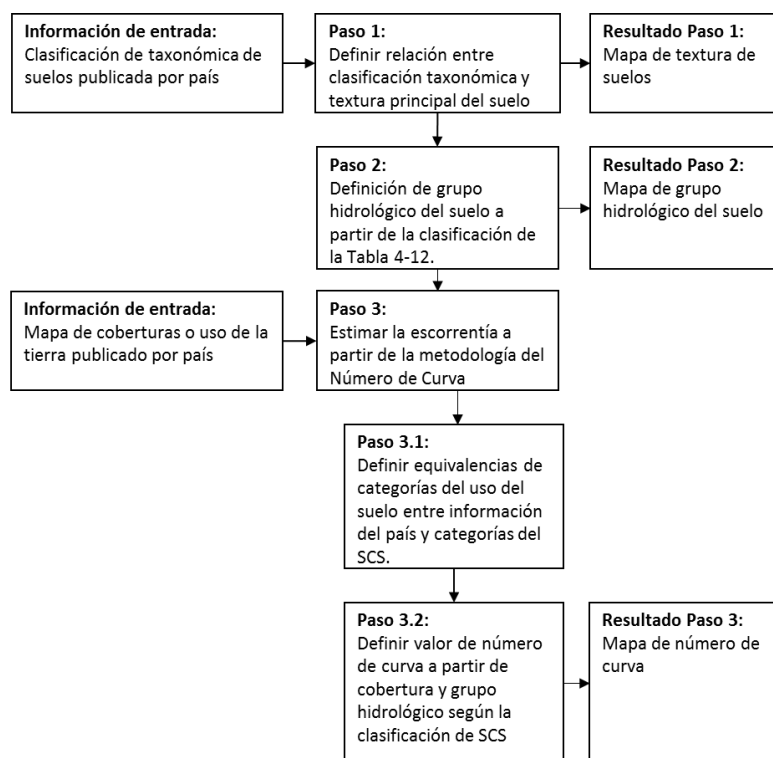


Figura 169. Esquema metodología aplicada para determinar características del suelo necesarias en el módulo de vulnerabilidad para evaluar riesgo por sequía en el sector agrícola.

El modelo de respuesta de cultivos al agua para Uruguay es un modelo a escala nacional. Al ser una resolución de trabajo gruesa, en el modelo de vulnerabilidad no se incluyen parámetros de afectación local como presencia de múltiples horizontes de suelo o variaciones en el nivel freático. En el caso del perfil de suelo se supone un perfil homogéneo para la profundidad máxima que alcanzan las raíces según cultivo, no se considera la presencia de barreras físicas que limiten la profundización de las raíces.

### 1.28.3.1 Almacenamiento y disponibilidad de agua en el suelo

Los parámetros necesarios para estimar la capacidad de suelo de almacenar y retener agua se muestran en la Figura 170 **Error! Reference source not found.**. Dependiendo del nivel del agua en el suelo se define la disponibilidad del agua para la planta. Es así como después de una lluvia, el agua puede quedar en exceso de la cual una fracción se convierte en escorrentía y la otra fracción se infiltra por fuerzas gravitacionales. Esta agua infiltrada pasa de un nivel de saturación (en el cual no hay contenido de aire en el suelo) al nivel que tiene el suelo de retener el agua o capacidad de campo (Field capacity en inglés). A medida que el agua se infiltra en el suelo, las plantas pierden la posibilidad de usar el agua, hasta llegar al punto de marchitamiento definitivo, en el que la planta no cuenta con agua disponible y no se puede recuperar. El rango de agua disponible para la planta se ubica entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento, en el que el suelo es capaz de retener el agua. Entonces el modelo de vulnerabilidad evalúa si el contenido de agua en el suelo se ubica dentro del rango de agua disponible que tiene la planta y ajusta el desarrollo del cultivo según las condiciones de estrés hídrico que sufra.

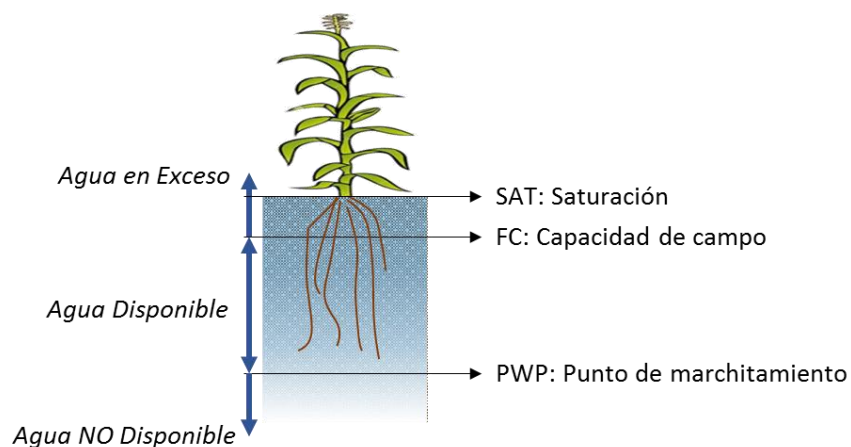


Figura 170. Esquema de la disponibilidad del agua en el suelo.

La capacidad de retener el agua en el suelo depende en gran medida de su textura. Como el suelo es un medio poroso, dependiendo del tamaño de los espacios entre partículas, el suelo está en capacidad de almacenar más o menos agua. El tamaño de las partículas del suelo, o textura se define según su contenido de arena, limo y arcilla. Es así como suelos arenosos tienen poca capacidad de retener agua por su estructura

de partículas gruesas con macroporos<sup>20</sup>. De otro lado suelos de partículas finas retienen el agua en microporos y tienen una mayor capacidad de campo (Sheppard & Hoyle, 2018). Esta relación se puede ver de forma esquemática en la Figura 171 en la que se presenta el porcentaje de volumen de agua para la capacidad de campo según la textura de suelo, desde arenas con partículas gruesas hasta arcilla de partículas finas. En la figura se puede ver como la capacidad campo o de retener agua en el suelo aumenta a medida que las partículas de suelo son más finas. Sin embargo, para que el agua sea disponible para las plantas, el contenido de agua en el suelo debe mantenerse sobre el punto de marchitamiento. Como se ve en la figura, el punto de marchitamiento también aumenta en la medida que la textura del suelo es más fina. Esto se debe a que, aunque hay mayor volumen de agua retenida del suelo fino, la fuerza que se ejerce para mantener el agua en los microporos es muy alta y las plantas no tienen capacidad de succionarla. Entonces, para propósitos agrícolas es preferible cultivar en suelos de textura media, tipo francos o franco limosos, que tienen una alta disponibilidad de agua para las plantas.

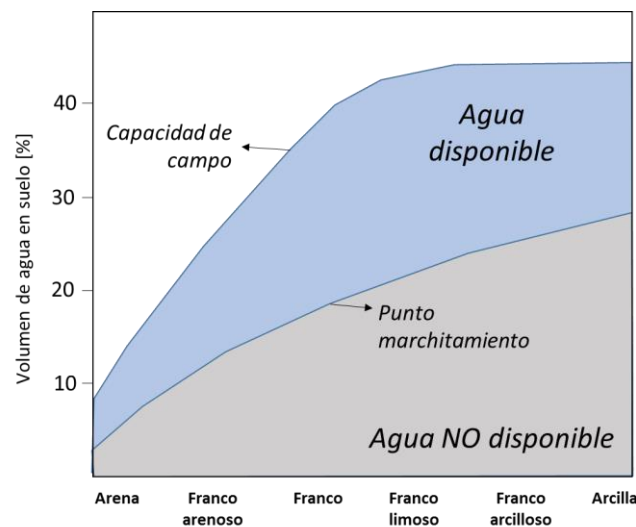


Figura 171. Esquema de retención de agua según tipo de suelo (Sheppard & Hoyle, 2018).

Los valores de contenido volumétrico de agua en suelo para condiciones de saturación, capacidad de campo y punto de marchitamiento se determinan a partir de

<sup>20</sup> Se entiende como poro el espacio entre partículas de suelo. En suelos de partículas gruesas como las arenas, los poros son de mayor tamaño que en suelos de partículas finas como las arcillas.



evaluaciones locales. El modelo AquaCrop suministra valores por defecto para estos parámetros, en caso de no contar con información del área de interés (Dirk Raes et al., 2011). Estos valores se utilizan en este estudio y se presentan en la Tabla 44.

Tabla 44. Valores de parámetros de contenido volumétrico de agua por defecto en el modelo AquaCrop.

Tipo suelo	SAT [%vol]	FC [%vol]	PWP [%vol]
arena	36	13	6
arenoso franco	38	16	8
franco arenoso	41	22	10
franco	46	31	15
franco limoso	46	33	13
limoso	43	33	9
franco arcillo arenoso	47	32	20
franco arcilloso	50	39	23
franco arcillo limoso	52	44	23
arcillo arenoso	50	39	27
arcillo limoso	54	50	32
arcilla	55	54	39
impermeable	0.5	0.3	0.1

La determinación de la textura del suelo se hace a partir de las fracciones de arcilla, limo y arenas que lo compongan. Esta clasificación por tipo que se muestra en la tabla anterior se obtiene a partir del triángulo de clase textural del suelo, publicado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, USDA por sus siglas en inglés. Este esquema se presenta en la Figura 172 **Error! Reference source not found..**

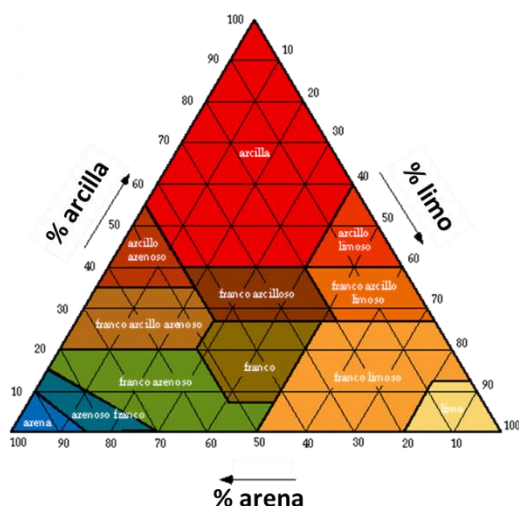


Figura 172. Triángulo de clases texturales básicas de suelos según el tamaño de partículas. Elaborado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA).

En el caso de Uruguay, era importante establecer la textura del suelo en todas las regiones de cada país para poder asociarlas a los valores por defecto del contenido volumétrico de agua de la Tabla 44.

A partir de la información consignada en la Carta de Reconocimiento de Suelos de Uruguay de Escala 1:1,000,000 disponible en la página web del MGAP<sup>21</sup>, se obtuvo información sobre las unidades cartográficas existentes en el territorio uruguayo que permiten clasificar el suelo según su textura y de igual forma según el grupo hidrológico. El mapa de suelos según la unidad cartográfica se muestra en la Figura 173.

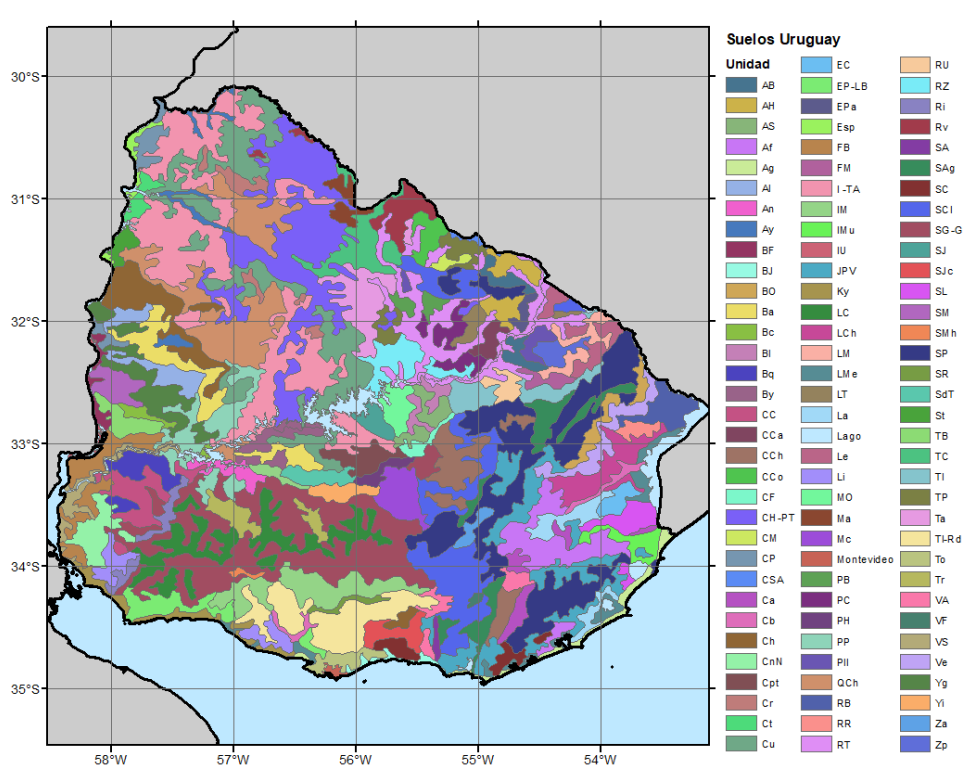


Figura 173. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay (MGAP, 2018).

La Tabla 45 muestra la relación entre las unidades cartográficas incluidas en el mapa publicado por el MGAP y las texturas de suelo utilizadas en este informe (Tabla 44 **Error! Reference source not found.**). La asignación de textura se hizo a partir del documento Clasificación Hidrológica de los Suelos del Uruguay (Durán, 1997) en el cual

<sup>21</sup> <http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/descarga/carta-de-reconocimiento-de-suelos-del-uruguay-escala-11000000>

se encuentra para cada unidad cartográfica la textura correspondiente a los horizontes A, B y C. Para efectos del presente análisis se toma en cuenta únicamente la textura del horizonte A del suelo, que corresponde al más superficial.

Tabla 45. Relación unidad cartográfica con textura de suelo para Uruguay. (Durán, 1997).

CÓD.	TEXTURA	CÓD.	TEXTURA
Af	Franco limoso	Le	Arcillo limoso
Al	Franco arenoso	Li	Franco arcillo limoso
An	Franco arcillo arenoso	LM	Franco arcilloso
Ag	Franco arenoso	MO	Franco arcillo arenoso
AS	Franco arenoso	Ma	Franco arcillo limoso
Ay	Arcilla	Mc	Franco
AB	Franco	PII	Arcilla
AH	Franco arcilloso	PC	Arcillo limoso
Ba	Franco arenoso	PP	Franco arcillo arenoso
BJ	Arena	PB	Franco arcillo limoso
BF	Arcillo limoso	PH	Franco arcillo arenoso
BO	Franco	QCh	Arcillo limoso
By	Arcilla	RU	Franco arcillo limoso
Bc	Arcilla	RR	Franco limoso
Bq	Franco arcilloso	RZ	Franco arcillo arenoso
Bl	Franco	RB	Franco limoso
CnN	Franco arcillo arenoso	RT	Franco arenoso
CF	Franco arenoso	Ri	Franco arcilloso
Ca	Franco arenoso	Rv	Arena
Cpt	Franco arcilloso	St	Franco arenoso
Cb	Arcillo limoso	SC	Franco limoso
CCh	Franco arcilloso	SG-G	Franco
Ch	Franco arcillo arenoso	SJc	Franco limoso
CP	Franco arenoso	SJ	Franco arenoso
Ct	Franco arcilloso	SL	Franco limoso
Cr	Franco arcillo limoso	SM	Franco arcilloso
CCa	Franco arcillo limoso	SR	Franco arcillo limoso
CCo	Franco arenoso	SCI	Franco arenoso
CC	Franco arcillo arenoso	SdT	Franco arenoso
CH-PT	Franco arcilloso	SAg	Franco arenoso
CM	Franco arenoso	SA	Franco arcilloso
CSA	Franco arcilloso	SMh	Franco arenoso
Cu	Franco arcilloso	SP	Franco
EP-LB	Franco arcilloso	Ta	Franco arenoso
EC	Franco limoso	TI-Rd	Franco arcillo limoso
EPa	Franco arcilloso	To	Franco limoso
Esp	Franco arcillo arenoso	TB	Franco arenoso
FM	Arcillo limoso	TC	Franco arenoso
FB	Franco arcillo limoso	TI	Franco arenoso
IMu	Franco arcillo limoso	TP	Franco arcilloso
IM	Franco arcilloso	Tr	Franco arcilloso

CÓD.	TEXTURA	CÓD.	TEXTURA
IU	Franco limoso	VA	Franco
I-TA	Franco arcillo limoso	VF	Franco arcillo limoso
JPV	Franco	Ve	Franco
Ky	Franco limoso	VS	Franco arcilloso
LC	Franco arcilloso	Yi	Franco arcillo arenoso
LCh	Franco limoso	Yg	Franco arcilloso
LMe	Franco arenoso	Zp	Franco arenoso
LT	Franco arenoso	Za	Franco arcillo limoso
La	Franco limoso		

Luego de relacionar el mapa de la Figura 173 y los valores de reclasificación de la Tabla 45Error! Reference source not found., se obtuvo el mapa de texturas de suelo para Uruguay que se muestra en la Figura 174Error! Reference source not found..

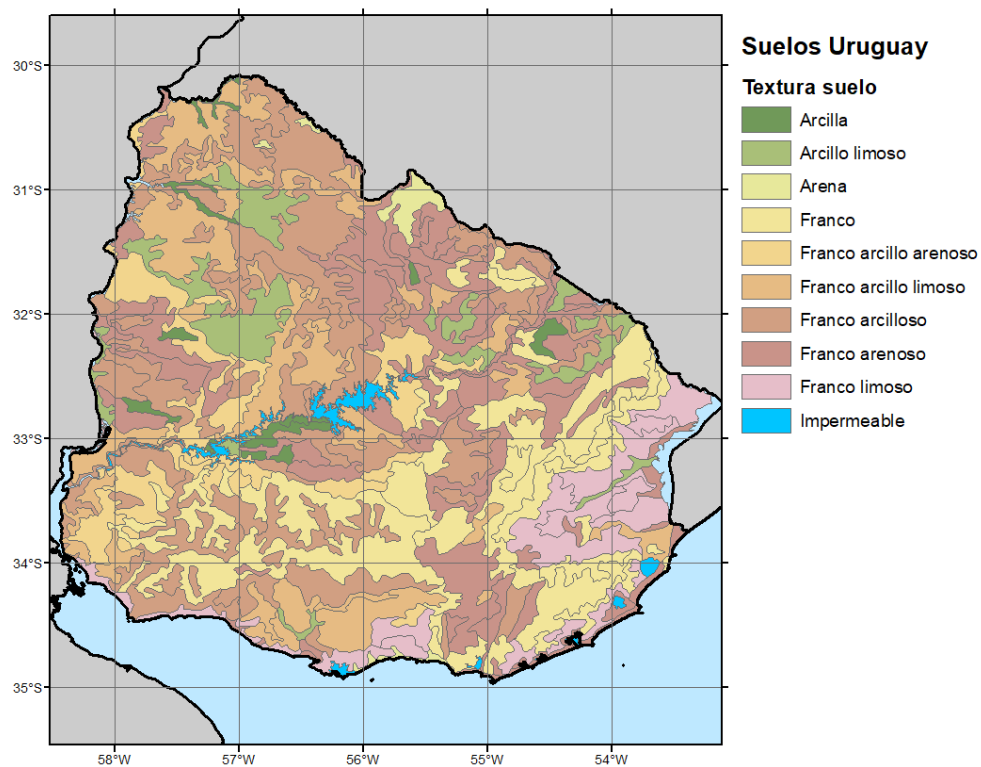


Figura 174. Mapa de textura de suelos para Uruguay.

### 1.28.3.2 Estimación de la escorrentía

Dentro del balance hídrico en el volumen de control del suelo se debe considerar tanto los flujos de entrada (precipitación, irrigación, capilaridad) como los flujos de salida (escorrentía, evapotranspiración y percolación profunda), y con esto estimar la cantidad de agua almacenada y disponible para la planta. Para calcular el caudal de escorrentía

se requiere asignar valores a la conductividad hidráulica saturada y el número de curva (o factor de escurrimiento) definido por el Soil Conservation Service de los Estados Unidos, que es la metodología seleccionada para determinar los volúmenes de escorrentía.

La conductividad hidráulica saturada (Ksat) determina el drenaje interno del perfil de suelo, las pérdidas por percolación profunda y la cantidad de agua infiltrada en la zona radicular, y la escorrentía superficial después de la lluvia (Dirk Raes et al., 2011). En caso de no contar con información detallada del área de análisis, el modelo AquaCrop suministra valores por defecto de la conductividad hidráulica saturada para cada tipo de textura de suelo, estos valores recomendados se muestran en la Tabla 46.

Tabla 46. Valores de parámetros hidrológicos del suelo por defecto en el modelo AquaCrop (Dirk Raes et al., 2011).

Tipo suelo	Ksat [mm/d]	Grupo hidrológico
arena	3000	A
arenoso franco	2200	A
franco arenoso	1200	A
franco	500	B
franco limoso	575	B
limoso	500	B
franco arcillo arenoso	225	C
franco arcilloso	125	C
franco arcillo limoso	150	C
arcillo arenoso	35	D
arcillo limoso	100	D
arcilla	35	D
impermeable	0	D

En esta tabla también se presenta el grupo hidrológico del suelo que indica la capacidad de infiltración del suelo. Más información sobre cada grupo hidrológico del suelo se presenta en la Tabla 47.

Tabla 47. Capacidad de infiltración según grupo hidrológico del suelo (Fuente: Soil Conservation Service, 1986, Dirk Raes et al., 2011).

Grupo hidrológico del suelo	Infiltración cuando están muy húmedos	Características
A	Rápida	Alta capacidad de infiltración > 76 mm/h
B	Moderada	Capacidad de infiltración 76-38 mm/h
C	Lenta	Capacidad de infiltración 36-13 mm/h
D	Muy Lenta	Capacidad de infiltración < 13 mm/h

El factor de escurrimiento o número de curva es un indicador global de la cantidad de agua que será absorbida o transpirada por los suelos superficiales. Se obtiene como función del uso de la tierra, la cobertura vegetal y las condiciones de infiltración y transpiración del suelo superficial. La metodología del US Soil Conservation Service consiste en calcular el agua perdida por escorrentía (RO) a partir de la precipitación (P) y el agua que se alcanza a infiltrar antes que ocurra el escurrimiento ( $I_a$ ). Eso se hace a partir del potencial máximo que tiene el suelo de retención de agua (S) que se calcula en función del número de curva (CN). Siguiendo las ecuaciones Ec. 0-7 y Ec. 0-8 se procede a calcular la escorrentía:

$$RO = \frac{[P - I_a]^2}{P + S - I_a} \quad \text{Ec. 0-7}$$

$$S = 254 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad \text{Ec. 0-8}$$

Según recomendaciones de los autores de AquaCrop (D. Raes et al., 2017), se considera que  $I_a = 0.05S$ . Esta condición está implementada en el modelo por defecto.

La estimación del número de curva se hace a escala nacional, a partir de la información consignada en el mapa de Cobertura del Suelo del año 2015, y la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay con la ayuda del Manual de Diseño y Construcción de Pequeñas Presas. (MVOTMA, 2011) que contiene los grupos hidrológicos del suelo para todas las unidades cartográficas del territorio uruguayo. La Tabla 48 **Error! Reference source not found.** muestra la relación entre las unidades cartográficas incluidas en el mapa publicado por el MGAP y los grupos hidrológicos del suelo utilizados en este informe para la determinar el número de curva. En aquellos casos dónde se asignaban grupos hidrológicos duales en el documento, se seleccionó la segunda opción que corresponde a la condición natural del suelo.

Tabla 48. Relación unidad cartográfica con grupo hidrológico de suelo para Uruguay. (MVOTMA, 2011).

CÓD.	GRUPO DOC.	GRUPO ASIGNADO	CÓD.	GRUPO DOC.	GRUPO ASIGNADO
Af	C	C	Le	D	D
Al	C/D	D	Li	C	C
An	B	B	LM	C	C
Ag	A/D	D	MO	C	C

CÓD.	GRUPO DOC.	GRUPO ASIGNADO	CÓD.	GRUPO DOC.	GRUPO ASIGNADO
AS	C	C	Ma	C	C
Ay	D	D	Mc	D	D
AB	C	C	Pll	C/D	D
AH	C	C	PC	D	D
Ba	B	B	PP	B	B
BJ	A	A	PB	D	D
BF	D	D	PH	C	C
BO	C	C	QCh	D	D
By	C	C	RU	C	C
Bc	D	D	RR	D	D
Bq	C	C	RZ	B/C	C
Bl	C	C	RB	D	D
CnN	D	D	RT	D	D
CF	B/D	D	Ri	D	D
Ca	B	B	Rv	B	B
Cpt	D	D	St	D	D
Cb	C	C	SC	C	C
CCh	B	B	SG-G	B	B
Ch	B	B	SJc	C	C
CP	C	C	SJ	C	C
Ct	A	A	SL	D	D
Cr	D	D	SM	C	C
CCa	C	C	SR	D	D
CCo	C	C	SCI	B	B
CC	C/D	D	SdT	B/C	C
CH-PT	D	D	SAg	D	D
CM	C	C	SA	B	B
CSA	C	C	SMh	B	B
Cu	D	D	SP	B/C	C
EP-LB	C	C	Ta	C	C
EC	D	D	TI-Rd	C/D	D
EPa	C	C	To	C	C
Esp	C	C	TB	C	C
FM	C	C	TC	B/C	C
FB	C	C	TI	B	B
IMu	D	D	TP	B/C	C
IM	C	C	Tr	C/D	D
IU	D	D	VA	C	C
I-TA	D	D	VF	C	C
JPV	C	C	Ve	D	D
Ky	C/D	D	VS	C	C
LC	C/D	D	Yi	B/C	C
LCh	D	D	Yg	C	C
LMe	D	D	Zp	C	C
LT	B	B	Za	C	C
La	D	D			

Haciendo uso de la Tabla 102 que presenta los valores de CN usados para las diferentes coberturas y grupo hidrológico del suelo existentes (Soil Conservation Service, 1986) se obtiene el mapa de número de curva de escurrimiento teniendo en cuenta una condición de humedad de suelo antecedente intermedia.

Tabla 49. Valores de CN para diferentes coberturas (usos de la tierra) y tipos de suelo.

DESCRIPCIÓN DE LA COBERTURA			TIPO DE SUELO			
Cobertura del suelo	Tratamiento	Condición hidrológica	A	B	C	D
Descanso (sin cultivo)	Suelo descubierto		77	86	91	94
Cultivos en surcos	Surcos rectos	Buena	67	78	85	89
Cereales	Surcos rectos		63	75	83	87
Condición hidrológica / Características			A	B	C	D
Cobertura del suelo						
Pastizal	Aceptable		49	69	79	84
Combinación bosques y pastizales	Buena		32	58	72	79
Combinación bosques y pastizales	Aceptable		43	65	76	82
Bosques	Buena		30	55	70	77
Superficie impermeable	Impermeable		100	100	100	100
Distrito urbano	Comercio y negocios		89	92	94	95
Distrito residencial (por tamaño de lote)	1/8 acre		77	85	90	92
Distrito residencial (por tamaño de lote)	1 acre		51	68	79	84

Los resultados de reclasificación de uso de suelos (según categorías del Soil Conservation Service) y del número de curva para Uruguay se presentan a continuación. Las equivalencias entre categorías de uso del suelo se presentan en la Tabla 50.

Tabla 50. Equivalencias entre categorías de cobertura del suelo del mapa del MVOTMA y categorías de uso de suelo del Soil Conservation Service para Uruguay.

Cobertura del suelo de la República de Uruguay, Año 2015	Categorías de uso de suelo
Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, MVOTMA	Soil Conservation Service
Aguas Artificiales	Superficie impermeable - Impermeable
Aguas Naturales	Superficie impermeable - Impermeable
Arbustos	Combinación bosques y pastizales - Aceptable
Área Natural inundable	Superficie impermeable - Impermeable
Área Urbana	Distrito residencial. 1/8 acre
Áreas Desnudas	Descanso (sin cultivo)
Áreas Urbanas Dispersas	Distrito residencial. 1 acre
Canteras, Areneras, Minas a Cielo Abierto	Superficie impermeable - Impermeable
Cultivos > 4-5 ha	Cultivos en surcos rectos - Buena
Cultivos Regados y de Secano < 4-5 ha	Cultivos en surcos rectos - Buena
Equipamiento Urbano	Distrito urbano – Comercio y negocios



<b>Cobertura del suelo de la República de Uruguay, Año 2015</b>	<b>Categorías de uso de suelo</b>
<b>Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, MVOTMA</b>	<b>Soil Conservation Service</b>
Frutales	Cultivos en surcos rectos - Buena
Herbáceo Natural	Pastizal - Aceptable
Monte Nativo	Bosques - Buena
Palmares	Cultivos en surcos rectos - Buena
Plantación Forestal	Combinación bosques y pastizales - Buena

La Figura 175 muestra el mapa de coberturas ajustado a las categorías de la tabla anterior. En la Figura 176 se presentan los resultados para el número de curva según lo consignado en la Tabla 102.

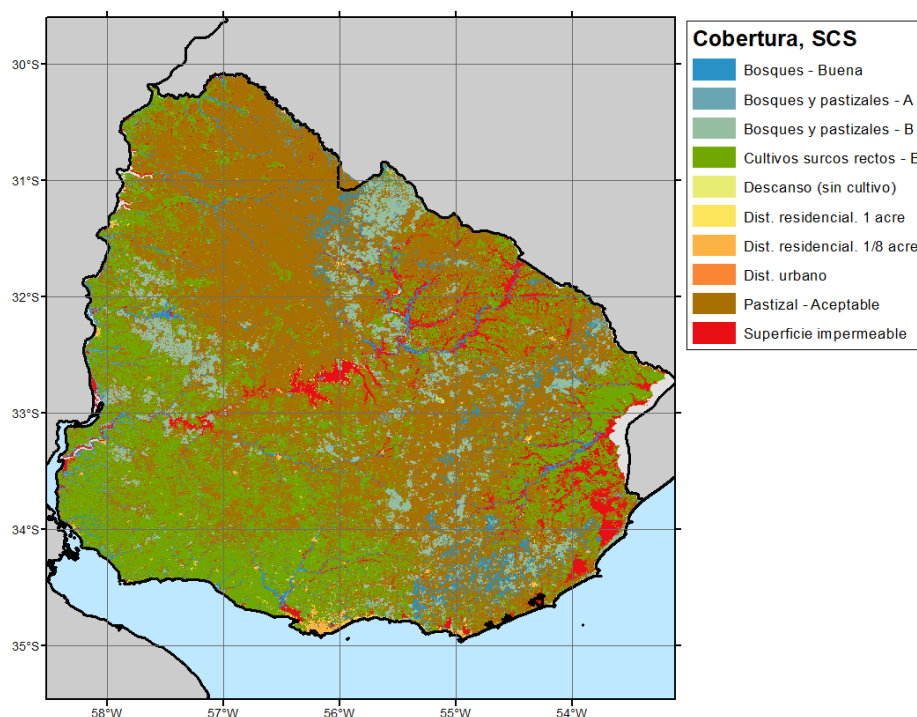


Figura 175. Mapa de cobertura de suelos de Uruguay con clasificación del SCS.

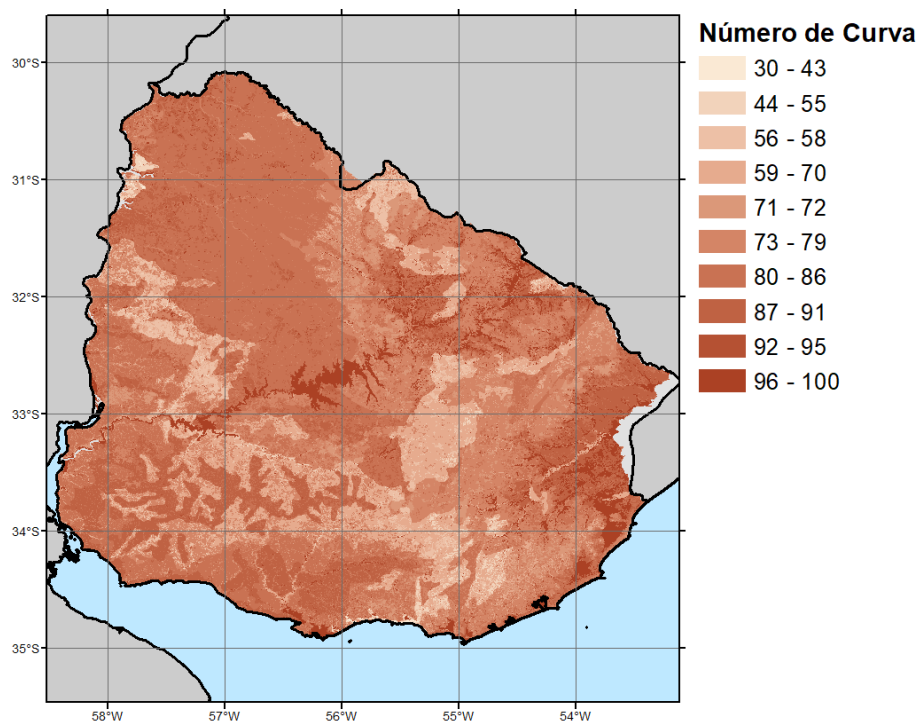


Figura 176. Mapa de número de curva para Uruguay.

### 1.28.3.3 Parámetros de suelos usados en modelación

#### Parámetros conservativos:

Son aquellos que no sufren variaciones considerables en el tiempo, bajo diferentes condiciones de manejo, por ubicación geográfica o clima. Se supone que no cambian entre tipo de suelos. En la Tabla 51 **Error! Reference source not found.** se muestra la lista de parámetros conservativos que definen las propiedades del suelo para el modelo de AquaCrop. Se presentan los valores por defecto utilizados en el caso de no tener información más detallada para incluir en el modelo.

Tabla 51. Parámetros para el suelo que definen el modelo de AquaCrop.

Campo	Descripción	Valor por defecto	Unidad
EvapZsurf	Espesor de la capa evaporativa del suelo superficial que está en contacto directo con la atmósfera (m)	0.04	[m]
EvapZmin	Mínimo espesor de la capa evaporativa completa del suelo	0.15	[m]
EvapZmax	Máximo espesor de la capa evaporativa completa del suelo	0.3	[m]

Campo	Descripción	Valor por defecto	Unidad
Kex	Coeficiente de evaporación máxima del suelo	1.1	[-]
fevap	Factor de forma que describe la reducción en la evaporación con la disminución del contenido de agua en la capa superficial del suelo	4	[-]
fWrelExp	Contenido relativo de agua en la capa superficial del suelo en la cual la profundidad de la capa evaporativa se expande	0.4	[-]
fwcc	Coeficiente que representa la reducción de la evaporación en el suelo por el efecto de protección de las hojas secas caídas	50	[-]
AdjREW	Define si el valor de REW (agua evaporable) se define por el usuario	0	[-]
REW	Valor definido por el usuario de agua evaporable (solo se usa si AdjREW es 1	0	[mm]
AdjCN	Define si el valor de número de curva (CN) se ajusta diariamente según las condiciones de humedad del suelo.	1	[-]
zCN	Espesor de la capa de suelo que se usa para calcular el contenido de humedad del suelo para ajustar el CN	0.3	[m]
zGerm	Espesor de la capa de suelo que se usa para calcular el contenido de humedad del suelo y determinar si puede ocurrir la germinación.	0.3	[m]
zRes	Profundidad de una capa restrictiva del suelo que pueda inhibir el crecimiento de las raíces.	-999	[-]
fshapecr	Factor de forma que describe el efecto de nivel freático superficial en el contenido de agua	16	[-]
Thickness	Usamos un espesor dependiendo del tipo de suelo	Ver Figura 177	[cm]
NumComp	Número de compartimientos en lo que se divide el espesor total del suelo para hacer cálculos de flujo de agua	10	[-]

*Criterios de selección del parámetro por defecto:*

1. Estos parámetros han sido calibrados en estudios previos que utilizan la metodología de la FAO de respuesta de cultivos al agua implementada en el programa AquaCrop. Una lista amplia de estos estudios en los que se ha aplicado la metodología de AquaCrop puede ser consultada en la siguiente página web: <http://www.fao.org/aquacrop/applications/es/> .

2. Para el alcance de este estudio se considera que el valor de volumen de agua evaporable no está disponible para ser incluido en el modelo, por lo que los valores asignados a estos parámetros (AdjREW y REW) son igual a cero, para evitar que el usuario deba ingresar un valor. La metodología de la FAO incluye otras formas de calcular estos parámetros a partir de la información ingresada por el usuario y no afecta el resultado final del modelo (Para detalles de esta metodología consultar el manual de cálculo de AquaCrop (D. Raes et al., 2017)).

3. Para el objetivo de este estudio se trabaja en escala nacional. se contó con información nacional, presentada en el visualizador Sigras desarrollado por la Unidad GRAS del INIA, de las principales variables físicas y químicas de los horizontes A y B para todos los perfiles de las unidades cartográficas de suelo. La medida de espesor de suelo se obtuvo a partir de dicha fuente de información (INIA-GRAS, 2012). Sin embargo, por ser una resolución gruesa, no es posible incluir parámetros medidos en campo en lo que se refiere a posibles capas restrictivas de suelo que impidan el crecimiento de las raíces o diferencias entre espesor de la capa de suelo, ya que se consideran capas homogéneas de suelo. Estos valores se usan para aplicaciones locales en cultivos pequeños en los que se puedan hacer estudios detallados para conocer las condiciones locales del suelo.

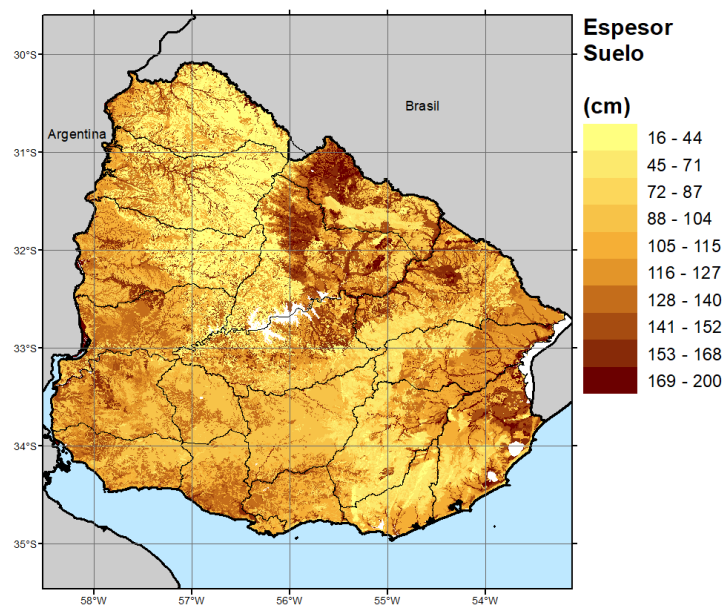


Figura 177. Mapa de espesor del suelo usado en la modelación. Fuente: (INIA-GRAS, 2012).

### Parámetros específicos y no conservativos:

Son aquellos que requieren un ajuste según tipo de suelo, que en el marco de este estudio está asociado a la textura de la capa principal. La Tabla 52 **Error! Reference source not found.** muestra la lista de parámetros que son específicos según el tipo de suelo y su uso. Se incluyen parámetros como el Número de Curva que se utiliza para el cálculo de volúmenes de escurrimiento, así como parámetros de capacidad de almacenamiento de agua.

Tabla 52. Parámetros no conservativos del suelo que definen el modelo de AquaCrop.

Campo	Descripción	Valor por defecto	Unidad
CN	Número de curva	El valor de CN se toma según el mapa por país.	[-]
SAT	Contenido de agua en suelo saturado	Ver Tabla 4-19	[%vol]
FC	Contenido de agua en suelo a capacidad de campo		[%vol]
PWP	Contenido de agua en suelo en punto de marchitamiento		[%vol]
Ksat	Conductividad hidráulica en saturación		[mm/d]
Textura	Descripción del suelo - nombre		[-]
TXT	Código de textura		[-]
InitialWC	Contenido inicial del suelo	Se supone que el suelo está en capacidad de campo	[-]

La Tabla 53 **Error! Reference source not found.** muestra la relación entre el tipo de textura, definido en la Sección 4.3.1, con los parámetros específicos del suelo en relación con el almacenamiento de agua en el suelo y su disponibilidad para las plantas. La categoría *impermeable* hace referencia a zonas urbanas y la categoría *agua* hace referencia a cuerpos de agua tipo lagos o reservorios.

Tabla 53. Relación textura del suelo con parámetros de contenido de agua y grupo hidrológico.

Textura	TXT	SAT [%vol]	FC [%vol]	PWP [%vol]	TAW [%vol]	Ksat [mm/d]	Grupo
Arena	0	36	13	6	70	3000	A
Arenoso franco	1	38	16	8	80	2200	A
Franco arenoso	2	41	22	10	120	1200	A
Franco	3	46	31	15	160	500	B

<b>Textura</b>	<b>TXT</b>	<b>SAT [%vol]</b>	<b>FC [%vol]</b>	<b>PWP [%vol]</b>	<b>TAW [%vol]</b>	<b>Ksat [mm/d]</b>	<b>Grupo</b>
Franco limoso	4	46	33	13	200	575	B
Limoso	5	43	33	9	240	500	B
Franco arcillo arenoso	6	47	32	20	120	225	C
Franco arcilloso	7	50	39	23	160	125	C
Franco arcillo limoso	8	52	44	23	210	150	C
Arcillo arenoso	9	50	39	27	120	35	D
Arcillo limoso	10	54	50	32	180	100	D
Arcilla	11	55	54	39	150	35	D
Impermeable	12	0.5	0.3	0.1	2	0	D
Agua	-1	0.5	0.3	0.1	2	0	D

Con esta información se completan los parámetros de suelo que serán usados en el módulo de vulnerabilidad de la evaluación de riesgo probabilista por sequía en Uruguay.

## VULNERABILIDAD DEL SECTOR PECUARIO A LA SEQUÍA

---

Según la UNISDR, el concepto de vulnerabilidad incluye las condiciones determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos y ambientales, que aumentan la susceptibilidad de un elemento expuesto al impacto de las amenazas (UNISDR, 2015b). Dentro de la metodología propuesta, la vulnerabilidad del sector pecuario evalúa las características fisiológicas de los animales que determinan su respuesta biológica al consumo de alimento. La disponibilidad de alimento se obtiene a partir de la respuesta de pasturas naturales a la disponibilidad de agua, que puede reducirse en condiciones de déficit hídrico. La susceptibilidad de las pasturas a la sequía determina el volumen de materia seca que se ofrece al animal. Por otro lado, la demanda de alimento depende del tipo de animal, su edad, peso, estado fisiológico y condiciones ambientales (temperatura y lluvia). Entonces, la susceptibilidad de los animales a la sequía relaciona la demanda y oferta de alimento, y las pérdidas se determinan a partir de la relación entre el volumen de alimento que dejan de consumir los animales y el alimento que deberían consumir para alcanzar el peso óptimo. La metodología de estimación de riesgo en el sector pecuario se muestra en la Figura 178 **Error! Reference source not found..**

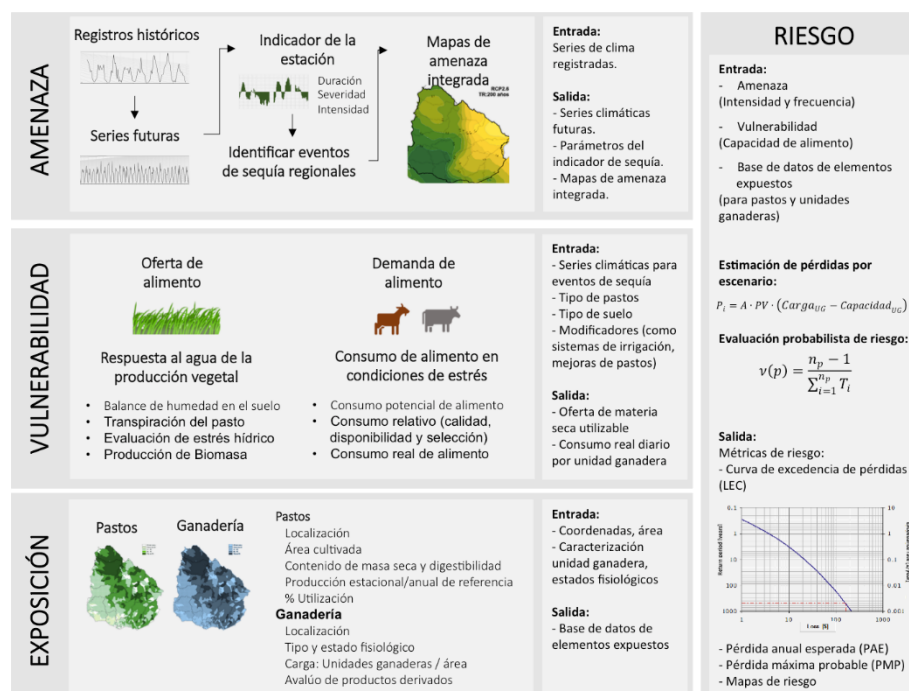


Figura 178. Esquema de módulos de amenaza, vulnerabilidad y exposición para estimar el riesgo por sequía en el sector pecuario.

La modelación de la vulnerabilidad en el sector pecuario se realiza siguiendo la metodología de cálculo aplicada en la Tesis Doctoral de Juan Manuel Soares de Lima “Modelo Bioeconómico para la Evaluación del impacto de la Genética y otras variables sobre la cadena Cárnica Vacuna de Uruguay” (2009) desarrollada a partir de investigaciones hechas en Australia y publicadas en el documento “Requerimiento de Nutrientes de Rumiantes Domesticados” (CSIRO, 2007). La vulnerabilidad se define en términos de la disminución de alimento consumido por los animales durante un período prolongado de escasez de agua, por disminuciones en el rendimiento de producción de materia seca de pastura natural. Dado que se aplica un modelo fisiológico de reducción de ingesta de alimentos, no se emplearán curvas o funciones de vulnerabilidad. La metodología propuesta por este grupo consultor es la única actualmente que utiliza un modelo de esta complejidad en la evaluación probabilista del riesgo de sequía en el sector pecuario.



## 1.29 Rendimiento de pasturas naturales como función del consumo de agua

Siguiendo el modelo de respuesta de cultivos a la disponibilidad de agua propuesto por la FAO, empleado en la evaluación probabilista de riesgo para el sector agrícola de este estudio, se estima el rendimiento de pasturas naturales en condiciones de estrés hídrico. La Figura 179 **Error! Reference source not found.** muestra el esquema de cálculo de la oferta de masa seca utilizable obtenido a partir de la producción de biomasa de la pastura natural. El procedimiento inicia con la definición de las condiciones de clima (en series diarias de precipitación y temperatura) que definen eventos de sequía. También se define el tipo de suelo y tipo de pasto que depende de la localización dentro del país. Para ajustar los resultados a las condiciones locales de clima y producción de pastura como alimento para animales, se debe incluir también un valor de referencia de rendimiento del pasto, siendo ideal que este rendimiento está desagregado por meses o estaciones del año, entendiendo que la producción de pasto es mayor en temporadas de verano y primavera y menor en época de invierno y otoño.

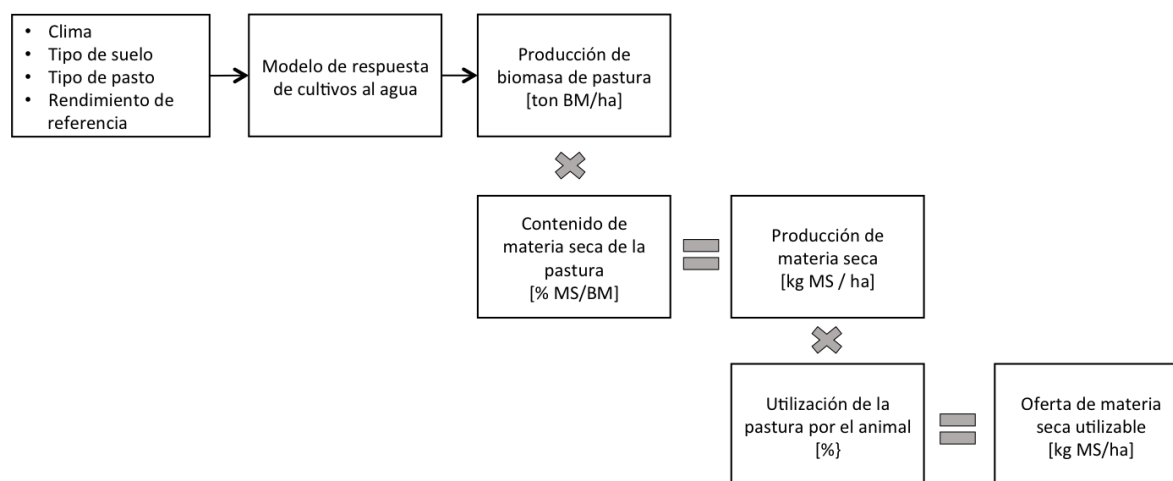


Figura 179. Esquema para el cálculo de la oferta de masa seca utilizable a partir de biomasa de pastura.

Con la información de clima, tipo de pasto y tipo de suelo se puede proceder a estimar la respuesta del pasto a la disponibilidad de agua durante un evento de sequía. Este procedimiento se hace siguiendo la metodología de la FAO descrita en las secciones anteriores para la vulnerabilidad de cultivos a la sequía. El resultado principal

de los modelos de crecimiento y producción del pasto es la cantidad de biomasa que se produce durante el año en el que ocurre un evento de sequía.

Luego, entendiendo que en la materia seca del alimento se concentran sus nutrientes, es necesario conocer el porcentaje de masa seca de la pastura para saber cuál es la proporción total del alimento que es aprovechable por el animal. De acuerdo con datos registrados en el documento de Presupuestación Forrajera (Irigoyen, 2011) el contenido promedio de materia seca algunos alimentos se presentan en la Tabla 54 **Error! Reference source not found..** Con este valor se obtiene la producción total de materia seca en un área determinada durante un evento de sequía.

Tabla 54. Contenido porcentual de materia seca en diferentes tipos de alimento (Fuente: Irigoyen, 2011 p.5).

Alimento	% Materia Seca
Pradera tierna	12 a 14%
Grano	80 a 90%
Heno	80 a 85%
Silo	30 a 35%

Para el caso del presente estudio, se cuenta con información de producción de materia seca para pasturas de las cuatro zonas principales definidas en el país, desagregados por estación del año.

Tabla 55. Producción de materia seca en diferentes pasturas naturales de diferentes zonas en Uruguay (Fuente: OPYPA con base a Berreta (1998), Bemhaja (1991), Carámbula (1987), Formoso (1991), Ayala et. al (1999) y Altesor et al. (2017)).

Región Ganadera	kg de materia seca por año				Total
	Verano	Otoño	Invierno	Primavera	
Basalto	1,217	786	562	1,179	3,744
	33%	21%	15%	32%	
Centro sur (Cristalino)	1,120	770	385	1,225	3,500
	32%	22%	11%	35%	
Noreste	1,879	688	339	1,387	4,300
	44%	16%	8%	32%	
Este	954	598	171	648	2,370
	40%	25%	7%	27%	

Finalmente, al considerar que no todo el alimento que tiene disponible el animal es consumido, se define un porcentaje de utilización de la pradera. La utilización es la proporción del alimento ofrecido que efectivamente es consumido. La pradera no

consumida es el rechazo. Los factores que afectan el porcentaje de utilización de la pradera incluyen la accesibilidad, el método de pastoreo, la estación del año y la pérdida de forraje (por pisoteo, muerte de hojas, deyecciones entre otros). En conclusión, los factores de contenido de biomasa en el pasto y su utilización definen la cantidad de materia seca utilizable que contiene los nutrientes para alimentar los animales. Esta materia seca es la oferta de alimento que tendrá el grupo de animales que se alimenta en cierta área definida según la escala de análisis.

### **1.30 Consumo de pasto como alimento principal de los animales**

La actividad pecuaria busca producir animales sanos que deriven en el aprovechamiento de su carne, piel o leche. La producción pecuaria entonces busca alimentar a los animales de forma que alcance su peso estándar de referencia, según su especie y estado fisiológico, para el momento del beneficio o venta del animal. La producción de ganado por pastoreo está limitada al consumo voluntario de pasturas, razón por la que se debe estimar este consumo voluntario para establecer la cantidad de pastura que se debe ofrecer a los animales. El modelo de vulnerabilidad del sector pecuario de este estudio calcula el consumo real del animal en dos componentes principales: el consumo potencial que depende del animal y el consumo relativo que ofrece la pastura.

#### **1.30.1 Consumo potencial de pasturas**

El consumo potencial de la pastura depende de las características del animal (peso y estado fisiológico), y se define como la cantidad de alimento que puede consumir en condiciones de abundancia y alta calidad. El consumo aumenta a medida que aumenta el peso del animal y si su requerimiento de energía es mayor. Por otro lado, el consumo de alimento puede disminuir en condiciones de estrés térmico o durante una enfermedad. El consumo potencial de pasturas está dado por la siguiente ecuación:

$$I = j A Z(1.7 - Z) CF m p t \quad \text{Ec. 0-1}$$

Donde  $j$  es un factor que depende de la especie del animal (se sigue 0.040 para ovinos y 0.025 para bovinos),  $A$  es el peso óptimo de referencia del animal (kg),  $Z$  es el

tamaño relativo del animal y  $CF$  es un factor de condición del animal que se define en función de su condición relativa al momento de hacer el análisis. Los factores  $m, p, t$  hacen referencia a correcciones del consumo potencial por lactancia, destete y estrés término. A continuación, se describen en detalle los factores que determinan el consumo potencial de pasturas:

**Tamaño del animal y su relación con su peso estándar de referencia (que es lo mismo que el peso óptimo en la madurez).**

El límite máximo de consumo de pasturas está definido por la demanda de energía del animal y su capacidad física para alimentarse, que en términos relativos depende de su tamaño. La curva de crecimiento normal del animal está definida como

$$N = A - (A - B)^{-kTA^{-0.27}} \quad \text{Ec. 0-2}$$

Donde  $N$  es el valor límite del peso normal (kg),  $A$  es el peso óptimo de referencia (kg),  $B$  es el peso del animal al nacer (kg),  $T$  es la edad del animal en meses y  $k$  es un factor específico si se está evaluando un bovino ( $k=0.35$ ) o un ovino ( $k=0.47$ ). A partir del peso normal se puede establecer el tamaño relativo del animal  $Z$  (valor menor a 1) como la relación entre  $N$  y  $A$ .

$$Z = N/A \quad \text{Ec. 0-3}$$

### Condición de animal

La condición del animal  $RC$  hace referencia la relación entre el peso actual del animal  $W$  con respecto al peso normal del animal en esa edad.

$$RC = W/N \quad \text{Ec. 0-4}$$

Valores de  $RC > 1$  indican que el animal supera el peso definido por la curva de crecimiento  $N$ . En ese caso, se debe ajustar el consumo potencial de alimento con el factor  $CF$  como se muestra en la siguiente ecuación. Si  $RC < 1$ , entonces  $CF = 1$ .

$$CF = RC(1.5 - RC)/0.5 \quad \text{Ec. 0-5}$$

### **Estado fisiológico del animal: lactancia**

Literatura especializada ha demostrado que, durante la lactancia, los animales incrementan hasta un 60% su consumo voluntario, para compensar el gasto de energía de producir leche. El aumento del consumo depende del tiempo desde el parto y el número de hijos, y se calcula a partir del factor  $m$  como:

$$m = 1 + aM^b \exp(b(1 - M)) L.D \quad \text{Ec. 0-6}$$

Donde  $M=T/c$  o la relación entre el día de lactancia y el tiempo al máximo consumo potencial,  $L$  define el efecto de la condición del animal en el momento del parto y  $D$  es la relación entre la producción actual y la producción óptima de leche.

### **Estado fisiológico del animal: Destete**

El consumo potencial de pastura de animales en sus primeras semanas de vida depende del desarrollo del rumen más que de su peso. La proporción de alimento proveniente de pastura  $p$  se define como:

$$p = (1 - P_{milk}) / (1 + \exp(-a(T - X))) \quad \text{Ec. 0-7}$$

Donde  $P_{milk}$  es la proporción de leche en la dieta del animal,  $T$  es el número de días desde el nacimiento,  $X$  está definido como 25 para corderos y 60 para terneros y  $a$  es 0.5 para corderos y 0.22 para terneros.

### **Estrés por temperatura**

Durante el pastoreo, los animales pueden sufrir estrés por temperatura del aire que afecta su consumo potencial de alimento. En el caso de bajas temperaturas, se puede evidenciar un aumento de consumo hasta de 1% por cada grado Celsius por debajo de la temperatura crítica definida para cada especie. Por el otro lado, con altas temperaturas, el consumo potencial de alimento puede disminuir hasta 2% por cada grado Celsius por encima de la temperatura máxima de referencia de especies bovinas y 1% por cada grado Celsius para otras especies. El ajuste del consumo por estrés hídrico se define en el término  $t$  de la Ec. 0-1.

### 1.30.2 Consumo relativo de pasturas

El consumo relativo se entiende como la proporción del consumo potencial que se espera el animal consuma en condiciones restringidas, en términos de la disponibilidad y calidad del pasto. Este consumo se mide en una escala entre 0 y 1. El consumo relativo aumenta a medida que el pasto es de mayor calidad y es de fácil acceso. La estimación del consumo relativo de pasturas es compleja por la alta variabilidad de especies que se pueden encontrar en las praderas naturales y la naturaleza selectiva en el momento de tomar el alimento, ya que los animales se alimentan primero de las hojas de mejor calidad y deciden no consumir tallos, hojas muertas o pisadas. A continuación, se describen en detalle los factores que determinan el consumo relativo de pasturas:

#### Calidad de la pastura

La calidad de la pastura se relaciona con su digestibilidad, que es lo mismo que el tiempo que le toma al alimento pasar por el sistema digestivo del animal. Se estima que hay una relación positiva entre la capacidad de digestión del alimento con el consumo voluntario, que por los términos de este modelo se expresa como

$$RQ = 1 - 1.7 * (\max\{(0.8 - (1 - P_{legume})g) - D\}, 0.0) \quad \text{Ec. 0-8}$$

Donde  $RQ$  es la digestibilidad relativa,  $P_{legume}$  es la proporción de leuminosas en la pastura,  $D$  es la digestibilidad de la pastura y  $g$  es un factor del tipo de pasto según su ruta de fotosíntesis (0 para pastos tipo C3 y 0.16 para pastos tipo C4. En el marco de este estudio, los valores de digestibilidad se desagregan por estación anual como se muestra en la **Error! Reference source not found.** Es así como en época de primavera a l ser la temporada de mayor crecimiento de la pastura, las hojas tienen a ser más frescas y tiernas y elevan su nivel de digestibilidad, mientras que en época de verano su digestibilidad es menor por las altas temperaturas que tienden a secar las hojas.

Tabla 56. Porcentaje de digestibilidad de materia seca en pasturas naturales de Uruguay. (Fuente: Carámbula 1991. Cuadro 6).

Verano	Otoño	Invierno	Primavera
50	55	58	62

## Disponibilidad

En el caso de animales de pastoreo, cuando la disponibilidad de alimento es alta, el consumo real depende únicamente de factores relacionados al consumo voluntario y a la calidad de la pastura. Si la cantidad de alimento baja de cierto umbral (del orden de 3 ton de materia seca/ha para ganado bovino), la disponibilidad de alimento disminuye y de manera progresiva, la actividad de pastoreo se vuelve más difícil y requiere mayor energía. En este estudio se relaciona la disponibilidad relativa  $F$  de la pastura con el peso del forraje  $B$ , considerando que cada incremento en el consumo con respecto a peso de pasto es proporcional al apetito insatisfecho bajo esas condiciones de disponibilidad de alimento.

$$\frac{dF}{dB} = 1 - F \quad \text{Ec. 0-9}$$

$$F = 1 - \exp(-aB) \quad \text{Ec. 0-10}$$

Donde  $a$  es la tasa constante, que depende de la estructura de la pastura y del tipo de animal. Según Aguirrezabala y Oficialdegui (1993, citado en Soares de Lima Lapetina, 2009 pg. 96) se estima un valor de  $a = 0.001664$  para el caso de vacunos en Uruguay. Este valor se adopta en este estudio para el caso de bovinos y ovinos al no contar con información adicional.

## Selección

El modelo de consumo de pasturas naturales requiere también incluir el efecto de la ingesta selectiva de pasturas. No se puede considerar que los animales consumen todo lo que tienen disponibles, se debe incluir el efecto de que los animales en el momento de tomar el alimento prefieren hojas vivas sobre las hojas muertas, hojas jóvenes sobre las maduras, y hojas más que tallos. Entonces es importante conocer la proporción de alimento que prefiere los animales, con respecto al total de pastura. En este estudio se aplica la metodología propuesta por Soares de Lima Lapetina (2009 Sección 5.4.2.2 pg. 96) para el contexto uruguayo. Se define una ecuación de índice de selectividad  $IS$  a partir de la disponibilidad del forraje  $B$  (kg MS/ha) y su digestibilidad  $D_{fd}$  (%).

$$IS = \max \{a.Ln(D_{fd} - b) + c + d.B + 1, 1\} \quad \text{Ec. 0-11}$$

Donde  $a = -0.249$ ,  $b = 23.7$ ,  $c = 0.939$ ,  $d = 8.3 \times 10^{-5}$ . Este índice es utilizado como multiplicador de la digestibilidad del forraje disponible  $D_{fd}$  para estimar la digestibilidad del forraje seleccionado  $D_{fs}$

$$D_{fs} = IS.D_{fd} \quad \text{Ec. 0-12}$$

En el caso del cálculo del consumo relativo de pasturas no se considera limitaciones por el contenido de proteína o minerales en la oferta de pastos. Tampoco se considera el efecto de la disponibilidad de agua como factor que mejore la digestibilidad del alimento.

### 1.30.3 Consumo real de pasturas

El consumo real  $C$  (kg MS) es el producto entre el consumo potencial  $I$  y el consumo relativo, que se da en función de la disponibilidad del forraje  $F$ , la calidad relativa  $RQ$  y la selectividad  $IS$ , como se muestra en la siguiente ecuación.

$$C = I * F * RQ * IS \quad \text{Ec. 0-13}$$

### 1.31 Estimación de la pérdida del sector pecuario

La estimación de las pérdidas en el sector pecuario se hace en función de la diferencia entre la carga y la capacidad de sostener animales encada unidad de tierra ganadera. La capacidad de cada unidad de tierra ganadera está dada por la relación entre la oferta de alimento, entendida como la producción de materia seca bajo condiciones de sequía, y la demanda de alimento, entendida bajo el consumo real de materia seca considerando el consumo potencial y relativo de cada tipo de animal. La capacidad es entonces la cantidad de unidades ganaderas que se pueden alimentar en una cierta área y se expresa en número de UG/ha.



$$\begin{aligned}
 \text{Capacidad} &= \frac{\text{Oferta de alimento}}{\text{Demanda de alimento}} \\
 &= \frac{\text{Producción de MS}}{\text{Consumo real de MS por animal}}
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 0-14}$$

La pérdida, en términos económicos, es entonces la diferencia entre la carga actual de la unidad de tierra ganadera y la capacidad de ésta para alimentarlos, que define para cuántos animales falta el alimento en condiciones de sequía. Esta diferencia se multiplica por el avalúo de cada animal, según el sistema productivo (carne, piel o leche) que se esté considerando.

$$\text{Pérdida} = (\text{Carga}_{UTG} - \text{Capacidad}_{UTG}) * \text{Avalúo}_{SP}
 \tag{Ec. 0-15}$$

## EVALUACIÓN PROSPECTIVA DE RIESGO POR SEQUÍA EN URUGUAY

---

En esta sección se presenta el resultado de la evaluación probabilista de riesgo por sequía en el sector agrícola de Uruguay. La estimación cuantitativa del riesgo se hace en términos de pérdidas económicas probables asociadas a la reducción en la producción agrícola durante periodos de estrés hídrico. Los resultados que se presentan a continuación son derivados del modelo de amenaza, la base de datos de exposición y el modelo de vulnerabilidad descrito anteriormente, y son el producto de las suposiciones hechas durante el proceso, que también se han descrito en este informe.

### **Pérdidas por evento**

Antes de presentar los resultados de riesgo para el portafolio completo del país, a continuación, se hace un análisis de los que se entiende como pérdidas por evento asociadas a la reducción en el rendimiento de producción de cultivos. La Figura 180 **Error! Reference source not found.** muestra la comparación del rendimiento alcanzado en el cultivo de soja bajo los efectos de un evento de sequía. El mapa de la izquierda muestra el rendimiento máximo alcanzado en cada unidad de tierra cultivada, que en promedio tiene un valor de 2.6 ton/ha con un máximo de 2.8 ton/ha. El mapa de la derecha muestra el rendimiento óptimo para cada unidad de tierra cultivada, que en el caso de la soja es de 3 ton/ha, que dentro del alcance de este estudio se consideró homogéneo en todas las regiones del país. Entonces, se puede ver cómo el rendimiento potencial no se alcanza durante eventos de déficit hídrico.

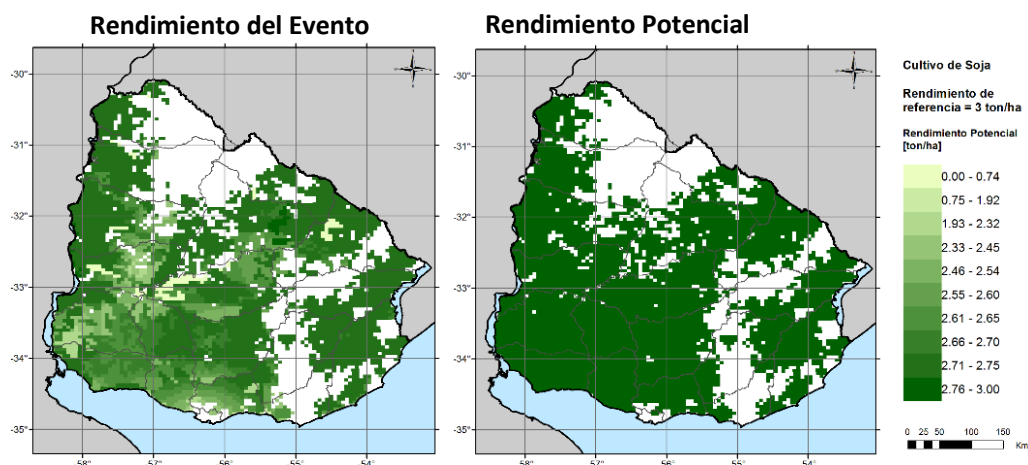


Figura 180. Rendimiento del evento vs. rendimiento potencial para el cultivo de soja en Uruguay.  
(Fuente: Elaboración propia).

Como se menciona en la metodología de evaluación de riesgo por sequía, la pérdida económica en una unidad cultivada, para un escenario específico, se calcula como:

$$P_i = A \cdot PV \cdot (Y_x - Y_i) \quad 0-1$$

En donde  $P_i$  es la pérdida económica para el escenario  $i$ ,  $A$  es el área de la unidad de tierra cultivada,  $PV$  es la valoración económica del cultivo,  $Y_x$  es el rendimiento máximo (calculado bajo condiciones óptimas) y  $Y_i$  es el rendimiento para el escenario  $i$  bajo condiciones de déficit hídrico. Al calcular la pérdida para cada unidad de tierra cultivada del cultivo de soja, se obtiene el mapa de la Figura 181 **Error! Reference source not found.**, en la que se puede ver cuáles son las áreas de mayores pérdidas para ese evento en particular.

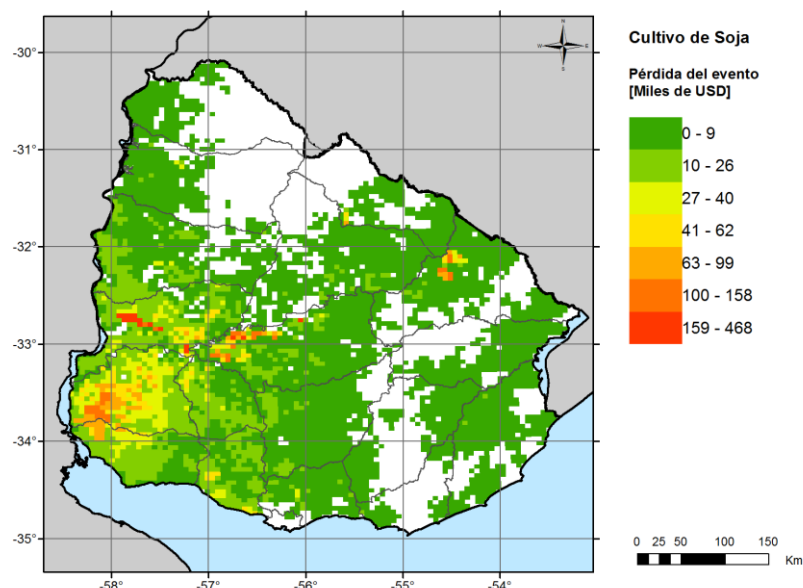


Figura 181. Pérdidas calculadas por unidad de tierra cultivada de soja para un evento de sequía en Uruguay. (Fuente: Elaboración propia).

Para calcular la curva de excedencia de pérdidas (y otras métricas de riesgo) se debe calcular las pérdidas por unidad de tierra cultivada para todos los eventos de sequía y para todos los cultivos incluidos en el portafolio y agregarlas de forma apropiada (considerando que son variables aleatorias). A continuación, se presentan los resultados de la evaluación prospectiva de riesgo para todo el portafolio de cultivos del país.

Primero se presenta una breve descripción de los resultados de pérdida anual esperada (valor anual que debe pagarse para compensar, en el largo plazo, todas las pérdidas futuras) y pérdida máxima probable para Uruguay. Luego, se presenta de forma detallada los resultados de riesgo por sequía, incluyendo los resultados del portafolio de cultivos completo y desagregado, así como los resultados de evaluación de riesgo bajo escenarios de cambios climático. Por último, se presenta un análisis del impacto de la sequía en el sector agrícola, evaluando tanto las pérdidas económicas como las reducciones en producción.

En el marco de este estudio la PAE o pérdida anual esperada se relaciona con pérdidas de flujos económicos que pueden tener un impacto en la economía de un país. Por otro lado, la PPAE o pérdida de producción anual esperada es la relación entre la

PAE y el avalúo del producto. La PPAE está relacionada con la reducción en la cosecha en términos de peso, son toneladas que se dejan de producir bajo condiciones de estrés hídrico y se calcula siguiendo la siguiente ecuación:

$$PPAE = \frac{PAE}{Avalúo} \quad 0-2$$

La PAE está relacionada con impactos económicos mientras que la PPAE tiene mayores impactos en aspectos de seguridad alimentaria, por ejemplo, puede indicar cuál es el déficit de producción que pueda implicar la necesidad de importar alimentos para mantener la disponibilidad de alimento dentro del país. En la Sección 1.12 se hace una breve explicación de la interpretación de estos resultados.

### 1.32 Evaluación de riesgo físico para el sector agrícola de Uruguay

En la Tabla 57 **Error! Reference source not found.** se muestran los resultados principales para la evaluación de riesgo por sequía en la agricultura de Uruguay. El portafolio completo de productos agrícolas está avaluado en \$1,540 millones de dólares, de los cuales el valor de pérdida anual esperada se estima en \$9.3 millones de dólares, lo que equivale al 0.6% de su valor expuesto. Esta tabla también muestra los valores de pérdida máxima probable para 20, 50, 100 y 200 años de periodo de retorno, que varían entre 4.9% y 6% del valor expuesto total. Estos valores de PML se obtienen de la curva que se presenta en la Figura 182 **Error! Reference source not found.**, que relaciona los valores de pérdida con una serie completa de años de periodo de retorno.

Tabla 57. Resultados de riesgo para el portafolio completo en Uruguay.

Resultados		
Valor Expuesto	USD Millones	\$1,540.7
Pérdida anual esperada	USD Millones	\$9.3
	%	0.60%
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	USD Millones	%
20	\$74.3	4.9
50	\$84.8	5.6
100	\$87.6	5.7
200	\$91.1	6.0

La curva que se presenta en la Figura 182 **Error! Reference source not found.** muestra cómo se alcanza valores de pérdida máxima probable en periodos de retorno pequeños y mantiene su nivel de pérdida constante para periodos de retorno altos. Esto puede indicar que la sequía como efecto amenazante genera pérdidas muy altas con mucha frecuencia, que está asociado también a la naturaleza transitoria de los cultivos como elementos expuestos a esta amenaza.

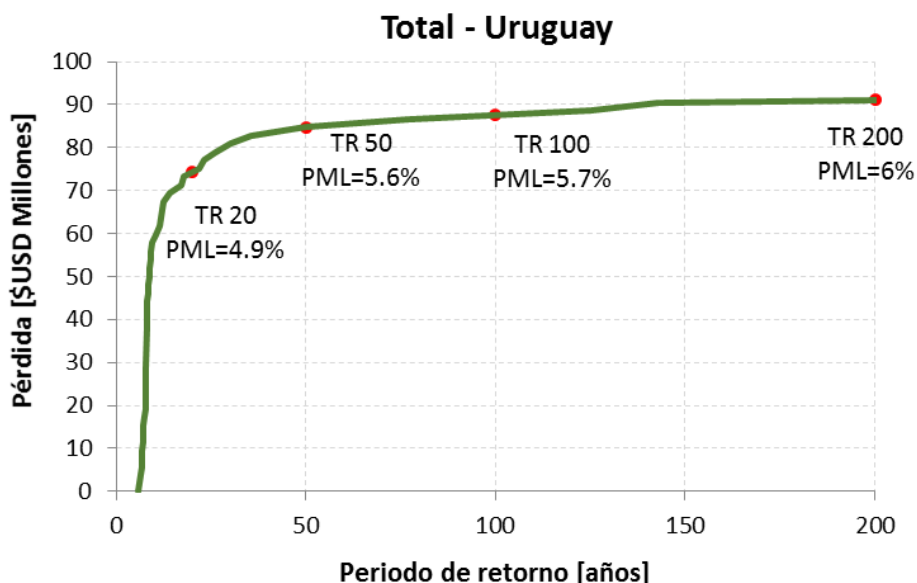


Figura 182. Curva de pérdidas vs. periodo de retorno para el portafolio completo en Uruguay..

La Figura 183 **Error! Reference source not found.** muestra las curvas de probabilidad de excedencia a) de superar una pérdida en el siguiente año y b) de superar una pérdida en el siguiente evento amenazante. Por ejemplo, la probabilidad de exceder una pérdida de \$80 millones de dólares el siguiente año es de 3.5% mientras que la probabilidad de exceder esa misma pérdida en cualquier evento de sequía del conjunto simulado elegido al azar es de 20%.

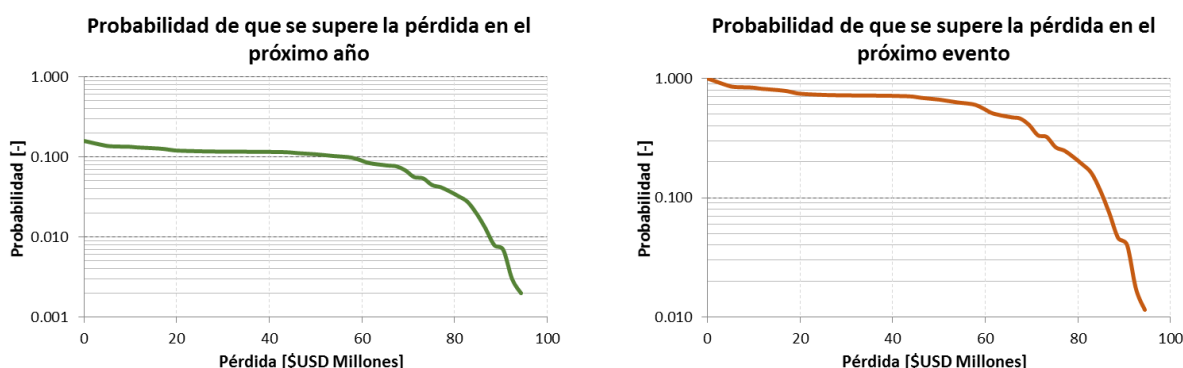


Figura 183. Curvas de probabilidad de excedencia de una pérdida para el portafolio completo en Uruguay. A la izquierda, probabilidad de exceder una pérdida en el siguiente año. A la derecha, probabilidad de exceder una pérdida en el siguiente evento de sequía.

### 1.32.1 Pérdidas por tipo de cultivo

En la Tabla 58 **Error! Reference source not found.** se presentan los resultados de pérdida anual esperada y en la

Tabla 59 **Error! Reference source not found.** los resultados de pérdida máxima probable para 20, 50, 100 y 200 años de periodo de retorno, desagregados por los cultivos que conforman el portafolio de Uruguay. Las cifras de valor expuesto muestran que los cultivos más importantes, en términos económicos, son la soja tanto de primera como de segunda siembra, y el arroz. Los productos que reportan las PAE relativas más altas son la soja, tanto de primera como de segunda siembra, el arroz y la cebada, con valores de 1.23%, 0.78%, 0.50% y 0.35% respectivamente, mientras que los productos que reportan las menores PAE relativas son los viñedos, y maíz de segunda siembra, con porcentajes de 0.00%, 0.11% respectivamente.

En términos generales, los productos que tienen mayores valores de PML para los períodos de retorno determinados son los cultivos de soja de primera y segunda

siembra y el cultivo de arroz, los cuales para 100 años de periodo de retorno alcanzan valores de 11.9%, 8.4% y 7.6% de PML relativa. Los productos que tienen menores valores de PML son los viñedos, el maíz de primera y segunda siembra y el trigo.

Tabla 58. Resultados de pérdida anual esperada desagregados por cultivos para Uruguay.

Producto	Valor Expuesto		PAE [USD Miles]	PAE Relativo
	[USD Miles]	[%]		
Arroz	\$ 251,685.0	16%	\$ 1,261.156	0.50%
Cebada	\$ 134,064.0	9%	\$ 473.988	0.35%
Cítricos	\$ 129,881.4	8%	\$ 91.178	0.07%
Maíz Primera	\$ 28,069.2	2%	\$ 32.293	0.12%
Maíz Segunda	\$ 10,414.0	1%	\$ 11.088	0.11%
Soja Primera	\$ 447,615.0	29%	\$ 5,510.252	1.23%
Soja Segunda	\$ 221,745.6	14%	\$ 1,734.635	0.78%
Sorgo Primera	\$ 16,494.3	1%	\$ 61.369	0.37%
Sorgo Segunda	\$ 9,990.0	1%	\$ 50.218	0.50%
Trigo	\$ 146,737.5	10%	\$ 35.341	0.02%
Viñedos	\$ 144,017.2	9%	\$ 7.033	0.00%
<b>Total Uruguay</b>	<b>\$ 1,540,713.2</b>		<b>\$ 9,268.551</b>	<b>0.60%</b>

Tabla 59. Resultados de pérdida máxima probable para 20, 50, 100 y 200 años de periodo de retorno, desagregados por cultivos para Uruguay.

Producto	PML [USD Miles]							
	20 años	%	50 años	%	100 años	%	200 años	%
Arroz	\$10,019	4.0	\$15,696	6.3	\$18,977	7.6	\$22,748	9.1
Cebada	\$5,232	4.0	\$6,114	4.6	\$6,462	4.9	\$6,697	5.0
Cítricos	\$1,017	0.8	\$1,395	1.1	\$1,545	1.2	\$1,635	1.3
Maíz Primera	\$274	1.0	\$306	1.1	\$326	1.2	\$340	1.3
Maíz Segunda	\$138	1.4	\$183	1.8	\$196	1.9	\$202	2.0
Soja Primera	\$44,834	10.1	\$50,962	11.4	\$53,037	11.9	\$55,476	12.4
Soja Segunda	\$17,372	7.9	\$17,870	8.1	\$18,507	8.4	\$19,023	8.6
Sorgo Primera	\$503	3.1	\$826	5.1	\$987	6.0	\$1,177	7.2
Sorgo Segunda	\$410	4.2	\$674	6.8	\$943	9.5	\$1,028	10.3
Trigo	\$347	0.3	\$443	0.4	\$478	0.4	\$605	0.5
Viñedos	\$68	0.1	\$88	0.1	\$100	0.1	\$104	0.1
<b>Total Uruguay</b>	<b>\$80,212</b>	<b>4.9</b>	<b>\$94,556</b>	<b>5.6</b>	<b>\$101,558</b>	<b>5.7</b>	<b>\$109,036</b>	<b>6.0</b>

Los resultados que se presentan en las tablas anteriores son producto de la evaluación probabilista de riesgo por sequía que considera mil años de simulaciones climáticas con el fin de ampliar la base de eventos de déficit hídrico y poder estimar el riesgo. Esto implica que los resultados no necesariamente describan las observaciones



históricas, que como se puede ver en la Figura 151 **Error! Reference source not found.** corresponden a una ventana de observación limitada de 16 años.

Cabe resaltar, que el modelo de exposición de cultivos de esta metodología no contempla la variación del área de siembra entre los años de simulación, es decir, el área permanece constante para todos los eventos de sequía simulados. De igual forma, el modelo de riesgo evalúa el sistema físico (la relación suelo – cultivo – atmósfera) mientras que los sistemas sociales y económicos quedan por fuera de su alcance, por lo tanto, muchas de las prácticas y decisiones de manejo agronómico de los cultivos derivadas de condiciones climáticas adversas que se han visto en la historia no son replicadas en el modelo.

En el Anexo **A. 12** se presentan los resultados de pérdida anual esperada y pérdida máxima probable, así como las curvas de pérdidas vs. periodo de retorno y probabilidad de excedencia de la pérdida en el próximo año para cada uno de los productos y temporalidades considerados en la estimación de riesgo para Uruguay.

### **1.32.2 Efectos del cambio climático en el riesgo por sequía en el sector agrícola nacional**

La Figura 184 **Error! Reference source not found.** muestra, para los diferentes escenarios de clima considerados, las proyecciones de cambio en precipitación y temperatura en cada una de las 103 estaciones virtuales analizadas en el estudio. Esta gráfica permite concluir que, para todos los escenarios, especialmente para el RCP8.5, se esperan lluvias por encima de lo registrado en el escenario base (punto verde ubicado en el punto 0,0 de la gráfica) en la mayoría de las estaciones. También se puede afirmar que los diferentes escenarios de cambio climático proyectan incremento de la temperatura en todos los casos.

Esta relación entre las proyecciones de cambios en precipitación total diaria y temperatura media anual es útil para interpretar los resultados de riesgo por sequía para el portafolio de cultivos de Uruguay, que se muestran de forma resumida en la Tabla 60 **Error! Reference source not found.** y los detalles comparativos de las curvas de riesgo en la Figura 185 **Error! Reference source not found.**. Los resultados permiten ver como para el escenario RCP2.6 la PAE es de 0.69%, superior al escenario de clima

base e inferior a los otros tres escenarios de clima modelados. Esto indica que, aunque los cambios de precipitación son similares a los observados en los escenarios RCP4.5 y RCP6, menores variaciones en la temperatura como las que se observan en el escenario RCP2.6 definen condiciones que favorecen el rendimiento de cultivos, por lo que sus pérdidas son menores. Por otro lado, para el escenario RCP8.5 la PAE es mayor que en todos los demás escenarios, incluyendo el de clima base, con un valor de 0.98%. Es decir, en este caso la combinación de mayores precipitaciones acompañada de mayores temperaturas configura condiciones adversas para el desarrollo de los cultivos por lo que no alcanzan el rendimiento óptimo y son mayores las pérdidas en las áreas cultivadas de cada producto. Se puede entonces concluir que la temperatura es un factor que influye más en inhibir la producción de los cultivos en Uruguay.

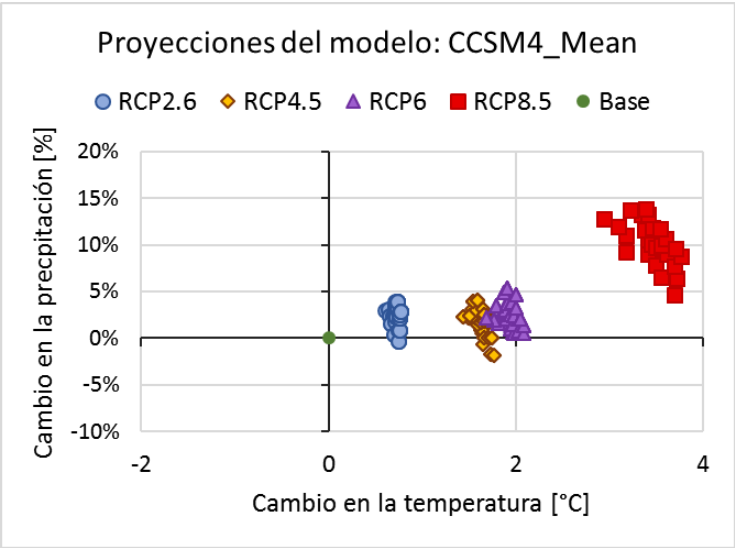


Figura 184. Proyecciones medias anuales de cambio en precipitación (eje vertical) y cambio en temperatura (eje horizontal) según modelo CCSM4 para cuatro escenarios de RCP para las 103 estaciones virtuales.

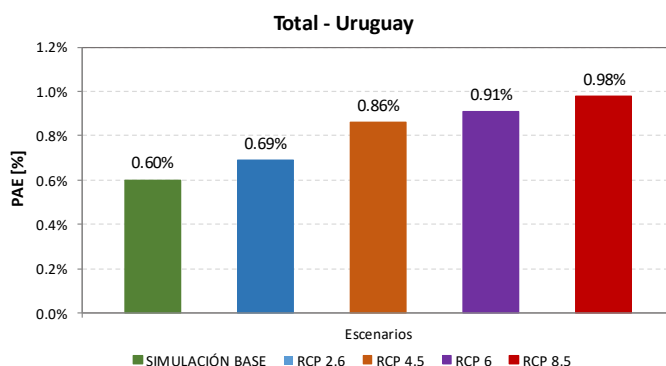
La Tabla 60**Error! Reference source not found.** también muestra el resultado d e PML para 20, 50, 100 y 200 años de periodo de retorno, para los cinco escenarios de clima evaluados. Las curvas que definen estos valores puntuales de PML se muestran en la Figura 185**Error! Reference source not found..** Como en el caso de la PAE, para e l escenario de RCP2.6 los valores de PML para cualquier periodo de retorno son más altos que los resultados obtenidos para el clima base, y más bajos que los resultados

para los escenarios de clima RCP4.5, RCP 6 y RCP8.5. Así mismo, los valores para el escenario RCP8.5 son los más altos para todos los periodos de retorno.

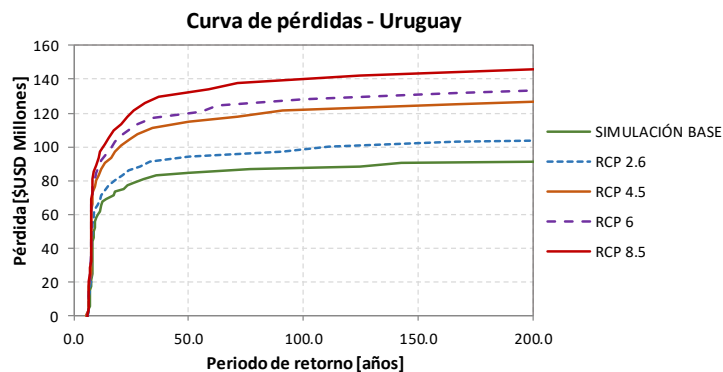
Tabla 60. Resultados de riesgo por sequía para el portafolio de cultivos de Uruguay para los escenarios de clima base y con cambio climático RCP 2.6, 4.5, 6 y 8.5.

Valor Expuesto	USD Millones	1,540.7	Total - Uruguay							
Resultados	SIMULACIÓN BASE		RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6		RCP 8.5	
PAE	USD Millones	9.3	USD Millones	10.6	USD Millones	13.3	USD Millones	14.0	USD Millones	15.1
	%	0.60%	%	0.69%	%	0.86%	%	0.91%	%	0.98%
PML										
Periodo retorno	SIMULACIÓN BASE		RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6		RCP 8.5	
años	USD Millones	%	USD Millones	%	USD Millones	%	USD Millones	%	USD Millones	%
20	\$74.3	4.8	\$81.8	5.3	\$100.1	6.5	\$105.72	6.9	\$112.7	7.3
50	\$84.8	5.5	\$94.3	6.1	\$114.6	7.4	\$120.08	7.8	\$132.3	8.6
100	\$87.6	5.7	\$98.5	6.4	\$122.0	7.9	\$128.38	8.3	\$140.1	9.1
200	\$91.1	5.9	\$103.5	6.7	\$126.4	8.2	\$133.51	8.7	\$146.1	9.5

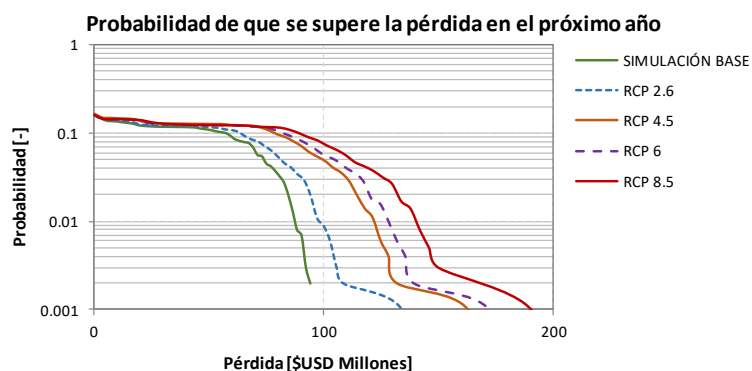
a) Pérdida Anual Esperada



b) Pérdida máxima probable según período de retorno



c) Probabilidad de excedencia de una pérdida para el siguiente año



d) Probabilidad de excedencia de una pérdida en el siguiente evento

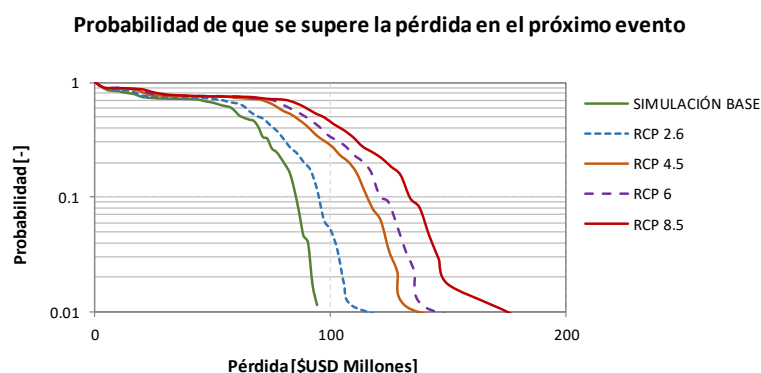


Figura 185. Resultados de riesgo por sequía para Uruguay comparando escenarios de clima base y proyecciones de cambio climático para RCP 2.6, 4.5, 6 y 8.5.

La Tabla 61 **Error! Reference source not found.** muestra los resultados de pérdida anual esperada para cada uno de los escenarios de clima, desagregado por los cultivos considerados en el análisis. En términos generales, los productos presentan la menor PAE con la condición de clima base, a excepción del maíz de segunda siembra, para el cual disminuye la PAE a medida que se van sometiendo a escenarios de clima con mayores temperaturas, lo que puede indicar que, el cultivo se favorece de las condiciones climatológicas proyectadas. Por otro lado, los cítricos, los viñedos y el trigo presentan valores de PAE muy similares para los diferentes escenarios de clima, por lo

que se podría inferir que aparentemente ese producto no es afectado por condiciones de aumento de la temperatura. En los demás casos, las PAE incrementan para el escenario de clima RCP 8.5.

Tabla 61. Resultados de pérdida anual esperada desagregados por cultivos y escenarios de clima para Uruguay

Producto	Clima Base		RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6		RCP 8.5	
	PAE [USD Miles]	PAE Relativo (%)	PAE [USD Miles]	PAE Relativo (%)	PAE [USD Miles]	PAE Relativo (%)	PAE [USD Miles]	PAE Relativo (%)	PAE [USD Miles]	PAE Relativo (%)
Arroz	\$ 1,261	0.50%	\$ 1,787	0.71%	\$ 2,924	1.16%	\$ 3,170	1.26%	\$ 4,008.88	1.59%
Cebada	\$ 474	0.35%	\$ 499	0.37%	\$ 588	0.44%	\$ 607	0.45%	\$ 574.93	0.43%
Cítricos	\$ 91	0.07%	\$ 94	0.07%	\$ 101	0.08%	\$ 97	0.07%	\$ 111.04	0.09%
Maíz Primera	\$ 32	0.12%	\$ 31	0.11%	\$ 37	0.13%	\$ 41	0.15%	\$ 39.68	0.14%
Maíz Segunda	\$ 11	0.11%	\$ 11	0.11%	\$ 10	0.10%	\$ 10	0.10%	\$ 9.84	0.09%
Soja Primera	\$ 5,510	1.23%	\$ 6,162	1.38%	\$ 7,350	1.64%	\$ 7,724	1.73%	\$ 7,860.62	1.76%
Soja Segunda	\$ 1,735	0.78%	\$ 1,884	0.85%	\$ 2,015	0.91%	\$ 2,076	0.94%	\$ 2,135.28	0.96%
Sorgo Primera	\$ 61	0.37%	\$ 72	0.44%	\$ 114	0.69%	\$ 128	0.77%	\$ 137.98	0.84%
Sorgo Segunda	\$ 50	0.50%	\$ 66	0.66%	\$ 91	0.91%	\$ 99	0.99%	\$ 99.57	1.00%
Trigo	\$ 35	0.02%	\$ 28	0.02%	\$ 46	0.03%	\$ 54	0.04%	\$ 69.44	0.05%
Viñedos	\$ 7	0.00%	\$ 6	0.00%	\$ 9	0.01%	\$ 10	0.01%	\$ 16.35	0.01%
<b>Total - Uruguay</b>	<b>\$ 9,269</b>	<b>0.60%</b>	<b>\$ 10,640</b>	<b>0.69%</b>	<b>\$ 13,284</b>	<b>0.86%</b>	<b>\$ 14,015</b>	<b>0.91%</b>	<b>\$ 15,064</b>	<b>0.98%</b>

### 1.32.3 Resultados de riesgo por sequía desagregados por departamento

Una vez calculados los resultados de riesgo por tipo de cultivo, se acumularon los valores de valor expuesto y pérdida anual esperada para cada departamento de Uruguay, con el fin de analizar los resultados de forma espacial y reportar pérdidas asociadas a divisiones administrativas dentro del país. Es así como se obtiene el valor expuesto del portafolio completo como la suma del valor expuesto de cada cultivo en cada departamento y las PAE para cada producto (el valor expuesto y la PAE se pueden agregar de forma directa, a diferencia de las PML que se deben recalcular). Los resultados del valor expuesto por departamento se muestran en la Figura 186Error! Reference source not found.. Los resultados de PAE de cada departamento, para los cuatro escenarios de clima considerados, se muestran en la

Tabla 62Error! Reference source not found. y en formato de mapas en la Figura 188Error! Reference source not found..

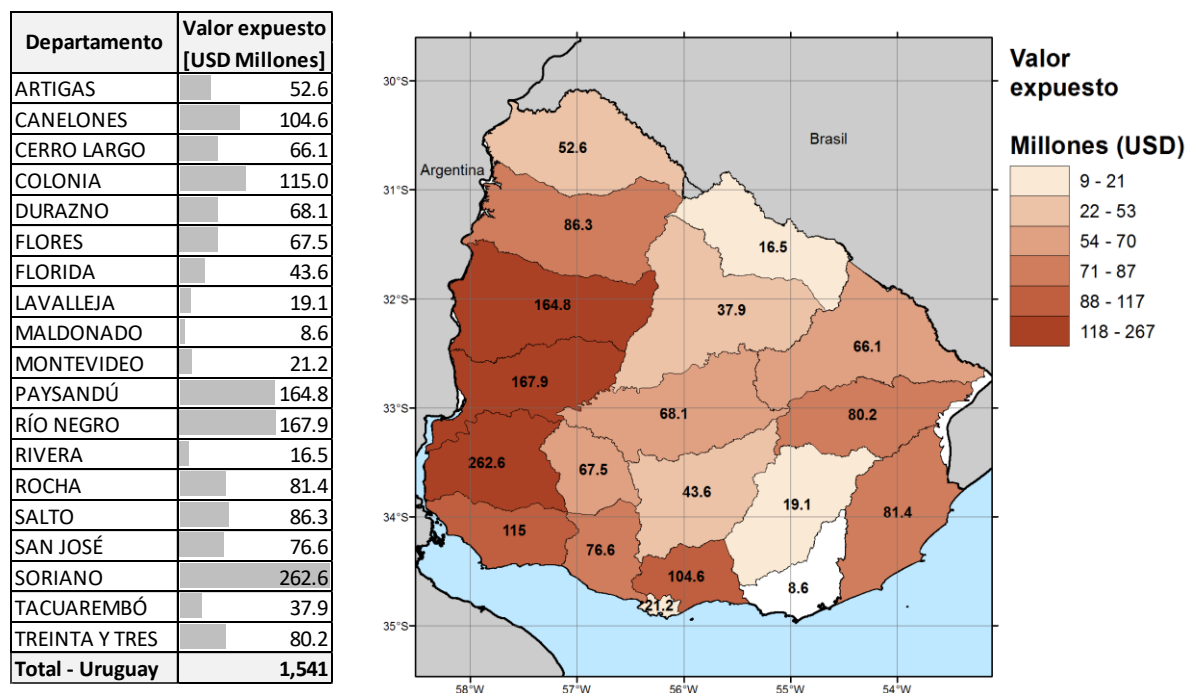
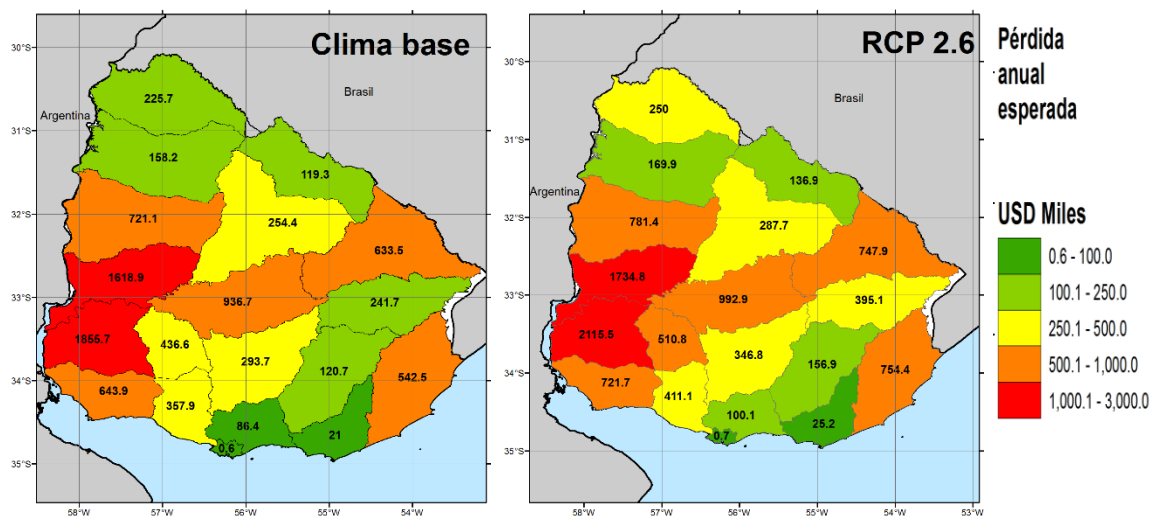


Figura 186. Valor expuesto en millones de USD para Uruguay.

Tabla 62. Resultados de pérdida anual esperada desagregados por departamento y escenarios de clima para Uruguay.

Departamento	Clima Base		RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6		RCP 8.5	
	PAE	PAE	PAE	PAE	PAE	PAE	PAE	PAE	PAE	PAE
	[USD Miles]	Relativo (%)	[USD Miles]	Relativo (%)	[USD Miles]	Relativo (%)	[USD Miles]	Relativo (%)	[USD Miles]	Relativo (%)
ARTIGAS	\$ 225.66	0.43%	\$ 250.02	0.48%	\$ 312.75	0.60%	\$ 326.70	0.62%	\$ 370.84	0.71%
CANELONES	\$ 86.37	0.08%	\$ 100.09	0.10%	\$ 132.91	0.13%	\$ 147.51	0.14%	\$ 178.62	0.17%
CERRO LARGO	\$ 633.52	0.96%	\$ 747.86	1.13%	\$ 976.55	1.48%	\$ 1,022.82	1.55%	\$ 1,196.08	1.81%
COLONIA	\$ 643.90	0.56%	\$ 721.74	0.63%	\$ 856.52	0.74%	\$ 915.39	0.80%	\$ 929.57	0.81%
DURAZNO	\$ 936.68	1.37%	\$ 992.92	1.46%	\$ 1,079.29	1.58%	\$ 1,104.29	1.62%	\$ 1,134.25	1.66%
FLORES	\$ 436.61	0.65%	\$ 510.77	0.76%	\$ 622.61	0.92%	\$ 659.29	0.98%	\$ 671.25	0.99%
FLORIDA	\$ 293.73	0.67%	\$ 346.77	0.79%	\$ 444.34	1.02%	\$ 477.91	1.10%	\$ 520.70	1.19%
LAVALLEJA	\$ 120.67	0.63%	\$ 156.89	0.82%	\$ 236.71	1.24%	\$ 259.54	1.36%	\$ 318.20	1.67%
MALDONADO	\$ 21.02	0.24%	\$ 25.18	0.29%	\$ 33.49	0.39%	\$ 36.69	0.42%	\$ 43.46	0.50%
MONTEVIDEO	\$ 0.60	0.00%	\$ 0.74	0.00%	\$ 1.10	0.01%	\$ 1.27	0.01%	\$ 2.35	0.01%
PAYSANDÚ	\$ 721.15	0.44%	\$ 781.44	0.47%	\$ 928.02	0.56%	\$ 954.43	0.58%	\$ 916.66	0.56%
RÍO NEGRO	\$ 1,618.94	0.96%	\$ 1,734.78	1.03%	\$ 1,930.02	1.15%	\$ 1,972.99	1.17%	\$ 1,979.34	1.18%
RIVERA	\$ 119.29	0.72%	\$ 136.87	0.83%	\$ 171.65	1.04%	\$ 177.75	1.08%	\$ 202.74	1.23%
ROCHA	\$ 542.50	0.67%	\$ 754.44	0.93%	\$ 1,157.28	1.42%	\$ 1,251.36	1.54%	\$ 1,536.16	1.89%
SALTO	\$ 158.18	0.18%	\$ 169.87	0.20%	\$ 195.84	0.23%	\$ 200.97	0.23%	\$ 206.55	0.24%
SAN JOSÉ	\$ 357.92	0.47%	\$ 411.12	0.54%	\$ 511.41	0.67%	\$ 553.16	0.72%	\$ 610.02	0.80%
SORIANO	\$ 1,855.71	0.71%	\$ 2,115.50	0.81%	\$ 2,557.01	0.97%	\$ 2,714.14	1.03%	\$ 2,670.77	1.02%
TACUAREMBÓ	\$ 254.44	0.67%	\$ 287.65	0.76%	\$ 351.97	0.93%	\$ 366.86	0.97%	\$ 390.25	1.03%
TREINTA Y TRES	\$ 241.67	0.30%	\$ 395.09	0.49%	\$ 784.95	0.98%	\$ 872.21	1.09%	\$ 1,185.80	1.48%
<b>Total - Uruguay</b>	<b>\$ 9,269</b>	<b>0.60%</b>	<b>\$ 10,640</b>	<b>0.69%</b>	<b>\$ 13,284</b>	<b>0.86%</b>	<b>\$ 14,015</b>	<b>0.91%</b>	<b>\$ 15,064</b>	<b>0.98%</b>



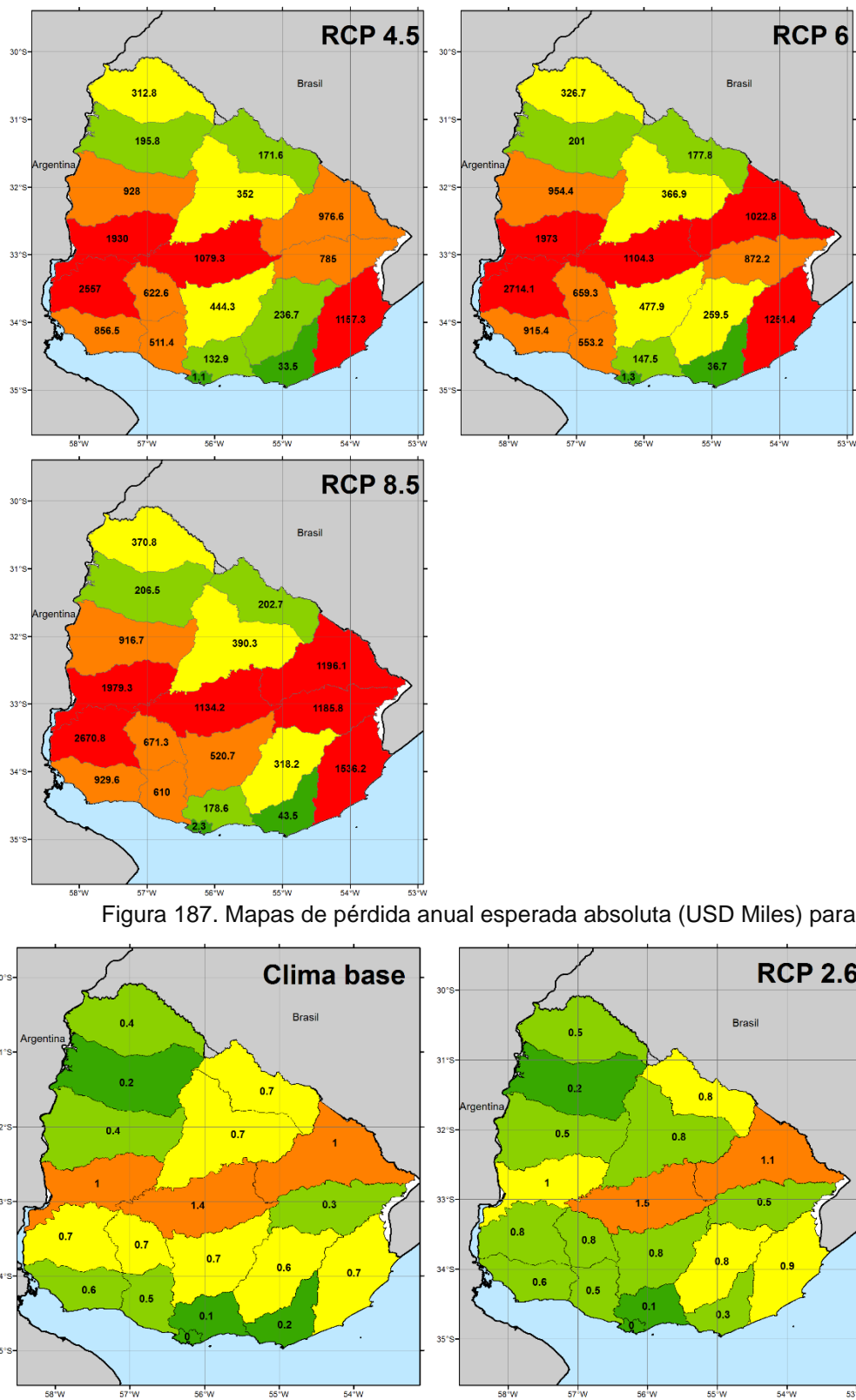


Figura 187. Mapas de pérdida anual esperada absoluta (USD Miles) para Uruguay.



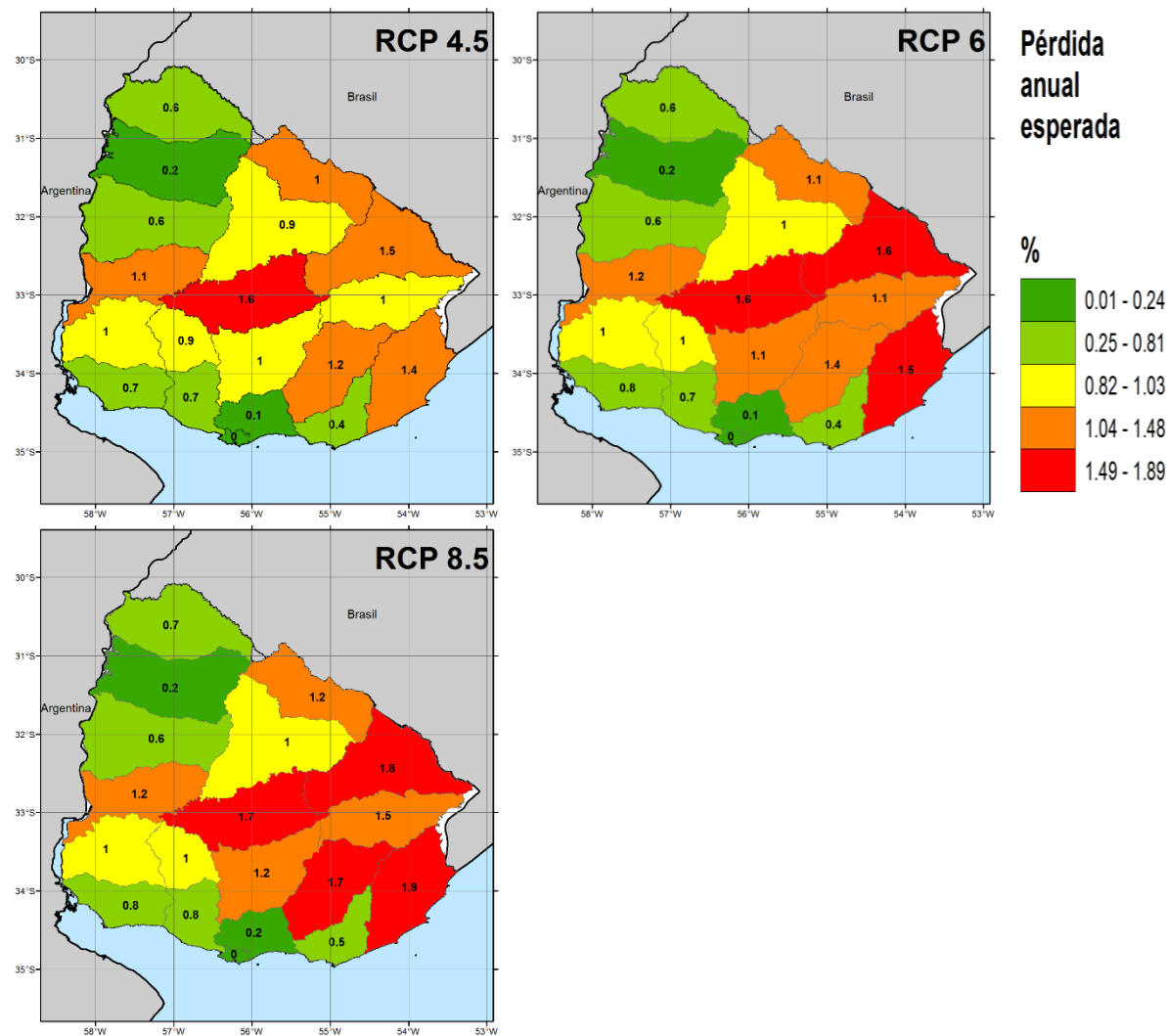


Figura 188. Mapas de pérdida anual esperada relativa (%) para Uruguay.

#### 1.32.4 Impacto del riesgo por sequía en el sector agrícola nacional

Una vez obtenidos los resultados de riesgo por sequía para Uruguay, se pueden analizar estos valores en términos de su impacto en la economía nacional, así como en la reducción esperada de la producción que puede tener algún impacto en términos de seguridad alimentaria.

En cuanto a la comparación con indicadores económicos, según reportes del Banco Mundial (2017), el Producto Interno Bruto (PIB) de Uruguay estimado para el 2017 es de \$56,157 millones de dólares (a precios actuales). La contribución nacional del sector de agropecuario es el 6% del aporte al PIB Nacional (MGAP - DIEA, 2017). El

valor expuesto del portafolio de cultivos incluido en esta evaluación de riesgo por sequía es de \$1,542 millones de dólares, equivalente al 2.75% del PIB Nacional. Esta cifra mantiene el orden de magnitud de la participación del sector agrícola en la economía nacional, que según datos reportados en el Anuario Estadístico Agropecuario 2017 representó en 2016 el 44.6% de la producción total del sector agropecuario (incluye ganadería y silvicultura).

En términos de pérdidas económicas esperadas, la Tabla 63 **Error! Reference source not found.** muestra la relación entre la pérdida anual esperada del portafolio completo de cultivos, para el escenario de clima base y los escenarios de cambio climático, con respecto al PIB Nacional. La PAE es el valor anual que debe pagarse para compensar, en el largo plazo, todas las pérdidas futuras. Se puede ver cómo el efecto de las sequías tiene un impacto en la economía del país, variando desde 0.017% en el escenario de clima base hasta 0.027% para el escenario de RCP8.5, con respecto al PIB nacional de 2017. Esto implica que en Uruguay se deben considerar iniciativas para implementar prácticas agrícolas que permitan prevenir estas pérdidas.

Tabla 63. Pérdida anual esperada para el portafolio completo de cultivos de Uruguay y su relación con el PIB Nacional.

Uruguay	PAE [USD Millones]	PAE/PIB <sub>2017</sub> [%]
<b>Clima Base</b>	\$ 9.27	0.017%
<b>RCP 2.6</b>	\$ 10.64	0.019%
<b>RCP 4.5</b>	\$ 13.28	0.024%
<b>RCP 6</b>	\$ 14.02	0.025%
<b>RCP 8.5</b>	\$ 15.06	0.027%

Por otro lado, a partir de los resultados de este estudio se pueden estimar las pérdidas de producción anual esperada (PPAE). Estos valores son útiles para evaluar el riesgo en términos de impactos de las sequías en la seguridad alimentaria y derivar en iniciativas que apoyen cada subsector de forma priorizada. La Tabla 64 **Error! Reference source not found.** muestra el resultado de pérdidas en toneladas del portafolio de granos básicos de Uruguay, considerando que son productos que tienen una gran importancia en la economía del país al ser mayormente productos de exportación, a excepción del maíz y el sorgo que son principalmente de consumo interno en forma de

grano para consumo humano o en forma de grano y forraje para consumo animal. Una baja disponibilidad de estos alimentos tiene un impacto directo en el valor de las exportaciones del país. Es así como la soja reporta las PPAE más altas, para los cinco escenarios de clima y en sus dos tiempos de siembra (primera en octubre y segunda en diciembre), seguida del arroz. Por otro lado, el maíz de primera siembra reporta PPAE similares en todos los escenarios de clima y temporalidades de siembra, mientras que el maíz de segunda siembra presenta una disminución en la PPAE a medida que se van sometiendo a escenarios de clima con mayores temperaturas.

La PPAE equivale a la producción que se debe reservar cada año para compensar las pérdidas en producción en el futuro.

Tabla 64. Pérdida de producción anual esperada para el portafolio de granos básicos de Uruguay.

Producto	Clima Base	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5
	PPAE [ton]	PPAE [ton]	PPAE [ton]	PPAE [ton]	PPAE [ton]
Arroz	7,006	9,926	16,246	17,612	22,272
Cebada	2,418	2,547	3,000	3,096	2,933
Maíz Primera	286	275	331	361	351
Maíz Segunda	87	88	82	82	78
Soja Primera	26,239	29,342	34,998	36,781	37,432
Soja Segunda	8,031	8,721	9,327	9,609	9,886
Sorgo Primera	412	486	766	857	926
Sorgo Segunda	372	489	672	733	738
Trigo	181	142	234	274	356

En cuanto a las pérdidas máximas probables, la Tabla 65 **Error! Reference source not found.** presenta los resultados para 100 años de periodo de retorno de la pérdida (no del evento amenazante). Una pérdida en producción que en promedio se espera cada 100 años, para el caso crítico se estima de 360,394 toneladas en la soja de primera siembra, 109,478 toneladas en la soja de segunda siembra y 255,065 toneladas para el arroz. Los productos considerados dentro del portafolio de granos básicos que reportan mayores pérdidas de producción en todos los escenarios, para ese periodo de retorno, son la soja – tanto de primera como de segunda siembra y el arroz.

Tabla 65. Pérdida máxima probable para 100 años de periodo para el portafolio de granos básicos de Uruguay.

Producto	Clima Base	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5
	PML 100 años [ton]	PML 100 años [ton]	PML 100 años [ton]	PML 100 años [ton]	PML 100 años [ton]
Arroz	105,426	138,487	193,469	212,681	255,065
Cebada	32,968	34,552	40,964	41,706	42,490
Maíz Primera	2,881	2,661	3,042	3,307	3,470
Maíz Segunda	1,543	1,529	1,494	1,457	1,387
Soja Primera	252,559	277,490	329,385	348,895	360,394
Soja Segunda	85,681	90,033	97,707	101,648	109,478
Sorgo Primera	6,627	7,842	10,836	11,624	12,810
Sorgo Segunda	6,985	8,709	11,555	12,304	11,888
Trigo	2,451	2,281	4,637	5,867	8,114

### 1.33 Evaluación de riesgo físico para el sector pecuario de Uruguay

En la Tabla 66 **Error! Reference source not found.** se muestran los resultados principales para la evaluación de riesgo por sequía en la ganadería de Uruguay. El portafolio completo de productos ganaderos está avaluado en \$1,924 millones de dólares, de los cuales el valor de pérdida anual esperada se estima en \$50 millones de dólares, lo que equivale al 2.63% de su valor expuesto. Esta tabla también muestra los valores de pérdida máxima probable para 20, 50, 100 y 200 años de periodo de retorno, que varían entre 22.8% y 54.8% del valor expuesto total. Estos valores de PML se obtienen de la curva que se presenta en la Figura 18 **Error! Reference source not found.**, que relaciona los valores de pérdida con una serie completa de años de periodo de retorno.

Tabla 66. Resultados de riesgo para el portafolio completo de ganadería en Uruguay.

Resultados		
Valor Expuesto	USD Millones	\$1,924.5
Pérdida anual esperada	USD Millones	\$50.6
	%	2.63%
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	USD Millones	%
20	\$438.7	22.8
50	\$541.1	28.2
100	\$769.6	40.0
200	\$1,054.3	54.8

La curva de pérdida máxima probable, que se presenta en la Figura 189Error! Reference source not found., muestra cómo aumentan los valores de pérdida a medida que aumenta el periodo de retorno.

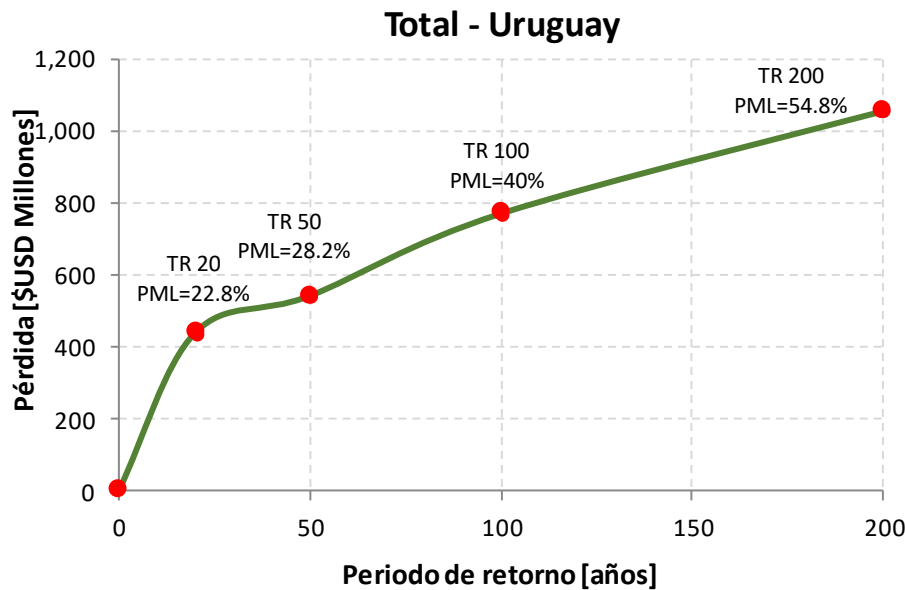


Figura 189. Curva de pérdidas vs. periodo de retorno para el portafolio completo de ganadería en Uruguay.

La Figura 190Error! Reference source not found. muestra las curvas de probabilidad de excedencia a) de superar una pérdida en el siguiente año y b) de superar una pérdida en el siguiente evento amenazante. Se puede identificar como la probabilidad de que se supere una pérdida de \$400 millones de dólares en el próximo año está alrededor del 5%, y la probabilidad de que se supere una pérdida similar en el próximo evento de sequía se encuentra alrededor de 30%.

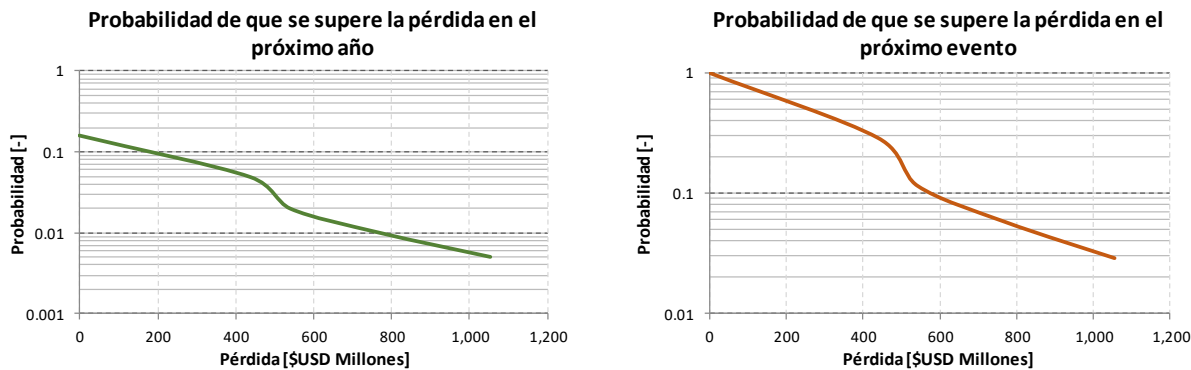


Figura 190. Curvas de probabilidad de excedencia de una pérdida para el portafolio completo de ganadería en Uruguay. A la izquierda, probabilidad de exceder una pérdida en el siguiente año. A la derecha, probabilidad de exceder una pérdida en el siguiente evento d

### 1.33.1 Pérdidas por tipo de ganadería

En la Tabla 67 **Error! Reference source not found.** se presentan los resultados de pérdida anual esperada y en la

Tabla 68 **Error! Reference source not found.** los resultados de pérdida máxima probable para 20, 50, 100 y 200 años de periodo de retorno, desagregados por los tipos de ganadería que conforman el portafolio pecuario de Uruguay. Las cifras de valor expuesto muestran que la ganadería más importante, en términos económicos, es la ganadería bovina. Los sistemas reportan PAE relativas al valor expuesto de 2.61% en el caso de ganadería bovina y 2.84% en el caso de ganadería ovina, siendo esta última mayor comparada con el total nacional que es de 2.63%. En cuanto al valor expuesto en el país la ganadería bovina reporta \$1,814 millones de dólares mientras que la ganadería ovina reporta \$110 millones de dólares.

Los valores de PML para el periodo de retorno 100 años son de \$691 millones de dólares en el caso de la ganadería bovina y \$52 millones de dólares en el caso de la ganadería ovina, alcanzando valores relativos del 23.9% y 34.1% respectivamente. Se observan aumentos en los valores de PML a medida que aumentan los períodos de retorno.

Tabla 67. Resultados de pérdida anual esperada para ganadería en Uruguay.

Ganadería	Valor Expuesto [USD Millones]	PAE [USD Millones]	PAE Relativo (%)
Bovina	\$ 1,814.03	\$ 47.42	2.61%
Ovina	\$ 110.49	\$ 3.14	2.84%
<b>Total Uruguay</b>	<b>\$ 1,924.53</b>	<b>\$ 50.56</b>	<b>2.63%</b>

Tabla 68. Resultados de pérdida máxima probable para 20, 50, 100 y 200 años de periodo de retorno, para ganadería en Uruguay.

Ganadería	PML [USD Millones]							
	20 años	%	50 años	%	100 años	%	200 años	%
Bovina	\$403.67	22.3	\$433.15	23.9	\$691.50	38.2	\$990.07	54.6
Ovina	\$25.01	22.7	\$37.62	34.1	\$52.32	47.4	\$54.16	49.1
<b>Total Uruguay</b>	<b>\$438.70</b>	<b>22.8</b>	<b>\$541.11</b>	<b>28.2</b>	<b>\$769.60</b>	<b>40.0</b>	<b>\$1,054.25</b>	<b>54.8</b>

En el Anexo **A. 13** se presentan los resultados de pérdida anual esperada y pérdida máxima probable, así como las curvas de pérdidas vs. periodo de retorno y probabilidad de excedencia de la pérdida en el próximo año para cada uno de los productos y temporalidades considerados en la estimación de riesgo para Uruguay.

### **1.33.2 Efectos del cambio climático en el riesgo por sequía en el sector ganadero nacional**

La Figura 191 **Error! Reference source not found.** muestra, para los diferentes escenarios de clima considerados, las proyecciones de cambio en precipitación y temperatura en cada una de las 103 estaciones virtuales consideradas en el estudio. Esta gráfica permite concluir que, para todos los escenarios, especialmente para el escenario RCP8.5, se esperan lluvias por encima de lo registrado en el escenario base (punto verde ubicado en el punto 0,0 de la gráfica) en la mayoría de las estaciones. También se puede afirmar que los diferentes escenarios de cambio climático proyectan incremento de la temperatura en todos los casos.

Esta relación entre las proyecciones de cambios en precipitación y temperatura es útil para interpretar los resultados de riesgo por sequía para el portafolio de ganadería de Uruguay, que se muestran de forma resumida en la Tabla 69 **Error! Reference source not found.** y los detalles comparativos de las curvas de riesgo en la Figura 192 **Figura 192. Resultados de riesgo por sequía para ganadería en Uruguay comparando escenarios de clima base y proyecciones de cambio climático para RCP 2.6, 4.5, 6 y 8.5.**

. Los resultados permiten ver como para el escenario RCP2.6 la pérdida anual esperada relativa al valor expuesto del portafolio aumenta con respecto a la PAE de la condición de clima base y es de 2.66%, para el escenario RCP4.5 es de 2.69%, para el escenario RCP6 desciende al 2.67% y para el escenario RCP8.5 vuelve a descender al 2.65%. Esto indica que, aunque existen cambios de precipitación y temperatura no constituyen condiciones que impacten drásticamente la ganadería, por lo que sus pérdidas son similares. Se observa que, para el escenario RCP4.5, la PAE es mayor que en todos los demás escenarios, incluyendo el escenario de clima base y RCP8.5, sin embargo, se encuentra muy aproximado a los valores de pérdida generados por los demás escenarios. Es decir, en este caso una condición de cambio medio en la temperatura y una leve variación en la precipitación configura condiciones adversas para

el desarrollo de la ganadería por lo que no se alcanza el rendimiento óptimo y son mayores las pérdidas. Sin embargo, dichas pérdidas no son considerablemente mayores a las alcanzadas en las demás combinaciones de clima.

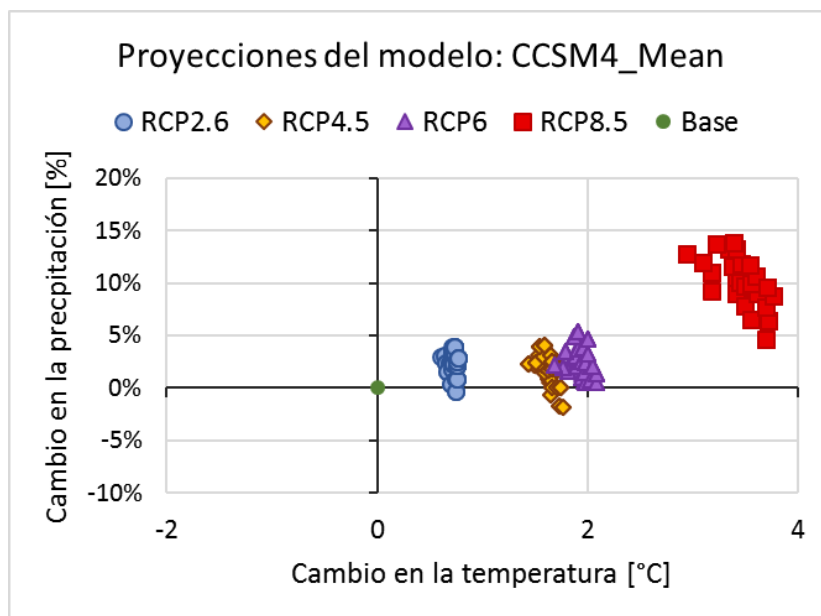


Figura 191. Proyecciones medias anuales de cambio en precipitación (eje vertical) y cambio en temperatura (eje horizontal) según modelo CCSM4 para cuatro escenarios de RCP para las 103 estaciones virtuales.

La Tabla 69 también muestra el resultado de PML para 20, 50, 100 y 200 años de periodo de retorno, para los cinco escenarios de clima evaluados. Las curvas que definen estos valores puntuales de PML se muestran en la Figura 192. Resultados de riesgo por sequía para ganadería en Uruguay comparando escenarios de clima base y proyecciones de cambio climático para RCP 2.6, 4.5, 6 y 8.5.

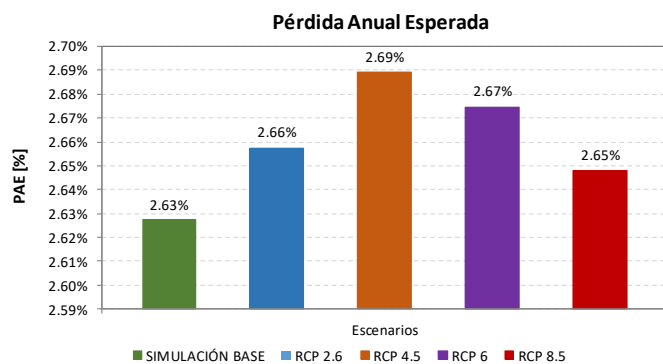
Como en el caso de la PAE, para el escenario de RCP 2.6 los valores de PML para cualquier periodo de retorno son más altos que los resultados de clima base, y más bajos que los resultados para los escenarios de clima RCP4.5, RCP 6 y RCP8.5. Así mismo, los valores para el escenario RCP8.5 son los más altos para los periodos de retorno de 50 y 100 años mientras que la condición de clima base tiene los valores más altos para los periodos de retorno de 20 y 200 años. En cuanto a los periodos de retorno bajos menores a 10 años, el comportamiento entre los escenarios de clima base y los escenarios de cambio climático es similar.



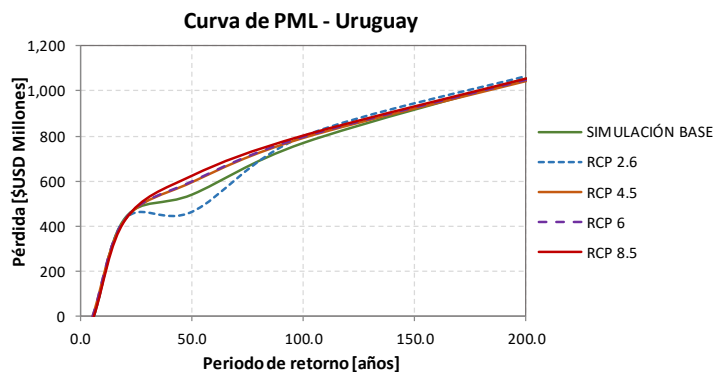
Tabla 69. Resultados de riesgo por sequía para el portafolio de ganadería de Uruguay para los escenarios de clima base y con cambio climático RCP 2.6, 4.5, 6 y 8.5.

Valor Expuesto	USD Millones	1,924.5	Pérdida Anual Esperada							
Resultados	SIMULACIÓN BASE		RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6		RCP 8.5	
PAE	USD Millones	50.6	USD Millones	51.1	USD Millones	51.8	USD Millones	51.5	USD Millones	51.0
	%	2.63%	%	2.66%	%	2.69%	%	2.67%	%	2.65%
PML										
Periodo retorno	SIMULACIÓN BASE		RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6		RCP 8.5	
años	USD Millones	%	USD Millones	%	USD Millones	%	USD Millones	%	USD Millones	%
20	\$438.7	22.8	\$434.4	22.6	\$427.8	22.2	\$428.43	22.3	\$429.8	22.3
50	\$541.1	28.1	\$465.1	24.2	\$596.1	31.0	\$597.44	31.0	\$623.9	32.4
100	\$769.6	40.0	\$799.0	41.5	\$793.1	41.2	\$794.82	41.3	\$801.2	41.6
200	\$1,054.3	54.8	\$1,065.0	55.3	\$1,045.7	54.3	\$1,048.02	54.5	\$1,052.6	54.7

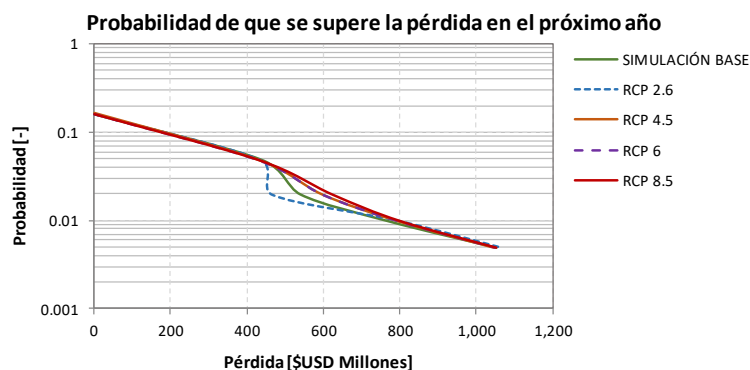
a) *Pérdida Anual Esperada*



b) *Pérdida máxima probable según período de retorno*



c) Probabilidad de excedencia de una pérdida para el siguiente año



d) Probabilidad de excedencia de una pérdida en el siguiente evento

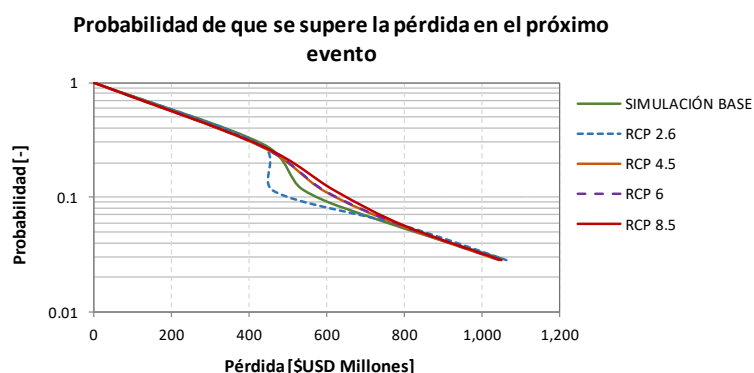


Figura 192. Resultados de riesgo por sequía para ganadería en Uruguay comparando escenarios de clima base y proyecciones de cambio climático para RCP 2.6, 4.5, 6 y 8.5.

La Tabla 70 muestra los resultados de pérdida anual esperada para cada uno de los escenarios de clima considerados en el análisis. Los dos sistemas de ganadería presentan la menor PAE con la condición de clima base y la mayor PAE en el escenario RCP4.5 a partir del cual la perdida empieza a disminuir. Esto indica que las condiciones de precipitación y temperatura de este escenario de clima son más desfavorables para la ganadería que aquellas con mayor aumento en la temperatura.

Tabla 70. Resultados de pérdida anual esperada en ganadería y escenarios de clima para Uruguay.

Ganadería	Clima Base		RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6		RCP 8.5	
	PAE [USD Millones]	PAE Relativo (%)	PAE [USD Millones]	PAE Relativo (%)	PAE [USD Millones]	PAE Relativo (%)	PAE [USD Millones]	PAE Relativo (%)	PAE [USD Millones]	PAE Relativo (%)
Bovina	\$ 47.42	2.61%	\$ 47.97	2.64%	\$ 48.54	2.68%	\$ 48.28	2.66%	\$ 47.80	2.63%
Ovina	\$ 3.14	2.84%	\$ 3.18	2.88%	\$ 3.22	2.91%	\$ 3.20	2.89%	\$ 3.16	2.86%
Total - Uruguay	\$ 50.56	2.63%	\$ 51.14	2.66%	\$ 51.75	2.69%	\$ 51.48	2.67%	\$ 50.96	2.65%

### 1.33.3 Resultados de riesgo por sequía desagregados por departamento

Una vez calculados los resultados de riesgo por sistema productivo, se acumularon los valores de valor expuesto y pérdida anual esperada para cada departamento de Uruguay, con el fin de realizar un análisis espacial y reportar pérdidas asociadas a

divisiones administrativas dentro del país. De esta manera se obtiene el valor expuesto del portafolio completo como la suma del valor expuesto de cada sistema productivo en cada departamento y las PAE para cada producto (el valor expuesto y la PAE se pueden agregar de forma directa, a diferencia de las PML que se deben recalcular). Los resultados del valor expuesto por departamento se muestran en la Figura 193

Figura 193. Valor expuesto en millones de USD para ganadería en Uruguay.

Tabla 71. Resultados de pérdida anual esperada en ganadería desagregada por departamento y escenarios de clima para Uruguay.

. Los resultados de PAE de cada departamento, para los cuatro escenarios de clima considerados, se muestran en la **Error! Reference source not found.** y en formato de mapas en la Figura 195**Error! Reference source not found.**

Departamento	Valor expuesto [USD Millones]
ARTIGAS	\$ 146.97
CANELONES	\$ 44.02
CERRO LARGO	\$ 152.64
COLONIA	\$ 62.83
DURAZNO	\$ 142.27
FLORES	\$ 59.00
FLORIDA	\$ 132.26
LAVALLEJA	\$ 116.70
MALDONADO	\$ 44.31
MONTEVIDEO	\$ 0.45
PAYSANDÚ	\$ 146.48
RÍO NEGRO	\$ 72.73
RIVERA	\$ 106.00
ROCHA	\$ 120.16
SALTO	\$ 163.82
SAN JOSÉ	\$ 56.16
SORIANO	\$ 74.67
TACUAREMBÓ	\$ 180.05
TREINTA Y TRES	\$ 103.01
<b>Total - Uruguay</b>	<b>\$ 1,924.53</b>

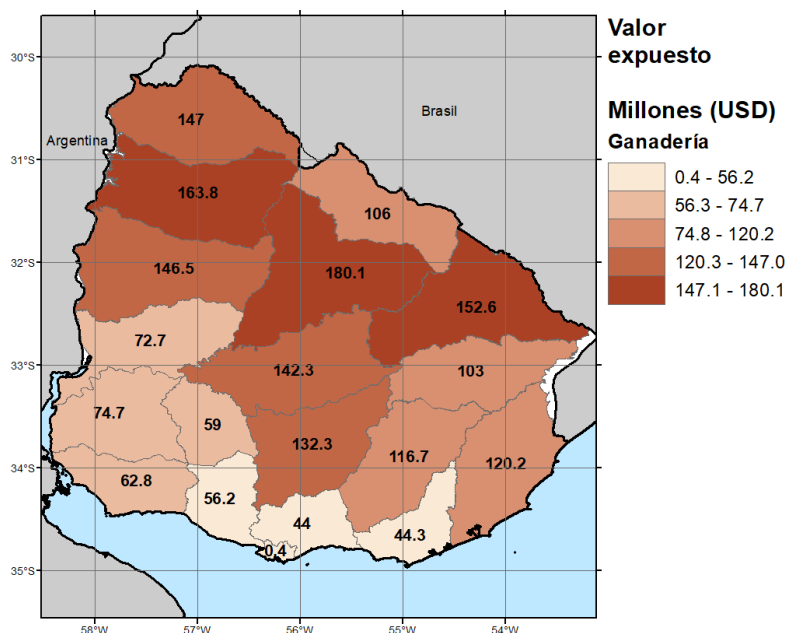
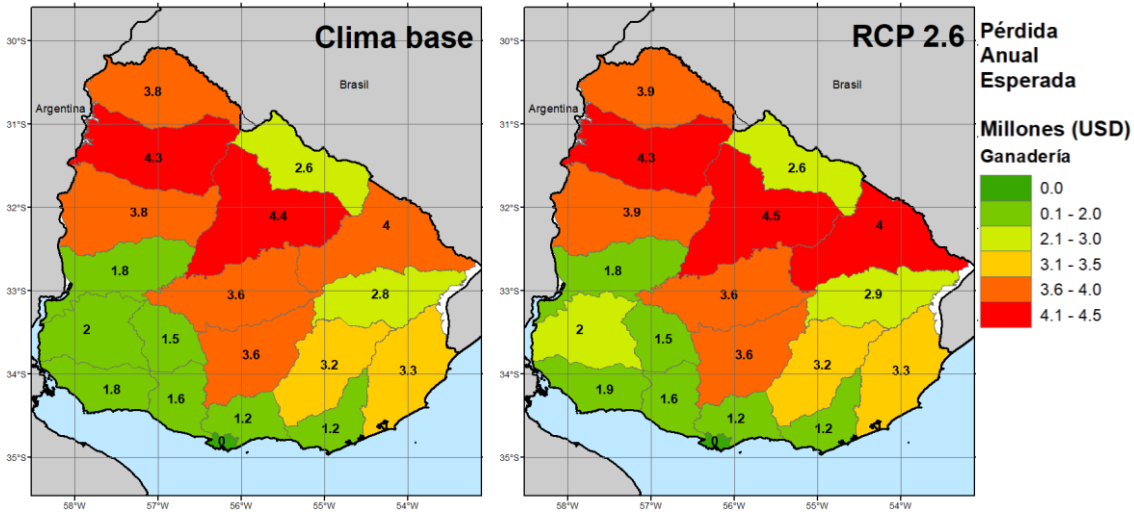


Figura 193. Valor expuesto en millones de USD para ganadería en Uruguay.

Tabla 71. Resultados de pérdida anual esperada en ganadería desagregada por departamento y escenarios de clima para Uruguay.

Departamento	Valor expuesto [USD Millones]	Clima Base		RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6		RCP 8.5	
		PAE	PAE	PAE	PAE	PAE	PAE	PAE	PAE	PAE	PAE
		[USD Millones]	Relativo [%]	[USD Millones]	Relativo [%]	[USD Millones]	Relativo [%]	[USD Millones]	Relativo [%]	[USD Millones]	Relativo [%]
ARTIGAS	\$ 146.97	\$ 3.83	2.61	\$ 3.88	2.64	\$ 3.93	2.67	\$ 3.91	2.66	\$ 3.87	2.63
CANELONES	\$ 44.02	\$ 1.23	2.80	\$ 1.25	2.84	\$ 1.26	2.87	\$ 1.26	2.85	\$ 1.24	2.82
CERRO LARGO	\$ 152.64	\$ 3.98	2.61	\$ 4.03	2.64	\$ 4.08	2.67	\$ 4.05	2.66	\$ 4.01	2.63
COLONIA	\$ 62.83	\$ 1.83	2.92	\$ 1.85	2.95	\$ 1.88	2.98	\$ 1.86	2.97	\$ 1.84	2.94
DURAZNO	\$ 142.27	\$ 3.56	2.51	\$ 3.60	2.53	\$ 3.65	2.56	\$ 3.63	2.55	\$ 3.59	2.53
FLORES	\$ 59.00	\$ 1.53	2.59	\$ 1.55	2.62	\$ 1.57	2.66	\$ 1.56	2.64	\$ 1.54	2.61
FLORIDA	\$ 132.26	\$ 3.56	2.69	\$ 3.60	2.72	\$ 3.64	2.75	\$ 3.62	2.74	\$ 3.58	2.71
LAVALLEJA	\$ 116.70	\$ 3.16	2.71	\$ 3.20	2.74	\$ 3.24	2.77	\$ 3.22	2.76	\$ 3.18	2.73
MALDONADO	\$ 44.31	\$ 1.19	2.69	\$ 1.20	2.72	\$ 1.22	2.75	\$ 1.21	2.73	\$ 1.20	2.70
MONTEVIDEO	\$ 0.45	\$ 0.01	2.58	\$ 0.01	2.61	\$ 0.01	2.64	\$ 0.01	2.62	\$ 0.01	2.59
PAYSANDÚ	\$ 146.48	\$ 3.82	2.61	\$ 3.87	2.64	\$ 3.91	2.67	\$ 3.89	2.66	\$ 3.86	2.63
RÍO NEGRO	\$ 72.73	\$ 1.80	2.48	\$ 1.82	2.51	\$ 1.85	2.54	\$ 1.84	2.52	\$ 1.82	2.50
RIVERA	\$ 106.00	\$ 2.58	2.43	\$ 2.61	2.46	\$ 2.64	2.49	\$ 2.63	2.48	\$ 2.60	2.46
ROCHA	\$ 120.16	\$ 3.30	2.74	\$ 3.33	2.77	\$ 3.37	2.81	\$ 3.35	2.79	\$ 3.32	2.76
SALTO	\$ 163.82	\$ 4.25	2.59	\$ 4.30	2.63	\$ 4.35	2.66	\$ 4.33	2.64	\$ 4.29	2.62
SAN JOSÉ	\$ 56.16	\$ 1.63	2.90	\$ 1.65	2.94	\$ 1.67	2.97	\$ 1.66	2.95	\$ 1.64	2.92
SORIANO	\$ 74.67	\$ 2.00	2.67	\$ 2.02	2.70	\$ 2.04	2.74	\$ 2.03	2.72	\$ 2.01	2.69
TACUAREMBO	\$ 180.05	\$ 4.44	2.47	\$ 4.49	2.50	\$ 4.55	2.53	\$ 4.52	2.51	\$ 4.48	2.49
TREINTA Y TRES	\$ 103.01	\$ 2.84	2.76	\$ 2.87	2.79	\$ 2.91	2.82	\$ 2.89	2.80	\$ 2.86	2.77
Total - Uruguay	\$ 1,924.53	\$ 50.56	2.63	\$ 51.14	2.66	\$ 51.75	2.69	\$ 51.48	2.67	\$ 50.96	2.65



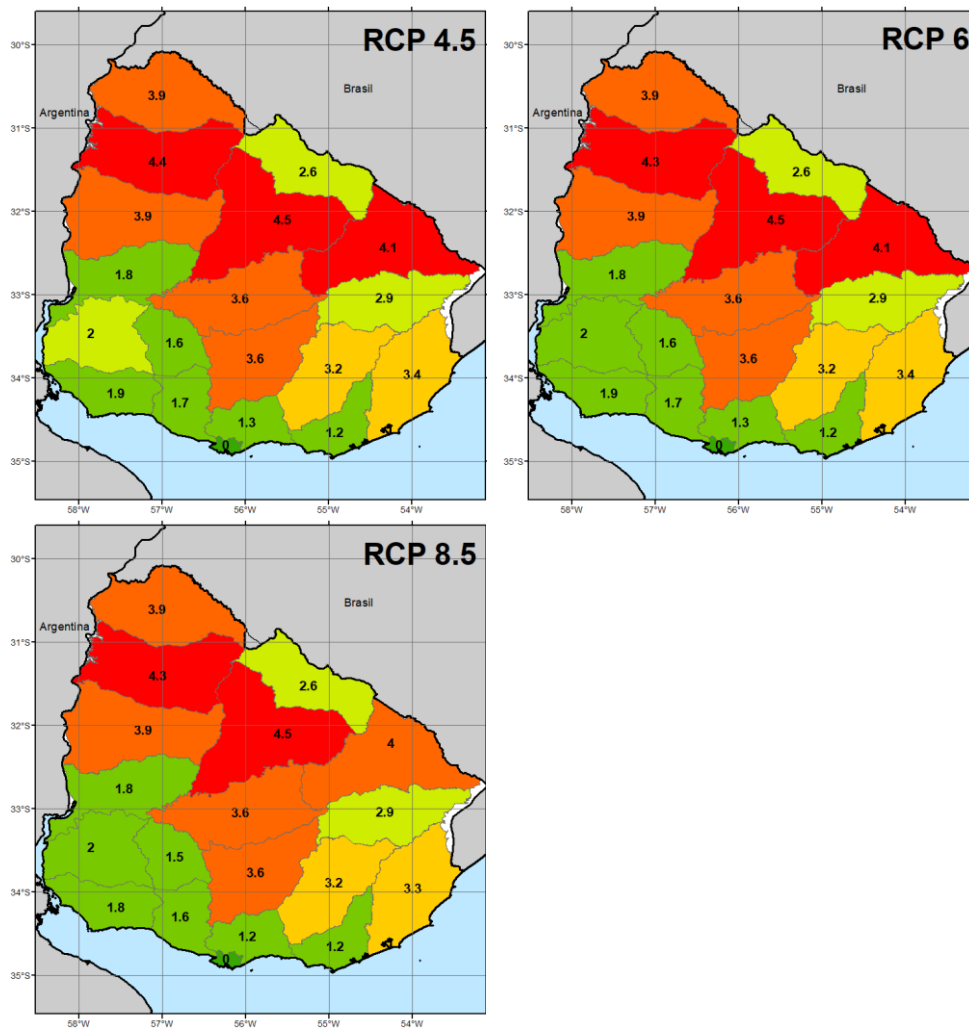


Figura 194. Mapas de pérdida anual esperada absoluta (USD Millones) para ganadería en Uruguay.

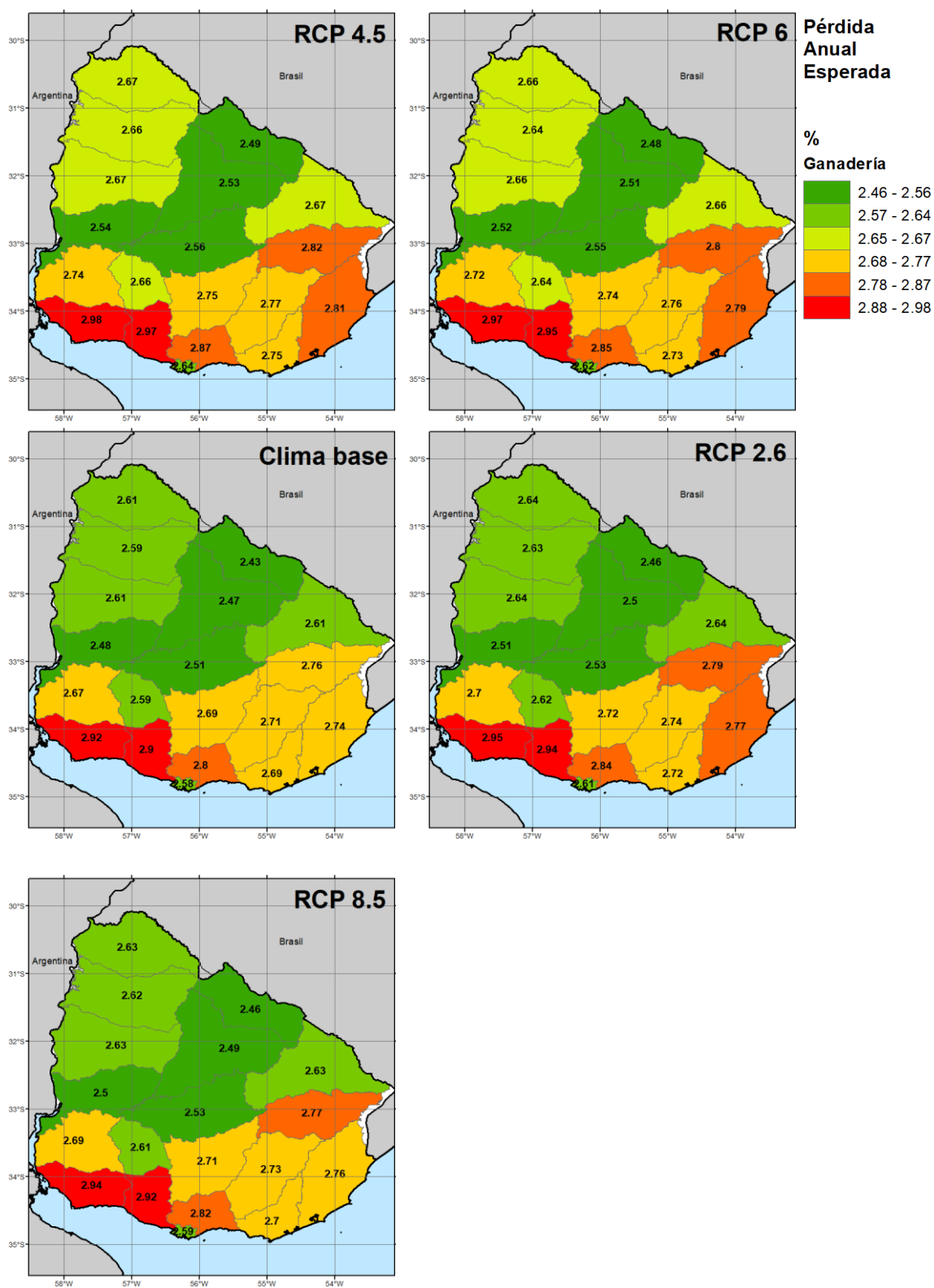


Figura 195. Mapas de pérdida anual esperada relativa (%) para ganadería en Uruguay.

#### 1.33.4 Impacto del riesgo por sequía en la ganadería nacional

Una vez obtenidos los resultados de riesgo por sequía para la ganadería en Uruguay, se pueden analizar estos valores en términos de su impacto en la economía nacional, así como en la reducción esperada de la producción que puede tener algún impacto en términos de seguridad alimentaria.

En cuanto a la comparación con indicadores económicos, según reportes del Banco Mundial (2017), el Producto Interno Bruto (PIB) de Uruguay estimado para el 2017 es de \$56,157 millones de dólares (a precios actuales). La contribución nacional del sector de agropecuario es el 6% del aporte al PIB Nacional (MGAP-DIEA, 2017a). El valor expuesto del portafolio de ganadería incluido en esta evaluación de riesgo por sequía es de \$1,924 millones de dólares, que es equivalente al 3.4% del PIB Nacional. Esta cifra mantiene el orden de magnitud de la participación del sector en la economía nacional, que según datos reportados en el Anuario Estadístico Agropecuario 2017 representó en el año 2016 el 44.6% de la producción total del sector agropecuario (incluye ganadería y silvicultura).

En términos de pérdidas económicas esperadas, la Tabla 71 **Error! Reference source not found.** muestra la relación entre la pérdida anual esperada del portafolio completo de ganadería, para los escenarios de clima base y cambio climático, con respecto al PIB Nacional. La PAE es el valor anual que debe pagarse para compensar, en el largo plazo, todas las pérdidas futuras. Se puede ver cómo el efecto de las sequías tiene un impacto en la economía del país, variando desde 0.090% en el escenario de clima base, hasta 0.092% para el escenario de RCP4.5 y RCP6, con respecto al PIB nacional. Esto implica que en Uruguay se deben considerar iniciativas para implementar prácticas ganaderas que permitan prevenir estas pérdidas.

Tabla 71. Pérdida anual esperada para el portafolio completo de ganadería en Uruguay y su relación con el PIB Nacional de 2017.

Escenario de clima	PAE	PAE/PIB Nacional 2017
	USD Millones	%
Clima base	\$ 50.56	0.090%
RCP 2.6	\$ 51.14	0.091%
RCP 4.5	\$ 51.75	0.092%
RCP 6	\$ 51.48	0.092%
RCP 8.5	\$ 50.96	0.091%

Por otro lado, a partir de los resultados de este estudio se pueden estimar las pérdidas de producción anual esperada (PPAE). Estos valores son útiles para evaluar el riesgo en términos de impactos de las sequías en la seguridad alimentaria y derivar en iniciativas que apoyen cada subsector de forma priorizada. La Tabla 72 **Error! Reference source not found.** muestra el resultado de pérdidas en kilogramos del portafolio de ganadería de Uruguay, considerando que los productos derivados de esta actividad tienen una gran importancia en la economía del país. La ganadería bovina reporta las PPAE más altas para los cinco escenarios de clima con su máximo de pérdida de producción en el RCP4.5 equivalente a 31.7 millones de kg, mientras que la ganadería ovina presenta una pérdida en producción correspondiente a 2.2 millones de kg en el mismo escenario de clima.

La PPAE equivale a la producción que se debe reservar cada año para compensar las pérdidas en producción en el futuro.

Tabla 72. Pérdida de producción anual esperada para el portafolio de ganadería en Uruguay.



Ganadería	Clima Base	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5
	PPAE [Kg]	PPAE [Kg]	PPAE [Kg]	PPAE [Kg]	PPAE [Kg]
Bovina	30,992,511	31,350,341	31,725,298	31,554,104	31,240,930
Ovina	2,182,453	2,207,476	2,232,725	2,220,351	2,196,033

En cuanto a las pérdidas máximas probables, la Tabla 73 **Error! Reference source not found.** presenta los resultados para 100 años de periodo de retorno de la pérdida (no del evento amenazante). Para una pérdida que en promedio se espera cada 100 años, se estiman pérdidas en el caso más crítico de 181 millones de kg para ganadería de carne bovina y de 12.5 millones de kg para ganadería de carne de ovino.

Tabla 73. Pérdida máxima probable para 100 años de periodo para el portafolio de granos básicos de Uruguay.

Ganadería	Clima Base	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5
	PML 100 años [Kg]	PML 100 años [Kg]	PML 100 años [Kg]	PML 100 años [Kg]	PML 100 años [Kg]
Bovina	180,207,008	180,270,697	180,577,654	180,610,126	180,946,182
Ovina	12,510,873	12,511,534	12,512,687	12,513,225	12,516,694

### 1.34 Evaluación de riesgo físico para el sector agropecuario de Uruguay

En la Tabla 74 **Error! Reference source not found.** se muestran los resultados principales para la evaluación de riesgo por sequía en el sector agropecuario de Uruguay. El portafolio completo del sector está avaluado en \$3,465 millones de dólares, de los cuales el valor de pérdida anual esperada se estima en \$59.8 millones de dólares, lo que equivale al 1.73% de su valor expuesto. Esta tabla también muestra los valores de pérdida máxima probable para 20, 50, 100 y 200 años de periodo de retorno, que varían entre 12.4% y 24.5% relativo al valor expuesto total. Estos valores de PML se obtienen de la curva que se presenta en la Figura 196, que relaciona los valores de pérdida con una serie completa de años de periodo de retorno.

Tabla 74. Resultados de riesgo para el portafolio completo del sector agropecuario en Uruguay.

Resultados		
Valor Expuesto	USD Millones	\$ 3,465.24
Pérdida Anual Esperada	USD Millones	\$ 59.83
	%	1.73%
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	USD Millones	%
20	\$430.2	12.4%
50	\$536.4	15.5%
100	\$807.1	23.3%
200	\$850.0	24.5%

La curva de pérdida máxima probable, que se presenta en la Figura 196**Error! Reference source not found.**, muestra cómo aumentan los valores de pérdida a medida que aumenta el periodo de retorno.

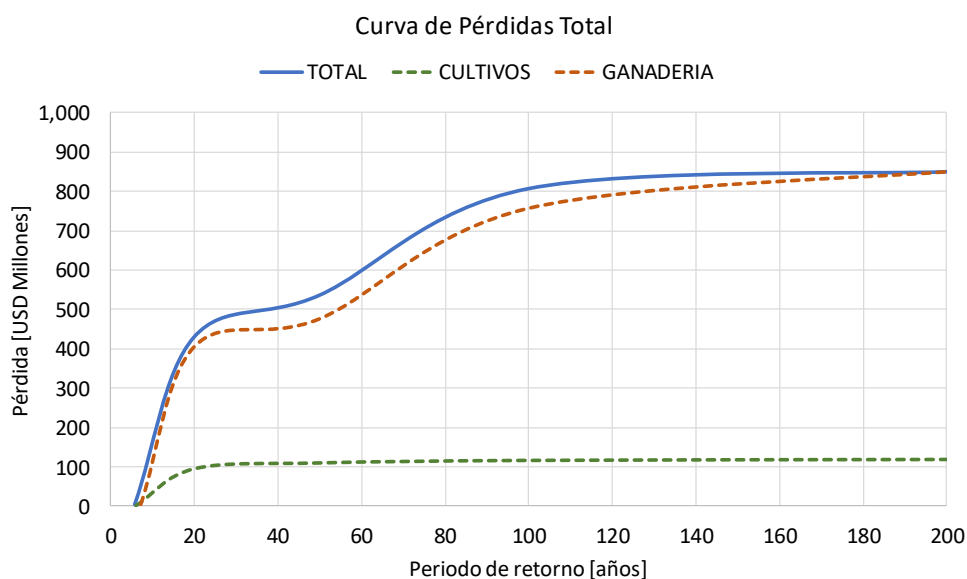


Figura 196. Curva de pérdidas vs. periodo de retorno para el sector agropecuario en Uruguay.

La Figura 197**Error! Reference source not found.** muestra las curvas de probabilidad de excedencia a) de superar una pérdida en el siguiente año y b) de superar una pérdida en el siguiente evento amenazante. Se puede identificar como la probabilidad de que se supere una pérdida de \$400 millones de dólares en el próximo

año está alrededor del 5%, y la probabilidad de que se supere una pérdida similar en el próximo evento de sequía se encuentra alrededor de 30%.

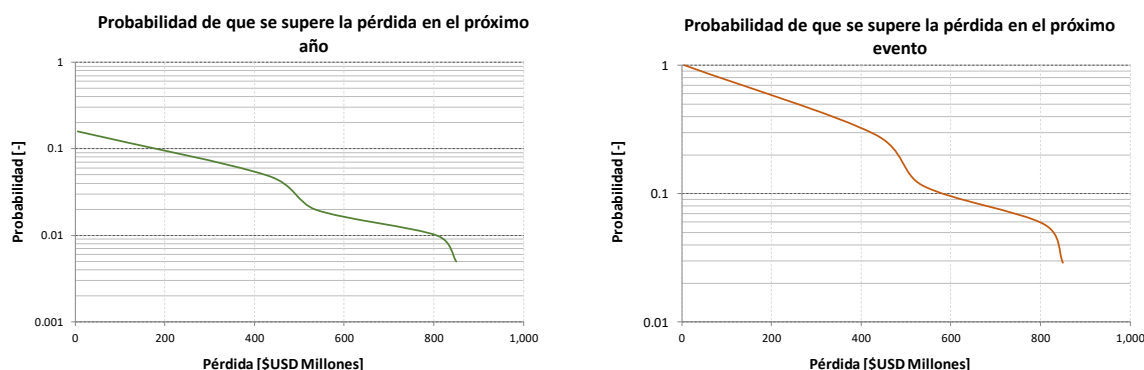


Figura 197. Curvas de probabilidad de excedencia de una pérdida para el portafolio completo en Uruguay. A la izquierda, probabilidad de exceder una pérdida en el siguiente año. A la derecha, probabilidad de exceder una pérdida en el siguiente evento de sequía.

### 1.34.1 Pérdidas por subsector

En la Tabla 75 **Error! Reference source not found.** se presentan los resultados de pérdida anual esperada y en la Tabla 76 **Error! Reference source not found.** los resultados de pérdida máxima probable para 20, 50, 100 y 200 años de periodo de retorno, desagregados por los subsectores que conforman el portafolio agropecuario de Uruguay. Las cifras de valor expuesto muestran que el subsector más importante, en términos económicos, es la ganadería. Los subsectores reportan PAE relativas al valor expuesto de 2.63% en el caso de ganadería y 0.6% en el caso de la agricultura, siendo la primera mayor comparada con el total nacional que es de 1.73%. En cuanto al valor expuesto en el país la ganadería reporta \$1,924 millones de dólares mientras que la agricultura reporta \$1,540 millones de dólares.

Los valores de PML para un periodo de retorno de 100 años son de \$769 millones de dólares en el caso del sector pecuario y \$87 millones de dólares en el caso del sector agrícola, alcanzando valores relativos al valor expuesto de 40% y 5.7% respectivamente. Se observan aumentos en los valores de PML a medida que aumentan los períodos de retorno.

Tabla 75. Resultados de pérdida anual esperada para sector agropecuario en Uruguay.

Subsector	Valor Expuesto [USD Millones]	PAE [USD Millones]	PAE Relativo (%)
Pecuario	\$ 1,924.53	\$ 50.56	2.63%
Agrícola	\$ 1,540.71	\$ 9.27	0.60%
<b>Total</b>	<b>\$ 3,465.24</b>	<b>\$ 59.83</b>	<b>1.73%</b>

Tabla 76. Resultados de pérdida máxima probable para 20, 50, 100 y 200 años de periodo de retorno, para el sector agropecuario en Uruguay.

Subsector	PML [USD Millones]							
	20 años	%	50 años	%	100 años	%	200 años	%
Pecuario	\$ 438.70	22.8%	\$ 541.11	28.1%	\$ 769.60	40.0%	\$ 1,054.25	54.8%
Agrícola	\$ 74.29	4.8%	\$ 84.79	5.5%	\$ 87.64	5.7%	\$ 91.14	5.9%
<b>Total</b>	<b>\$ 430.24</b>	<b>12.4%</b>	<b>\$ 536.43</b>	<b>15.5%</b>	<b>\$ 807.14</b>	<b>23.3%</b>	<b>\$ 850.00</b>	<b>24.5%</b>

### 1.34.2 Efectos del cambio climático en el riesgo por sequía en el sector agropecuario nacional

La Figura 198 **Error! Reference source not found.** muestra, para los diferentes escenarios de clima considerados, las proyecciones de cambio en precipitación y temperatura en cada una de las 103 estaciones virtuales consideradas en el estudio. Esta gráfica permite concluir que, para todos los escenarios, especialmente para el escenario RCP8.5, se esperan lluvias por encima de lo registrado en el escenario base (punto verde ubicado en el punto 0,0 de la gráfica) en la mayoría de las estaciones. También se puede afirmar que los diferentes escenarios de cambio climático proyectan incremento de la temperatura en todos los casos.

Esta relación entre las proyecciones de cambios en precipitación y temperatura es útil para interpretar los resultados de riesgo por sequía para el portafolio agropecuario de Uruguay, que se muestran de forma resumida en la Tabla 77 **Error! Reference source not found.** Los resultados permiten ver como para el escenario RCP2.6 la pérdida anual esperada relativa al valor expuesto del portafolio aumenta con respecto a la PAE de la condición de clima base y es de 1.78%, para el escenario RCP4.5 es de 1.88%, para el escenario RCP6 es de 1.89% y para el escenario RCP8.5 es de 1.91%. Es decir, en este caso la combinación de mayores precipitaciones acompañada de mayores temperaturas

configura condiciones adversas para el desarrollo de los cultivos por lo que no alcanzan el rendimiento óptimo y son mayores las pérdidas en las áreas cultivadas de cada producto, al igual que configura condiciones adversas en la producción pecuaria. Se puede entonces concluir que la temperatura es un factor que influye más en inhibir la producción en Uruguay.

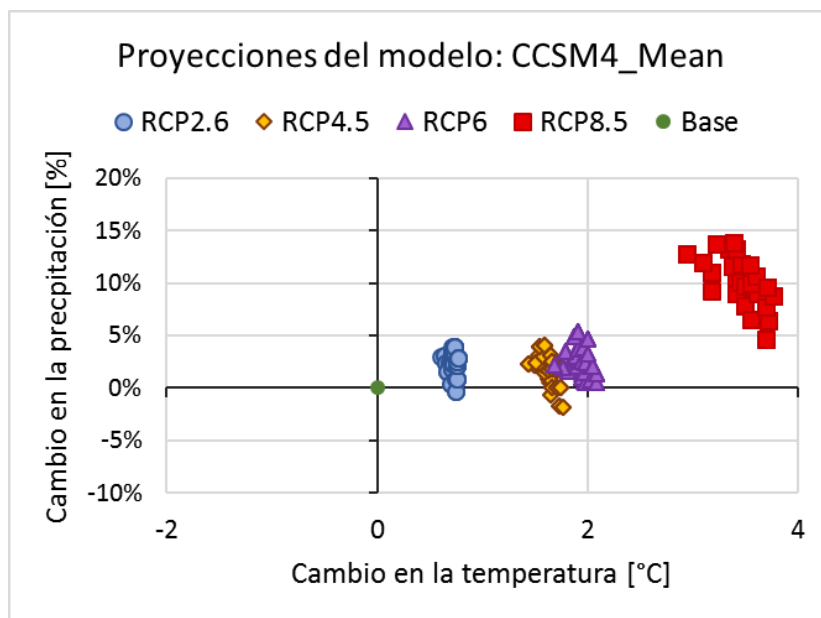


Figura 198. Proyecciones medias anuales de cambio en precipitación (eje vertical) y cambio en temperatura (eje horizontal) según modelo CCSM4 para cuatro escenarios de RCP para las 103 estaciones virtuales.

La Tabla 77 **Error! Reference source not found.** también muestra el resultado de PML para 20, 50, 100 y 200 años de periodo de retorno, para los cinco escenarios de clima evaluados. Las curvas que definen estos valores puntuales de PML se muestran en la Figura 199. Resultados de riesgo por sequía en Uruguay comparando escenarios de clima base y proyecciones de cambio climático para RCP 2.6, 4.5, 6 y 8.5.

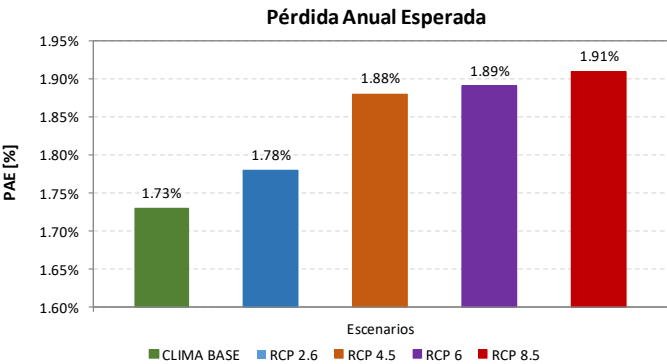
. Como en el caso de la PAE, para el escenario de RCP 2.6 los valores de PML para cualquier periodo de retorno son más altos que los resultados de clima base, y más bajos que los resultados para los escenarios de clima RCP4.5, RCP 6 y RCP8.5. Así mismo, los valores para el escenario RCP8.5 son los más altos para los periodos de retorno de 100 y 200 años mientras que la condición de RCP6 tiene el valor más alto para el periodo de retorno de 50 años, y para un periodo de retorno de 20 años se obtienen los mayores valores en la condición de clima RCP4.5 y RCP8.5. En cuanto a

los periodos de retorno bajos menores a 10 años, el comportamiento entre los escenarios de clima base y los escenarios de cambio climático es similar.

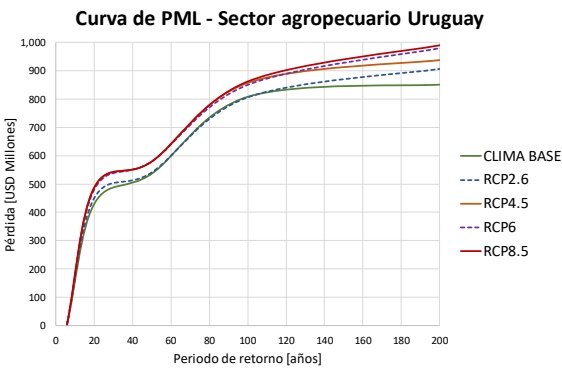
Tabla 77. Resultados de riesgo por sequía para el portafolio completo de Uruguay para los escenarios de clima base y con cambio climático RCP 2.6, 4.5, 6 y 8.5.

Valor Expuesto	USD Millones	\$ 3,465.24	Pérdida Anual Esperada							
Resultados	SIMULACIÓN BASE		RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6		RCP 8.5	
PAE	USD Millones	\$ 59.83	USD	\$ 61.78	USD	\$ 65.04	USD	\$ 65.49	USD	\$ 66.02
	%	1.73%	%	1.78%	%	1.88%	%	1.89%	%	1.91%
PML										
Periodo retorno	SIMULACIÓN BASE		RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6		RCP 8.5	
años	USD Millones	%	USD Millones	%	USD Millones	%	USD Millones	%	USD Millones	%
20	\$ 430.24	12.4%	\$ 450.00	13.0%	\$ 486.80	14.0%	\$ 480.00	13.9%	\$ 486.80	14.0%
50	\$ 536.43	15.5%	\$ 541.09	15.6%	\$ 579.33	16.7%	\$ 579.75	16.7%	\$ 579.33	16.7%
100	\$ 807.14	23.3%	\$ 806.00	23.3%	\$ 857.33	24.7%	\$ 850.00	24.5%	\$ 861.62	24.9%
200	\$ 850.00	24.5%	\$ 906.27	26.2%	\$ 937.96	27.1%	\$ 979.33	28.3%	\$ 989.43	28.6%

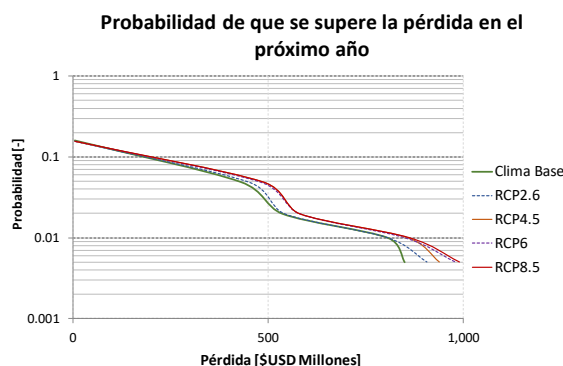
a) *Pérdida Anual Esperada*



b) *Pérdida máxima probable según período de retorno*



c) Probabilidad de excedencia de una pérdida para el siguiente año



d) Probabilidad de excedencia de una pérdida en el siguiente evento

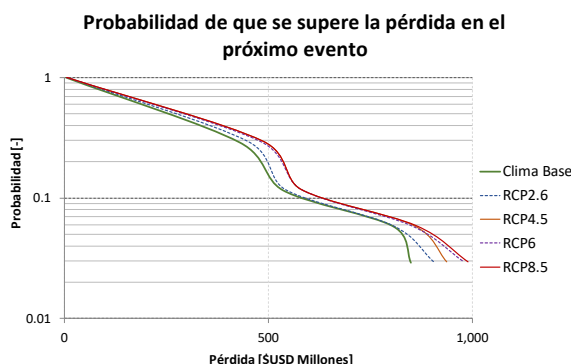


Figura 199. Resultados de riesgo por sequía en Uruguay comparando escenarios de clima base y proyecciones de cambio climático para RCP 2.6, 4.5, 6 y 8.5.

La Tabla 78 muestra los resultados de pérdida anual esperada para cada uno de los escenarios de clima considerados en el análisis. El portafolio agropecuario presenta la menor PAE con la condición de clima base y la mayor PAE en el escenario RCP8.5.

Tabla 78. Resultados de pérdida anual esperada por subsector y escenarios de clima para Uruguay.

Subsector	Clima Base		RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6		RCP 8.5	
	PAE [USD Millones]	PAE Relativo (%)	PAE [USD Millones]	PAE Relativo (%)	PAE [USD Millones]	PAE Relativo (%)	PAE [USD Millones]	PAE Relativo (%)	PAE [USD Millones]	PAE Relativo (%)
Pecuario	\$ 9.27	0.48%	\$ 10.64	0.55%	\$ 13.28	0.69%	\$ 14.02	0.73%	\$ 15.06	0.78%
Agrícola	\$ 50.56	3.28%	\$ 51.14	3.32%	\$ 51.75	3.36%	\$ 51.48	3.34%	\$ 50.96	3.31%
Total	\$ 59.83	1.73%	\$ 61.78	1.78%	\$ 65.04	1.88%	\$ 65.49	1.89%	\$ 66.02	1.91%

### 1.34.3 Resultados de riesgo por sequía desagregados por departamento

Una vez calculados los resultados de riesgo por subsector, se acumularon los valores de valor expuesto y pérdida anual esperada para cada departamento de Uruguay, con el fin de realizar un análisis espacial y reportar pérdidas asociadas a divisiones administrativas dentro del país. De esta manera se obtiene el valor expuesto del portafolio completo como la suma del valor expuesto de del sector agrícola y el sector pecuario en cada departamento y la PAE (el valor expuesto y la PAE se pueden agregar de forma directa, a diferencia de las PML que se deben recalcular). Los

resultados del valor expuesto por departamento se muestran en la Figura 200. Valor expuesto en millones de USD para el portafolio completo en Uruguay.

Tabla 79. Resultados de pérdida anual esperada desagregada por departamento y escenarios de clima para Uruguay.

. Los resultados de PAE de cada departamento, para los cuatro escenarios de clima considerados, se muestran en la Tabla 79Error! Reference source not found. y en formato de mapas en las Figura 201Error! Reference source not found. y Figura 202.

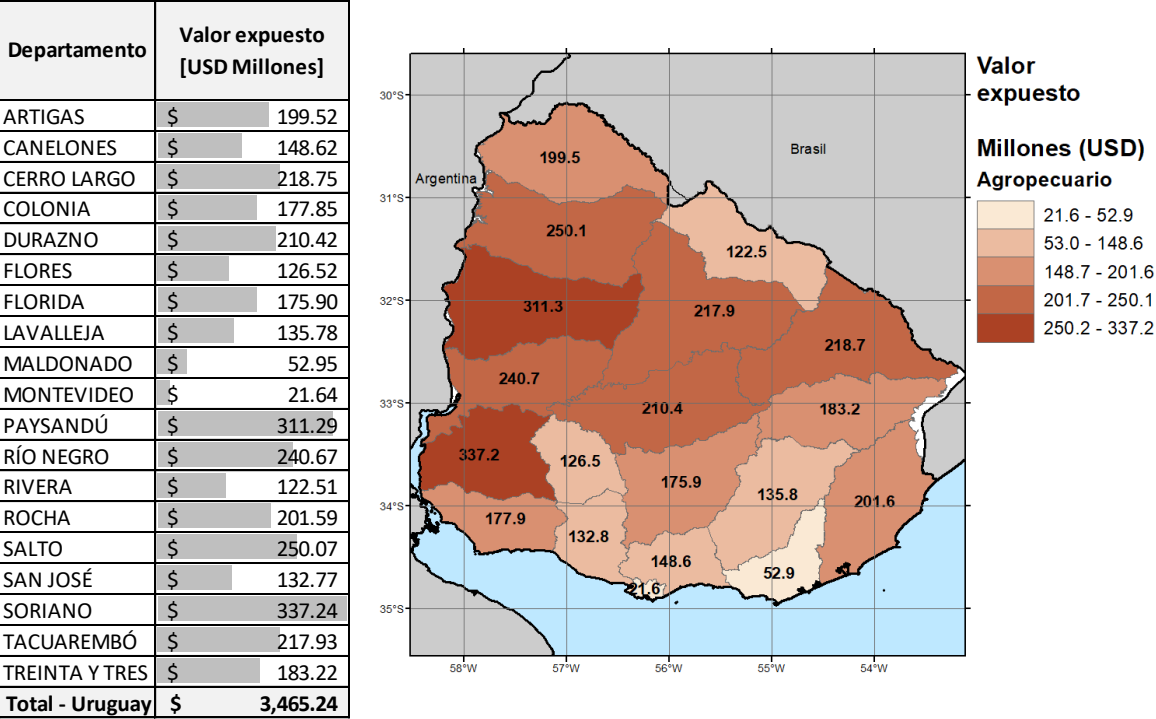
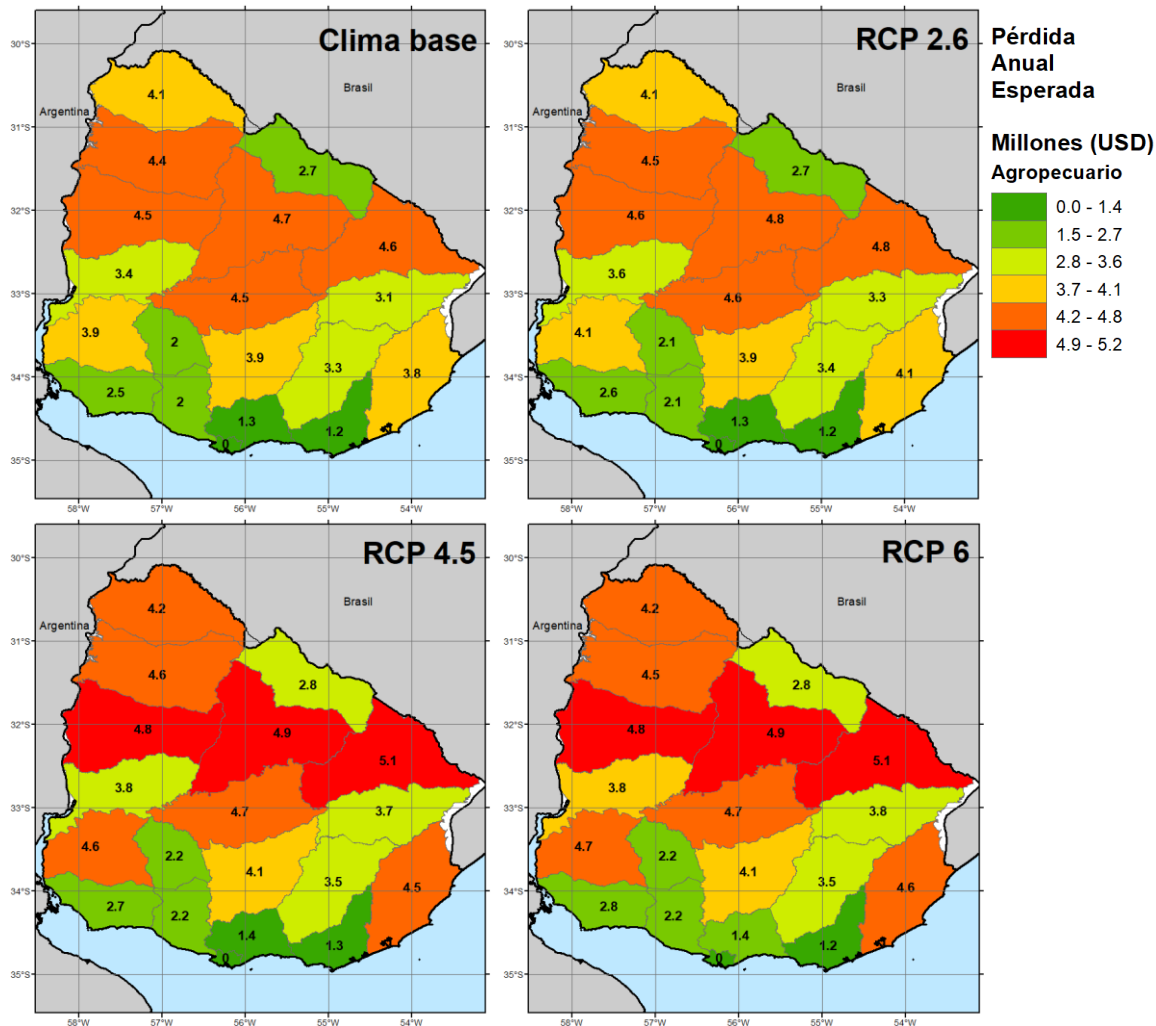


Figura 200. Valor expuesto en millones de USD para el portafolio completo en Uruguay.

Tabla 79. Resultados de pérdida anual esperada desagregada por departamento y escenarios de clima para Uruguay.



Departamento	Clima Base		RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6		RCP 8.5	
	PAE [USD Millones]	PAE Relativo [%]	PAE [USD Millones]	PAE Relativo [%]	PAE [USD Millones]	PAE Relativo [%]	PAE [USD Millones]	PAE Relativo [%]	PAE [USD Millones]	PAE Relativo [%]
ARTIGAS	\$ 4.06	2.03%	\$ 4.13	2.07%	\$ 4.24	2.13%	\$ 4.23	2.12%	\$ 4.24	2.13%
CANELONES	\$ 1.32	0.89%	\$ 1.35	0.91%	\$ 1.40	0.94%	\$ 1.40	0.94%	\$ 1.42	0.96%
CERRO LARGO	\$ 4.62	2.11%	\$ 4.78	2.18%	\$ 5.05	2.31%	\$ 5.08	2.32%	\$ 5.21	2.38%
COLONIA	\$ 2.48	1.39%	\$ 2.58	1.45%	\$ 2.73	1.54%	\$ 2.78	1.56%	\$ 2.77	1.56%
DURAZNO	\$ 4.50	2.14%	\$ 4.60	2.19%	\$ 4.73	2.25%	\$ 4.73	2.25%	\$ 4.73	2.25%
FLORES	\$ 1.97	1.55%	\$ 2.06	1.63%	\$ 2.19	1.73%	\$ 2.22	1.75%	\$ 2.21	1.75%
FLORIDA	\$ 3.85	2.19%	\$ 3.95	2.24%	\$ 4.09	2.32%	\$ 4.10	2.33%	\$ 4.10	2.33%
LAVALLEJA	\$ 3.28	2.42%	\$ 3.36	2.47%	\$ 3.47	2.56%	\$ 3.48	2.56%	\$ 3.50	2.58%
MALDONADO	\$ 1.21	2.29%	\$ 1.23	2.32%	\$ 1.25	2.36%	\$ 1.25	2.36%	\$ 1.24	2.34%
MONTEVIDEO	\$ 0.01	0.06%	\$ 0.01	0.06%	\$ 0.01	0.06%	\$ 0.01	0.06%	\$ 0.01	0.06%
PAYSANDÚ	\$ 4.54	1.46%	\$ 4.65	1.49%	\$ 4.84	1.56%	\$ 4.85	1.56%	\$ 4.77	1.53%
RÍO NEGRO	\$ 3.42	1.42%	\$ 3.56	1.48%	\$ 3.78	1.57%	\$ 3.81	1.58%	\$ 3.80	1.58%
RIVERA	\$ 2.70	2.20%	\$ 2.74	2.24%	\$ 2.81	2.30%	\$ 2.80	2.29%	\$ 2.81	2.29%
ROCHA	\$ 3.84	1.90%	\$ 4.09	2.03%	\$ 4.53	2.25%	\$ 4.61	2.28%	\$ 4.85	2.41%
SALTO	\$ 4.41	1.76%	\$ 4.47	1.79%	\$ 4.55	1.82%	\$ 4.53	1.81%	\$ 4.50	1.80%
SAN JOSÉ	\$ 1.99	1.50%	\$ 2.06	1.55%	\$ 2.18	1.64%	\$ 2.21	1.67%	\$ 2.25	1.70%
SORIANO	\$ 3.85	1.14%	\$ 4.13	1.23%	\$ 4.60	1.36%	\$ 4.75	1.41%	\$ 4.68	1.39%
TACUAREMBÓ	\$ 4.70	2.15%	\$ 4.78	2.19%	\$ 4.90	2.25%	\$ 4.89	2.24%	\$ 4.87	2.24%
TREINTA Y TRES	\$ 3.08	1.68%	\$ 3.27	1.78%	\$ 3.69	2.01%	\$ 3.76	2.05%	\$ 4.04	2.21%
<b>Total - Uruguay</b>	<b>\$ 59.83</b>	<b>1.73%</b>	<b>\$ 61.78</b>	<b>1.78%</b>	<b>\$ 65.04</b>	<b>1.88%</b>	<b>\$ 65.49</b>	<b>1.89%</b>	<b>\$ 66.02</b>	<b>1.91%</b>



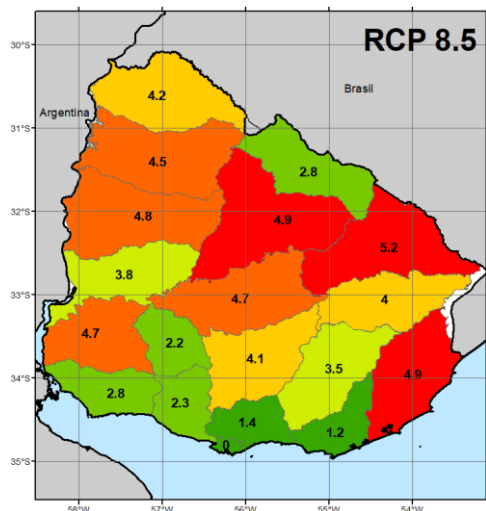
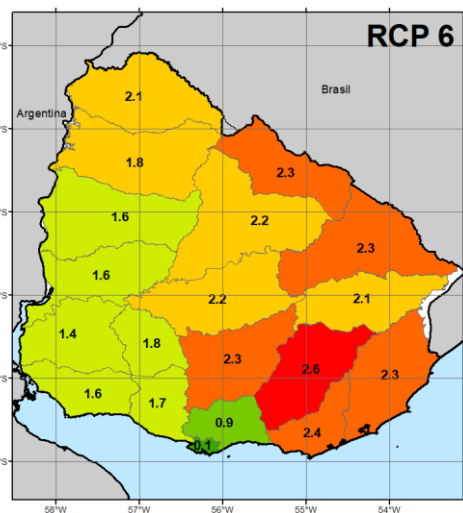
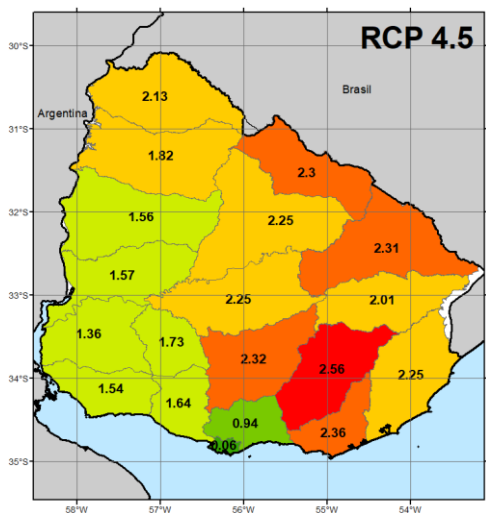
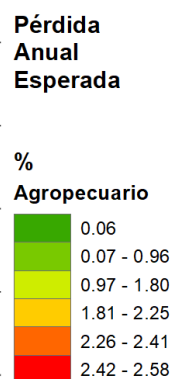
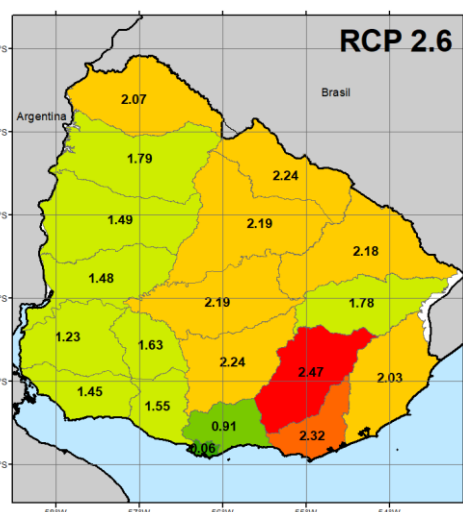
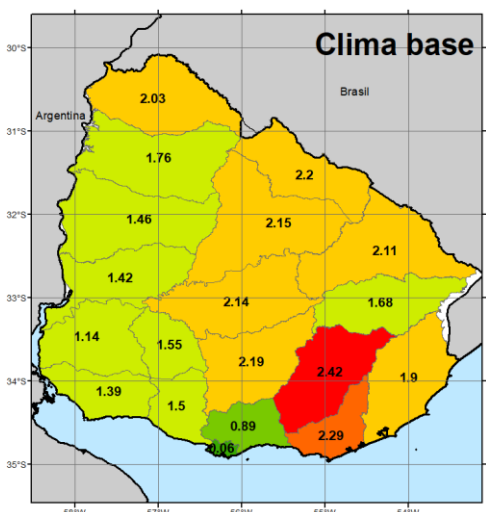


Figura 201. Mapas de pérdida anual esperada absoluta (USD Millones) en Uruguay.



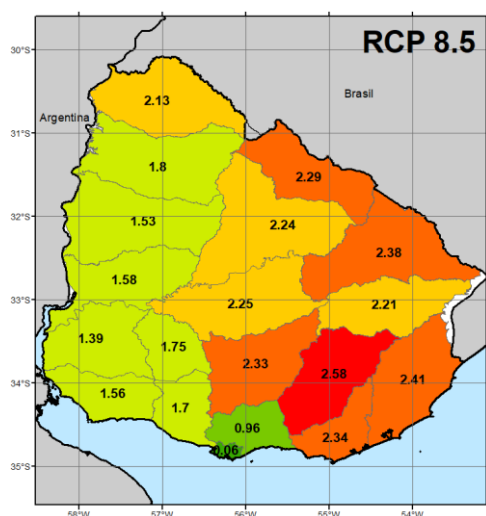


Figura 202. Mapas de pérdida anual esperada relativa (%) en Uruguay.

#### 1.34.4 Impacto del riesgo por sequía en el sector agropecuario nacional

Una vez obtenidos los resultados de riesgo por sequía para el sector agropecuario en Uruguay, se pueden analizar estos valores en términos de su impacto en la economía nacional, así como en la reducción esperada de la producción que puede tener algún impacto en términos de seguridad alimentaria.

En cuanto a la comparación con indicadores económicos, según reportes del Banco Mundial (2017), el Producto Interno Bruto (PIB) de Uruguay estimado para el 2017 es de \$56,157 millones de dólares (a precios actuales) y según el Anuario Estadístico de 2017 (MGAP-DIEA, 2017a) el PIB Agropecuario corresponde a \$3,036 millones de dólares. La contribución nacional del sector de agropecuario es el 6% del aporte al PIB Nacional (MGAP-DIEA, 2017a). El valor expuesto del portafolio completo incluido en esta evaluación de riesgo por sequía es de \$3,465 millones de dólares, que es equivalente al 6.17% del PIB Nacional.

En términos de pérdidas económicas esperadas, la Tabla 71 **Error! Reference source not found.** muestra la relación entre la pérdida anual esperada del portafolio completo, para los escenarios de clima base y cambio climático, con respecto al PIB Nacional del 2017 y el PIB Agropecuario de 2017. La PAE es el valor anual que debe pagarse para compensar, en el largo plazo, todas las pérdidas futuras. Se puede ver cómo el efecto de las sequías tiene un impacto en la economía del país, variando desde 0.107% en el escenario de clima base, hasta 0.118% para el escenario de RCP8.5, con

respecto al PIB nacional. Esto implica que en Uruguay se deben considerar iniciativas para implementar prácticas ganaderas que permitan prevenir estas pérdidas.

Tabla 80. Pérdida anual esperada para el portafolio completo de ganadería en Uruguay y su relación con el PIB Nacional de 2017 y el PIB Agropecuario de 2017.

Escenario de clima	PAE	PAE/PIB Nacional 2017	PAE/PIB Agropecuario 2017
	USD Millones	%	%
Clima base	\$ 59.83	0.107%	1.97%
RCP 2.6	\$ 61.78	0.110%	2.03%
RCP 4.5	\$ 65.04	0.116%	2.14%
RCP 6	\$ 65.49	0.117%	2.16%
RCP 8.5	\$ 66.02	0.118%	2.17%

## EVALUACIÓN RETROSPECTIVA DEL RIESGO

---

La evaluación probabilista del riesgo tiene como objetivo establecer, en términos de probabilidad, la ocurrencia futura de desastres que produzcan algún impacto determinado en los elementos expuestos. Esta evaluación se realiza con base en la información disponible y teniendo en cuenta la incertidumbre inherente a cada componente del análisis.

La teoría actuarial del riesgo provee el marco conceptual necesario para abordar el problema en términos de probabilidad. Esta teoría permite modelar la ocurrencia de desastres y pérdidas causadas en el tiempo. Por supuesto, se considera (como es natural) que la ocurrencia de desastres no está determinada (no es determinista) en el tiempo, sino que se puede modelar con un proceso de Poisson. Un proceso de Poisson es un tipo de proceso estocástico que marca la ocurrencia de eventos en el tiempo de manera totalmente aleatoria. Los eventos, dentro de este contexto, se refieren a la ocurrencia de las pérdidas, independientemente de su origen. Es esto por lo que la teoría de riesgo es aplicable a cualquier fenómeno natural. La Figura 203 **Error! Reference source not found.** muestra una ilustración del proceso de Poisson.

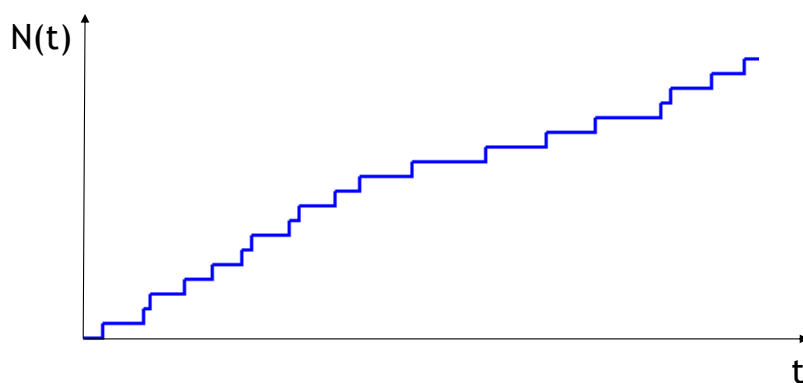


Figura 203. Ilustración de un proceso de Poisson.

En un proceso de Poisson, se estudian dos variables aleatorias: el tiempo ( $t$ , variable independiente) y el número de eventos ocurridos en determinado tiempo ( $N(t)$ , variable dependiente). Como se ilustra en la Figura 203, los momentos de ocurrencia de los eventos se producen de manera totalmente estocástica, por lo cual se tienen en realidad infinitas posibilidades de desarrollo de un mismo proceso de Poisson. El

parámetro principal del proceso de Poisson es su intensidad (o tasa)  $\lambda$ . El resultado del proceso es una colección de variables aleatorias con las siguientes características:

- Las variables aleatorias  $N(t)$ , es decir el número de ocurrencias en determinado tiempo, se distribuyen **Poisson** con parámetro  $\lambda t$
- Si  $T_k$  es el tiempo transcurrido entre el evento  $k-1$  y el evento  $k$ , entonces  $T_k$  es una variable aleatoria con distribución **exponencial** y parámetro  $\lambda$ .
- Si  $S_n$  es el tiempo transcurrido entre el evento inicio y el evento  $n$ , entonces  $S_n$  es una variable aleatoria con distribución **gamma** y parámetros  $n$  y  $\lambda$ .

El proceso de Poisson se configura entonces en términos de un único parámetro. Dentro de la evaluación del riesgo, este parámetro es la tasa de excedencia de pérdidas. Esto significa que, si se quiere modelar el riesgo de que se presenten en el futuro eventos que superan una pérdida  $p$ , entonces debe calcularse su tasa de excedencia  $v(p)$  como función de la probabilidad de que cualquiera de todos los escenarios de amenaza factibles de ocurrir en el territorio, supere  $p$ .

Sin embargo, la estimación de las tasas de excedencia  $v(p)$  no puede limitarse a un único valor de  $p$ . Es esto por lo cual se calcula la Curva de Excedencia de Pérdidas (CEP), la cual indica precisamente el valor de  $v(p)$  para cualquier  $p$  (desde 0 hasta el valor expuesto total). Esto significa que la CEP contiene los parámetros  $\lambda$  apropiados para definir el proceso estocástico de ocurrencia, en el tiempo, de pérdidas iguales o superiores a  $p$ , para cualquier valor económico de  $p$ . La CEP provee entonces una cuantificación exhaustiva del problema de riesgo, en términos de probabilidad.

A partir de la CEP se pueden calcular gran cantidad de métricas probabilistas, que ayudan a una completa comprensión del problema de riesgo a nivel nacional. Entre estas cabe resaltar la *Pérdida Anual Esperada* y la *Pérdida Máxima Probable*:

a) *Pérdida Anual Esperada* (PAE): se trata del valor esperado de la pérdida anual. Es una cantidad importante puesto que indica, por ejemplo, que, si el proceso de ocurrencia de pérdidas fuera estacionario de aquí a la eternidad, su costo equivaldría a haber pagado la PAE anualmente. Por tanto, en un sistema simple de seguro, la pérdida anual esperada sería la prima pura de riesgo.

b) *Pérdida Máxima Probable* (PML por las iniciales en inglés de *Probable Maximum Loss*): se trata de una pérdida que ocurre poco frecuentemente, es decir, que está

asociada a un periodo de retorno muy largo (o, alternatively, a una tasa de excedencia muy baja). No existen estándares universalmente aceptados para definir qué quiere decir “poco frecuentemente”. De hecho, la elección de un periodo de retorno u otro para tomar cierta decisión depende de la aversión al riesgo de quien la está tomando. En la industria aseguradora, por ejemplo, los periodos de retorno utilizados para definir la PML varían entre 200 y al menos 1500 años.

Las tasas de excedencia pueden estimarse a partir de la información histórica contenida en una base de datos de desastres (evaluación retrospectiva o empírica) o por medio de un modelo de riesgo (evaluación prospectiva o analítica). Para este proyecto se desarrollarán los cálculos de la curva de excedencia siguiendo ambos enfoques. No obstante, en este informe se presenta únicamente el primer enfoque, basado en la información histórica siguiendo la metodología expuesta en la Figura 204. La evaluación prospectiva del riesgo se realizará en fases posteriores de este proyecto.

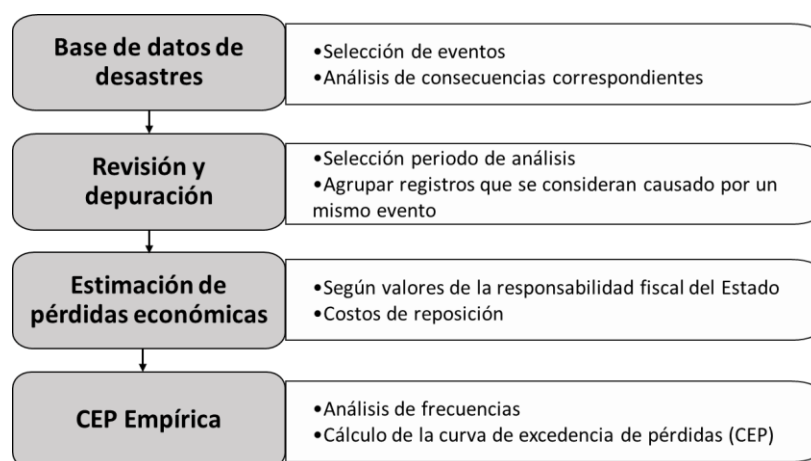


Figura 204. Esquema de metodología de cálculo de la curva de excedencia de pérdidas retrospectiva (A partir de la metodología de Velásquez (2015)).

### 1.35 Estimación de la tasa de excedencia

En la evaluación retrospectiva del riesgo, la curva de excedencia de pérdidas se calcula directamente de los datos disponibles. Estos datos corresponden a estimaciones del costo de los desastres ocurridos en el pasado (la estimación del costo asociado a desastres pasados se trata en la siguiente sección). Esta información se determina a partir de la base de datos DesInventar.

Nótese que, al ser una estimación basada en información histórica, la estimación en sí misma es incierta. Es decir, si hipotéticamente contásemos con más años de registro de desastres, o con un periodo de tiempo diferente, o incluso, con una metodología más acerca de estimación del costo de los eventos, la estimación de la tasa de excedencia cambiaría. Esto implica que el valor estimado para dicha tasa depende de la muestra de datos, y como dicha muestra es solo una realización (medida en un tiempo relativamente corto) del proceso de ocurrencia de pérdidas, la tasa de excedencia estimada es una variable aleatoria.

Al realizar la evaluación retrospectiva, los desastres valorados se organizan en una gráfica de pérdida contra el tiempo, como se muestra en la Figura 205 **Error! Reference source not found.** Al establecer una cantidad de pérdida arbitraria  $p$ , podemos identificar de la gráfica todos los eventos que exceden  $p$  (véase la Figura 205). Es posible determinar de esta información los tiempos entre eventos para  $p$ . El conjunto de valores observados  $(T_1, T_2, \dots, T_n)$  se usará para estimar el parámetro  $\lambda$  de una distribución exponencial, la cual corresponde a la distribución de probabilidad del tiempo entre eventos de un proceso de Poisson, que además tiene la particularidad de ser el mismo  $\lambda$  que define el proceso de Poisson completamente (i.e. es la misma tasa de excedencia,  $\lambda = v(p)$ ).

La ventana de tiempo para calcular  $\lambda$  varía dependiendo del país y de la información disponible. Para Uruguay se tiene un periodo de registros de 25 años, de acuerdo con el periodo entre 1988 y 2013 de la plataforma DesInventar.



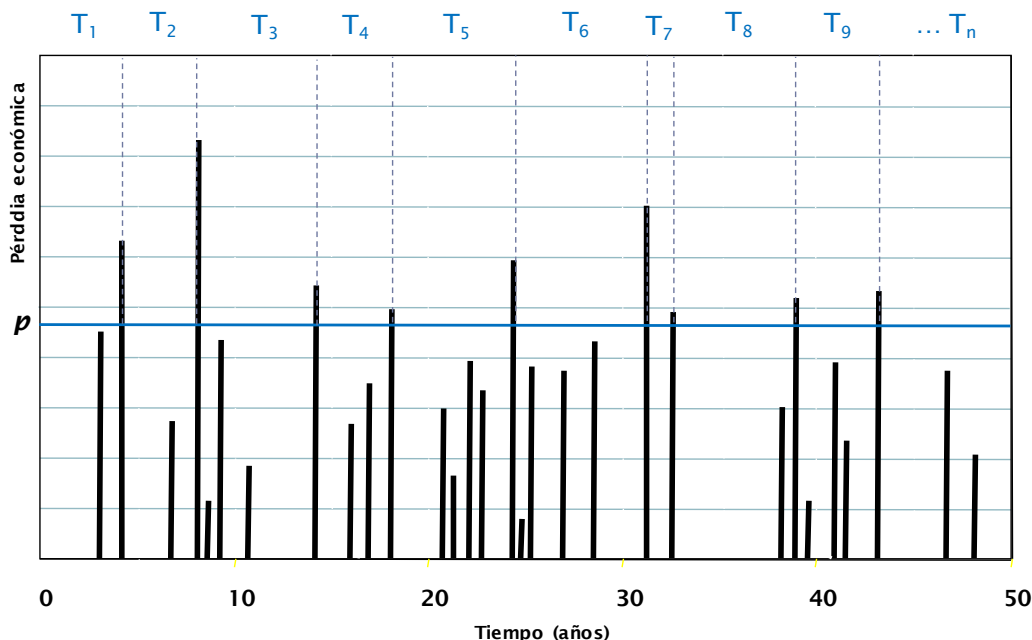


Figura 205. Ilustración de pérdidas contra el tiempo, valoradas a partir de una base de datos de desastres.

La tasa de excedencia poblacional ( $\lambda$ ) es estimada mediante la tasa de excedencia empírica ( $\Lambda$ ) de la siguiente manera:

$$\Lambda = \frac{n - 1}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad \text{Ec. 0-1}$$

En donde  $n$  es el número de eventos que superan la pérdida  $p$  y  $T_i$  son los tiempos observados. Este estimador cumple con los cuatro criterios estadísticos de calidad de la estimación de parámetros de distribuciones de probabilidad: es no sesgado, de varianza mínima, consistente y suficiente. Ahora bien, es posible demostrar que el estimador  $\Lambda$  sigue una distribución de probabilidad *Gamma inversa* con parámetros  $n$  y  $(n-1) \lambda$  a partir de lo cual se puede determinar su coeficiente de variación (CV) como:

$$CV = \frac{1}{\sqrt{n - 2}} \quad \text{Ec. 0-2}$$

El coeficiente de variación indica la relación entre la desviación estándar y la media de una variable aleatoria. Como se indica en la ecuación Ec. 0-2, CV disminuye a

medida que el número de datos ( $n$ ) aumenta. La ecuación Ec. 0-2 es una fórmula estándar, aplicable a cualquier problema de estimación retrospectiva del riesgo, en donde el CV de la tasa de excedencia varía con el tamaño de la muestra como se indica en la Figura 206 **Error! Reference source not found..**

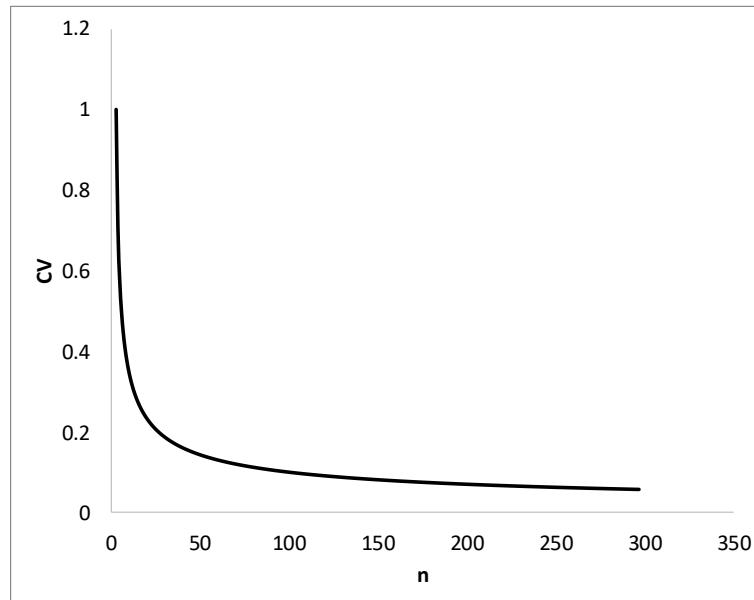


Figura 206. Variación del coeficiente de variación de la tasa de excedencia con el tamaño de la muestra.

Como puede verse en la Figura 206, el CV crece rápidamente a medida que  $n$  disminuye. Esto quiere decir que, al estimar la tasa de excedencia de pérdidas grandes (eventos catastróficos) en base a la información histórica, para los cuales se contará con un valor pequeño de  $n$  (es decir, pocos eventos que exceden esa pérdida dentro de la base de datos), la dispersión de la estimación (i.e. su desviación estándar) es muy grande en comparación a la estimación misma, lo cual implica una posibilidad de error muy grande. Por el contrario, al estimar la tasa de excedencia de pérdidas con cuantía menor,  $n$  será necesariamente un número más grande y, en consecuencia, la dispersión de la tasa disminuye a valores incluso despreciables en la práctica. Es esto por lo que, para cuantías de pérdida menores, la evaluación retrospectiva es suficiente, mientras que, para pérdidas grandes o muy grandes, resulta estadísticamente insuficiente y debe entonces recurrirse al uso de modelos analíticos.

### 1.36 Costo de los desastres

La valoración económica de los efectos de los desastres que se han presentado en el pasado es una tarea que no se ha hecho en forma sistemática. En el mejor de los casos, lo que se ha hecho es la consolidación de algunos datos acerca de los efectos; lo que ha permitido reflejar, de manera muy general y no sin dudas y controversias, el costo directo de daños y pérdidas. Claramente, aún con técnicas bien concebidas, las evaluaciones se limitan a cifras muy básicas de costos que han estado lejos de dimensionar el impacto de los desastres de una manera mucho más rigurosa, en términos sociales, ambientales y económicos. Esto se presenta por la falta de información precisa o confiable, por la inevitable diversidad de criterios y por las subjetividades inherentes de los mismos evaluadores o interesados. En realidad, el impacto de un desastre difiere del costo per se. Es esto por lo que el problema de la medición del impacto se presenta en la literatura como algo irresoluble, o en el mejor de los casos como inmedible. Sin embargo, los intentos de medición tienden a concentrarse en:

- a. Los efectos causados por grandes desastres, ignorando los efectos de los pequeños e incluso, en muchos casos, los efectos de los desastres de mediana magnitud cuando éstos no tienen un elevado costo que afecte directamente las principales variables de tipo macroeconómico.
- b. Atender la medición de los efectos causados a sectores consolidados de la economía o estructuras formales, ignorando los efectos en los sectores informales o marginales de subsistencia.

En lo que se refiere a la estimación del impacto, además de incluir el aspecto económico (tanto en negativo como en positivo) se debe considerar otro tipo de variables que no siempre es posible medir en términos monetarios o cuya cuantificación se dificulta por su naturaleza. Entre ellas, se puede mencionar la desarticulación económica de sectores marginales e informales de la economía local, la pérdida del patrimonio familiar o individual de sectores marginales, la destrucción de formas de subsistencia de autoconsumo, la migración causada por un desastre, además de otros factores que pueden darse en casos específicos, como puede ser la destrucción parcial o total de sitios y edificios históricos, obras de arte, patrimonio científico, etc.

En general, cuando ocurre un gran desastre, existen mayores posibilidades -o al menos mejores condiciones- de que los recursos para ayuda y reconstrucción fluyan hacia las poblaciones afectadas, aunque esto no siempre suceda así y tampoco se refleje en una distribución equitativa de ellos, pero generalmente cuando ocurre un desastre de pequeña o mediana magnitud, es la propia población la que tiene que invertir recursos para rehabilitar sus actividades productivas y cotidianas, dado que en la mayoría de los casos la ayuda proveniente tanto de los gobiernos centrales como de organismos externos, es prácticamente nula. Son en cierta forma desastres “invisibles”. Por otra parte, normalmente los gobiernos locales son muy débiles en lo que se refiere a la disponibilidad de recursos para la inversión o en la capacidad para gestionarlos ante otros niveles de gobierno, en la disponibilidad de personal calificado y en la existencia de esquemas de planificación o gestión territorial efectiva, lo que contribuye a que los desastres tengan un mayor impacto, si no directo, sí en términos de los efectos secundarios que se reflejan en un deterioro aún mayor de los niveles de vida de la población o en la imposibilidad de mejorarlos en el corto y mediano plazo. En el caso de las poblaciones que permanentemente sufren algún tipo de desastre, la pérdida de los medios de subsistencia puede representar uno de los aspectos más importantes de obstaculización para el desarrollo, ya que cada suceso interrumpe la actividad normal y cancela la posibilidad de mejorar esos medios de subsistencia al invertir los pocos recursos económicos existentes en su reposición, que con frecuencia se hace en condiciones menos favorables que las que se tenían anteriores a su ocurrencia.

Por lo anterior y sin pretender resolver la complejidad de la evaluación del impacto de los desastres, este informe intenta ilustrar, con una técnica simplificada, el costo indicativo que hubiesen tenido que asumir los gobiernos centrales, si se hubiera cubierto en el pasado la reposición, reparación o reconstrucción de los activos afectados. Esto en función de los limitados datos disponibles de los efectos ocurridos, que usualmente son deficientes e incompletos, particularmente en el caso de los desastres menores. En otras palabras, se intenta dar cuenta de los costos que, al no ser cubiertos, en muchos casos, por los gobiernos, han tenido que ser asumidos o absorbidos por los afectados. Esta, aunque es una valoración económica hipotética, simplificada y conservadora, ilustra de alguna manera el impacto a las comunidades en su contexto y el no despreciable gasto

que hubiesen tenido los gobiernos. De esta manera se revela, a través de las cifras de los eventos históricos y el uso de la curva empírica de excedencia de pérdidas, un problema especialmente relevante en los países en desarrollo donde los desastres, particularmente los menores, no han sido visualizados en su verdadera dimensión social y económica. De paso se da una idea de los recursos económicos que deberían tener los gobiernos para atender la reposición de activos y medios de sustento de los eventos más recurrentes.

Existen varias metodologías para estimar el costo de los desastres. Una de las más utilizadas es la descrita en el “Manual para la evaluación del impacto socioeconómico y ambiental de los desastres” (CEPAL, 2003). Esta técnica contiene una guía que orienta la manera como se puede hacer una estimación del costo económico de los desastres. En desastres usualmente mayores o relevantes para los gobiernos nacionales y los organismos internacionales, esta técnica ha sido utilizada para dar cuenta de este tipo de eventos, por solicitud expresa de los gobiernos, sin embargo el detalle de la información requerida, la necesidad de contar con especialistas en diferentes sectores y el tiempo necesario para su correcta aplicación hacen inviable su uso cuando se trata de estimar el costo de cientos o, en ocasiones, de miles de desastres menores registrados en el nivel local.

A pesar de no siempre poder aplicar en su totalidad una metodología detallada como la mencionada, para el caso de desastres mayores se reconoce que es la mejor opción, si se hace un esfuerzo para determinar no sólo el costo sino el impacto del desastre de acuerdo con los diferentes contextos. Esto se traduce en la necesidad de llevar a cabo la reflexión de para quién es el desastre y sus implicaciones. Ahora bien, para el caso de los muchos desastres menores que se presentan en la mayoría de los países, dadas las limitaciones prácticas del uso de métodos detallados de valoración de efectos directos e indirectos y por la ausencia obvia de información, se ha desarrollado una técnica simplificada de valoración, basada en la reposición de activos, para efectos de dar cuenta de las implicaciones que tienen los desastres en lo local y al mismo tiempo en forma acumulada y recurrente para un país o una región. Su enfoque no es la valoración de lo que se ha destruido (e.g. una vivienda precaria) sino la valoración de la

reposición o el reemplazo del activo como resultado de la responsabilidad fiscal del estado (e.g. una vivienda básica o de interés social).

Esta metodología permite valorar los principales efectos de los desastres, de los cuales se disponga una información básica, de manera que al utilizar las bases de datos de desastres se pueda contar con información indicativa para caracterizar tanto la recurrencia como el costo de los desastres en una región o en un país. La metodología empleada hace uso de la base de datos DesInventar (<http://www.desinventar.org/>). Esta base de datos provee información de los efectos en la población y de los daños que se han presentado por diferentes tipos de evento; e.g. sismos, inundaciones, deslizamientos, volcanes, huracanes y sequías, entre otros. Dicha información puede considerarse razonablemente creíble y consistente después de cierta depuración y útil por las siguientes razones:

- a. Una vez los efectos han sido valorados con criterios coherentes con el propósito del análisis, permite estimar las consecuencias económicas de los eventos y facilita la estimación en forma confiable de cuáles de dichos eventos dominan o controlan las mayores pérdidas en un país o región.
- b. Complementa los resultados de la evaluación analítica o prospectiva del riesgo, ya que permite definir en forma empírica la curva de excedencia de pérdidas para los eventos de menor intensidad. En este segmento de la curva de excedencia de pérdidas, usualmente, las evaluaciones analíticas son poco confiables.
- c. Sirve como referente para contrastar el costo de desastres ocurridos con estimaciones de pérdidas realizadas con modelos analíticos de evaluación del riesgo físico, utilizando para el efecto escenarios específicos deterministas.

### **1.37 Curva empírica de excedencia de pérdidas para Uruguay**

La base de datos de desastres DesInventar para Uruguay contiene registros que abarcan desde el año 1959 hasta el año 2014. La Figura 207 **Error! Reference source not found.** ilustra la evolución del número de eventos ocurridos para para la base de datos completa.

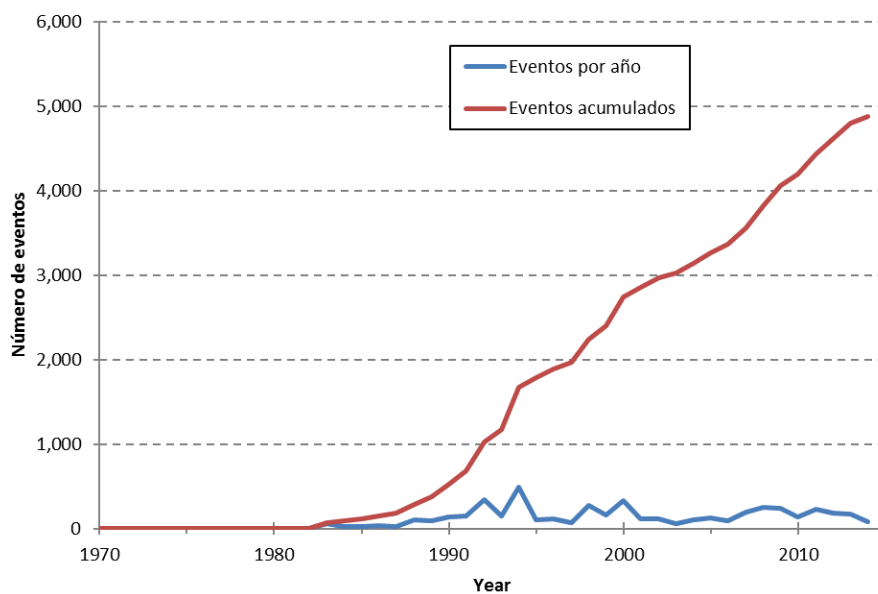


Figura 207. Número de registros por año y acumulado de desastres en DesInventar periodo 1959-2014.

Debido al extenso catálogo de eventos disponibles es necesario evaluar su regularidad y su relevancia considerando las condiciones de exposición y vulnerabilidad actuales. Debido a esto, se seleccionó como periodo de análisis el rango comprendido entre los años 1988 – 2013, el cual presenta un intervalo temporal estadísticamente consistente en cuanto al número de eventos ocurridos anualmente.

La Figura 208 **Error! Reference source not found.** ilustra la evolución del número de eventos ocurridos para cada año seleccionado. Cabe anotar que los resultados acá presentados incluyen el efecto de todos los desastres reportados en la base de datos DesInventar para Uruguay, y no exclusivamente los asociados a sequías o inundaciones, con el fin de proveer una visión retrospectiva completa del riesgo.

Una vez determinado el periodo de análisis, se seleccionan las amenazas naturales presentes en el país, en las cuales se agruparán las diferentes causas reportadas en la base de datos. Se excluyen de este análisis los eventos antrópicos.

- Sequía: eventos hidrometeorológicos en los que la afectación es debida a la ausencia extrema de humedad en la atmosfera.
- Hidrometeorológicos: eventos hidrometeorológicos de lluvias, tormentas, granizadas, heladas y otros en los que la afectación sea debida a la condensación del aire.

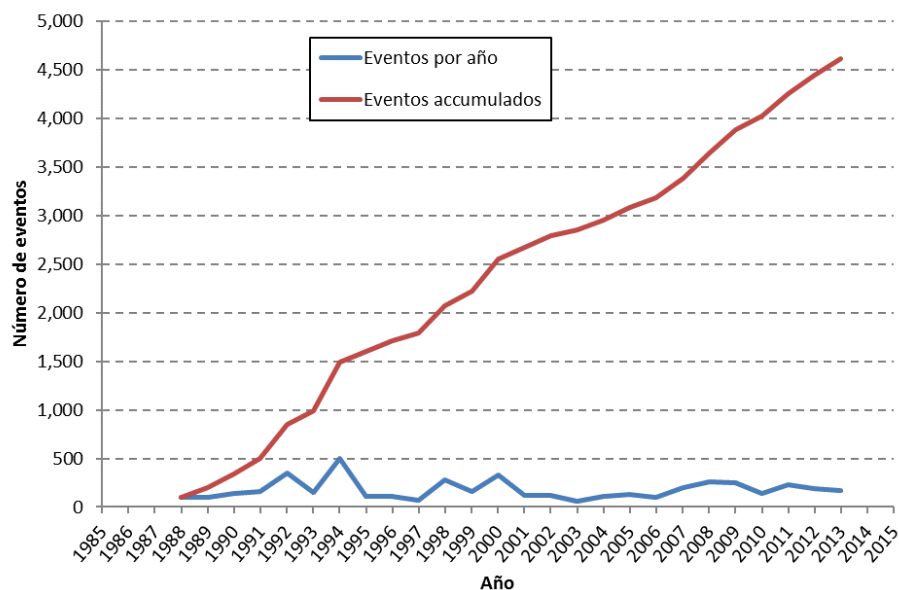


Figura 208. Número de registros por año y acumulado de desastres en DesInventar periodo 1988-2013.

La Figura 209 **Error! Reference source not found.** ilustra la evolución del número de eventos ocurridos para cada año seleccionado, filtrado para eventos de sequía e hidrometeorológicos.

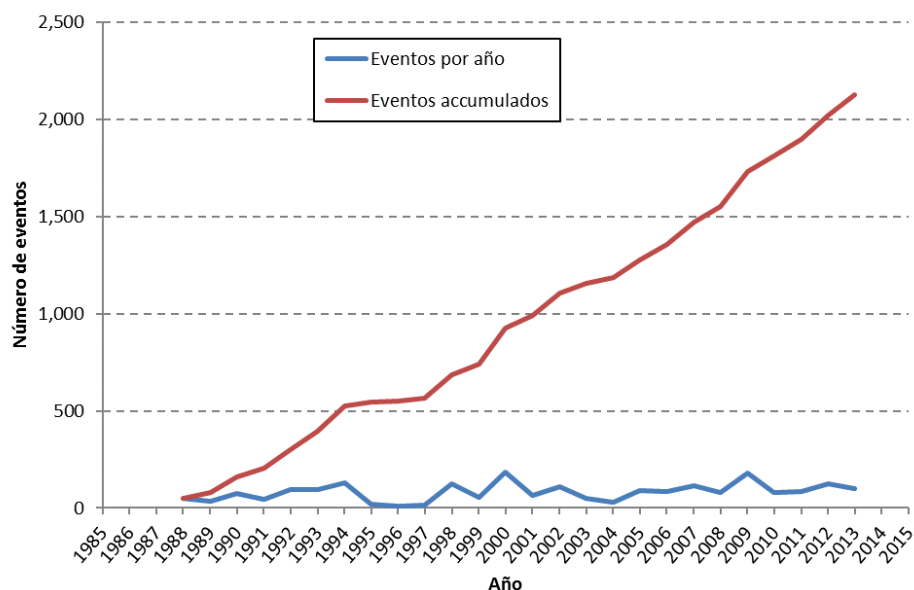


Figura 209. Número de registros por año y acumulado de desastres en DesInventar para sequías y eventos hidrometeorológicos en el periodo 1988-2013.



La afectación por categoría se muestra a continuación. Se presenta un número de registros considerable para eventos hidrometeorológicos y para sequías no se presentan afectaciones en esas categorías. Las afectaciones de las sequías no se ven reflejadas en heridos o muertos, o en daños a construcciones. Por el contrario, para el caso de las sequías se definen en afectaciones al sector agropecuario, de suministro de agua, energético y ambiental. Estas categorías no se consideran en DesInventar.

Tabla 81. Afectación total por categoría.

Categoría	Eventos	Heridos	Muertos	Casas dañadas	Casas destruidas
Sequía	115	0	0	0	0
Hidrometeorológicos	2,010	317	205	70,431	2,382

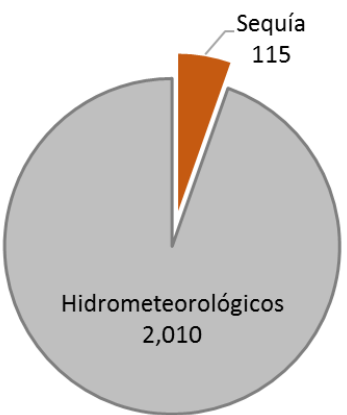


Figura 210. Distribución de la afectación total por categoría.

La metodología empleada para el almacenamiento de eventos en la base de datos recomienda su registro al nivel local, esto es, en la mayoría de los casos municipios y ciudades. Es por esto que para realizar el presente estudio a nivel nacional es necesario agruparlos. Para este caso se agruparán los registros correspondientes a eventos hidrometeorológicos y deslizamientos a nivel regional (por Departamento, campo “level0” de la base de datos). El resto de las categorías se agrupará a nivel nacional. La combinación de los registros presentes en la base de datos empleará parámetros temporales y espaciales que permitan de manera aproximada considerar los eventos causantes. La agrupación se ejecuta de acuerdo con las relaciones temporales entre las categorías establecidas en la Tabla 82.

Los parámetros espaciales toman en cuenta el lugar donde ocurrió el evento para agruparlo con los registros relacionados cercanos. El intervalo empleado se justifica en la duración esperada de cada evento, más un intervalo entre la ocurrencia de un evento y su correspondiente reporte. En el caso de la sequía, considerando que los diferentes eventos concentraban los registros en un mismo día, se eligió un límite que permitiera agrupar y no dejar aislados otros registros cercanos. Los parámetros temporales toman en cuenta que las consecuencias causadas por un evento pueden ser reportadas en diferentes días. También se considera que una categoría puede desencadenar un evento secundario perteneciente a otra categoría.

Tabla 82. Relación entre categorías.

<b>Categoría detonante</b>	<b>Categoría causada</b>	<b>Intervalo [días]</b>
Hidrometeorológicos	Hidrometeorológicos	2
Hidrometeorológicos	Deslizamientos	2
Sequía	Sequía	30

De esta forma, se obtienen los resultados del número de eventos y la afectación total por categoría incluida en el DesInventar, después de llevar a cabo la agrupación, los cuales se presentan en la Tabla 83.

Tabla 83. Resumen de afectación después de la agrupación

<b>Categoría</b>	<b>Eventos</b>	<b>Heridos</b>	<b>Muertos</b>	<b>Casas dañadas</b>	<b>Casas destruidas</b>
Sequía	22	0	0	0	0
Hidrometeorológicos	467	317	205	70,431	2,382

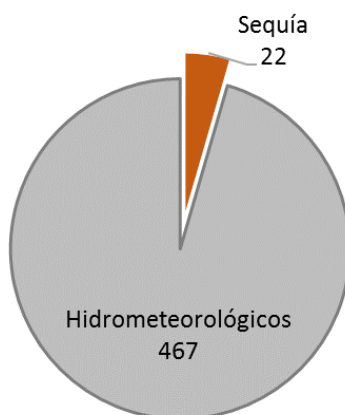


Figura 211. Distribución de la afectación total por categoría después de agrupación.

### 1.37.1 Valoración y curva de excedencia de pérdidas

La valoración económica de los registros agrupados se realiza estimando el costo de la responsabilidad fiscal del estado hacia los sectores más vulnerables de la sociedad, y considerando que la base de datos de desastres en su mayoría cubre desastres menores los cuales principalmente afectan pequeñas poblaciones o barrios marginales y que el mayor porcentaje de la población afectada durante un desastre corresponde a los sectores más vulnerables (Velásquez, 2015). Se considera entonces que el Estado, debido a su responsabilidad fiscal repondrá las viviendas destruidas mediante una vivienda de interés social y colaborará en parte con la reparación de las viviendas averiadas.

Tabla 84. Costos unitarios.

	Casas averiadas	Casas destruidas	Escuelas (3)	Centros de salud (4)	Vías (5)
Área [m2]	45	45	75	48	
Valor/m <sup>2</sup> [USD] <sup>(1)</sup>	501	501	501	501	
Desarrollo urbano [%] <sup>(2)</sup>	0	0.4	0.4	0.4	
Impacto [%]	0.25	1	1	1	
Costo [\$USD] por unidad	5,637	31,567	52,613	33,672	161

(1) Se estima que el costo de un metro cuadrado de construcción es de 1.18% PIBPC + 304.74 USD

(2) Entre los costos que engloba este concepto se encuentran: viabilidad, servicios públicos, vías, saneamiento y parques

(3) Se estiman dos aulas (6m x 5m) y un espacio administrativo/logístico de 15 m2

(4) Se considera un área de espera (3x4), una oficina (3x4), un área para atención básica y primeros auxilios, y áreas para almacenamiento (insumos médicos, mantenimiento)

(5) El costo de reparación/rehabilitación por metro de vía se obtiene del proyecto ROCKS (Banco Mundial), el cual se multiplica por valores de distribución de vías asfaltadas (Indicadores del banco mundial) y se corrige por los años desde que el proyecto se culminó.

Conforme a los costos unitarios presentados en la Tabla 84 y a la afectación presentada en la Tabla 83, para cada categoría después de la agrupación, se realiza la valoración de las pérdidas generadas para eventos asociados a procesos hidrometeorológicos. Para la sequía, se toma la valoración de pérdidas para el sector agropecuario, reportadas en la Sección anterior en la Tabla 4. La Tabla 85 **Error! Reference source not found.** presenta las pérdidas obtenidas para cada categoría.

Tabla 85. Pérdidas por categoría (en dólares).

Categoría	Eventos	Eventos por año (promedio)	Pérdida acumulada	Pérdida anual (promedio)	Pérdida por evento (promedio)
Sequía	2	0.08	1,068,000,000	41,076,923	534,000,000
Hidrometeorológicos	467	18	1,217,089,027	46,811,116	2,606,186

La

Tabla 86 **Error! Reference source not found.** muestra los valores de pérdida acumulada, pérdida anual promedio (PAE) y pérdida por evento.

Tabla 86. Pérdida anual esperada (en dólares).

Eventos	Eventos por año (promedio)	Pérdida acumulada	Pérdida anual (promedio)	Pérdida por evento (promedio)
469	18	2,285,089,027	87,888,039	4,872,258

Una vez valorados los diferentes registros y agrupados en eventos, la curva se construye evaluando para diferentes niveles de pérdida el número de eventos que igualan o superan dicho nivel de pérdida sobre el periodo de tiempo de eventos disponible. Ver Velásquez (2015) para mayor detalle. La Figura 212 **Error! Reference source not found.** muestra la CEP retrospectiva para Uruguay, indicando el valor estimado de la tasa de excedencia y su correspondiente banda de incertidumbre construida como la tasa estimada +/- su desviación estándar.

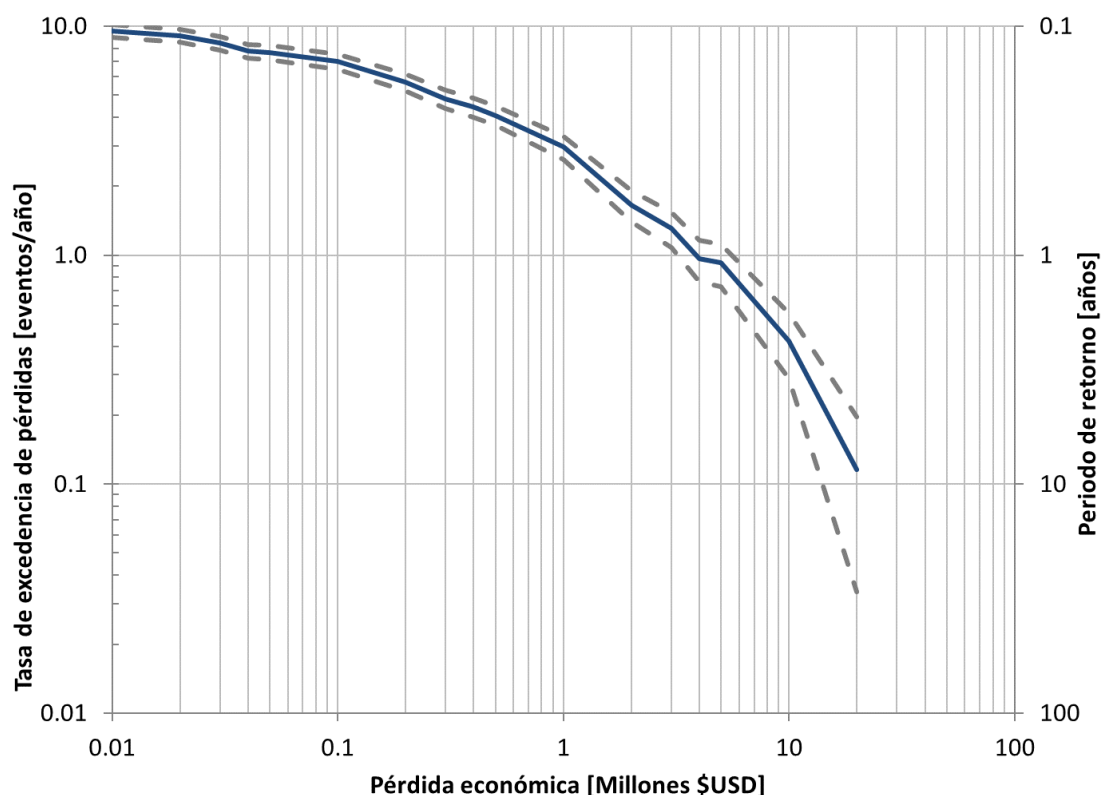


Figura 212. Curva empírica de excedencia de pérdidas. Tasa de excedencia estimada +/- una desviación estándar.

En la Tabla 87 **Error! Reference source not found.** se presenta la lista de eventos catastróficos con mayor pérdida en Uruguay, de acuerdo con los registros de DesInventar entre 1988 y 2013 y la Tabla 4 de este documento. Se resaltan los eventos de sequía reportados para los eventos 2008-2009 y 1999-2000. Es importante notar que estos valores de pérdidas no necesariamente fueron pagados por los gobiernos nacionales o locales, fueron pérdidas que también cubrieron los afectados.

Tabla 87. Eventos catastróficos de mayor pérdida en Uruguay entre 1988-2013 reportados en plataforma DesInventar

Año	Categoría	Pérdida [USD]
2008-2009	Sequía	868,000,000
2002	Hidrometeorológicos	537,576,374
1999-2000	Sequía	200,000,000
2005	Hidrometeorológicos	63,190,632
2007	Hidrometeorológicos	25,392,401
1999	Hidrometeorológicos	18,038,400

1998	Hidrometeorológicos	15,253,642
2010	Hidrometeorológicos	14,826,219
1999	Hidrometeorológicos	14,634,779
2009	Hidrometeorológicos	14,047,404
1998	Hidrometeorológicos	13,461,525
2001	Hidrometeorológicos	11,662,939

## CURVA HÍBRIDA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS

---

Teniendo en cuenta la modelación prospectiva del riesgo de sequía, en conjunto con la evaluación empírica a partir de los eventos históricos, se construyó la curva híbrida de pérdida máxima probable, la cual es una métrica fundamental de la estimación del riesgo. La confirmación de la curva híbrida, a través de la evaluación empírica y analítica de riesgo, se llevó a cabo siguiendo la metodología desarrollada por este grupo consultor, y documentada en Velázquez (2015).

### 1.38 Construcción de la curva de pérdidas histórica

En la evaluación retrospectiva del riesgo, la curva de excedencia de pérdidas se calcula directamente de los datos disponibles que corresponden a estimaciones del costo de desastres previos. Esta información se determina a partir de la base de datos DesInventar que para el caso de Uruguay contiene registros que abarcan desde el año 1959 hasta el año 2014. Como periodo de análisis se seleccionó el rango comprendido entre los años 1988 – 2013, el cual presenta un intervalo temporal estadísticamente consistente en cuanto al número de eventos hidrometereológicos (sequías, lluvias, tormentas, etc.) ocurridos anualmente.

Esta metodología tiene ciertas limitaciones, ya que para el caso de las sequías las pérdidas se definen en afectaciones al sector agropecuario, de suministro de agua, energético y ambiental y estas categorías no se consideran en el DesInventar.

A partir de la construcción de la curva histórica de pérdidas para el Uruguay se pueden obtener datos sobre pérdidas asociadas a periodos de retorno cortos. En la Figura 213 **Error! Reference source not found.** se muestra la curva de pérdidas históricas vs. periodo de retorno, la cual alcanza valores de ocho años de período de retorno. A partir de esta curva, se puede concluir que, según los registros históricos, una pérdida de \$20 millones de dólares ocurrió en promedio cada ocho años en Uruguay

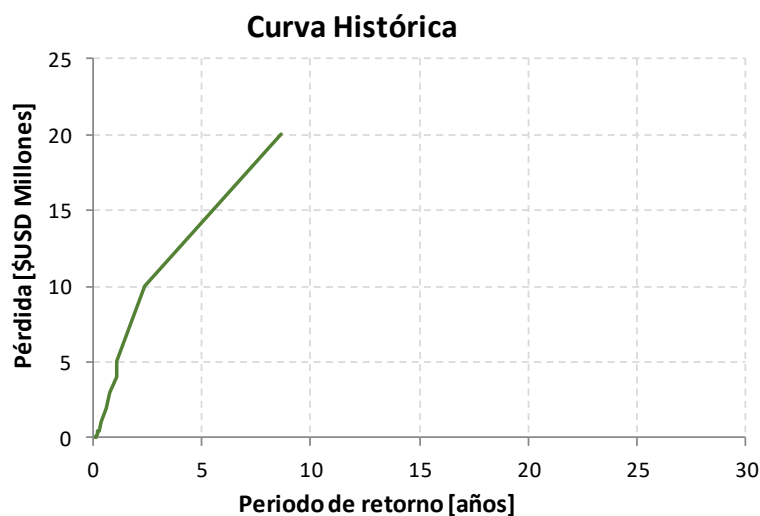


Figura 213. Curva de pérdidas histórica.

### 1.39 Construcción de la curva de pérdidas simulada

La curva simulada de pérdidas usada para construir la curva híbrida, y que se muestra a continuación, corresponde a la misma curva prospectiva de riesgo calculada para el sector agropecuario del país: los ocho cultivos analizados a escala nacional y los sistemas de ganadería bovina y ovina, presentada con mayor detalle en la sección 1.34 de este informe. Adicionalmente, la interpretación de los resultados presentados en esta curva se explica en la sección 1.12 de este producto.

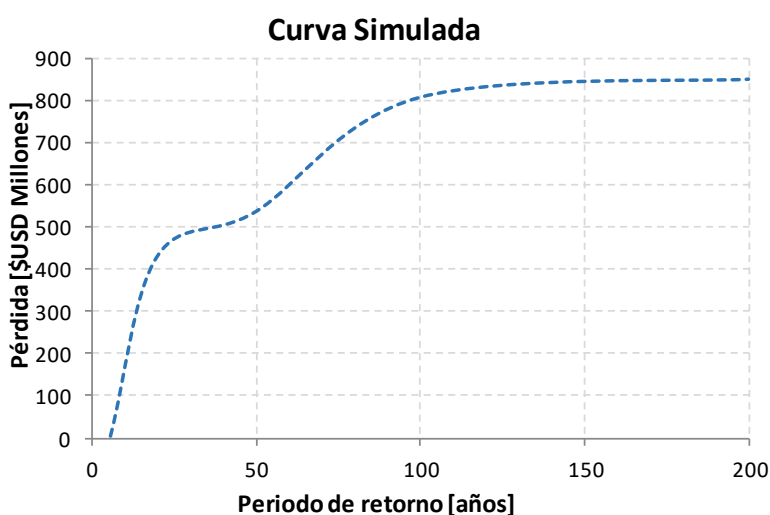


Figura 214. Curva de pérdidas simulada.



#### 1.40 Resultados de la curva híbrida de pérdidas

La curva híbrida de pérdidas es el resultado de integrar la curva de pérdidas histórica con la curva de pérdidas catastróficas o curva simulada, de manera que se cuenta con una curva completa de pérdidas, que se convierte en un insumo indispensable para la estimación de los niveles de pérdidas y para el desarrollo de estructuras de retención y transferencia del riesgo. La Figura 215 **Error! Reference source not found.** muestra la comparación de la curva histórica y la curva simulada. Debido a que la curva de pérdidas histórica reporta valores de período de retorno bajos, la curva híbrida termina siendo controlada por los valores de la curva simulada. Es así como la curva híbrida es la envolvente que resulta de la curva de pérdidas histórica y la curva de pérdida simulada. Estas curvas tienen la misma importancia en el análisis, por lo que no se usan pesos adicionales en el cálculo de la envolvente. La Figura 216 **Error! Reference source not found.** ilustra la curva híbrida de pérdidas en el sector agropecuario debido a la sequía para Uruguay.

La construcción de la curva híbrida para el riesgo por sequía presenta una alta complejidad por la limitación de información disponible sobre registros de pérdidas históricas. En este estudio se construyó la curva de pérdidas históricas a partir de la plataforma DesInventar y otras fuentes oficiales del país (Bartaburu et al. 2009; PNUD, 2007; Montes y Bartaburu, 2007; Paolino, Methol y Quintans, 2010; Methol y Silveira, 2013; ARU, 2009 y Bartaburu, 2010), que no reportan la información de forma sistematizada. Por esta razón es importante contar con medidas que busquen optimizar y homogenizar el proceso de reporte y registro de pérdidas por eventos de sequía en el futuro. Por el contrario, las curvas de pérdidas simuladas son el resultado de una metodología de evaluación de riesgo robusta, y cuyos resultados cubren un amplio rango de periodos de retorno.

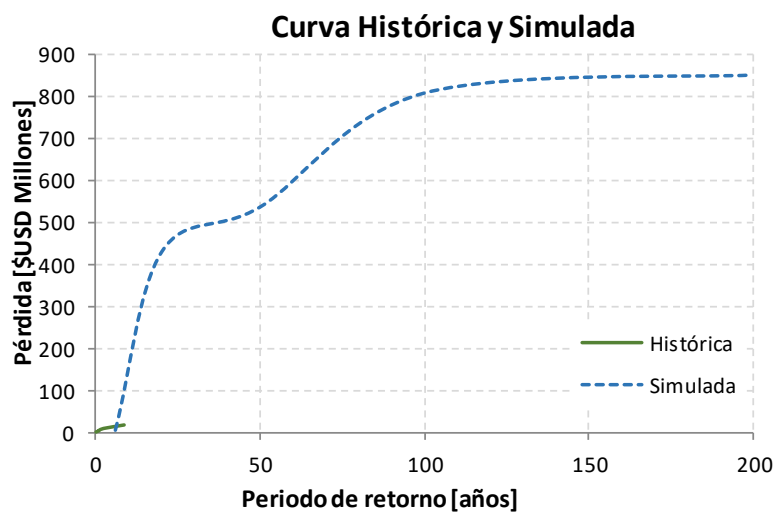


Figura 215. Curva de pérdidas históricas y simuladas para Uruguay.

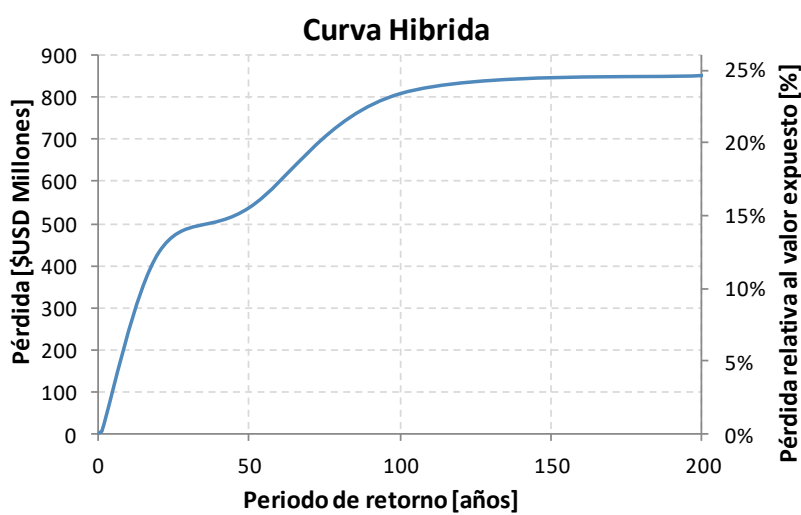


Figura 216. Curva híbrida de pérdidas calculada para Uruguay.

## **Parte II**

Evaluación del Riesgo por Inundación en la ciudad de Río Branco

## METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE RIESGO POR INUNDACIÓN

---

Se incluyen en esta sección algunas consideraciones teóricas asociadas al cálculo del riesgo por inundación. Esto debido a que, en rigor, el procedimiento para el cálculo del riesgo difiere del empleado en el caso de las sequías. No obstante, se aclara que ambos enfoques son equivalentes y derivan en el mismo tipo de resultados. El usar diferentes aproximaciones para la evaluación del riesgo por sequía o por inundación responde, exclusivamente, a cuestiones prácticas y de eficiencia en la aplicación de los modelos de cálculo.

### 1.41 Procedimiento para el análisis del riesgo en bienes inmuebles

La evaluación de riesgo de inundación en bienes inmuebles requiere de tres pasos de análisis, que se describen a continuación:

- Evaluación de la amenaza: se define un conjunto de eventos, con sus respectivas frecuencias de ocurrencia, que representan de manera integral la amenaza correspondiente. Cada escenario contiene la distribución espacial de parámetros que permiten construir la distribución de probabilidad de las intensidades producidas por su ocurrencia.
- Definición del inventario de elementos expuestos: debe definirse el inventario de elementos expuestos, el cual debe especificar la localización geográfica del bien expuesto más los siguientes parámetros, que califican el elemento:
  - Valor físico o costo de reposición del bien.
  - Valor humano o número de ocupantes estimado.
  - Clase estructural a la que pertenece el bien.
- Vulnerabilidad de las construcciones: debe asignarse a cada una de las clases estructurales una función de vulnerabilidad. Esta función caracteriza el comportamiento de la construcción durante la ocurrencia de inundaciones. Las funciones de vulnerabilidad definen la distribución de probabilidad de las pérdidas como función de la intensidad producida durante un escenario específico. Se definen mediante curvas que relacionan el valor esperado del daño y la desviación estándar del daño con la intensidad del fenómeno.

### 1.41.1 Ecuación básica

Considerando el objetivo básico del análisis probabilista del riesgo expuesto anteriormente, es necesario plantear entonces la metodología específica de cálculo de las frecuencias de ocurrencia de niveles específicos de pérdidas asociados a los activos expuestos en lapsos determinados de tiempo y ante la ocurrencia de amenazas naturales.

El riesgo se describe mediante la *curva de excedencia de pérdidas* que especifica las frecuencias, con que ocurrirán eventos en que se exceda un valor especificado de pérdidas. Esta cantidad, que fue también estimada para el riesgo por sequía, se determina en este caso mediante la siguiente ecuación, que es una de las múltiples formas que adopta el teorema de la probabilidad total:

$$\nu(p) = \sum_{i=1}^{\text{Eventos}} \Pr(P > p | \text{Evento}_i) F_A(\text{Evento}_i) \quad 0-1$$

En la ecuación anterior  $\nu(p)$  es la tasa de excedencia de la pérdida  $p$  y  $F_A(\text{Evento}_i)$  es la frecuencia anual de ocurrencia del evento  $i$ , mientras que  $\Pr(P > p | \text{Evento}_i)$  es la probabilidad de que la pérdida sea superior a  $p$ , dado que ocurrió el  $i$ -ésimo evento. La suma en la ecuación anterior se hace para todos los eventos potencialmente dañinos. El inverso de  $\nu(p)$  es el periodo de retorno de la pérdida  $p$ , identificado como  $Tr$ .

La pérdida  $p$  a que se refiere la Ecuación 6-1 es la suma de las pérdidas que acontecen en todos los bienes expuestos. Conviene hacer notar lo siguiente en este contexto:

- La pérdida  $p$  es una cantidad incierta. Debe, por tanto, ser vista y tratada como una variable aleatoria.
- La pérdida  $p$  se calcula como la suma de las pérdidas que se presentan en cada uno de los bienes inmuebles expuestos. Cada uno de los sumandos es una variable aleatoria y entre ellos existe cierto nivel de correlación.

En vista de la Ecuación 6-1, la secuencia de cálculo probabilista de riesgo es la siguiente:

1. Para un escenario, determinar la distribución de probabilidades de la pérdida en cada uno de los bienes expuestos.

2. A partir de las distribuciones de probabilidad de las pérdidas en cada bien, determinar la distribución de probabilidad de la suma de estas pérdidas, tomando en cuenta la correlación que existe entre ellas.
3. Una vez determinada la distribución de probabilidad de la suma de las pérdidas en este evento, calcular la probabilidad de que esta exceda un valor determinado,  $p$ .
4. La probabilidad determinada en el inciso anterior, multiplicada por la frecuencia anual de ocurrencia del evento, es la contribución de este evento a la tasa de excedencia de la pérdida  $p$ .

El cálculo se repite para todos los eventos, con lo que se obtiene el resultado indicado por la Ecuación 6-1.

#### 1.41.2 Incertidumbres

Como se observa en la Ecuación 6-1, y como se planteó anteriormente, la pérdida que se presenta en un grupo de bienes expuestos durante un escenario es una cantidad incierta que debe ser tratada como variable aleatoria.

Generalmente es impráctico determinar de manera directa la distribución de probabilidad de la pérdida en un bien expuesto condicionada a la ocurrencia de un escenario. Por razones metodológicas, la probabilidad de excedencia de la pérdida  $p$ , dado que ocurrió un evento, suele expresarse de la siguiente manera:

$$\Pr(P > p \mid \text{Evento}) = \int_I \Pr(P > p \mid I) f(I \mid \text{Evento}) dI \quad 0-2$$

El primer término del integrando,  $\Pr(P > p \mid I)$ , es la probabilidad de que la pérdida exceda el valor  $p$  dado que la intensidad local fue  $I$ ; este término, por tanto, toma en cuenta la incertidumbre que hay en las relaciones de vulnerabilidad. Por otro lado, el término  $f(I \mid \text{Evento})$  es la densidad de probabilidades de la intensidad, condicionada a la ocurrencia del evento; este término toma en cuenta el hecho de que, dado que ocurrió un evento, la intensidad en el sitio de interés es incierta.

## 1.42 Representación probabilista de la amenaza por inundación

### 1.42.1 Enfoque basado en eventos

El objetivo del análisis probabilista del riesgo es la caracterización, también probabilista, de las pérdidas esperadas sobre un conjunto de elementos expuestos, dada la ocurrencia de inundaciones. Como se mencionó anteriormente, y dado que hay incertidumbre en su estimación, la pérdida es entonces modelada como una variable aleatoria. En términos generales, interesa conocer lo siguiente acerca de la pérdida:

- El universo de todas las pérdidas posibles, es decir, el dominio de la variable aleatoria que describe la pérdida.
- La función de densidad de probabilidad de la pérdida, la cual está definida dentro del dominio de la variable.

En términos generales, un evento de pérdida **A**, definido dentro del universo de todas las pérdidas posibles (o espacio de muestreo) **S**, se puede representar en un diagrama de conjuntos como se muestra en la Figura 217 **Error! Reference source not found..** El evento **A** es un subconjunto de **S**, el cual es definido de manera totalmente arbitraria, es decir, su definición depende exclusivamente de a que pregunta se quiere contestar. En este sentido, el evento **A** puede estar definido, por ejemplo, como el conjunto de pérdidas mayores a 10 millones, o como el conjunto de pérdidas menores a 100 millones, o incluso como el conjunto de pérdidas entre 10 y 100 millones. Esto significa que **A** es definido por el tomador de decisiones, en función del tipo de decisiones que quiera tomar. Ahora bien, la definición de **A** en sí misma no es de interés; interesa conocer la probabilidad de **A**, denotada como **P(A)**. Entonces si, por ejemplo, **A** está definido como el conjunto de pérdidas mayores a 10 millones, lo que realmente interesa conocer es la probabilidad de que la pérdida sea mayor a 10 millones, es decir **P(A)**.

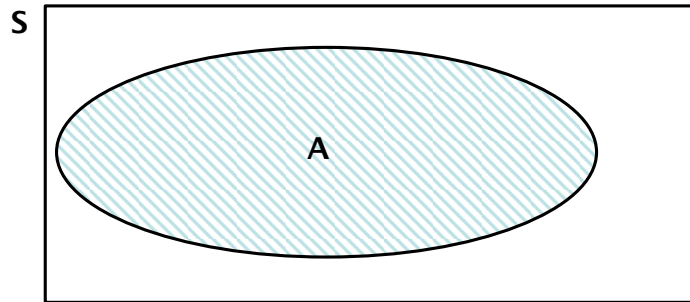


Figura 217. Representación gráfica de un evento arbitrario **A** dentro del espacio de muestra de pérdidas **S**.

Dado que los eventos **A** son definidos de manera arbitraria, resulta inconveniente realizar el análisis de riesgo para un conjunto **A** específico. Se requiere encontrar una manera mediante la cual sea posible determinar  $P(\mathbf{A})$  para cualquier evento **A** de interés. Esto se logra subdividiendo el espacio de muestreo **S** en un número finito de eventos base conocidos, **B** (Figura 218 **Error! Reference source not found.**).

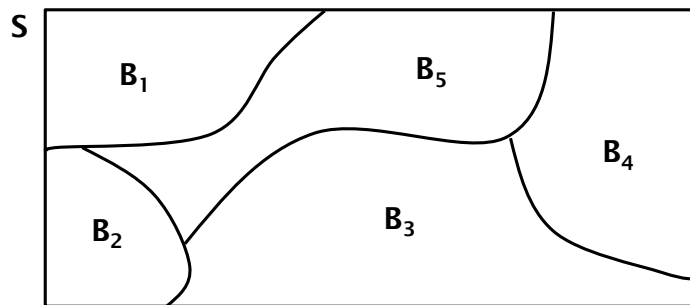


Figura 218. Subdivisión del espacio de muestra **S** en eventos base **B**.

Los eventos base **B** deben cumplir las siguientes características:

- *Ser mutuamente excluyentes.* En términos matemáticos esto significa que los conjuntos nunca se intersectan, es decir, su intersección es el conjunto vacío. En términos del análisis de riesgo esto quiere decir que los eventos de pérdida **B** no pueden ocurrir simultáneamente.
- *Ser colectivamente exhaustivos.* En términos matemáticos esto implica que la unión de todos los conjuntos **B** es igual al espacio de muestreo **S**. En términos del análisis de riesgo esto significa que los eventos **B**, en conjunto, representan de manera integral el universo de todas las pérdidas posibles.



Ahora bien, para poder determinar  $P(A)$ , para un evento  $A$  cualquiera, hacemos uso de las intersecciones que se producen entre el evento  $A$  y los eventos base  $B$  (Figura 219 **Error! Reference source not found.**).

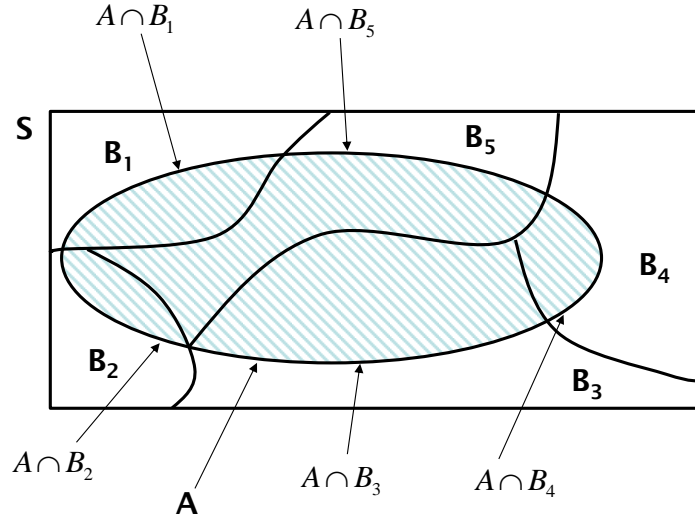


Figura 219. Intersecciones entre el evento  $A$  y los eventos base  $B$ .

Dado que el evento  $A$  se puede definir como la unión de sus intersecciones con los eventos base  $B$ , y recurriendo al tercer axioma de la teoría de la probabilidad<sup>22</sup>, podemos definir a  $P(A)$  como la suma, para todos los eventos base  $B$ , de la probabilidad de ocurrencia de las intersecciones:

$$P(A) = \sum_{j=1}^n P(A \cap B_j) \quad 0-3$$

Para cualquier evento base  $B_j$ , definimos la probabilidad  $P(A|B_j)$  como la probabilidad condicional de  $A$ , dado que  $B_j$  ha ocurrido. Esta probabilidad condicional está dada por:

$$P(A|B_j) = \frac{P(A \cap B_j)}{P(B_j)}, \quad P(B_j) \neq 0 \quad 0-4$$

Nótese que se asume que  $B_j$  ha ocurrido. Esto significa que el espacio de muestreo  $S$  es ahora reemplazado por un nuevo espacio de muestreo,  $B_j$ , y  $P(A|B_j)$  no es más que la probabilidad de  $A$  en ese nuevo espacio. De esta manera, reemplazando la

<sup>22</sup> El tercer axioma de la probabilidad establece que, para una colección contable de eventos mutuamente excluyentes, la probabilidad de su unión es igual a la suma de las probabilidades individuales.

Ecuación 6-5 en la Ecuación 6-4, llegamos a la solución de **P(A)**, que no es más que la definición del teorema de la probabilidad total:

$$P(A) = \sum_{j=1}^n P(A | B_j) \cdot P(B_j) \quad 0-5$$

La Ecuación 6-6, aplicada en el contexto de la evaluación del riesgo, es esencialmente igual a la Ecuación 6-1. Esta ecuación indica la probabilidad de ocurrencia de cualquier evento de pérdida sobre el espacio **S**.

Haciendo uso de la Ecuación 6-6 podemos calcular la probabilidad de cualquier evento **A**. La Tabla 88 **Error! Reference source not found.** muestra, a modo de ejemplo, tres eventos A arbitrarios y su medida de probabilidad calculada con la Ecuación 6.

Tabla 88. Eventos arbitrarios A y su medida de probabilidad.

Eventos arbitrarios A	Probabilidad
Pérdidas mayores a 10 millones	$P(p > 10) = \sum_{j=1}^n P(p > 10   B_j) \cdot P(B_j)$
Pérdidas menores a 100 millones	$P(p < 100) = \sum_{j=1}^n P(p < 100   B_j) \cdot P(B_j)$
Pérdidas entre 10 y 100 millones	$P(p > 10 \cap p < 100) = \sum_{j=1}^n P(p > 10 \cap p < 100   B_j) \cdot P(B_j)$

En resumen, dentro del contexto del análisis de riesgo, la definición de los eventos de interés **A** es totalmente arbitraria, por lo tanto, su probabilidad **P(A)** se calcula como función de la distribución de probabilidad de la pérdida para cada evento base **B<sub>j</sub>**. Esto implica que los eventos base **B** no pueden ser definidos de manera arbitraria.

En análisis de riesgo, la colección de eventos base **B** se construye a partir de la definición de escenarios de amenaza. Se define entonces una colección de escenarios de amenaza, usualmente generados de manera estocástica, los cuales representan de manera integral todas las formas como la amenaza puede manifestarse en el territorio de análisis. Estos escenarios deben cumplir las siguientes características:

- Ser mutuamente excluyentes.
- Ser colectivamente exhaustivos.
- Admitir una medida de probabilidad temporal, generalmente conocida como su frecuencia anual de ocurrencia.

- Admitir una medida de probabilidad espacial mediante la definición de su medida de intensidad como una variable aleatoria.

La medida de intensidad a la que se hace referencia corresponde a la variable física que representa la severidad del fenómeno en el territorio de análisis. Para el caso de las inundaciones, las medidas de intensidad comúnmente usadas son la profundidad de inundación y la velocidad del flujo.

Con el fin de incluir de manera directa el resultado de la evaluación de la amenaza en el cálculo del riesgo, manteniendo de manera rigurosa la representación por escenarios, dicho resultado se almacena en el formato AME, el cual es un formato ráster multicapa diseñado específicamente para amenazas naturales.

## ENFOQUE METODOLÓGICO PARA LA MODELACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN

---

Este capítulo contiene la descripción de la metodología aplicada para la evaluación de amenaza probabilista por inundación en la ciudad de Río Branco dentro de la cuenca del río Yaguarón<sup>23</sup>, ubicada en la frontera entre Brasil y Uruguay. Esta metodología hace uso de modelos de amenaza por lluvias intensas (modelos hidrológicos de precipitación-escorrentía) en conjunto con modelos de amenaza por inundación (modelos hidrodinámicos unidimensionales y bidimensionales) para estimar las pérdidas por inundación en la ciudad de Río Branco en Uruguay. A continuación, se hace una breve descripción de la cuenca de análisis y de cada uno de los modelos de amenaza, así como la información necesaria y disponible para ingresar al modelo y resultados del modelo.

### 1.43 Descripción de la cuenca de análisis

La idoneidad de una cuenca para realizar el cálculo probabilista de riesgo por inundación, desde la perspectiva de la ciencia natural, se basa en las condiciones de la cuenca, considerando el hecho de que el tipo de estudio propuesto se aplica a cuenca naturales. Es decir, este estudio no considera intervenciones antropogénicas y por lo tanto la cuenca no debe tener estructuras importantes como represas, centrales hidroeléctricas o sistemas de compuertas que regulen el flujo. En la etapa de selección de la cuenca también es importante considerar la historia de eventos de inundación y el nivel de impacto que estos pueden tener sobre elementos expuestos ya sean poblaciones y/o cultivos.

Para este estudio se analiza la cuenca del río Yaguarón y la amenaza de inundación en la ciudad de Río Branco, de acuerdo a sugerencias de DINAGUA. La cuenca se encuentra localizada en la zona nororiental del país y abarca tanto territorio uruguayo (departamento Cerro Largo) como brasilero (estado Rio Grande do Sul)

---

<sup>23</sup> La selección de la cuenca de análisis fue hecha por DINAGUA y comunicada a los consultores (vía correo el 29 de junio de 2017). Los consultores evaluaron la conveniencia de esa cuenca (en términos de la caracterización morfológica y existencia de estructuras tipo presa que pudieran limitar la modelación) y se adelantó el estudio de inundación.

alcanzando una superficie total de 7,300 km<sup>2</sup>.<sup>24</sup> En la Figura 220 se presenta la ubicación de la cuenca Río Branco. En la cuenca se encuentran ubicadas únicamente dos ciudades: en la margen derecha del río se encuentra la ciudad de Río Branco, segunda más poblada del departamento Cerro Largo con 14.604 habitantes, según el censo de 2011 y del margen izquierdo la ciudad limítrofe brasilera de Jaguarão, con la que se comunica a través del Puente Internacional Barón de Mauá.

El río Yaguarón es el cauce principal de la cuenca de Río Branco. Nace en Cuchilla de Las Flores en la ciudad de Bagé ubicada en el sur de Brasil y actúa como límite fronterizo con Uruguay hasta su desembocadura en la laguna Merín. Tiene una longitud de 270 km y una profundidad media de 2.5 m y es navegable en un tramo de 32 km. Sus principales afluentes son el arroyo de las Cañas, el arroyo Sarandí de Barceló y el arroyo Sarandí. Entre las actividades económicas desarrolladas en la cuenca se destacan actividades agrícolas, con especial énfasis en el cultivo de arroz, la ganadería intensiva y lechería, y el turismo en la Laguna Merín.

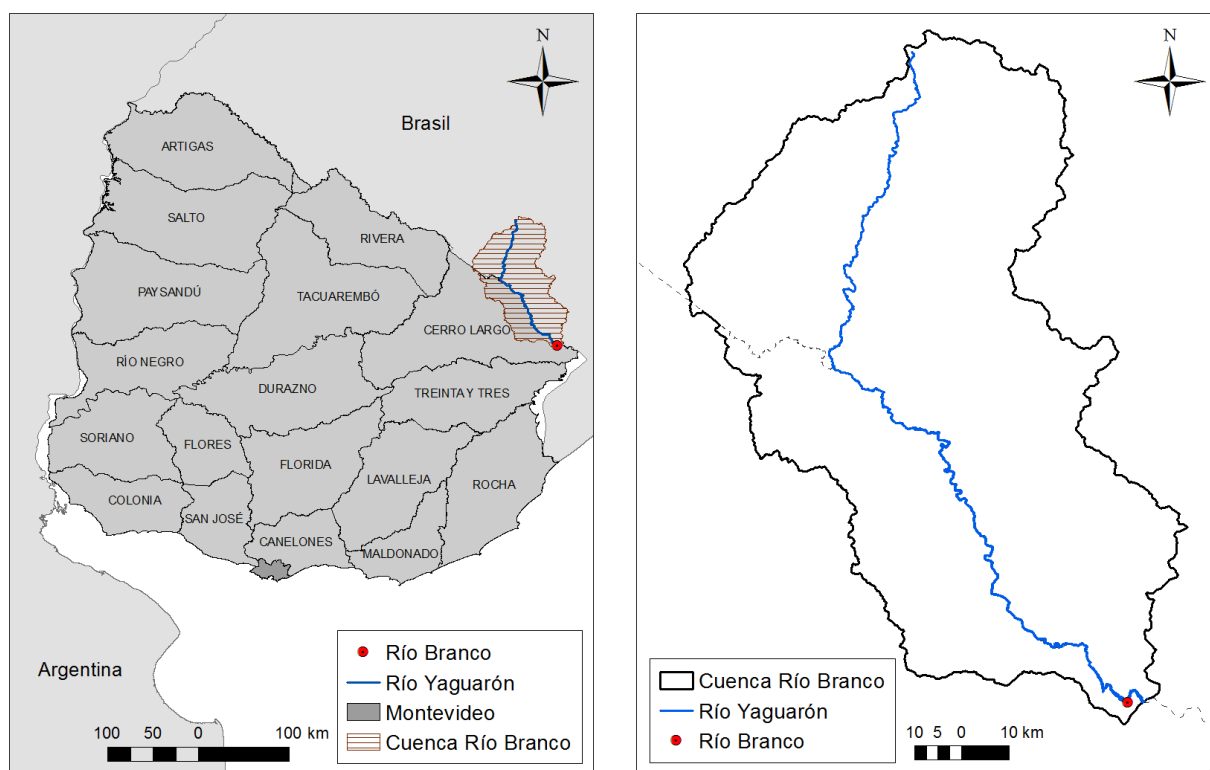


Figura 220. Ubicación y detalle de la cuenca Río Branco.

<sup>24</sup> Según los Planos síntesis - recorrida por la ciudad de Río Branco elaborados por IDU – DINAGUA en 2013

En la siguiente tabla se resumen los eventos históricos de inundación en la cuenca de Río Branco (en territorio uruguayo), incluidos en la base de datos de desastres DesInventar (2015).

Tabla 89. Eventos reportados en DesInventar.

Fecha	Lugar afectado	Causa
29/05/1984	Río Branco	Natural
19/11/1986	Río Branco	Natural
11/04/1992	Río Branco	Lluvias - crecida río Yaguarón
01/08/1992	Río Branco	Avance del río Yaguarón
20/06/1994	Río Branco	Lluvias intensas
30/07/1994	Río Branco	Lluvias
06/01/1998	Río Branco	El Niño
17/04/1998	Río Branco	Lluvias - en el norte del país
07/07/2000	Río Branco	Lluvias
11/09/2005	Río Branco	Crecida río Yaguarón
20/11/2009	Río Branco	Natural
17/09/2013	Río Branco	Lluvias

Como se observa en la Tabla 89 se ha presentado 12 eventos de inundación reportados en DesInventar que han afectado al municipio de Río Branco entre 1984 y 2014. Además, se conoce que en septiembre de 2015 y agosto de 2017 se presentaron nuevas inundaciones que afectaron al municipio y que generaron el desplazamiento de habitantes.

#### 1.43.1 Evento inundación 1984

En la Figura 221 **Error! Reference source not found.** se muestra el mapa de vivienda y población en área inundable para Río Branco, publicado en el 2014 por MVOTMA y DINAGUA. La línea roja indica la curva de inundación extraordinaria para el evento del año 1984, y las sombras azules el porcentaje de afectación de viviendas de 0 o ninguna afectación (blanco) a 100% (azul oscuro). Este mapa muestra las zonas que ya han sufrido de inundaciones.

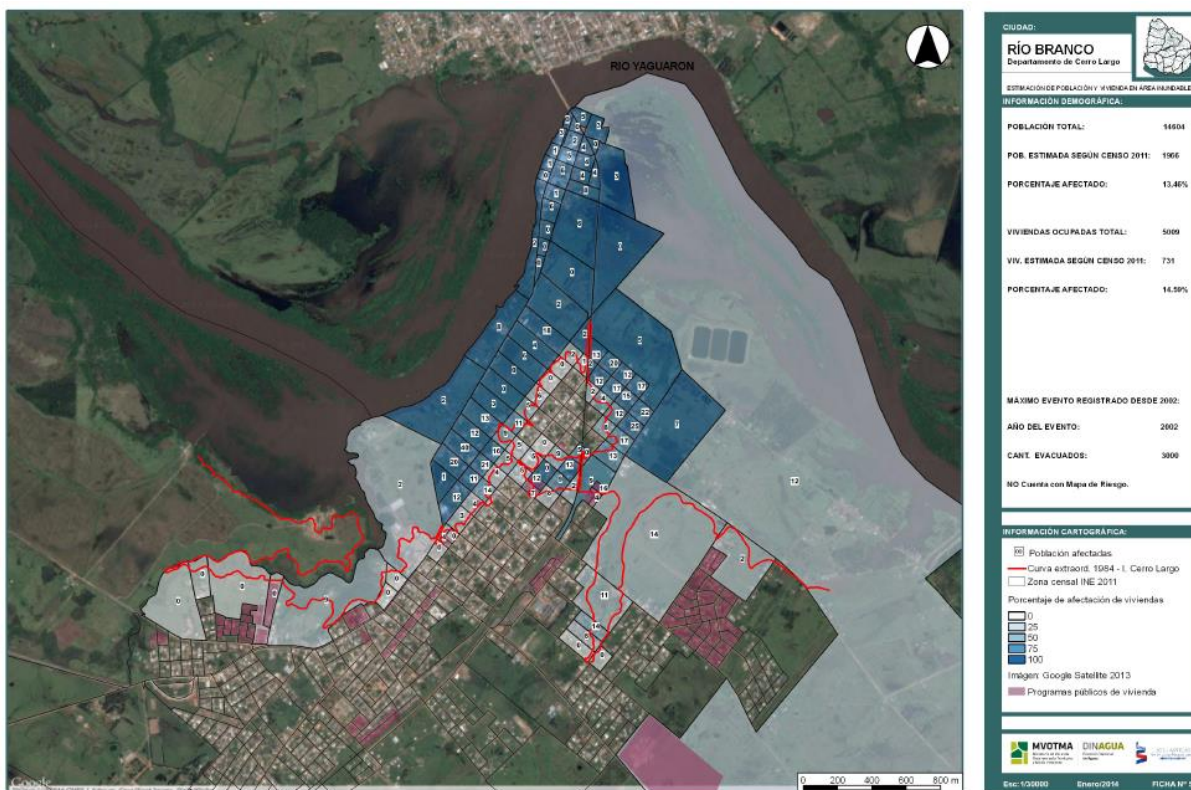


Figura 221. Estimación de vivienda y población en área inundable para Río Branco. MVOTMA, DINAGUA. Mapa publicado en 2014.

#### 1.44 Información disponible usada para la modelación

Tanto la modelación de la amenaza por lluvias intensas, como la amenaza por inundación requieren de información que permita caracterizar las condiciones físicas del entorno en términos de: topografía, uso del suelo, características de la superficie del suelo de la cuenca, valores de rugosidad del cauce y de la planicie de inundación. Así como también las características históricas de la cuenca en términos de precipitación y caudal.

El propósito de este capítulo es definir los insumos básicos de información para los modelos de amenaza por lluvias intensas y el modelo de amenaza por inundación, describiendo sus principales características y las fuentes de las cuales fueron obtenidas.

### 1.44.1 Amenaza por lluvias intensas

#### ***Base de datos de precipitación***

El insumo principal del modelo de lluvias intensas es una base de datos de precipitación, a partir de la cual se obtiene la caracterización del régimen de lluvias de la cuenca y se establecen las relaciones de precipitación vs. área para la construcción de escenarios estocásticos de lluvia en la región de análisis. Así como también se usa para la derivación de las curvas de distribución horaria de la lluvia total diaria, con el fin de implementar el modelo hidrológico seleccionado para el caso de análisis (Clark modificado - ModClark).

Dado que la información suministrada por el grupo de Inundación y Drenaje Urbano (IDU) de la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA) no estaba completa y no se suministró información de precipitación horaria en estaciones en tierra, la información de precipitación para la cuenca del río Yaguarón fue obtenida de la base de datos de la Universidad de Princeton. Esta información fue publicada por el Grupo de Investigación de Hidrología Terrestre de la Universidad de Princeton (Sheffield et al., 2006) que generó un dataset meteorológico global. La información de precipitación para este estudio se obtuvo de la Versión 1 para el periodo 1981-2010 en mallas de resolución 0.25°x0.25°. Esta información está disponible para descarga libre en la página <http://hydrology.princeton.edu/data.pgf.php>. En la Figura 222 se muestra la ubicación de los puntos de la malla de análisis para la cuenca. Cada uno de estos puntos tiene una serie histórica de registros de precipitación diarios entre el 1981 y 2010, son 48 puntos en total que cubren un área de mayor extensión al área de la cuenca, para asegurar la continuidad de la información en los límites de esta.



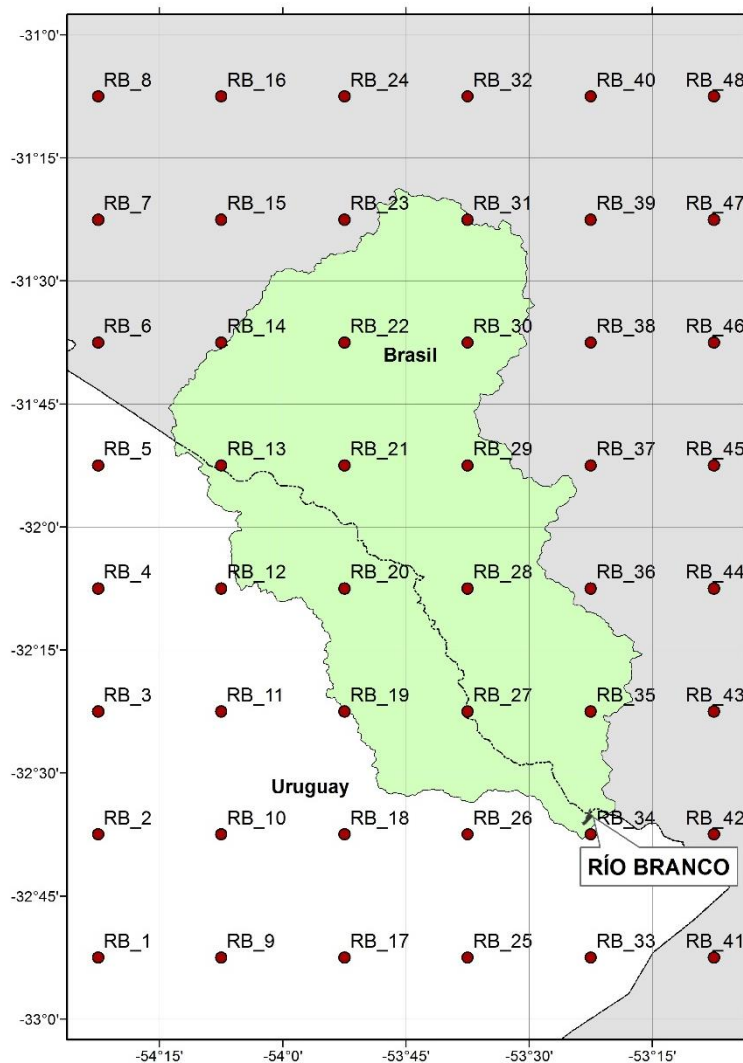


Figura 222. Malla de análisis 0.25°x0.25° para la Cuenca Río Branco.

A continuación, se presentan a modo resumen los valores medios multianuales de la precipitación mensual y anual del área de estudio. La Figura 223 **Error! Reference source not found.** muestra el diagrama de cajas de la precipitación mensual, que muestra el régimen pluvial de la zona con picos de lluvias en febrero, mayo a junio y septiembre. En la Figura 224 **Error! Reference source not found.** se muestra el resumen de precipitación media anual según la información para la cuenca del río Yaguarón. La precipitación total anual, calculada a partir del promedio de precipitación anual entre 1981 y 2010, muestra un gradiente decreciente de valores de lluvia de norte a sur con valores entre 1300 y 1600 mm/año.

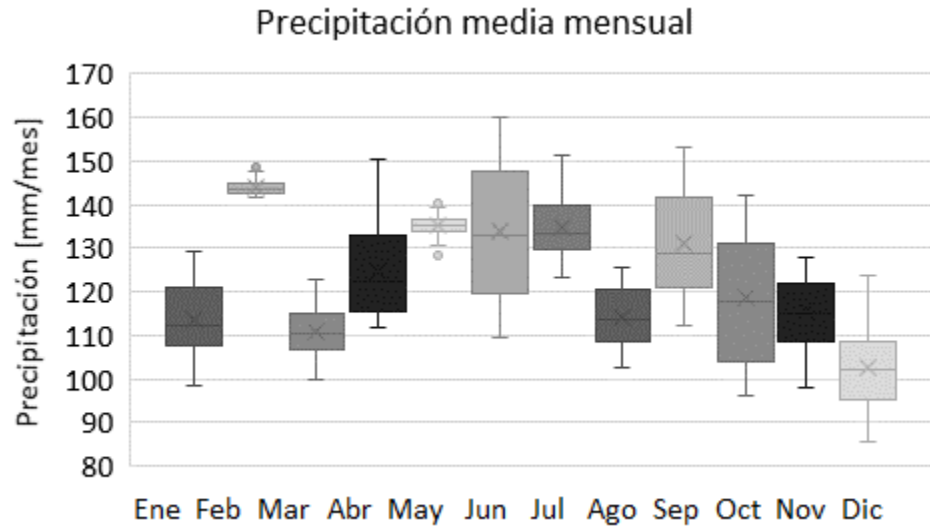


Figura 223. Precipitación media mensual para el área de estudio, en mm/mes.

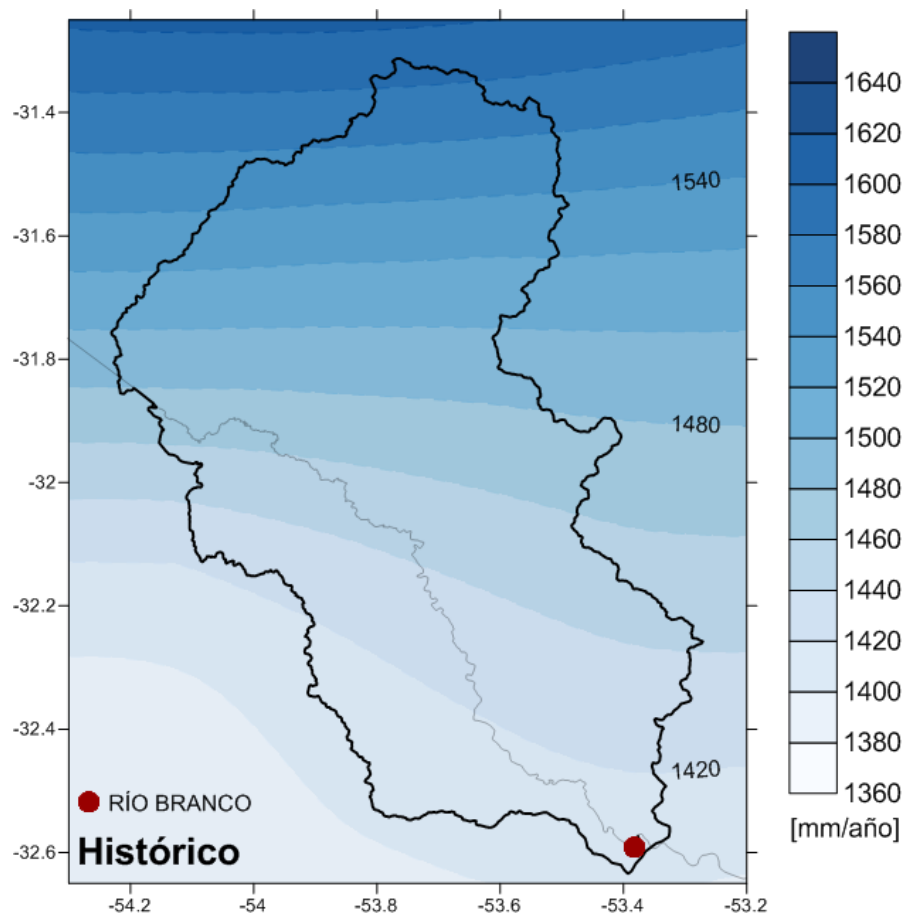


Figura 224. Precipitación total anual media para el área de estudio, en mm/año.

### 1.44.2 Amenaza por inundación

La evaluación de la amenaza por inundación tiene como fin determinar el comportamiento de la cuenca del río Yaguarón ante un evento de precipitación. Con la ayuda de los sistemas de información geográfica (SIG) y un modelo de elevación digital del terreno (DEM), se pueden distribuir espacialmente los parámetros referentes al área contributiva, pendiente, longitud y dirección de flujo, proporcionando así la información necesaria para determinar la respuesta hidrológica de la cuenca de estudio.

#### ***Topografía***

La determinación de la red de drenaje es una prioridad, si se quiere analizar una cuenca, puesto que esta establece como se mueve el agua a lo largo y ancho del terreno y a su vez, está estrechamente relacionada con el sistema de laderas. Para determinar dicha red, es necesario considerar la topografía de la cuenca siendo este parámetro determinante sobre el paisaje, y cualquier fenómeno que se presente. Por falta de acceso a relevamiento topográficos de la zona de estudio, adicional a la complejidad de obtener información topográfica para un área tan extensa, se utilizaron modelos digitales del terreno (MDT).

La topografía utilizada en el modelo hidrodinámico de inundación para la ciudad de Río Branco, que es la variación continua del relieve sobre el espacio (DEM), es obtenida a partir de la iniciativa japonesa bautizada como ALOS-PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) liderada por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI, por sus siglas en inglés) y la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA, por sus siglas en inglés). La resolución espacial de la topografía utilizada es de 12,5 metros y la elevación máxima encontrada dentro de los límites de la cuenca es de 476 m.s.n.m.

La Figura 225 **Error! Reference source not found.** muestra el mapa de topografía del área que conforma la cuenca del río Yaguarón, en donde se encuentra ubicada la ciudad Río Branco.

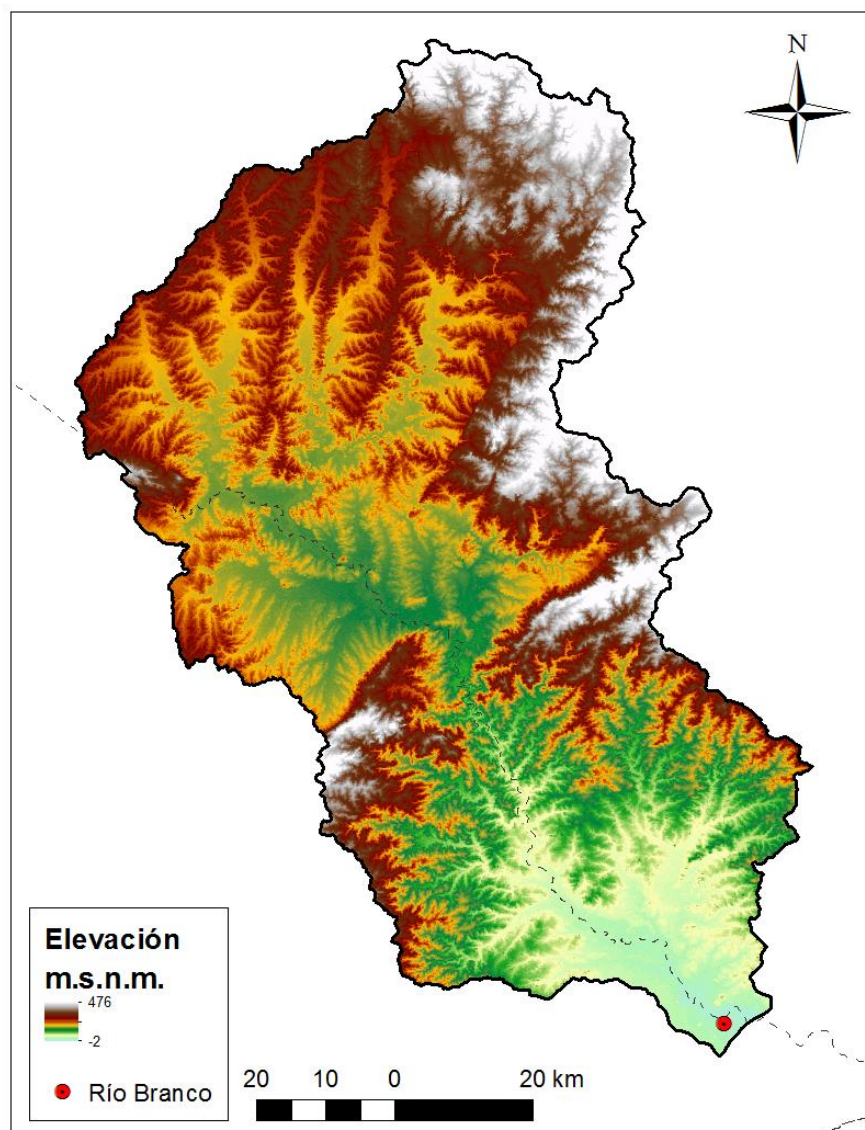


Figura 225. Mapa de topografía para la cuenca Río Branco.

### ***Mapa geológico***

El mapa geológico de la cuenca de Río Branco fue generado a partir de dos fuentes diferentes dado que una parte de la cuenca se encuentra en territorio uruguayo y otra parte en territorio brasileiro y no se cuenta con información unificada. La geología del territorio uruguayo fue obtenida a partir de la “Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay” elaborada por la Dirección de suelos y fertilizantes del Ministerio de Agricultura y Pesca en 1976, mientras que la geología del territorio brasileiro fue obtenida del Instituto Brasileiro de Geografía e Estatística (IBGE). A partir de las características geológicas del suelo se determinan los tipos de suelo hidrológico para la cuenca usando documentos

de cada país donde se hace la respectiva asignación. El tipo hidrológico de suelo influye en el comportamiento de la producción de escorrentía en la cuenca ya que de este depende que haya una mayor o menor infiltración de agua.

La Tabla 90 **Error! Reference source not found.** muestra la asignación realizada a los suelos brasileiros de acuerdo con el documento “Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação” (Sartori, Lombardi Neto, & Genovez, 2005).

Tabla 90. Asignación grupo hidrológico de suelos brasileiros.

Clasificación de suelos, Brasil	Grupo hidrológico de suelo
Gleissolo Háptico Ta Eutrófico	D
Chernossolo Ebânico Carbonático	D
Argissolo Vermelho - Amarelo Eutrófico	C
Neossolo Litólico Distrófico	D
Neossolo Flúvico Ta Eutrófico	C
Planossolo Háptico Eutrófico	D
Vertissolo Ebânico Carbonático	D
Área urbana	
Corpos d'água continental	
Gleissolo Melânico Ta Eutrófico	D
Organossolo Háptico Hêmico	D
Argissolo Vermelho - Amarelo Distrófico	C
Neossolo Litólico Chernossólico	D
Luvissolo Háptico Órtico	D
Argissolo Vermelho Distrófico	C
Neossolo Litólico Eutrófico	D

La

Tabla 91 presenta la asignación de grupo hidrológico de suelo realizada a los suelos en territorio uruguayo con la ayuda del Manual de Diseño y Construcción de Pequeñas Presas (Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, 2011).

Tabla 91. Asignación grupo hidrológico de suelos uruguayos.

Unidad Cartográfica de Suelos, Uruguay		Grupo hidrológico de suelo
SCI	Santa Clara	B
LT	Las Toscas	B
RT	Rio Tacuarembó	D
TI	Tres Islas	B
Le	Lechiguana	D
SAg	Sierra de Aiguá	D
BO	Bañado de Oro	C
RB	Rio Branco	D
LM	Los Mimbres	C
SP	Sierra de Polanco	C
Ve	Vergara	D

La Figura 226 presenta el mapa del grupo hidrológico del suelo de acuerdo con la clasificación del USDA Natural Resources Conservation Service (antes llamado Soil Conservation Service) para la cuenca del río Yaguarón. Se evidencia el predominio de suelos tipo C que comprenden arena muy fina, arcillas de baja plasticidad, mezclas de arena, y limo y arcilla y tipo D, que corresponden a suelos de escurrimiento máximo incluyendo principalmente arcillas de alta plasticidad, y suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables cerca de la superficie.

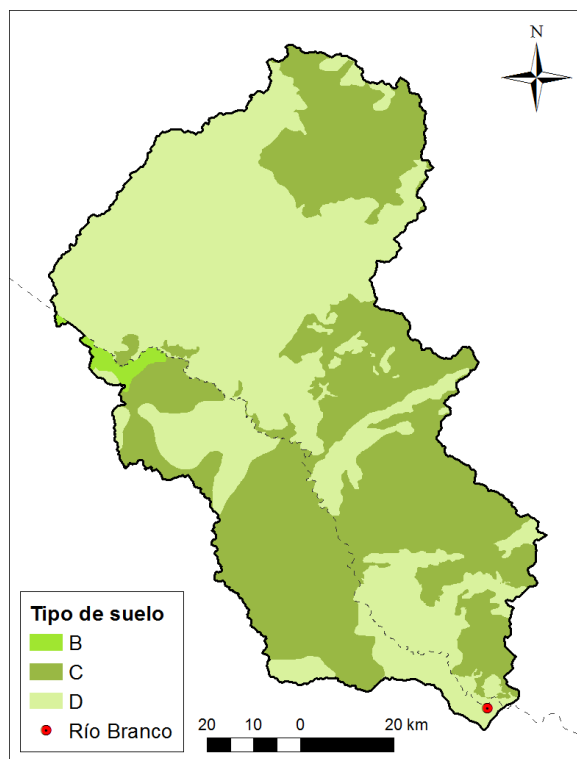


Figura 226. Mapa de grupo hidrológico del suelo para la cuenca Río Branco.

### ***Mapa cobertura vegetal***

La información de cobertura vegetal fue obtenida a partir de dos fuentes: la información del territorio brasileiro fue descargada del Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) mientras que la información del área uruguaya fue tomada del geoservicio del Ministerio de Vivienda. A partir de estas dos capas se construyó el mapa de cobertura y usos del suelo en la superficie completa de la cuenca. Como la información se obtuvo de fuentes diferentes, la clasificación de la cobertura vegetal no coincide entre los dos países motivo por el cual se homologaron de acuerdo con las clases que otorga el USDA NRCS, con el fin de presentar un mapa con las mismas clases. La Figura 227 **Error! Reference source not found.** presenta el mapa obtenido.

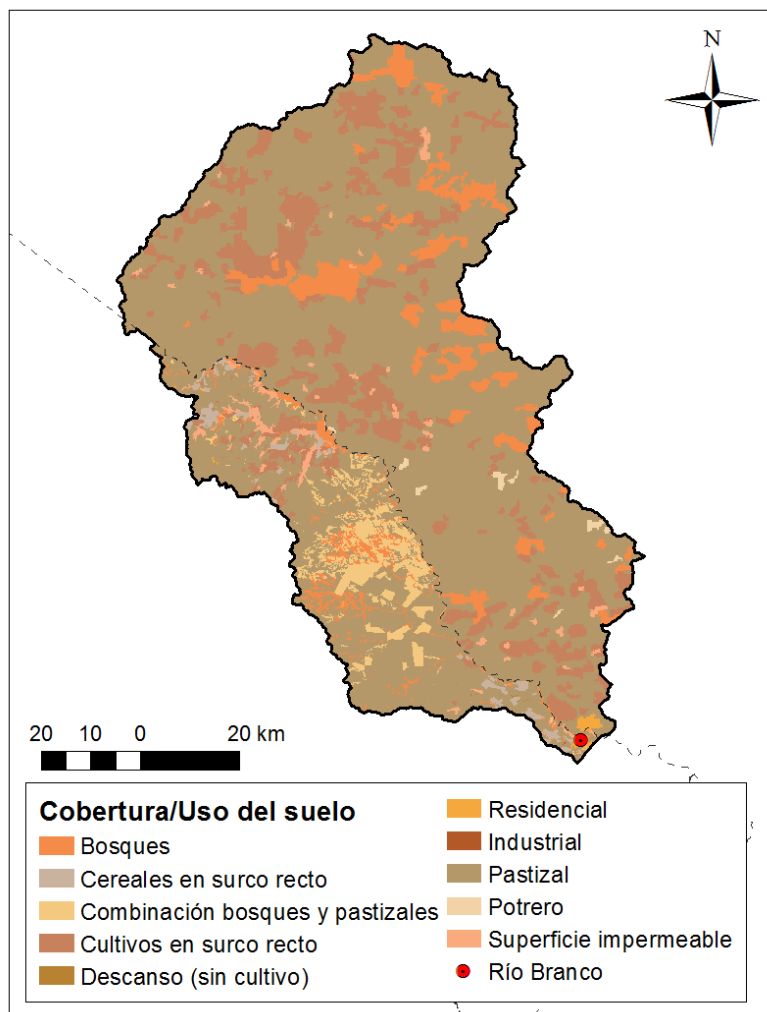


Figura 227. Mapa de cobertura y uso del suelo cuenca Río Branco.

#### 1.44.3 Parámetros hidráulicos para el motor de cálculo (HEC-RAS)

Para realizar el estudio hidráulico del río Yaguarón a lo largo de su cauce se hace uso del “Método estándar por etapas para canales naturales” (Chow, 1994), ya que es posible describir su pendiente, morfometría y características principales de manera relativamente sencilla por medio de secciones transversales. Por otro lado para la ciudad de Río Branco se hace uso de la solución de las ecuaciones de Saint Venant por diferencias finitas ya que las condiciones topográficas de la planicie de inundación hacen que la caracterización de sus propiedades principales en términos de rugosidad, topografía y condiciones de flujo requieran una malla de cálculo en dos direcciones.



Para el cálculo de los tirantes de inundación y las condiciones de velocidad media de flujo del del modelo acoplado (1D en el cauce y 2D en la planicie de inundación) en Río Branco, se hace uso del programa HEC-RAS en su versión 5.0.3, desarrollado por el U.S Army Corps of Engineers.

Los valores de rugosidad ( $n$  de Manning) para las zonas de modelación fueron obtenidos a partir de la información provista por el mapa de usos de suelo y cobertura vegetal presentado en la Figura 227 para las planicies de inundación. Para los tramos de canal principal y riberas aledañas fueron usados valores de rugosidad calibrados para la zona, obtenidos del “Estudio de la zona costera de Río Branco” elaborado por el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental. El valor de rugosidad de Manning usado para el cauce principal es de  $n=0.04$  y para las riberas aledañas  $n=0.09$ .

Los diferentes valores de pendiente media del cauce y de morfometría de la cuenca fueron obtenidos a partir del análisis del modelo digital de elevación por medio de sistemas de información geográfico.

#### **1.45 Modelo de amenaza por lluvias intensas**

El objetivo del modelo es establecer las características de los aguaceros fuertes que se pueden presentar en la región, a partir de los registros históricos de precipitación medidos en estaciones pluviométricas o en datasets como el de la Universidad de Princeton que se utiliza en este estudio. Entre las características que se desean conocer de los aguaceros fuertes se encuentra la intensidad de la lluvia (que se asocia con la profundidad máxima de precipitación promedio), su distribución espacial, su frecuencia y su duración.

##### **1.45.1 Análisis de distribución espacial de precipitación**

La distribución espacial de la precipitación se determina a partir de los resultados de la generación estocástica de series de precipitación, y la selección de eventos de lluvia fuerte se realiza a partir de criterios definidos por el modelador.

En este estudio se hace uso de un modelo de generación estocástica de series climáticas, que hace parte del módulo de amenaza por sequía (Bernal, Escovar, Zuloaga, & Cardona, 2017) que se presenta en la Sección 6 de este informe, y que ha sido

desarrollado por el consultor. La generación de series estocásticas de precipitación hace uso de distribuciones paramétricas de probabilidad para estimar, a partir de conjuntos de datos históricos, la probabilidad de ocurrencia de un determinado valor de precipitación en un determinado momento del régimen pluvial de la zona (día, semana, mes). Para el caso de la amenaza por lluvias, la metodología toma cada día del año hidrológico y determina la distribución de probabilidad que mejor se ajusta a los registros históricos, para finalmente obtener distribuciones de probabilidad de lluvia específicos para los 365 días del año. Luego, usando los parámetros de las distribuciones seleccionadas se generan números aleatorios para un determinado número de años de simulación de precipitación total diaria (del orden de 1,000 años). Las series aleatorias luego son correlacionadas en el tiempo y en el espacio para representar las condiciones climáticas de la región de análisis. A continuación, se explica en detalle la metodología para determinar la amenaza por lluvias fuertes en la Cuenca del río Yaguarón, siguiendo la metodología propuesta por el consultor que se muestra de forma esquemática en la Figura 228 **Error! Reference source not found..**

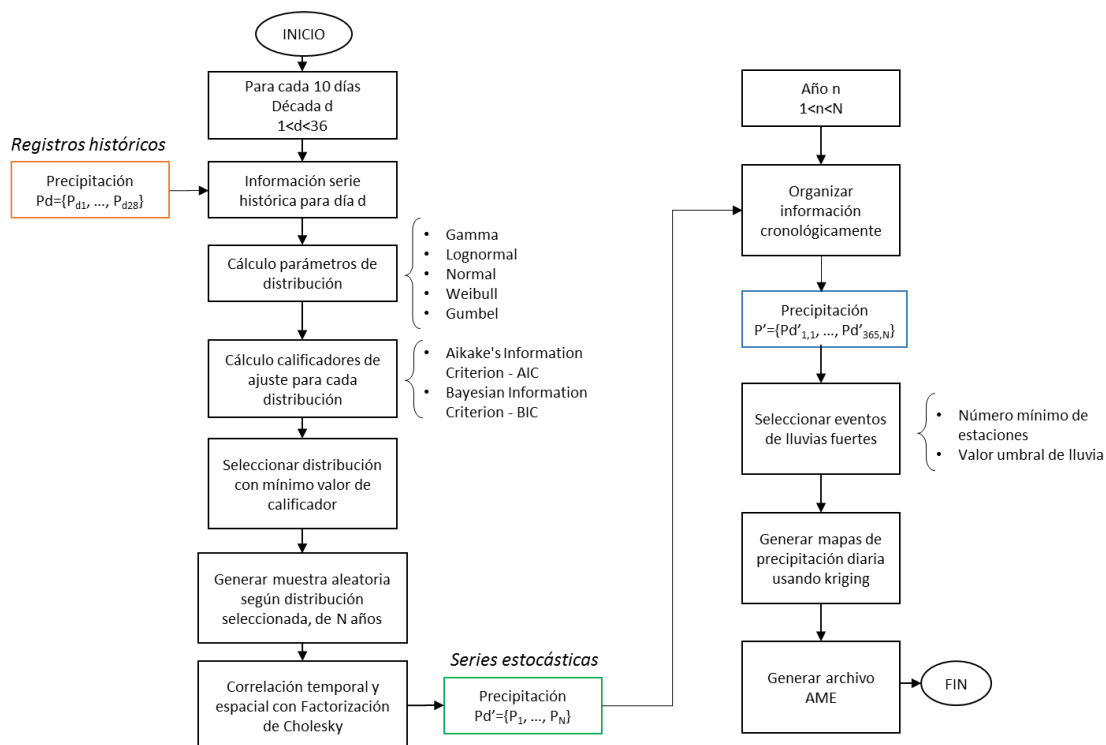


Figura 228. Esquema de la metodología de modelación de amenaza por lluvias intensas.

## Generación de series aleatorias

Las funciones de distribución de probabilidad que se consideran para la generación estocástica de precipitación son Gamma, Lognormal, Normal, Weibull y Gumbel, que son normalmente empleadas en ciencias atmosféricas. A partir de este conjunto de funciones, se procede a estimar los parámetros de cada distribución según los valores de registros históricos de cada día del año. La estimación de los parámetros se hace por el método de los momentos o de máxima verosimilitud. La evaluación del ajuste de cada distribución a los valores registrados de precipitación se hace por métodos cualitativos (herramientas gráficas y de inspección visual) y cuantitativos (Criterio de Información de Akaike (AIC, Akaike 1974) o el Criterio Bayesiano de Información (BIC, Schwarz 1978)), que miden la calidad relativa de los modelos de distribución para un conjunto dado de datos. Está claro que los criterios AIC y BIC no dan ninguna indicación sobre la calidad del modelo, sino que es una comparación entre la bondad de ajuste de cada modelo y su complejidad en términos de un valor de penalización que aumenta con el número creciente de parámetros ajustados (Banimahd & Khalili, 2013).

Para el caso de la precipitación, se debe hacer una consideración especial para los días de no lluvia, ya que estos valores pueden afectar el ajuste de las distribuciones de probabilidad y el ajuste estadístico final que permite comparar los resultados con la serie histórica. Entonces, para series de precipitación se divide la función de densidad de probabilidad en dos partes 1) cuando la precipitación es igual a cero ( $P_0$ ) 2) cuando la precipitación es mayor a cero ( $1-P_0$ ). La probabilidad de que ocurra un día seco se define como:

$$P_0 = \frac{n}{N} = \frac{\# \text{ días secos}}{\# \text{ días en la muestra}} \quad \text{Ec. 0-1}$$

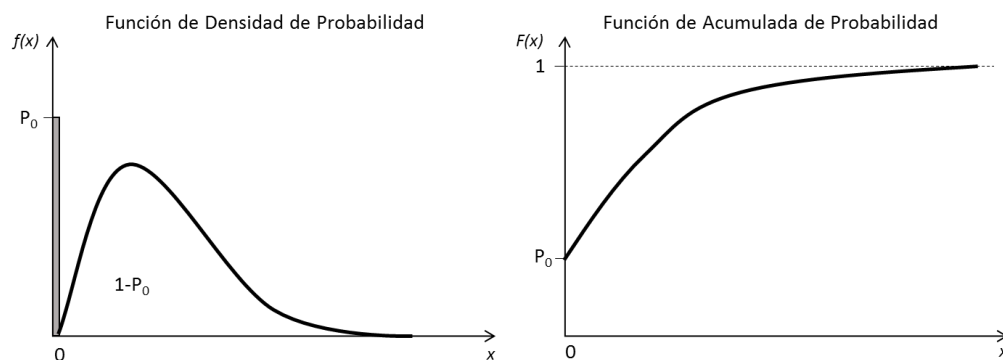


Figura 229. Funciones de densidad de probabilidad y probabilidad acumulada teniendo en cuenta  $p=0$

Al seguir este procedimiento, se obtienen series de precipitación que mantienen la relación histórica de días de no lluvia con respecto al total de días, según la temporada del régimen de lluvias. Si se utiliza la función de densidad de probabilidad sin hacer este ajuste, no se obtienen días secos en las series aleatorias. Aunque este ajuste es más importante para los modelos de amenaza por sequía, se considera igual importante para definir las zonas de lluvia vs. la zona de no lluvia para el caso de amenaza por lluvias fuertes.

Luego de definir la distribución de probabilidad que mejor se ajusta a los valores diarios históricos, para cada uno de los 365 días del año, se generaron números aleatorios para 1000 años de simulación. Como resultado, se obtienen series aleatorias de datos de precipitación total diaria (365,000 días simulados) para cada una de las estaciones en el área de estudio. Estas simulaciones no son un pronóstico de clima futuro.

### **Correlación de series aleatorias**

Las series aleatorias son luego correlacionadas en el tiempo y en el espacio haciendo uso de la matriz de correlación para cada punto de la malla de análisis para evitar cambios abruptos en los valores de precipitación para días consecutivos y ubicaciones cercanas. La autocorrelación temporal indica la correlación de una variable con sus valores pasados y futuros (Wilks, 2006). La correlación espacial considera la aparición de datos simultáneos en múltiples estaciones del área de estudio, utilizando la matriz de autocorrelación espacial entre valores de las diferentes estaciones de registro. Las series de números aleatorios correlacionados son más suaves que las series

aleatorias, ya que los valores adyacentes (en escalas temporales y espaciales) tienden a ser más parecidos que en series independientes.

### Resultados para la cuenca del río Yaguarón

Para evaluar la amenaza por lluvias fuertes en la cuenca del río Yaguarón, se modelaron 1,000 años equivalentes de precipitación. Estos 1,000 años no son un pronóstico de clima futuro, son series estocásticas que se ajustan al clima histórico del área de estudio. En estas series se pueden encontrar mayor número de eventos de precipitación y de intensidades más altas a las que se pueden encontrar en las series históricas; considerando que en 1,000 años simulados se presentan mayor número de eventos que en 30 años de registros. Incluso, las series simuladas pueden incluir valores atípicos extremos de precipitación que corresponden a eventos de lluvias fuertes cuya intensidad no se ha presentado aún.

Los resultados globales de la simulación de series de precipitación se presentan en la Figura 230. En esta figura se puede ver el ajuste tanto en magnitud de la precipitación como en la distribución espacial de la misma. Esto indica que la metodología es apta para la generación de series de precipitación que se ajustan al comportamiento histórico de la zona de estudio.

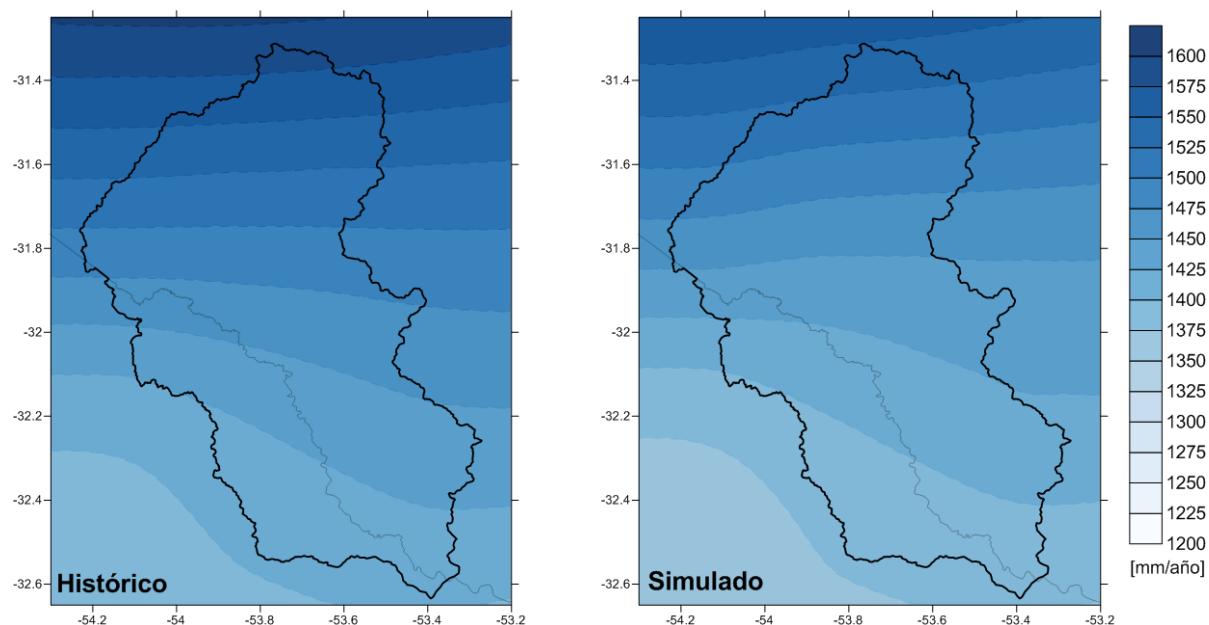


Figura 230. Mapas de valores medio multianuales para precipitación en la cuenca del Río Yaguarón.

## **Selección de eventos de lluvias fuertes**

Un evento de lluvia fuerte se determina a partir de los siguientes criterios:

- Número mínimo de estaciones que registren un determinado aguacero para la generación de los mapas de isoyetas correspondientes, de tal manera que éstos sean confiables para la descripción espacial del evento. El número de estaciones depende de la localización y densidad de las estaciones en el área de estudio.
- Valor umbral mínimo para la selección de un evento considerado como significativo, es decir que, además que el evento esté registrado en el número mínimo de estaciones definido, la precipitación registrada en cada una de estas estaciones supere ese valor umbral (p.e. mayor que 10 mm en 24 horas).
- Valor umbral medio que considera un valor mínimo para el promedio de precipitación en el número de estaciones que superan el umbral mínimo. Este criterio se utiliza para asegurar que se presenta una lluvia de intensidad considerable en un área extensa y no se limita a lluvias fuertes en sitios particulares.

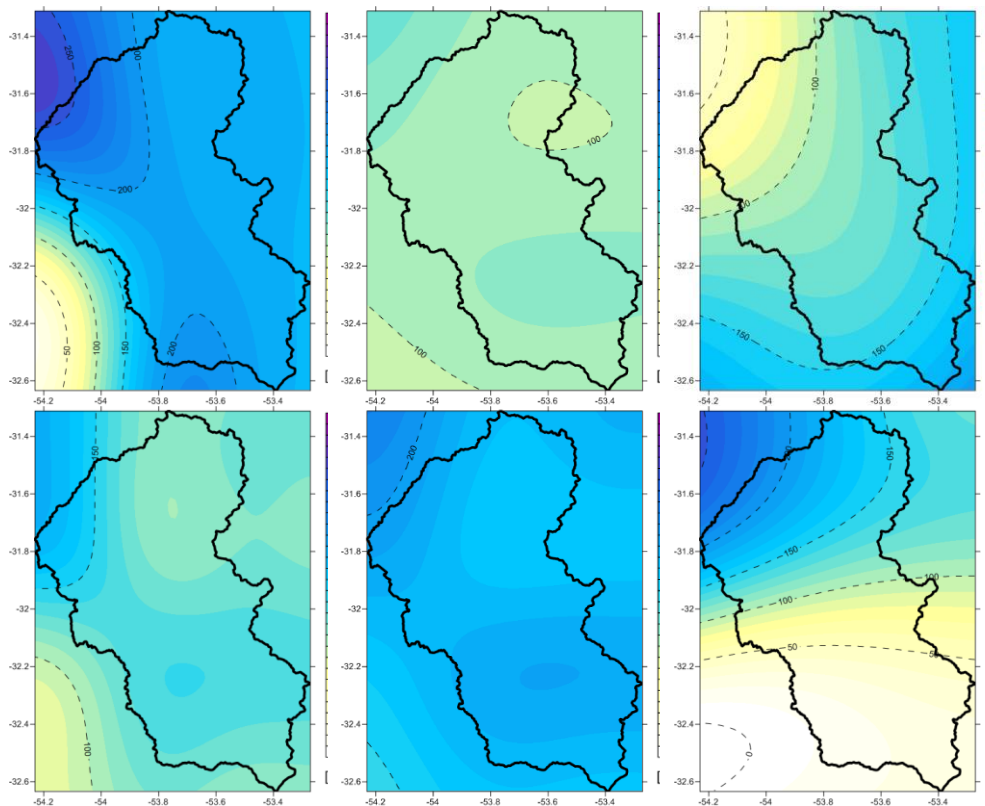
Para la evaluación de amenaza de la cuenca del Río Yaguarón se seleccionaron los eventos de mayor intensidad. En este caso los criterios que se utilizaron fueron presencia de lluvia en 45 de 48 estaciones (es decir, llueve en casi todas las estaciones de la malla de análisis en el mismo día) y umbral mínimo de 100 mm/día. El valor del umbral medio también se estableció en 100 mm/día, ya que para los eventos considerados un valor más alto no significaba una diferencia dada la alta magnitud de lluvia de los eventos. Con estos criterios se encontraron 52 eventos de lluvia fuerte de un día, en los 365,000 días simulados. Estos eventos son aguaceros muy fuertes, considerando que la lluvia acumulada del mes de diciembre apenas supera los 100 mm, es decir que son eventos en los que en un día puede llover lo equivalente a un mes. Estos eventos, que son muy poco frecuentes, pueden configurar un escenario de inundación grave en la cuenca y en la ciudad Río Branco.

## **Distribución espacial de la precipitación**

Una de las ventajas de utilizar la generación estocástica de series de precipitación en varios puntos del área de análisis es que la distribución espacial de la lluvia se deriva directamente de los datos simulados, sin tener que entrar a establecer patrones

geométricos representativos de los eventos o localizaciones preferenciales de los centros de tormenta. La interpolación espacial que se utiliza en este estudio consiste en aplicar el método de Kriging, ajustando el variograma de los datos de entrada a series tipo Gaussiana. En la Figura 231 **Error! Reference source not found.** se muestran los mapas para 12 eventos de lluvias fuertes, que hacen parte del conjunto de 52 eventos que componen la amenaza por lluvia para la cuenca del río Yaguarón.

Como se puede ver en los mapas, la distribución de la lluvia fuerte en la cuenca cambia considerablemente en magnitud y distribución espacial. En el conjunto de eventos encontrados no hay dos eventos iguales. Entonces, estos eventos representan la precipitación total diaria en un escenario de lluvia fuerte. Por otro lado, la distribución en el tiempo (intradiaria) de esta precipitación se calcula a partir de las curvas Huff, que se explica a continuación.



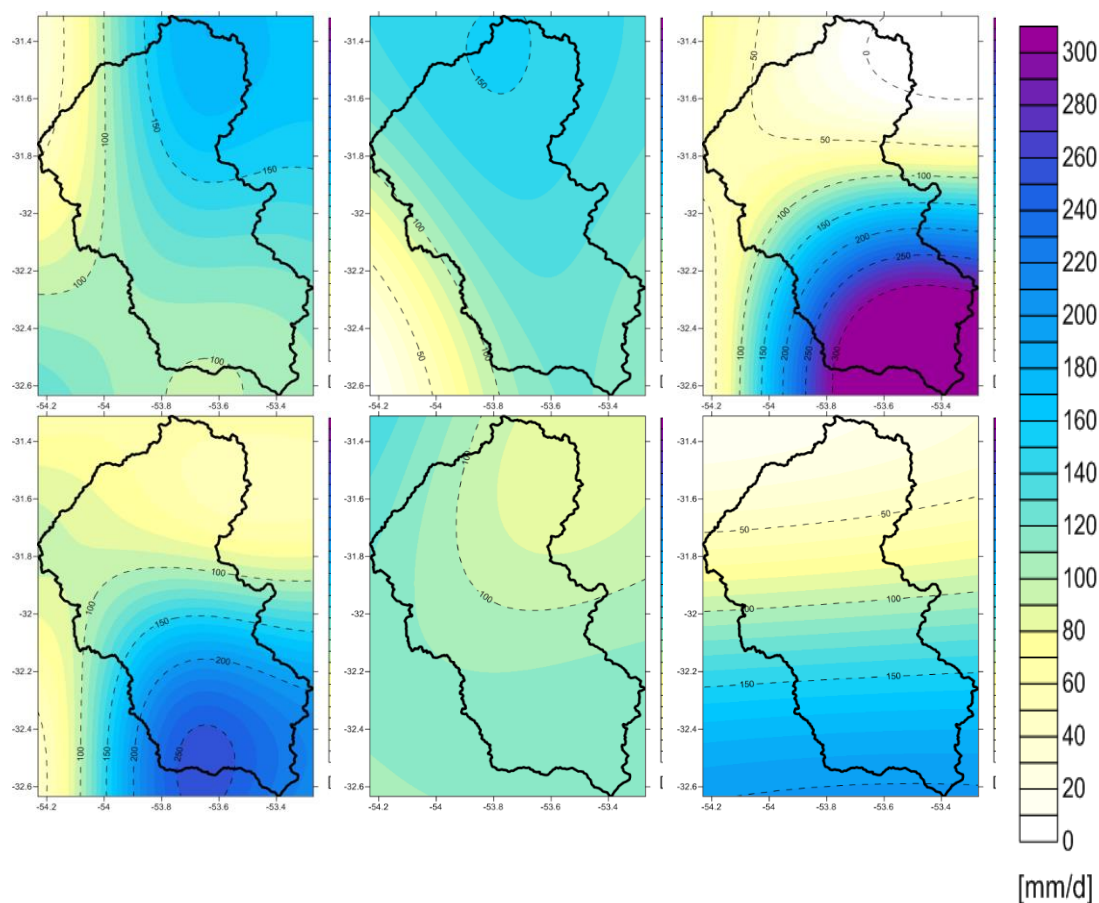


Figura 231. Mapas de distribución espacial de tormentas en la cuenca del río Yaguarón.

### 1.45.2 Análisis de distribución temporal de precipitación (Curvas Huff)

Los modelos hidrológicos de precipitación - escorrentía para la modelación y gestión de cuencas hídricas requieren una caracterización y distribución espacial y temporal de la precipitación. La generación de series estocásticas de lluvia constituyen una aproximación a la caracterización de la distribución espacial de la lluvia sobre una cuenca en términos de la intensidad que se espera en un área determinada para unos períodos de retorno (o frecuencia) considerados, teniendo en cuenta la precipitación histórica sobre el área de estudio.

Por otro lado, las curvas Huff corresponden a una metodología de “tormentas de diseño” propuesta en 1967 con el fin de describir la distribución temporal de la precipitación de una zona en términos probabilistas (Rao & Kao, 2006). Por medio del análisis, Huff identificó que la mayor cantidad de precipitación ocurre en una porción



pequeña del total de la duración de cada evento, confirmando el concepto de las curvas IDF en las que se establece que las mayores intensidades de precipitación se registran en lapsos cortos. Así, los eventos de precipitación para un área determinada se clasifican en cuatro grupos: primer, segundo, tercer y cuarto cuartil, definidos como el 25% del segmento temporal en el que ocurre la mayor cantidad de precipitación.

De manera general y como se establece en Rao (2006) y en IDOT DWR (1992), el primer cuartil de la distribución Huff es usado para tormentas con una duración menor o igual a seis horas. Mientras que el segundo cuartil de duración de tormenta es usado para eventos con una duración mayor a seis horas y menor a doce horas. Para el tercer cuartil se usan eventos entre 12 y 24 horas de duración. Y para eventos mayores a 24 horas se hace uso de la distribución Huff del cuarto cuartil.

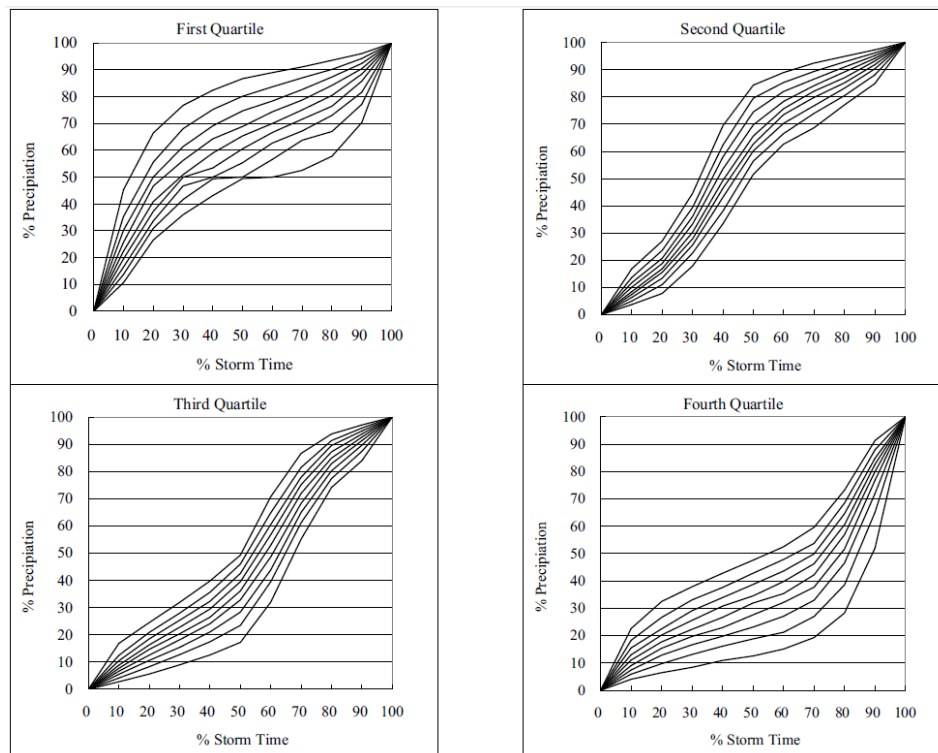


Figura 232. Ejemplo de curvas Huff calculadas para Indiana (EEUU). (Rao & Kao, 2006)

El cálculo de las curvas Huff se debe hacer a partir de registros horarios de precipitación en el mayor número de estaciones y para el mayor periodo de registro posible. Para la cuenca del río Yaguarón, el equipo consultor no cuenta con nformación oficial de agencias nacionales. Entonces, para hacer el cálculo de las curvas Huff en este caso, se hace uso del dataset de la Universidad de Princeton que cuenta con información

cada 3 horas en la malla de resolución de  $0.25^\circ$ . A continuación se presenta el proceso de cálculo de curvas Huff a partir de información horaria de precipitación y el proceso de cálculo de las curvas Huff en caso de no contar con esa información detallada.

### **Proceso de cálculo de curvas Huff a partir de registros horarios**

El proceso de cálculo de las curvas Huff a partir de una base de datos de precipitación completa se describe a continuación:

1. Selección de eventos de precipitación horaria a partir de tres criterios:
  - a. Separación mínima entre eventos de precipitación de seis horas.
  - b. Eventos seleccionados deben tener una duración mayor o igual a tres horas.
  - c. El umbral mínimo de precipitación horaria escogido es de un milímetro.
2. Una vez seleccionados los eventos de análisis se deben ordenar por fecha de ocurrencia y se procede a normalizar la duración y la precipitación total acumulada de cada evento. Esto es, para cada evento seleccionado se divide cada paso horario entre el número total de horas que duró dicho evento. A su vez, para cada valor de precipitación en cada paso horario se divide entre la precipitación total acumulada de todo el evento.
3. Se grafica el total de eventos normalizados.
4. Se determinan los cuartiles 25, 50, 75 y 100 de duración normalizada para cada evento y se clasifica cada uno de ellos según la ocurrencia de la mayor cantidad de precipitación en alguno de los cuartiles mencionados.
5. Una vez clasificado cada evento dentro de un cuartil de duración específico, se determinan sus correspondientes estadísticas. Esto es, para todos los cuartiles, se grafican la totalidad de eventos clasificados dentro de cada grupo intercuartil.
6. Para cada cuartil, para cada paso de duración adimensional (p.e. cada 0.1) se leen los valores de precipitación adimensional de cada evento y se ordenan de menor a mayor.
7. Para cada grupo ordenado se determina su valor de probabilidad por medio de la expresión

$$P = \frac{(100 * i)}{n + 1}$$

Ec. 0-2

Donde i es el contador para cada evento ordenado y n el número total de eventos dentro del rango intercuartil.

8. Se interpolan los valores obtenidos para cada paso de duración adimensional, para cada valor de probabilidad de interés (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100%).

A partir de la aplicación del algoritmo descrito se obtienen las curvas Huff para una estación pluviométrica determinada y su correspondiente área aferente.

La distribución espacial de la precipitación y las curvas Huff son el insumo para el modelo hidrológico para el análisis lluvia-escorrentia en la cuenca del río Yaguarón. El día y mes de ocurrencia de los eventos de lluvias fuertes seleccionados en el procedimiento de distribución espacial son valores conocidos. Al utilizar las curvas Huff para estos mismos días se pueden calcular los insumos de entrada al modelo hidrológico.

#### **1.46 Modelo hidrológico de la cuenca**

En el modelo hidrológico la determinación de la red de drenaje es una prioridad, si se quiere analizar una cuenca, puesto que esta establece como se mueve el agua a lo largo y ancho del terreno y a su vez, está estrechamente relacionada con el sistema de laderas. Para determinar dicha red, es necesario considerar la topografía de la cuenca siendo este parámetro determinante sobre el paisaje, y cualquier fenómeno que se presente. El modelo hidrológico trabaja bajo 4 procesos de pérdidas de lluvia, traslación, flujo base, y enrutamiento. Finalmente se puede determinar la respuesta de la cuenca a través de hidrogramas que son una huella digital de la cuenca y conforman el esquema de producción – traslación – enrutamiento hasta el punto de salida de la cuenca.

##### **1.46.1 Propiedades morfométricas generales de la cuenca Río Branco**

El proceso de caracterización de las propiedades morfométricas de una cuenca es esencial para el conocimiento y gestión adecuada de sus condiciones físicas y ambientales. Por medio de la morfometría se pretende determinar parámetros que

permitan la caracterización de un entorno ambiental (cuenca) y que, a su vez, den un conocimiento en sentido matemático y estadístico que permitan una mayor objetividad en las decisiones que se derivan de dichos parámetros.

Uno de los objetivos del análisis morfométrico es, entre otros, determinar las zonas en las cuales es posible efectuar una modelación de amenaza por un método hidrodinámico determinado. Parámetros como el tiempo de concentración y la pendiente de la cuenca y del cauce principal son fundamentales para determinar las características hidráulicas principales del cauce analizado.

Cabe anotar que las características presentadas en este informe son derivadas principalmente de la forma, relieve y red de drenaje de la cuenca. Todos los parámetros fueron calculados usando herramientas SIG con funciones hidrológicas específicas y de manipulación de datos tipo raster. Se utilizaron los programas ARGIS, MapWindow e Hidro-Sig como herramientas facilitadoras del proceso.

Para la elaboración de los mapas hidrogeométricos de la cuenca se utilizó el modelo de elevación digital de JAXA con resolución espacial de 12,5 metros. Un modelo de elevación digital representa la topografía del terreno de manera distribuida, lo que permite adquirir las características necesarias para determinar el comportamiento hidrológico y geomorfológico de una cuenca. También se puede determinar las características de los cauces y de la red de drenaje. Por esta razón es necesario que la información que proporciona el modelo DEM sea confiable. En caso de existir incoherencias en el modelo, asociadas al método de interpolación de datos, este debe ser corregido. En el caso del río Yaguarón la corrección del DEM (**Error! Reference source not found.**, izquierda), se realizó a través de la herramienta “*WaterShed delimitation*” del programa *MapWindow*. Posteriormente se iluminan los drenajes y parte aguas de la cuenca (Figura 233, derecha).

A partir del DEM corregido y del shape de cuenca y drenajes, se extrae los mapas de direcciones de flujo, pendiente, longitud de corrientes y área específica de captación, siendo estos necesarios para poder inferir la respuesta de la cuenca ante un evento de lluvia. Los mapas fueron procesados a través del modelo de direccionamiento de D8 y Dinf; sin embargo, los procesos realizados se hicieron utilizando los mapas extraídos de los mapas de D8, debido a la practicidad en la manipulación de los resultados. Sobre la

preparación de los mapas geomorfológicos para inferir la respuesta de la cuenca ante un evento se hacen las siguientes aclaraciones:

- Mapa de área contributiva: Al momento de trabajar con este mapa es necesario considerar que los datos almacenados por Dinf son valores que se encuentran multiplicados 1 vez por el tamaño de la celda (88 m), a diferencia de D8 en donde la información se encuentra distribuida referente a la celda sin considerar su tamaño, es decir el área alrededor del cual se distribuyen los datos representados por cada uno de los ráster.
- Mapa de longitud de corrientes: Lo importante de este mapa no es tanto la longitud de los cauces individuales, sino las distancias que existen desde el inicio del cauce hasta la salida de la cuenca, por lo que es importante que sea la longitud aguas arriba de la cuenca.
- Mapa de pendiente: Los mapas de pendiente de D8 y Dinf difieren uno del otro, no solo en la forma de calcular dicha pendiente, sino también, en las unidades en las cuales la información es proporcionada. Dinf brinda la pendiente en grados, mientras que, D8 lo hace en porcentaje. Esto es relevante a medida que se realizan los cálculos y se puede llegar a cálculos erróneos.

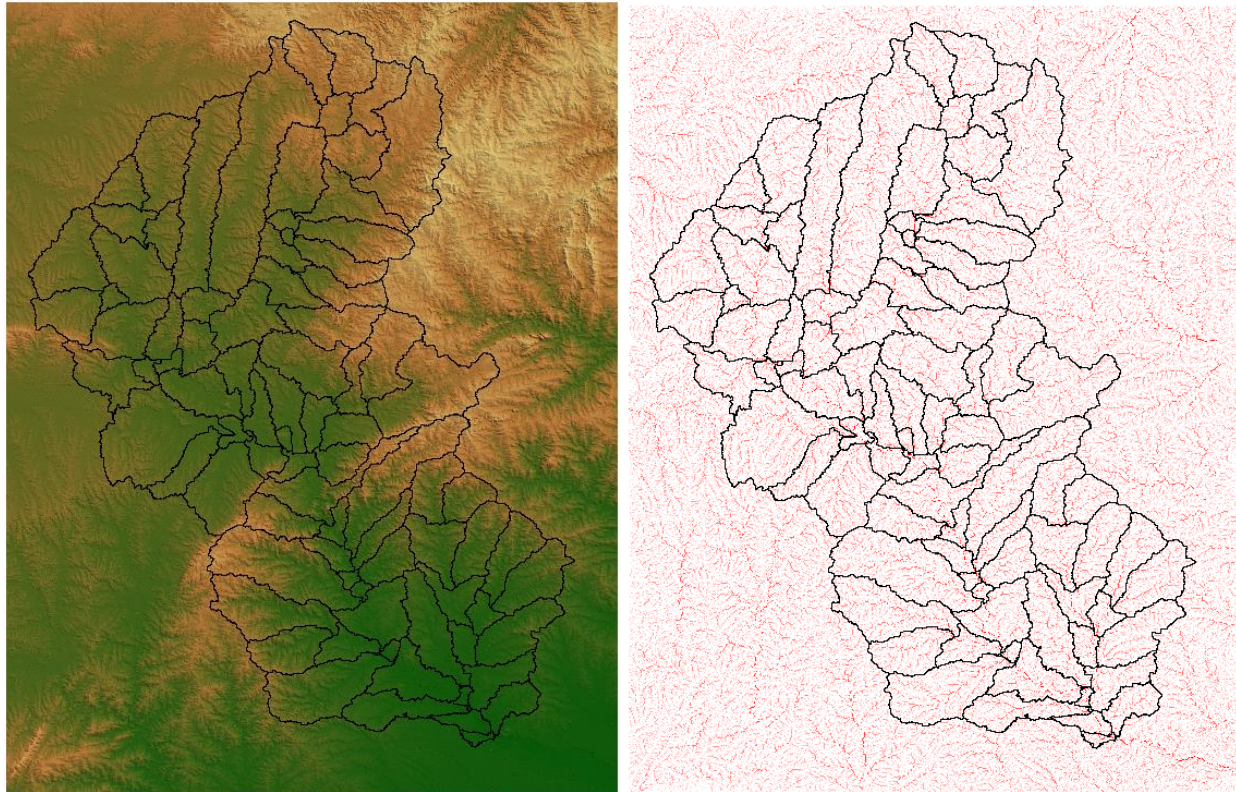


Figura 233. DEM corregido y Cuenca de Río Branco (izquierda). Delimitación de la cuenca y drenajes (derecha).

La

Tabla 92 **Error! Reference source not found.** presenta un resumen de las principales propiedades morfométricas de la cuenca Río Branco los cuales son utilizados más adelante en el modelo hidrológico. Parámetros como el área y perímetro dan una idea inicial de la respuesta hidrológica de una cuenca ante un evento en particular. La densidad de drenaje y el tiempo de concentración indican el tipo de respuesta hidrológica y el tiempo que este tardará en generar una respuesta de caudal pico.

Tabla 92. Parámetros morfométricos generales cuenca Río Branco.

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS CUENCA RÍO BRANCO		
Descripción	Unidad	Valor
Área	km <sup>2</sup>	7,175.13
Perímetro de la cuenca	km	507.84
Cotas		
Máxima	m.s.n.m.	476.00
Mínima	m.s.n.m.	2.00
Centroide: (PSC: WGS1984 UTM Zona 19S)		
X centroide	°	-53.740
Y centroide	°	-31.970
Z centroide	m.s.n.m.	140.00
Longitud Cuenca	km	147.20
Ancho Cuenca	km	48.74
Altitud		
Altitud media	m.s.n.m.	140.00
Altitud más frecuente	m.s.n.m.	139.50
Altitud de frecuencia media (1/2)	m.s.n.m.	196.15
Pendiente		
Pendiente promedio de la cuenca	%	0.9658
Red Hídrica		
Longitud del curso principal	km	226.51
Orden de la red Hídrica	UND	9
Longitud Red Hídrica <sup>25</sup>	km	9,374.44
Pendiente promedio en la red hídrica	%	4.24
Parámetros generados		
Pendiente promedio del cauce principal	m/m	0.122
Factor de forma [F]		0.331
Coeficiente de compacidad [Kc]		1.691
Densidad de drenaje	km/km <sup>2</sup>	1.307
Coef. De torrencialidad (Ct)	#/Km <sup>2</sup>	0.049

La interpretación de los parámetros geomorfológicos se presenta a continuación:

- Índice de compacidad:

<sup>25</sup> Longitud de red hídrica calculada a partir del ramo de orden 3 hasta el ramo de orden 9.

Este parámetro permite inferir la forma que puede tener la cuenca ya sea alargada para valores de 3, o valores de 1 para cuencas de forma (Vélez, 2014). Por lo que implica que con un valor de 1.69 la cuenca es ligeramente alargada en la dirección del río principal, lo que conlleva a inferir que la respuesta de la cuenca ante un evento podría ser lenta a moderadamente lenta. Se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$k_c = \frac{P}{P_c} = \frac{P}{2\pi R}$$

Ecuación  
0-3

Donde, P es el perímetro de la cuenca, P<sub>c</sub> el perímetro de la circunferencia y R el radio de la circunferencia (Rojo, 1997).

- Factor de forma de Horton:

Este parámetro permite entrever la respuesta de la cuenca basada en forma como su nombre lo indica; para un valor de 0.33 se tiene que la cuenca presentaría una respuesta media sustentada en un valor intermedio de forma (Vélez, 2014). Su ecuación es la siguiente (Rojo, 1997):

$$k_f = \frac{A}{L^2}$$

Ecuación  
0-4

Las características del hidrograma de escorrentía están muy relacionadas con las relaciones de forma de la cuenca. A continuación, en la Figura 234 se ilustra cual podría ser el hidrograma esperado según la forma de la cuenca:



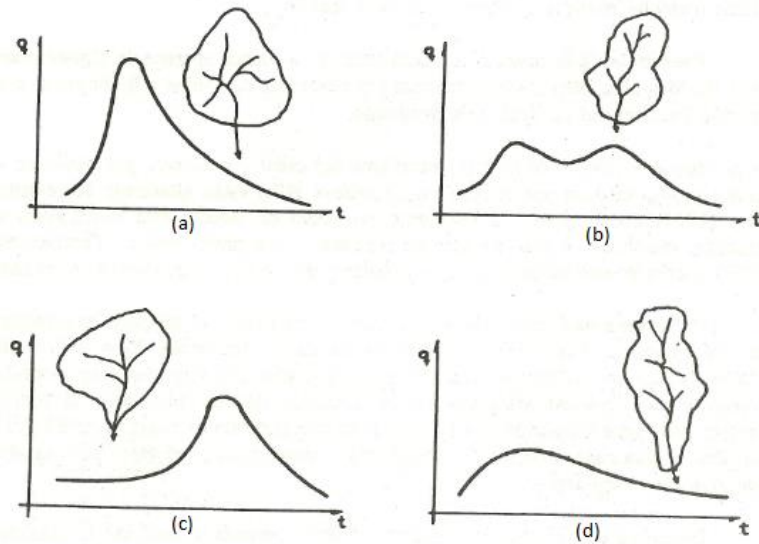


Figura 234. Hidrograma esperado según la forma de la cuenca.

Con base a la información proporcionada por los anteriores parámetros de forma, con cuencas ligeramente alargadas con una respuesta media a lenta, se podría esperar el hidrograma característico con un pico achatado, pero una duración extensa como se muestra en la Figura 234 **Error! Reference source not found.**(d).

- Coeficiente de torrencialidad:

Este índice mide el grado de torrencialidad (crecidas fuertes de corta duración) de la cuenca. A mayor magnitud, mayor el grado de torrencialidad. Esto sugiere que, para un valor de 0.049, en este caso la cuenca del río Yaguarón es poco susceptible a presentar avenidas torrenciales, y por el contrario a presentar inundaciones (Posada, 1994). Calculado con la ecuación presentada a continuación (Rojo, 1997):

$$C_t = \frac{\# \text{ Cauces orden 1}}{\text{Area cuenca (Km}^2\text{)}} \quad \begin{array}{l} \text{Ecuación} \\ 0-5 \end{array}$$

- Pendiente media del cauce principal:

Este parámetro se impone como indicador directo de la velocidad del flujo a través del cauce. En la Figura 235 se presenta el mapa de pendientes general de la cuenca del río Yaguarón. Se encuentra que la pendiente promedio de la cuenca es de 0.96%, normalizada a partir del porcentaje total de pendiente; valor que sugiere velocidades

bajas que se traducen en un mayor tiempo de salida de la cuenca (Vélez, 2014). También se presenta el mapa de drenajes de la cuenca del río Yaguarón. La longitud aproximada de la red de drenaje es de 9,300 km, con una pendiente promedio de 4.24%, calculados a partir de herramientas SIG.

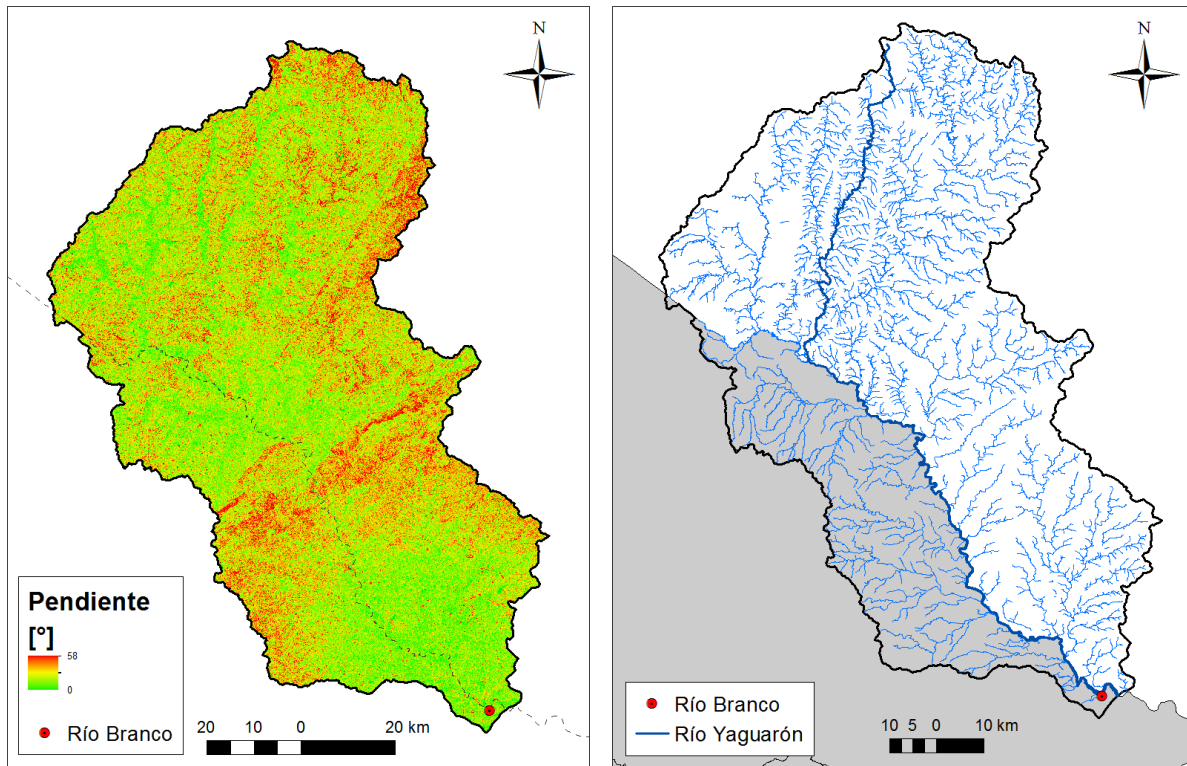


Figura 235. Mapa de pendientes y red de drenajes de la cuenca de Río Branco.

- Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes:

La curva hipsométrica representa la variación relativa de la altura de la cuenca ( $h/H$ ), con el área drenada ( $a/A$ ), mientras que el histograma de frecuencias altimétricas da una idea probabilística de la variación de la altura en la cuenca. Estos parámetros permiten realizar un análisis área - elevación, que es una manera conveniente y objetiva de encontrar la relación entre las características hidrológicas de la cuenca y su geomorfología (Posada, 1994). La curva hipsométrica y el histograma de frecuencias altimétricas para la cuenca de río Yaguarón se presenta en la Figura 236 **Error! Reference source not found.** En ella se indica el porcentaje de superficie que existe por encima de una determinada cota.

Las curvas hipsométricas están asociadas con las edades de los ríos. Para el caso de la cuenca del río Yaguarón se manifiesta una curva característica de los ciclos de erosión de un río maduro (Asensio, et al., 2011). Esto implica que tiene un canal de sección amplia aproximadamente rectangular, con pendientes más planas y valles amplios. El lecho del río ha logrado una condición gradada, es decir tiene una pendiente tal que la línea de energía es justamente suficiente para transportar el material a través del sistema. El cauce principal presenta llanuras de inundación y se han formado meandros en su curso. Estas características permiten concluir que la velocidad de respuesta de la cuenca es de media a lenta.

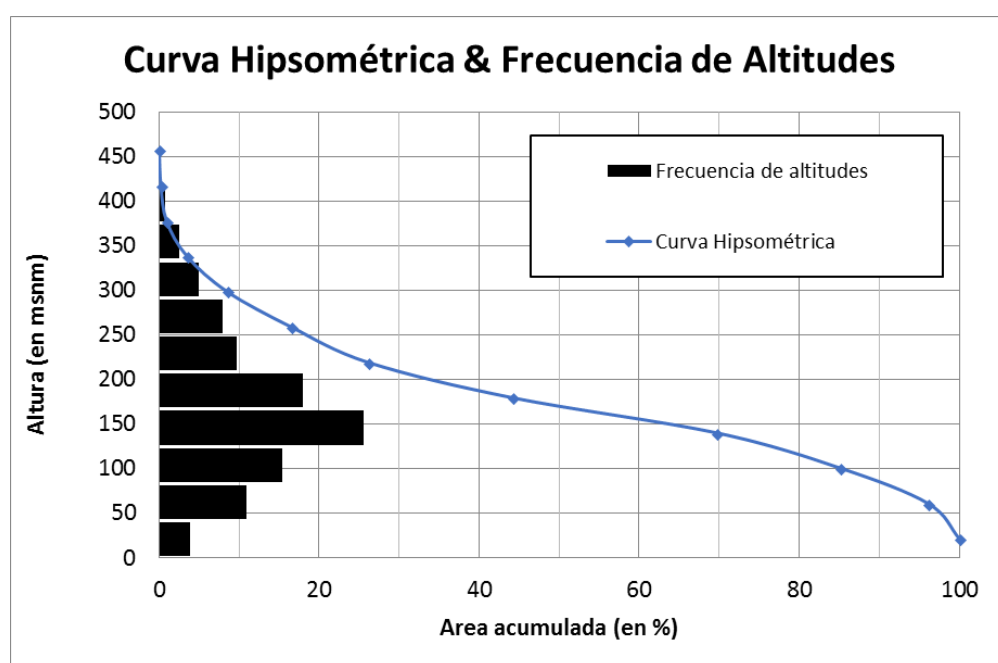


Figura 236. Curva hipsométrica de frecuencias para la cuenca de Río Yaguarón.

#### 1.46.2 Estimación de la respuesta de la cuenca ante un evento de lluvia

Los parámetros que se presentaron anteriormente permiten obtener una idea del comportamiento de la cuenca. Sin embargo, como se puede observar las “predicciones” (respuesta lenta o media) son tan variadas como métodos existentes. A continuación, se determina la función de ancho y el índice topográfico, como parámetros adicionales para evaluar la respuesta de la cuenca con un mayor grado de precisión.

- Función de ancho

La función de ancho consiste en determinar el número de tramos del canal con una longitud  $X$  desde la salida. Su cálculo se realiza con un histograma de frecuencias de número de tramos con una distancia  $X$ ,  $2X$ ,  $3X$ , etc., desde la salida. Sirve como herramienta para conocer la respuesta de la cuenca, puesto que considera la distancia de cada drenaje hasta la salida y a su vez considera la frecuencia en que esa distancia se presenta. Esto implica que el valor más frecuente permite intuir el tiempo que tardará el flujo en recorrerlo. Si la distancia es corta la respuesta de la cuenca será más rápida, y si por el contrario la distancia es más larga la respuesta será más lenta.

Se observa en la Figura 237 la cuenca del río Yaguarón y la función de ancho extraída de ella. Se puede apreciar que, por la forma ligeramente alargada en la dirección del río principal y el tamaño de la cuenca, el agua debe recorrer una mayor distancia hasta la desembocadura. En la parte alta de la cuenca se presenta un predominio de distancias hasta la salida entre los 139,214 metros hasta los 180,263 (cuarta barra del histograma), siendo estas las distancias más frecuentes. No obstante, las frecuencias para las distancias asociadas a la parte media y baja también son altas. Esto está estrechamente relacionado con el tiempo de viaje del flujo a través de la cuenca, ratificando el hecho de que, para evacuar un evento de precipitación de gran magnitud, el agua debe recorrer largas distancias y en conjunto con las bajas pendientes la respuesta esperada será lenta.

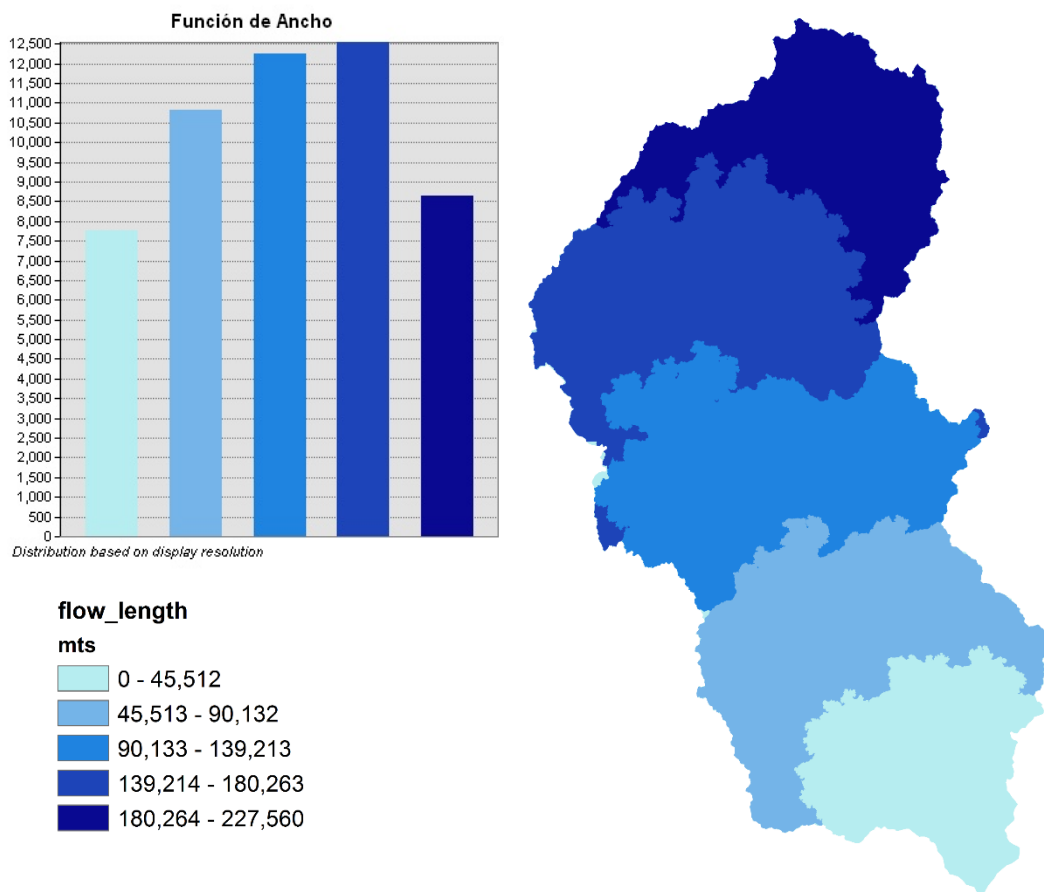


Figura 237. Función de ancho e histograma para la cuenca de estudio (unidades: Metros).

- Índice topográfico

El índice topográfico, a pesar de que su fin no es determinar la respuesta de la cuenca, permite dar una percepción de cómo podría ser. Este índice es el indicador de las zonas de humedad y revela las áreas donde posiblemente se dé el exceso de saturación de las laderas (Roa-Lobo Jose, 2012). El cálculo de este índice se realizó a través de la herramienta “Calculadora de Ráster” de ArcGIS y en la cual se computarizaron los mapas de área de drenaje y de pendiente en grados, para aplicar la siguiente formula:

$$IT = \text{Ln} \left( \frac{a}{\tan \beta} \right)$$

Ecuación  
0-6

Donde  $a$  es el mapa de área de drenaje por unidad de longitud, y  $\beta$  el mapa de pendiente en grados calculado por *Dinf*. El resultado de este cálculo se muestra en la Figura 238.

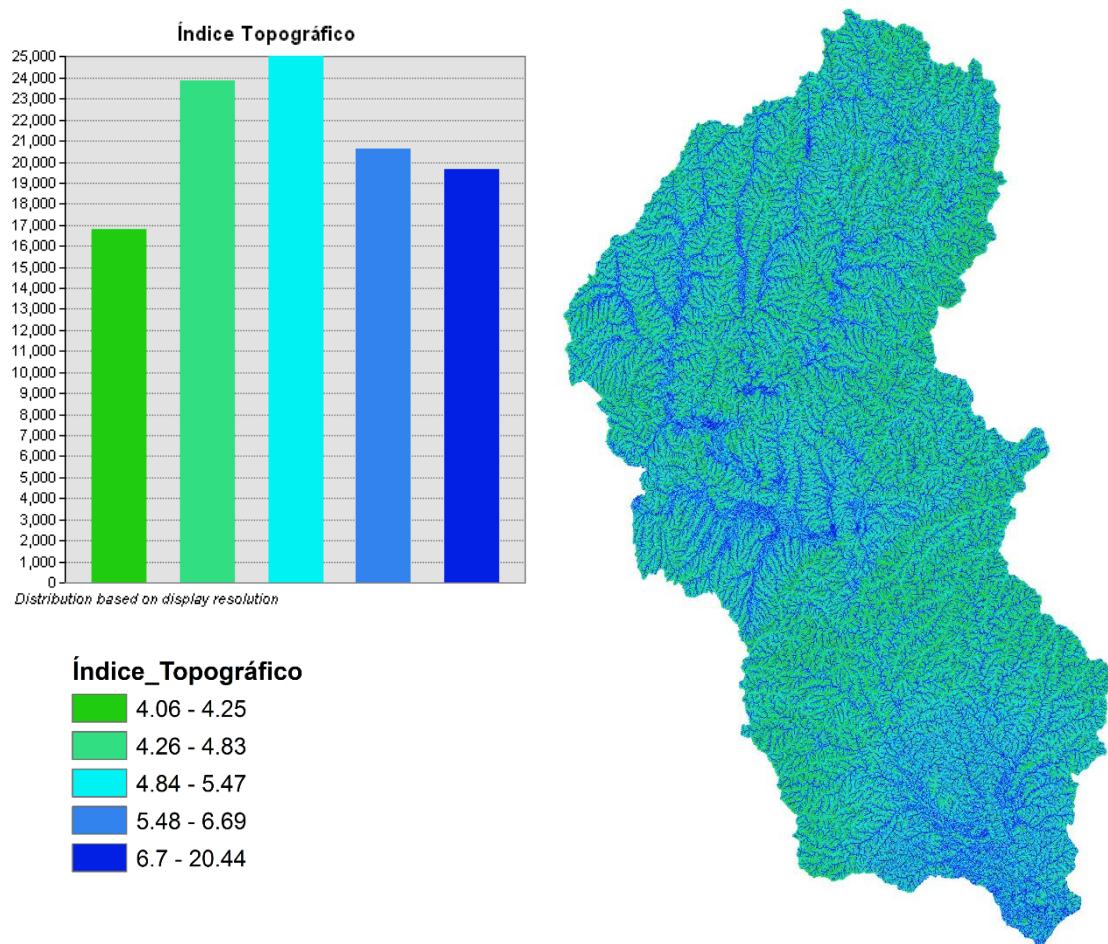


Figura 238. Índice topográfico e histograma para la cuenca de estudio.

Valores bajos del índice topográfico corresponden a las zonas de ladera con poca área contributiva (valores cercanos a 4); mientras que valores altos del índice topográfico (valores cercanos a 20) indican zonas planas con grandes áreas de contribución, generalmente cerca de los cauces y la base de las laderas (Vélez, 2014). La frecuencia de estos valores representados en un histograma permite observar lo que sería la respuesta de la cuenca ante un evento (Ver Figura 238). El histograma que representa los valores de índice topográfico vs su frecuencia muestra un pico entre los valores



medios de la cuenca y una distribución similar para los valores altos como para los valores bajos, lo que se podría atribuir a una respuesta media.

### 1.46.3 Modelación hidrológica preliminar de la cuenca con HEC-HMS

Con el propósito de conocer el comportamiento de la cuenca, previo a aplicar modelos complejos hidrológicos e hidráulicos al conjunto de escenarios de aguaceros fuertes para la cuenca del río Yaguarón, se hizo un modelo preliminar en HEC-HMS. Este análisis también se hizo con el objetivo de comparar y validar los resultados preliminares obtenidos en este estudio con los resultados del “Estudio de la zona costera de río Branco” (Teixeira, et al., 2013). La Figura 239 muestra la esquematización de la cuenca, la cual se subdividió en 3 subcuencas (Alta, media y baja), cada subcuenca se presenta con un color diferente.

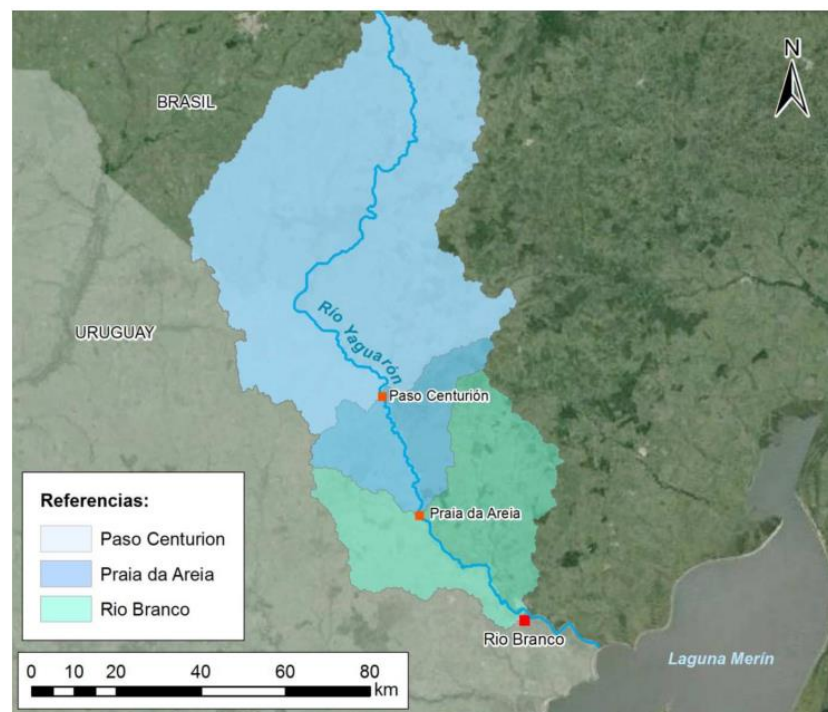


Figura 239. Esquematización de la zona de estudio. Fuente: (Teixeira, Chreties, & Crisci, 2013)

### **Tiempo de concentración**

A partir de los parámetros geomorfológicos calculados (área, la pendiente, la longitud del cauce principal y la elevación), se determinó el tiempo de concentración de la cuenca. Este parámetro se define como el tiempo necesario para que todo el sistema (la cuenca) contribuya eficazmente a la generación de flujo en el desagüe. Se atribuye

muy comúnmente el tiempo de concentración al tiempo que tarda una gota de agua caída en el punto de la cuenca más alejado (según el recorrido de drenaje) del desagüe, en llegar a éste (Vélez, et al., 2013).

El cálculo del tiempo de concentración se la cuenca del río Yaguarón se hizo a partir de la ecuación de Giandotti y de la ecuación de Kirpich, que son metodologías que se aplican a cuencas de gran extensión.

- **Giandotti:**

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}} \quad \text{Ecuación 0-7}$$

Donde, S es el área de la cuenca (km<sup>2</sup>), L es la longitud del cauce principal (km) y H la diferencia entre la elevación media de la cuenca y la salida (m) (Ibáñez Asensio, Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer, 2010).

- **Kirpich:**

$$T_c = 0.95 \left( \sqrt{\frac{L^3}{S}} \right)^{0.385} \quad \text{Ecuación 0-8}$$

Donde, L es la longitud del cauce principal (Km) y H (m) es la diferencia de elevación entre el comienzo del cauce principal y el punto de salida (Rojo, 1997).

Los resultados obtenidos a partir de las diferentes metodologías para el cálculo del tiempo de concentración en cuencas con áreas grandes se presentan en la Tabla 93. El valor promedio de tiempo de concentración calculado fue 65.89 horas. Sin embargo, para realizar la comparación con los datos que se tienen del “Estudio de la zona costera de río Branco” (Teixeira, Chreties, & Crisci, 2013), se usó el tiempo de concentración igual a 48 horas de dicho estudio.

Tabla 93. Estimación del tiempo de concentración empleando diferentes metodologías

Tc (método)	Resultado (horas)
Giandotti	69.02
Kirpich	62.75
Promedio	65.89



### ***Evento de lluvia para la modelación***

La distribución espacial y temporal del evento de lluvia para el modelo preliminar de la cuenca se obtuvo de la generación estocástica de aguaceros explicada en la Sección 1.45. De las lluvias generadas se seleccionó una tormenta de duración de 24 horas con valores de precipitación para la cuenca alta, media y baja de 79mm, 186mm y 195mm, respectivamente.

Para este caso los valores se distribuyeron en el tiempo según el tercer cuartil de Huff. A esta conclusión se llegó luego de analizar la información intra-diaria disponible (datos medidos en estaciones virtuales cada 3 horas). Se graficaron la distribución de todas las tormentas de duraciones iguales a 15 horas (Figura 240) y 18 horas (Figura 241). Se tomaron estas duraciones porque representan 3 y 4 puntos para lograr obtener una curva de distribución. Duraciones de 21 horas no se encontraron y por restricciones del dataset utilizado, no se utilizaron aguaceros de duración de 24 horas (porque para estos casos el dataset distribuye de manera homogénea la lluvia en todo el día).

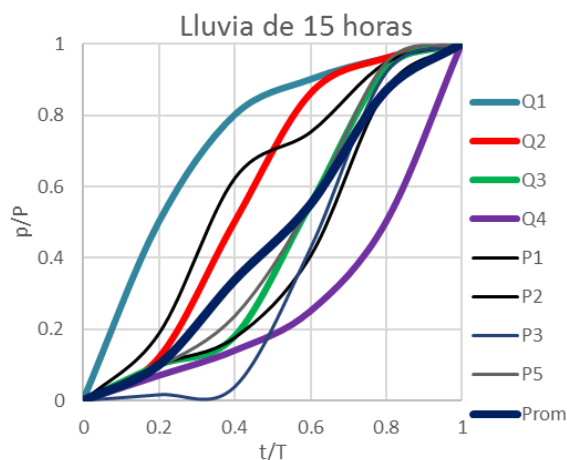


Figura 240. Distribución de la lluvia de 15 horas.

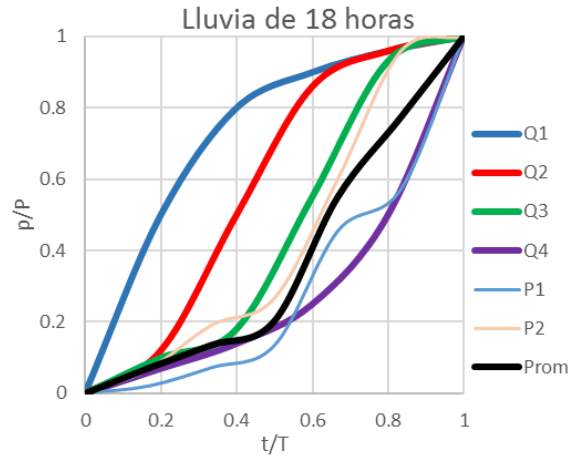
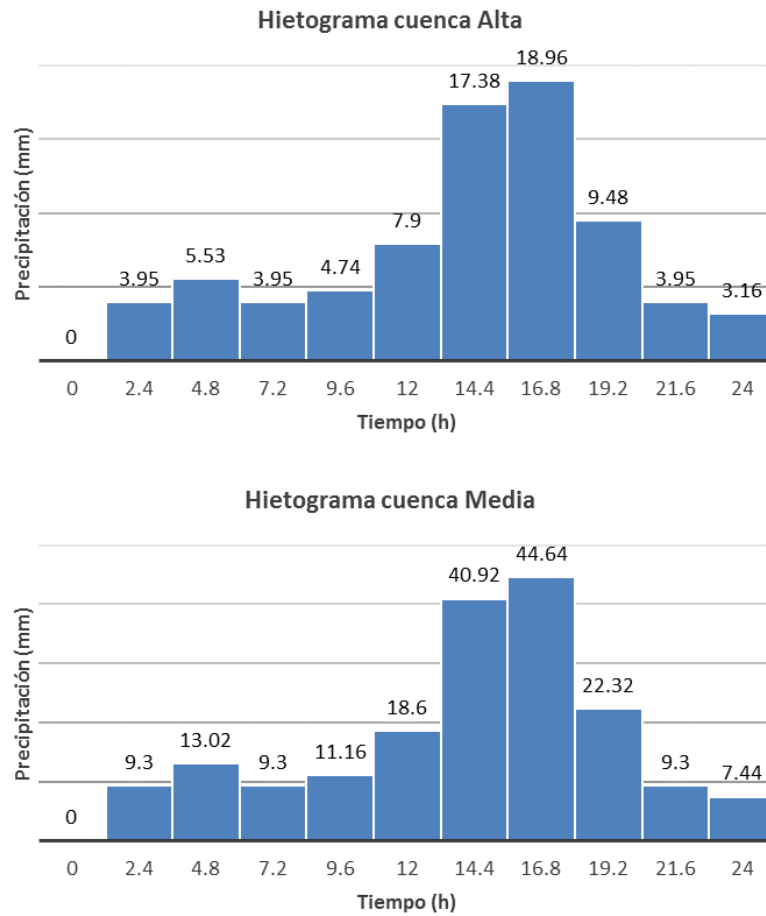


Figura 241. Distribución de la lluvia de 18 horas.

La distribución de la lluvia de diseño (cuenca alta = 79mm, media = 186mm media y baja = 195mm), realizada mediante el tercer cuartil de Huff se presenta en la Figura 242.



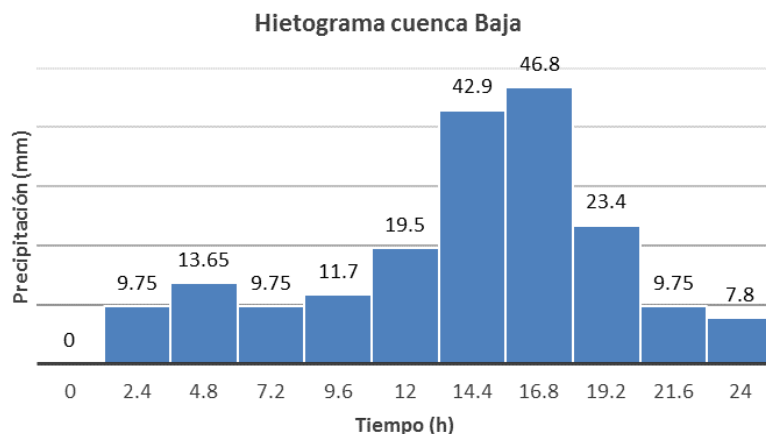


Figura 242. Distribución de la lluvia de diseño según el tercer cuartil de Huff para cada subcuenca.

La distribución de los datos de lluvia diarios para todas las estaciones consideradas dentro de la cuenca es la presentada con la línea negra en la Figura 243(izquierda), y este promedio comparado con los cuartiles de Huff se observan en la parte derecha.

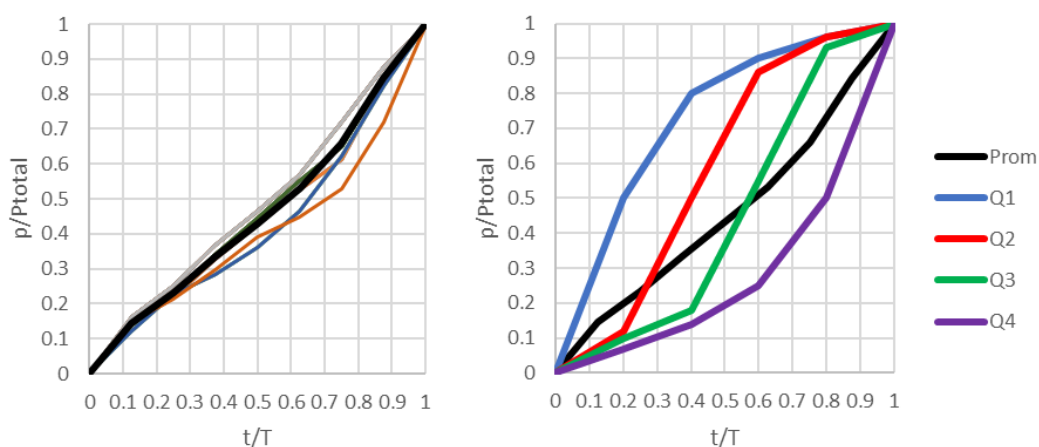


Figura 243. Comparación de los cuartiles de Huff y la distribución de los datos diarios de lluvia en todas las estaciones.

### **Estimación de caudales con HEC-HMS 4.0**

HEC-HMS es un programa complejo que calcula el hidrograma producido por una cuenca a partir del ingreso de lluvia y otros parámetros físicos que permiten al modelo. Su base matemática permite simular la respuesta de la unidad hidrográfica. Para el ejercicio preliminar se subdividió la cuenca en 3 subcuencas (Alta, Media y Baja) de acuerdo con el “Estudio de la zona costera de río Branco”.

El software trabaja bajo 4 procesos: pérdidas de lluvia, traslación, flujo base, y enrutamiento. Existen varios métodos para calcular cada uno de esos procesos. Sin embargo, no todos los casos se utilizaron en el presente estudio por falta de información. Las combinaciones de metodologías evaluadas se presentan en la Tabla 94 **Error! Reference source not found..** Para todos los casos se realizó el enrutamiento mediante el método de Muskingum.

Tabla 94. Combinaciones evaluadas en el modelo HEC HMS para la estimación de caudales a la salida de la cuenca.

Ensayo	Método de pérdidas	Método de transformación
1	Número de Curva del Soil Conservation Service (NC SCS)	Hidrograma Unitario - Soil Conservation Service (HU SCS)
2		Hidrograma Unitario - Clark (HU Clark)
3		Hidrograma Unitario - Snyder (HU Snyder)

A continuación, se describe la forma como se seleccionaron los parámetros de entrada necesarios para evaluar los diferentes métodos y respectivas combinaciones.

- Número de curva del Soil Conservation Service

Este método calcula la precipitación generada por un determinado evento de lluvia en función del parámetro “NUMERO DE CURVA” que es determinado por las condiciones de infiltración del suelo del terreno que se esté analizando. Este método asume una proporcionalidad entre escorrentía y retención de agua en la cuenca.

El número de curva (NC) se determina de manera experimental a través de tablas y gráficos que manifiestan la diversidad de condiciones del suelo, vegetación y condiciones de infiltración. A partir de los resultados obtenidos en el “Estudio de la zona costera de río Branco” (Teixeira, et al., 2013), se tomó un NC=78 para realizar la modelación en el HEC. Para la aplicación del método de pérdidas del Número de Curva del Soil Conservation Service, también es necesario ingresar el porcentaje de impermeabilidad del suelo, el cual se asumió de 5%.

- Hidrograma unitario del Soil Conservation Service

Para la implementación de este método de transformación se requirió un lag time (tiempo de retardo) que corresponde al 60% del tiempo concentración ( $t_c$ ), relación sugerida por el Soil Conservation Service para la implementación de su modelo. Para el

caso de estudio el valor del lag time, según la subcuenca, fue de 1095 minutos(Alta), 288 minutos(Media) y 36 0minutos(Baja).

- Hidrograma unitario de Clark

Para aplicar este método se requiere información del tiempo de concentración en horas, que para cada subcuenca analizada fue de 30.4h (Alta), 8h (Media) y 10h (Baja). Además, se debe definir un coeficiente de almacenamiento, que representa el retardo que la cuenca impone a la esorrentía superficial para desplazarse y puede calcularse disponiendo de un histograma real de esa cuenca o evaluarse de algún modo. Algunos autores suponen que es similar al lag o tiempo de retardo, o que es una fracción del tiempo de concentración. Para este caso se utilizó un coeficiente de 0.75 para afectar  $t_c$  y así obtener su valor, el cual, para las subcuencas de estudio fue de 22.8 horas (Alta), 6h (Media) y 7.5h (Baja).

- Hidrograma unitario de Snyder

Esta metodología requiere el cálculo de dos tipos de parámetros de tiempo:

Tiempo de retardo: diversos estudios sugieren el tiempo de retardo como porción del  $t_c$  en un rango del 50 -75%. En este caso se usó la misma suposición del HU- SCS que hace referencia a un 60% del tiempo de concentración. Ambos métodos se refieren al tiempo transcurrido desde el centro de gravedad del hidrograma de lluvia neta hasta la punta del hidrograma, a pesar de que los métodos para calcular dicho hidrograma sean diferentes. El valor obtenido para el estudio fue de 18.24 horas (Alta), 4.8h (Media) y 6h (Baja).

Coeficiente pico: es un parámetro que multiplica el área para poder determinar el caudal pico. No está basado en conceptos físicos por lo que es mejor determinar su valor a través de la calibración. Sin embargo, hay estudios que sugieren un rango entre 0.56 y 0.69. Valores mayores de  $C_p$  indican cuencas con grandes inclinaciones. Considerando que la cuenca a evaluar posee pendiente muy baja, se tomó el valor mínimo, correspondiente a 0.56 para todas las subcuencas.

- Método de enrutamiento de Muskingum

En este método se calcula el parámetro K que relaciona la longitud del tramo con la velocidad de la onda de inundación, 12.93h (Alta) y 7.08h (Media). Puede asimilarse al tiempo de recorrido de la onda cinemática de un extremo a otro del tramo estudiado.

También es necesario un parámetro X, referente a una constante que puede estar entre 0 y 0.5, y que normalmente vale 0.2-0.3. En este modelo se utilizó X=0.2. Estos dos factores determinan la amortiguación del hidrograma a lo largo del tramo del cauce.

### **Resultados modelación HEC-HMS**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las combinaciones establecidas con el software HEC HMS.

- NC SCS-HU SCS

Tabla 95. Ensayo 1. NC SCS- HU SCS

ENSAYO 1. NC SCS - HU SCS	MÉTODO DE PÉRDIDAS		
	NC SCS	Número de curva	78
		% Impermeabilidad	5
	MÉTODO DE TRANSFORMACIÓN		
	HU SCS	Tiempo de Retardo (Lag Time) (min)	1095 - Alta
			288 - Media
			360 - Baja

Tabla 96. Resultados de caudal pico. Ensayo 1.

Metodología	Caudal (m3/seg)			
	Alta	Media	Baja	Salida
NC_HU SCS	1864	2924	5842	7756

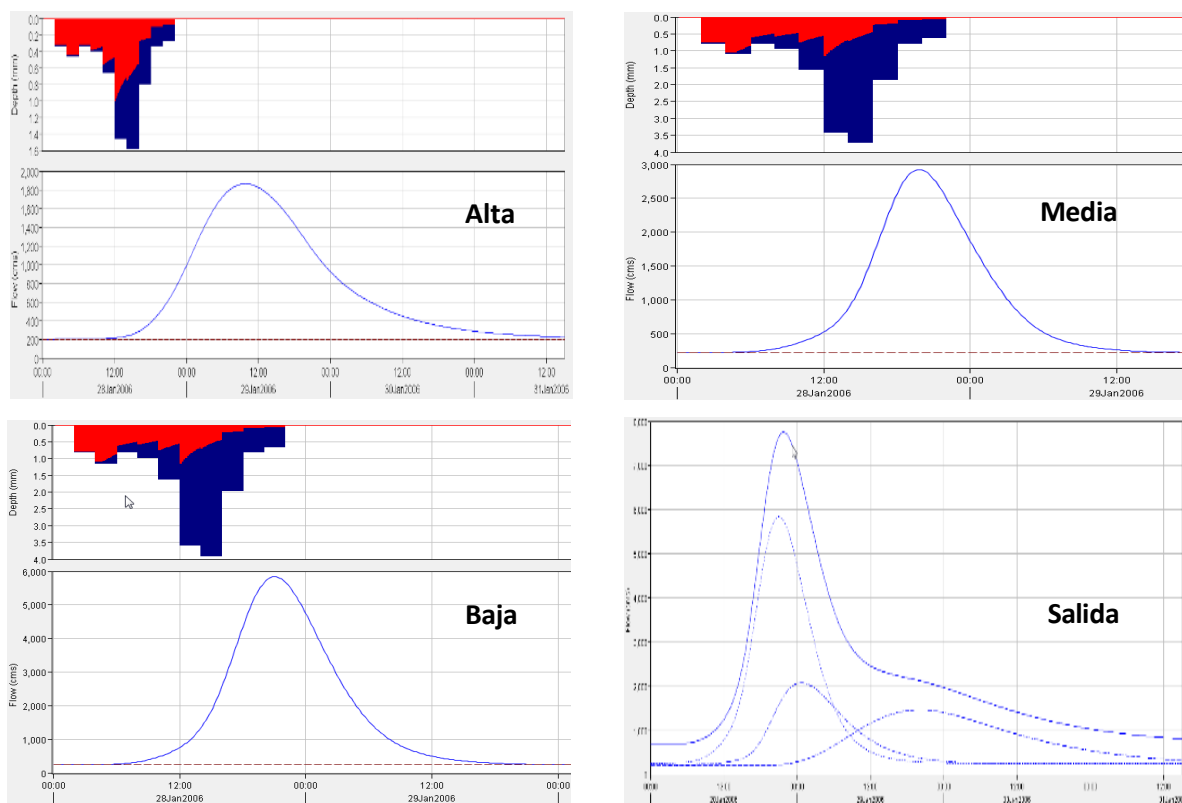


Figura 244. Hidrogramas obtenidos de la modelación. Ensayo 1.

- NC SCS-HU CLARK

Tabla 97. Ensayo 2. NC SCS- HU CLARK.

MÉTODO DE PÉRDIDAS			
ENSAYO 2. NC SCS - HU CLARK	NC SCS	Número de curva	78
		% Impermeabilidad	5
	MÉTODO DE TRANSFORMACIÓN		
	HU CLARK	Tiempo de concentración (horas)	30.4 - Alta
			8 – Media
			10 - Baja
		Coeficiente de almacenamiento (horas)	22.8 – Alta
			6 – Media
			7.5 - Baja

Tabla 98. Resultados de caudal pico. Ensayo 2.

Metodología	Caudal (m3/seg)			
	Alta	Media	Baja	Salida
NC_ HU CLARK	1242	2202	4230	5977

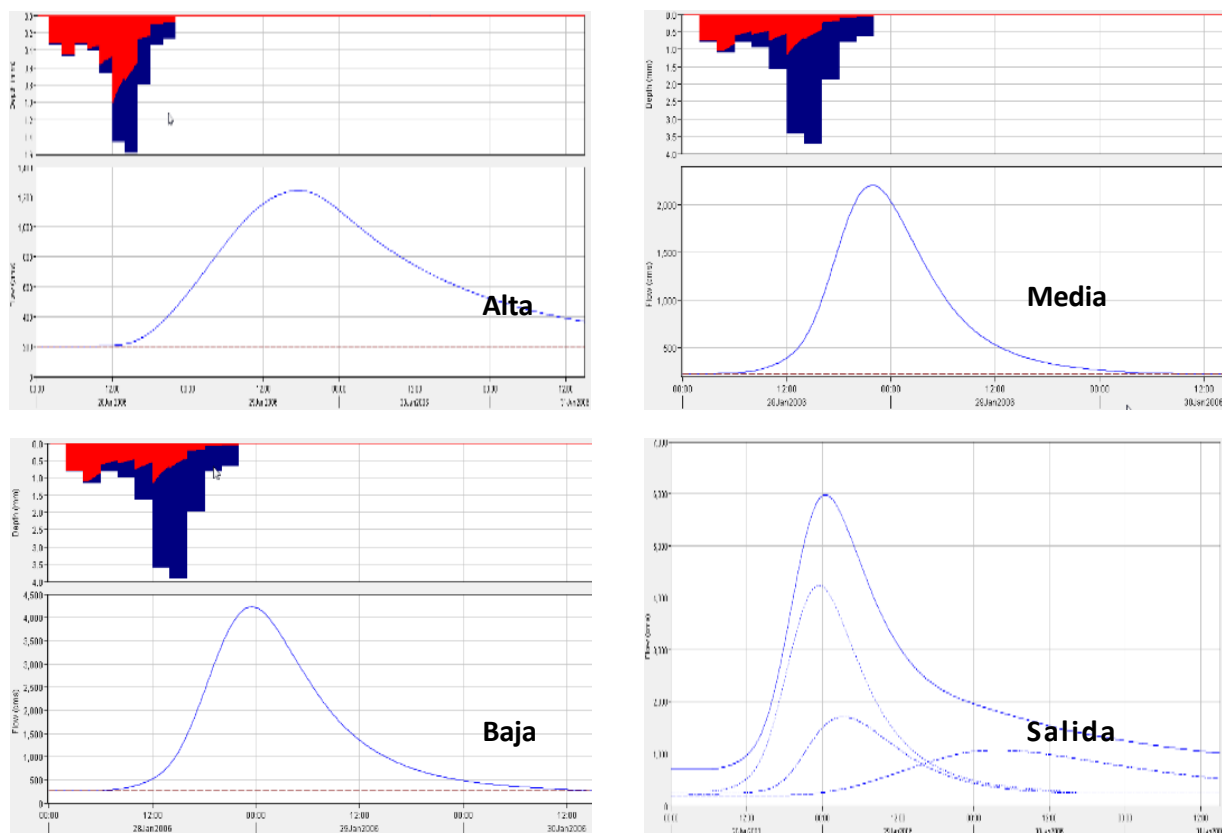


Figura 245. Hidrogramas obtenidos de la modelación. Ensayo 2.

- NC SCS-HU SNYDER

Tabla 99. Ensayo 3. NC SCS- HU SNYDER.

ENSAYO 3. NC SCS - HU SNYDER	MÉTODO DE PÉRDIDAS		
	NC SCS	Número de curva	78
		% Impermeabilidad	5
	MÉTODO DE TRANSFORMACIÓN		
	HU SNYDER	Tiempo de retardo (horas)	18.24 – Alta
			4.8 – Media
			6 - Baja
		Coeficiente pico (Cp)	0.56

Tabla 100. Resultados de caudal pico. Ensayo 3.

Metodología	Caudal (m3/seg)			
	Alta	Media	Baja	Salida
NC_HU SNYDER	1487	2414	4714	6391



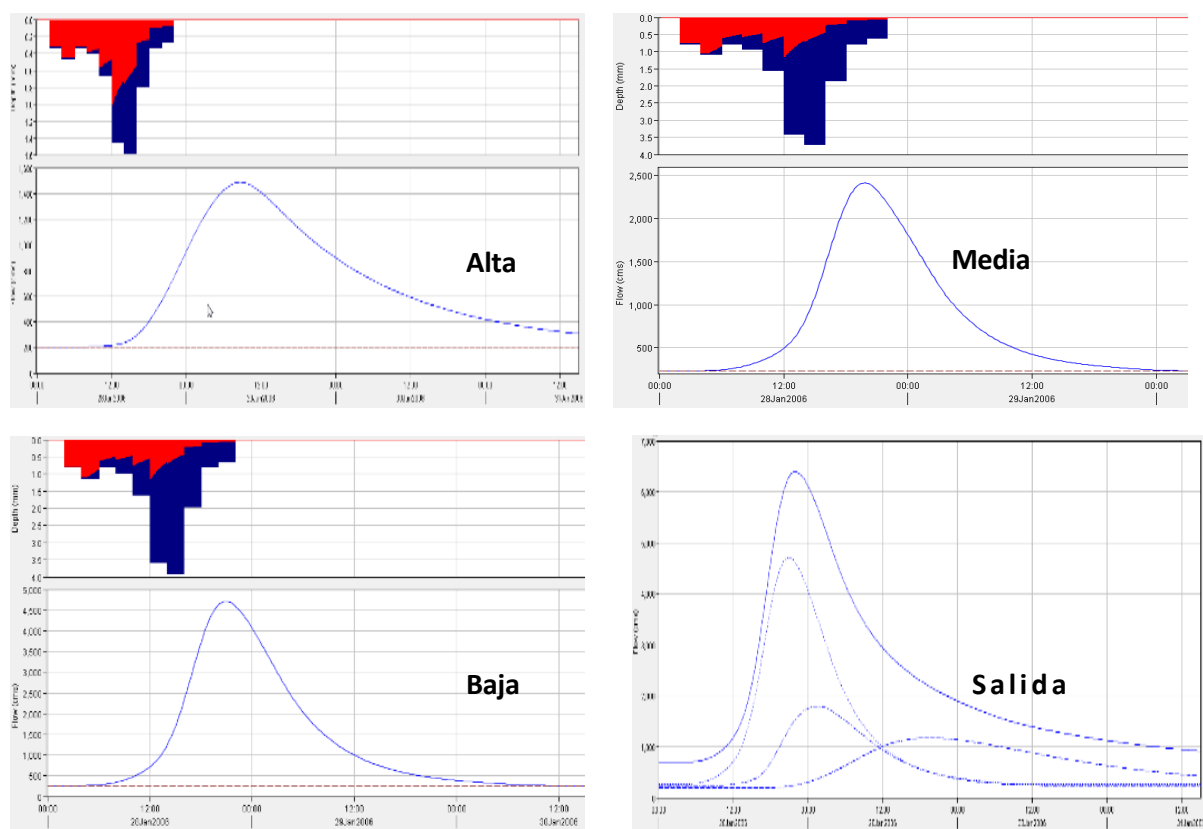


Figura 246. Hidrogramas obtenidos de la modelación. Ensayo 3.

### Resumen de resultados

La Tabla 101Error! Reference source not found. presenta el resumen general de los resultados obtenidos mediante la modelación hidrológica con el software HEC HMS y sus diferentes combinaciones, cuyos resultados se promediaron para obtener un caudal de final.

Tabla 101. Resultados de caudal pico. Modelación hidrológica HEC.

Metodología	Caudal (m3/s)			
	Alta	Media	Baja	Salida
NC_HU SCS	1864	2924	5842	7756
NC_HU CLARK	1242	2202	4230	5977
NC_HU SNYDER	1487	2414	4714	6391
PROMEDIO	1531	2513	4929	6708

En cuanto a los resultados obtenidos en el modelo hidrológico preliminar de la cuenca del Río Yaguarón, se puede concluir que la respuesta de la cuenca si es lenta según la forma del hidrograma de salida de los tres ensayos realizados. Esto se ajusta al concepto preliminar establecido a partir de los parámetros geomorfológicos y pruebas de función de ancho e índice topográfico. Esta respuesta se valida más adelante con los resultados del modelo hidrológico distribuido.

#### 1.47 Método de cómputo de volumen de escorrentía: Número de curva

Como método para determinar los volúmenes de escorrentía se emplea el número de curva o factor de escurrimiento dado por el Soil Conservation Service de los Estados Unidos. Al definir los factores de escurrimiento, es posible determinar la precipitación efectiva.

La precipitación efectiva corresponde a la intensidad de lluvia remanente, luego que, de la profundidad total de precipitación aportada por la tormenta, se ha gastado una porción en procesos hidrológicos de infiltración, interceptación y evapotranspiración. Ésta escorrentía se calcula en función del valor total de precipitación y del factor de escurrimiento en determinado punto, de la siguiente manera:

$$P_e = \frac{\left[P_m - \frac{508}{CN} + 5.08\right]^2}{P_m - \frac{2032}{CN} - 20.32} \quad \text{Ecuación 0-9}$$

En donde  $P_e$  es la precipitación efectiva en cm,  $P_m$  es la precipitación de la tormenta en cm, y  $CN$  es el factor de escurrimiento.

El factor de escurrimiento es un indicador global de la cantidad de agua que será absorbida o transpirada por los suelos superficiales. Se obtiene como función del uso de la tierra, la cobertura vegetal y las condiciones de infiltración y transpiración del suelo superficial. En la Tabla 102 se presentan los valores de CN usados para las diferentes coberturas y grupo hidrológico del suelo existentes en la cuenca (Soil Conservation Service, 1986). El rango de aplicación de la Ecuación 0-9, es para valores de:

$$P_m > \frac{508}{CN} + 5.08$$

Ecuación  
0-10

Fuera de este intervalo se considera que la precipitación efectiva es igual a cero. También se debe garantizar que la precipitación efectiva no sea mayor que la precipitación de la tormenta.

Teniendo en cuenta la información consignada en la Tabla 102 y la información contenida en los mapas presentados que describen el tipo de suelo, cobertura vegetal y la condición del suelo para la cuenca Río Branco, se obtienen los mapas de número de curva de escurrimiento para la cuenca teniendo en cuenta tres condiciones de humedad de suelo antecedentes: seca, intermedia y húmeda que se presentan a continuación.

Tabla 102. Valores de CN para diferentes coberturas (usos de la tierra) y tipos de suelo

<b>Tipo de cobertura y condición</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Cultivos en surco recto - Buena	67	78	85	89
Bosques - Buena	30	55	70	77
Pastizal - Aceptable	49	69	79	84
Superficie impermeable	100	100	100	100
Distrito residencial. 1/8 acre	77	85	90	92
Bosques - Aceptable	36	60	73	79
Combinación bosques y pastizales - Buena	32	58	72	79
Combinación bosques y pastizales - Aceptable	43	65	76	82
Distrito residencial. 1 acre	51	68	79	84
Cereales en surco recto	63	75	83	87
Terrenos recién adecuados	77	86	91	94
Bosques - Buena	30	55	70	77
Distrito urbano. Industrial	81	88	91	93
Superficie impermeable. Calles. Pavimentada. Cunetas abiertas	83	89	92	93
Descanso (sin cultivo)	77	86	91	94
Superficie impermeable. Calles. Pavimentada	98	98	98	98
Potrero	30	58	71	78

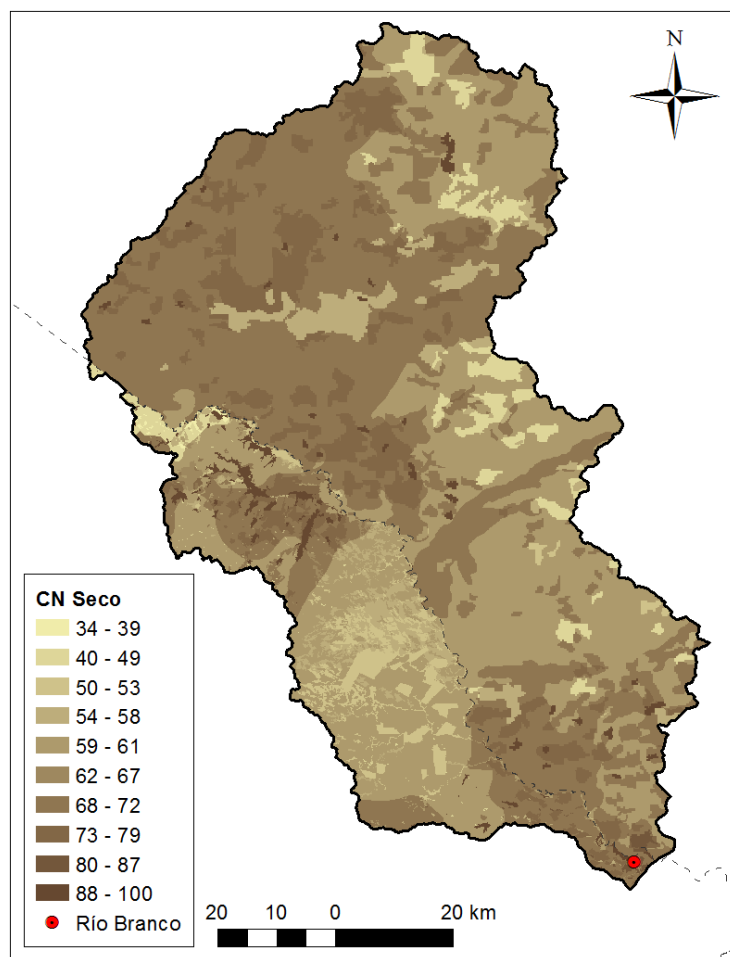


Figura 247. Mapa de números de curva CN para condición de humedad antecedente seca

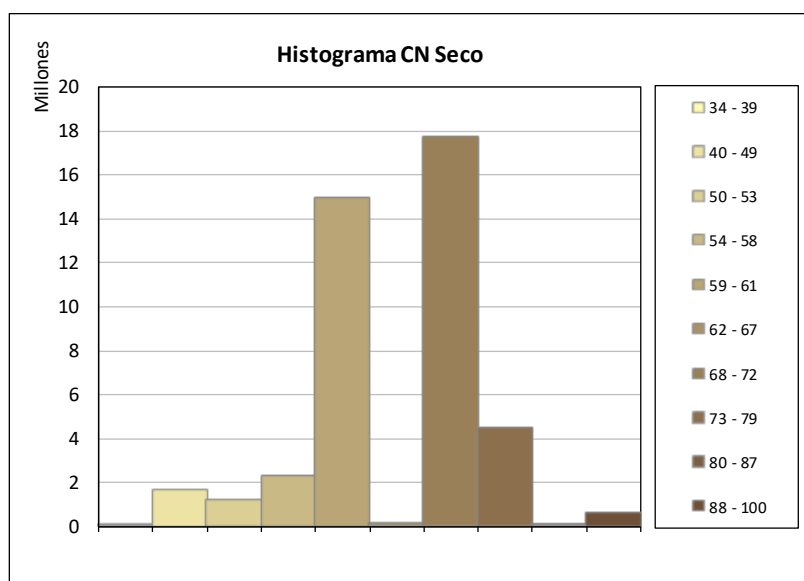


Figura 248. Histograma de frecuencia de CN para condición de humedad antecedente seca

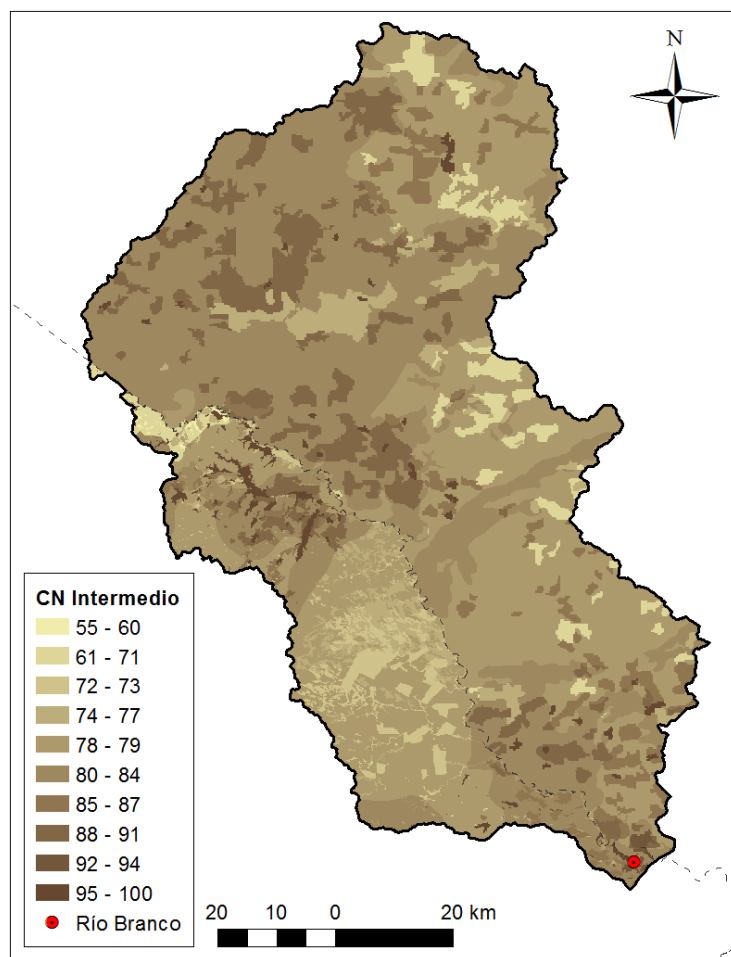


Figura 249. Mapa de números de curva CN para condición de humedad antecedente intermedia.

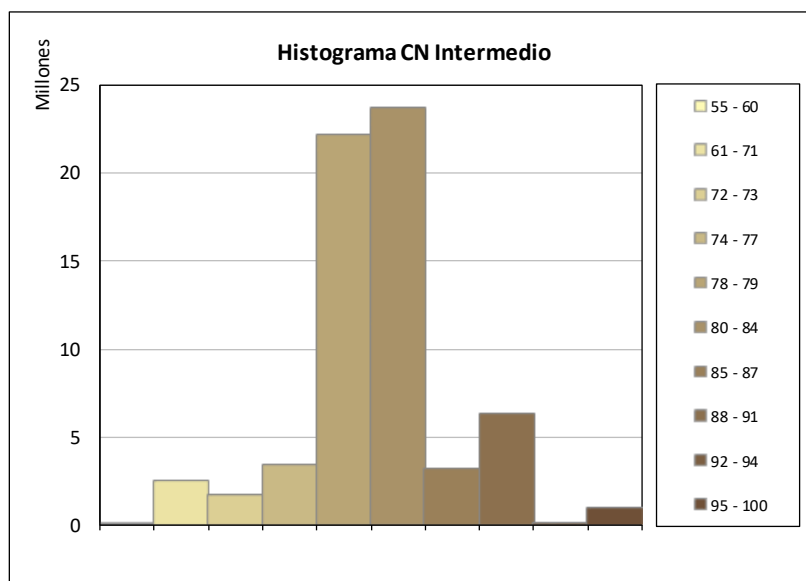


Figura 250. Histograma de frecuencia de CN para condición de humedad antecedente intermedia

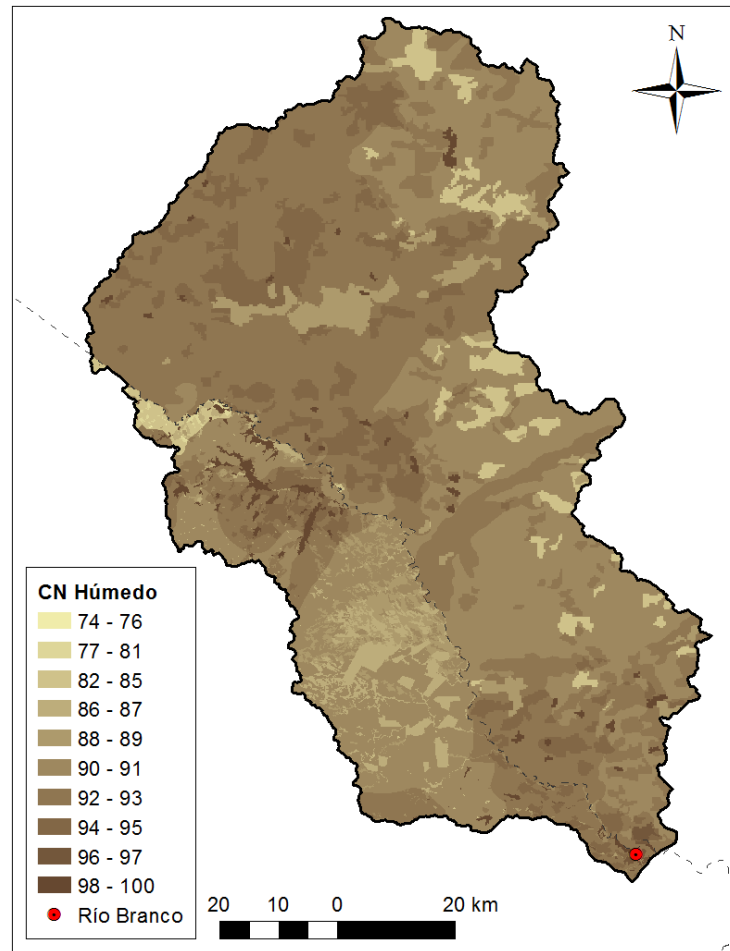


Figura 251. Mapa de números de curva CN para condición de humedad antecedente húmeda.

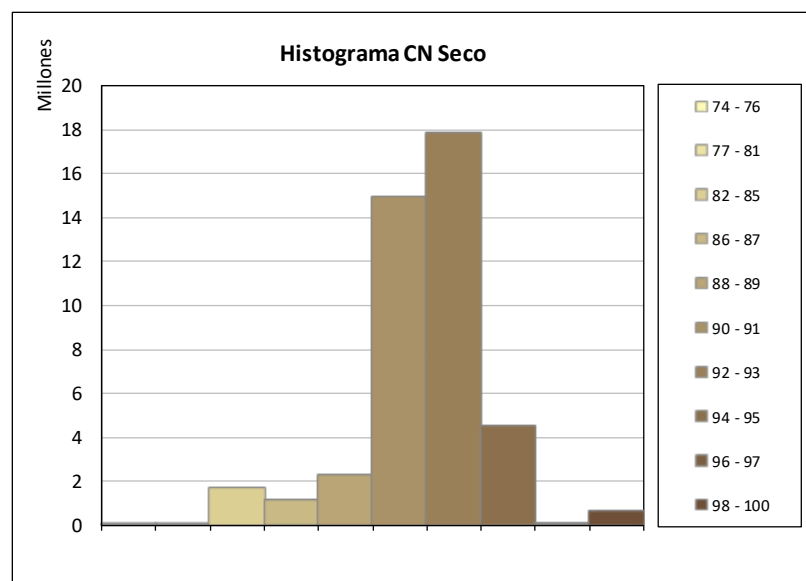


Figura 252. Histograma de frecuencia de CN para condición de humedad antecedente húmeda.

Se aprecia que, de acuerdo con la condición antecedente de humedad del suelo, los números de curva varían en cuanto a su magnitud. Lo anterior debido a que la capacidad de infiltración de un volumen de agua en condiciones húmedas decrece en comparación con la capacidad en condiciones antecedentes de tipo seco. Se observa en los gráficos de histograma de frecuencias de valores de CN que para condiciones secas se presenta una mayor cantidad de valores cercanos a 70, para condiciones intermedias se presentan valores cercanos a 80, mientras que para condiciones húmedas se presentan valores cercanos a 90. Zonas con valores de CN cercanos a 0 corresponden a zonas con alta capacidad de absorción de agua en eventos de precipitación, tales como bosques naturales espesos. Por el contrario, valores de CN cercanos a 100 corresponden a zonas con muy baja capacidad de absorción de agua en eventos de precipitación, tales como zonas artificiales y/o ciudades.

Haciendo uso de la Ecuación 0-9 y de la información de CN para cada condición, se obtienen los valores de precipitación efectiva para cada evento de análisis.

#### **1.48 Modelo de precipitación-escorrentía: Clark Modificado**

Los modelos de precipitación escorrentía son aproximaciones de cálculo, a nivel de cuenca, de la cantidad de precipitación efectiva que debe ser transitada por un cauce específico en un punto de concentración determinado en función del tiempo. Dentro de los modelos existentes se identifican modelos materiales y simbólicos, de acuerdo con la clasificación propuesta por Singh (Hydrologic systems, 1988).

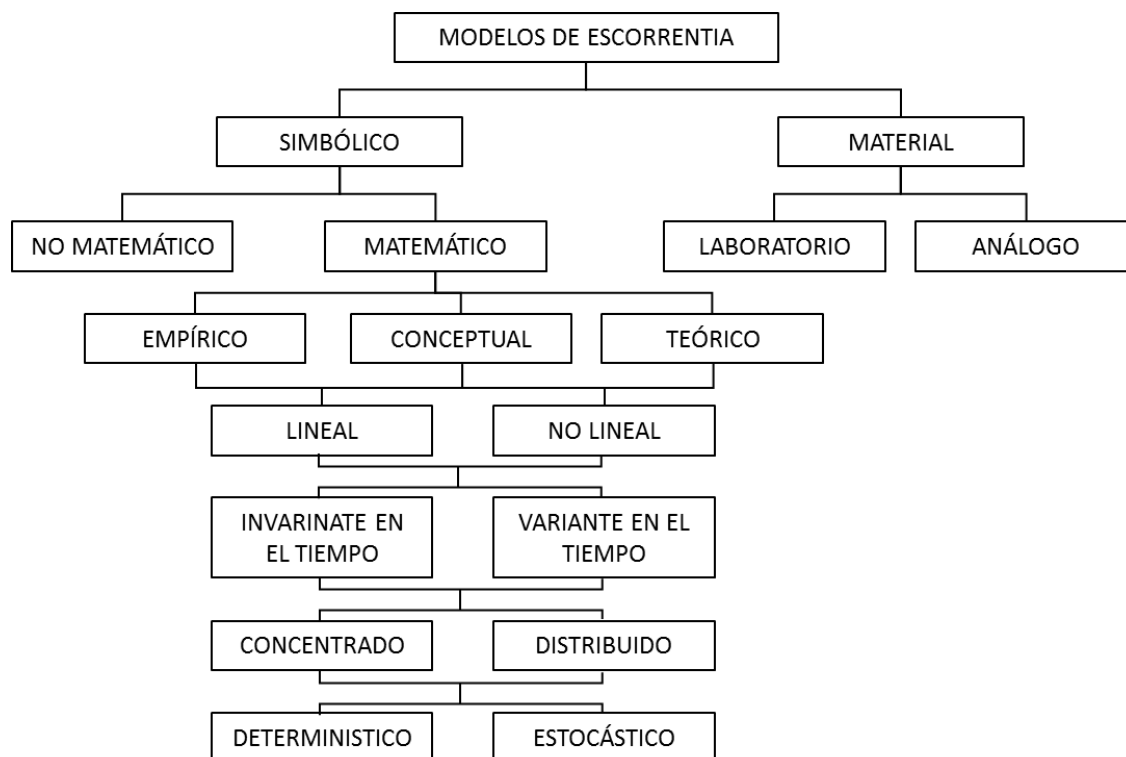


Figura 253. Clasificación de modelos hidrológicos, propuesta por Singh (1988).

Los modelos de tipo simbólico se clasifican de acuerdo a su base matemática. Dentro de los modelos matemáticos físicamente basados, se encuentran los modelos distribuidos y agrupados. El modelo seleccionado para el análisis de escorrentía en la cuenca de Río Branco es el método Clark modificado, o ModClark. Este modelo es paramétrico distribuido, es decir, las variaciones espaciales de las características y procesos hidrológicos son consideradas de manera explícita (US Army Corps of Engineers, 2000). Esto se traduce en que se tienen en cuenta las variaciones en el tiempo de viaje hacia el punto de concentración, desde todos los puntos de la cuenca de análisis.

El modelo Clark modificado define dos procesos fundamentales en el proceso de transformación de un volumen de lluvia en escorrentía directa:

- La traslación o movimiento del exceso de precipitación a lo largo de los drenajes de la cuenca.
- La atenuación, o disminución de la magnitud de descarga a medida que el exceso de precipitación es almacenado en la cuenca (en el suelo, superficie y canales).



### **Proceso de traslación**

El tiempo que le toma a una partícula de agua llegar a la salida de la cuenca se modela mediante una malla de tiempos de viaje. Para cada celda del territorio, se determina el tiempo hasta la salida de la siguiente manera:

$$t_{celda} = t_c \frac{d_{celda}}{d_{m\acute{a}x}} \quad \text{Ecuación 0-11}$$

En donde  $t_{celda}$  es el tiempo de viaje del agua desde la celda en consideración,  $t_c$  es el tiempo de concentración de la cuenca,  $d_{celda}$  es la distancia de la celda en consideración a la salida de la cuenca, y  $d_{m\acute{a}x}$  es la máxima distancia de alguna celda a la salida de la cuenca.

El tiempo de concentración puede calcularse aplicando la ecuación de Kirpich (Kirpich, 1940), la cual se expresa como:

$$t_c = 0.0003245 \left[ \frac{L}{\sqrt{S}} \right]^{0.77} \quad \text{Ecuación 0-12}$$

En donde  $t_c$  es el tiempo de concentración en horas,  $L$  es la longitud del cauce principal en m y  $S$  es la pendiente media del cauce principal.

Con la información del cauce y la topografía general se obtiene la pendiente media del cauce empleado el método de Taylor-Schwarz (Springall, 1970) la cual está dada por:

$$S = \frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_n}{\sqrt{S_n}}} \quad \text{Ecuación 0-13}$$

En donde la longitud del cauce principal  $L$  se divide en  $n$  número de segmentos de longitud  $l$  y para cada uno de ellos se calcula su pendiente  $S$ .

Del área de cada celda se determina el volumen de escurrimiento en cada momento del tiempo. Estos volúmenes son enrutados usando el modelo de reservorio lineal dentro del proceso de atenuación.

### **Proceso de atenuación**

El almacenamiento de corto plazo juega un papel muy importante en la transformación del exceso de precipitación en escorrentía. En el método de Clark, este almacenamiento se modela como un reservorio lineal. En un reservorio lineal aplica la ecuación de continuidad de la forma:

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t \quad \text{Ecuación 0-14}$$

En donde  $\frac{dS}{dt}$  es la tasa de cambio del almacenamiento en la cuenca, en el tiempo  $t$ ,  $I_t$  es el caudal de entrada, y  $O_t$  es el caudal de salida. En el modelo de reservorio lineal, el caudal de salida está relacionado con el volumen almacenado de manera proporcional:

$$S_t = RO_t \quad \text{Ecuación 0-15}$$

En donde  $R$  es el parámetro de reservorio lineal. Al combinar y solucionar las ecuaciones anteriores mediante un enfoque sencillo de diferencias finitas, se obtiene que

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1} \quad \text{Ecuación 0-16}$$

En donde  $C_A$  y  $C_B$  son coeficientes de enrutamiento., que se calculan como:

$$C_A = \frac{\Delta t}{R + 0.5\Delta t} \quad \text{Ecuación 0-17}$$

$$C_B = 1 - C_A \quad \text{Ecuación 0-18}$$

El caudal de salida promedio para el tiempo  $t$  es entonces:

$$\bar{O}_t = \frac{O_{t-1} + O_t}{2} \quad \text{Ecuación 0-19}$$

Para cada celda de la malla de cálculo, se calcula un caudal de salida promedio, para cada momento del tiempo. Al final, la suma de los caudales promedio, en cada paso de tiempo, da el hidrograma de salida final ( $Q_t$ ).

$$Q_t = \sum_{i=1}^{N_{celdas}} \bar{O}_{i,t}$$

Ecuación  
0-20

De esta manera, el modelo Clark modificado puede verse esquemáticamente de la siguiente manera:

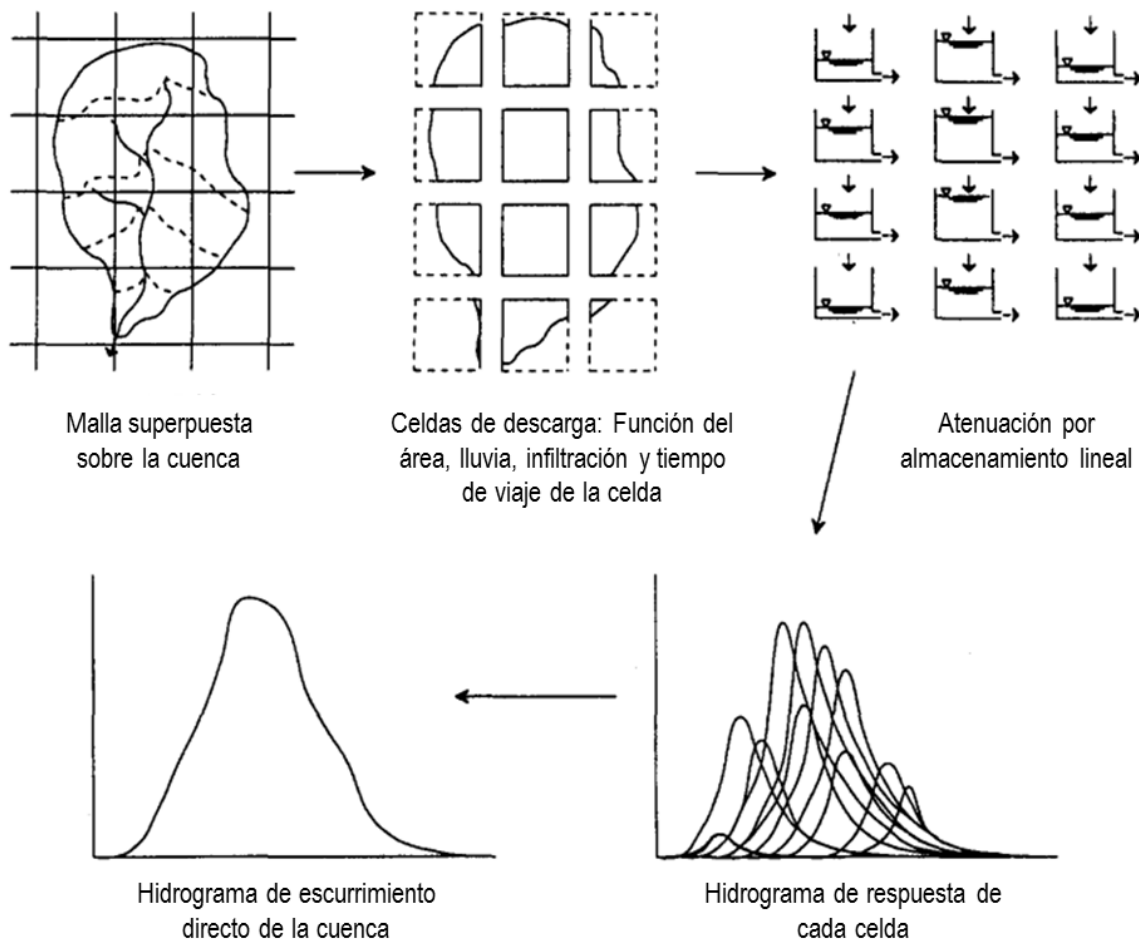


Figura 254. Modelo de escorrentía directa ModClark. Modelo conceptual (Kull & Feldman, 1998).

A diferencia del método de Clark (1945), que es un modelo agrupado, el modelo ModClark (Peters & Easton, 1996) presenta el cálculo y caracterización de los procesos de traslación y atenuación antes descritos de manera distribuida en la cuenca de análisis por medio de una malla previamente definida. De cada una de las celdas de la malla de

análisis se obtienen tiempos de concentración y relaciones de atenuación que derivan en una serie de hidrogramas en la salida de cada una de las celdas. A partir de la envolvente de dichos hidrogramas se obtiene el hidrograma de salida en el punto de concentración deseado en el análisis. Para este caso el punto de concentración está ubicado aguas arriba de la ciudad de Río Branco.

#### 1.48.1 Resultados para la cuenca de río Yaguarón

La Figura 255 **Error! Reference source not found.** muestra el resultado de los hidrogramas en el punto de concentración de la cuenca del río Yaguarón, obtenidos para 50 eventos de precipitación generados estocásticamente. El tiempo al pico promedio se ubica en las 60 horas. Los eventos de precipitación se seleccionaron de forma tal que incluyeran eventos extremos que no se han presentado aún, como el evento que genera un caudal pico de 12,700 m<sup>3</sup>/s. Vale la pena recordar que las lluvias generadas estocásticamente corresponden a duraciones de un día, y fueron obtenidas de la modelación de 365,000 días (lo mismo que 1,000 años), por lo que su frecuencia de ocurrencia es muy baja.

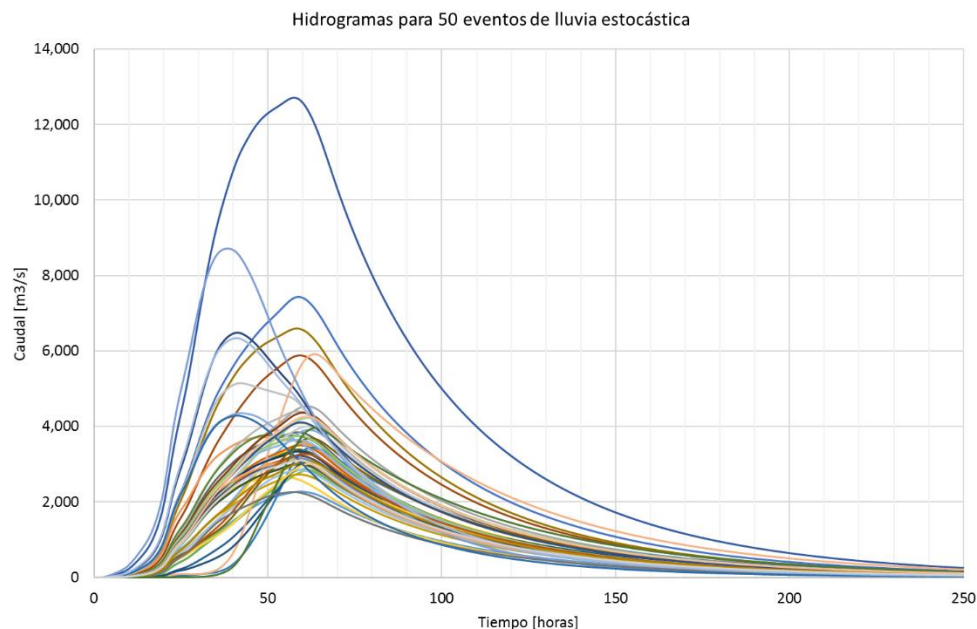


Figura 255. Hidrogramas en el punto de concentración para 50 escenarios de lluvia estocástica.

Al comparar estos resultados con la modelación hidrológica presentada en la Sección 1.46.3, se puede concluir que la forma de los hidrogramas de salida es la misma, lo que confirma que la respuesta de la cuenca es media lenta. Sin embargo, la metodología aplicada en este estudio, que acopla el modelo desagregado de Número de Curva para cálculo del volumen de escorrentía y Clark Modificado para cálculo del hidrograma de escurrimiento, proporciona resultados de menor incertidumbre que modelos acoplados.

#### **1.49 Modelo de amenaza por inundación**

Los modelos tradicionales de inundación se componen de 3 partes esenciales: modelo de precipitación (generación de aguaceros descrita en la Sección 1.45), modelo de precipitación-escorrentía (modelo hidrológico de generación de hidrogramas de tránsito Sección 1.48) y modelos hidrodinámicos, que son modelos físicamente basados que se encargan de transitar el caudal de escorrentía teniendo en cuenta la topografía, condiciones de rugosidad y regímenes de flujo de un río o tramo de río en particular.

La manera de abordar los modelos hidrodinámicos se divide a su vez en 3 componentes principales. Dichos componentes se caracterizan en términos del número de dimensiones en las cuales se plantea el análisis hidrodinámico, por lo tanto se componen de modelos 1D, 2D y 3D. Adicional a estos modelos existen variaciones derivadas de ellos, como por ejemplo los modelos acoplados 1D/2D que como su nombre lo indica nacen de la unión de modelos uni y bidimensionales. Los modelos unidimensionales son modelos relativamente sencillos que solucionan las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento en una dirección y su aplicación se centra en ríos no meandrosos y con un cauce bien definido en el cual las variaciones de flujo en sentidos horizontales no sean predominantes. En el caso de los modelos bidimensionales se solucionan las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento (Saint Venant) para las dos direcciones de flujo, por lo que su aplicación se centra en ríos meandrosos, con un cauce definido y zonas anegables con pendientes reducidas.

### 1.49.1 Inundación aluvial – modelo 1D (HEC-RAS)

El objetivo del análisis unidimensional es la solución de los perfiles de profundidad de agua en secciones transversales a lo largo del cauce de un río. Se asume un flujo no permanente, gradualmente variado y unidimensional.

Para el cálculo del eje hidráulico o tirante en el modelo particular en la ciudad de Río Branco, se hace uso del “Método estándar por etapas en cauces naturales” (Chow, 1994), debido a que en este tipo de canal es posible conocer las propiedades de secciones localizadas a distancias relativamente fijas, y determinadas a partir de herramientas de SIG como el HEC-GeoRAS.

La ecuación de energía, para dos secciones transversales adyacentes,  $ST_1$  y  $ST_2$ , es

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad \text{Ecuación 0-21}$$

En donde  $Y_1$  y  $Y_2$  son la profundidad del agua en las secciones  $ST_1$  y  $ST_2$  respectivamente,  $Z_1$  y  $Z_2$  son las elevaciones del canal en  $ST_1$  y  $ST_2$ ,  $V_1$  y  $V_2$  son las velocidades promedio del flujo (la descarga total dividida por el área total),  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  son coeficientes de ponderación,  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $h_e$  es la cabeza de pérdida de energía. El término de la cabeza de pérdida de energía se define como:

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad \text{Ecuación 0-22}$$

En donde  $L$  es la distancia ponderada entre secciones transversales,  $S_f$  es la pendiente representativa de fricción entre las secciones transversales y  $C$  es un coeficiente de expansión o contracción. La distancia ponderada y la pendiente representativa de fricción se determinan como:

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad \text{Ecuación 0-23}$$

$$S_f = \left( \frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2$$

Ecuación  
0-24

En donde  $L_{lob}$ ,  $L_{ch}$  y  $L_{rob}$  son las distancias en la margen izquierda, canal principal y margen derecha, disponibles para el flujo entre las secciones, respectivamente.  $\bar{Q}_{lob}$ ,  $\bar{Q}_{ch}$  y  $\bar{Q}_{rob}$  son los caudales promedio entre secciones para la margen izquierda, el canal principal y la margen derecha, respectivamente,  $K_1$  y  $K_2$  son las conducciones de las secciones transversales.

El cálculo de la conducción y el caudal de una sección transversal, se realiza para cada subdivisión dentro de la sección (margen izquierda, canal principal, margen derecha), como:

$$Q = K \sqrt{S_f}$$

Ecuación  
0-25

$$K = \frac{1.486}{n} AR^{2/3}$$

Ecuación  
0-26

En donde  $K$  es la conducción para la subdivisión,  $n$  es el coeficiente de rugosidad de Manning,  $A$  es el área de flujo, y  $R$  el radio hidráulico.

El método presentado está implementado en el software HEC-RAS, desarrollado por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos. HEC-RAS es un sistema integrado de software que permite realizar cálculos hidráulicos de una dimensión para una red completa de canales naturales y/o construidos.

### 1.49.2 Inundación aluvial – modelo 2D

El carácter dinámico de las inundaciones y la influencia del desplazamiento del agua hacia las zonas bajas, hacen necesario emplear modelos matemáticos que, por lo menos, incluyan ecuaciones de flujo en dos direcciones horizontales. El método propuesto considera un modelo numérico bidimensional con base en la ecuación de conservación de cantidad de movimiento y en la ecuación de continuidad; en ellas las velocidades corresponden a su valor promedio en la vertical. Se considera el flujo sobre una región con o sin agua. Las ecuaciones dinámicas que describen la conservación de cantidad de movimiento son:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{n^2 |u| u}{h^{4/3}} = -\frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} \quad \text{Ecuación 0-27}$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{n^2 |v| v}{h^{4/3}} = -\frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial z}{\partial y} \quad \text{Ecuación 0-28}$$

En donde  $u$  y  $v$  son las componentes de la velocidad en las direcciones  $x$  y  $y$  respectivamente,  $n$  es el coeficiente de rugosidad según la fórmula de Manning,  $h$  es el nivel de la superficie libre del agua con respecto al nivel del terreno natural y  $t$  es el tiempo.

El principio de la conservación de masa (ecuación de continuidad) en dos dimensiones horizontales establece que:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} u h + \frac{\partial}{\partial y} v h = 0 \quad \text{Ecuación 0-29}$$

El área (en proyección horizontal) de la llanura a inundarse se divide en celdas de forma rectangular de largo  $\partial x$  y ancho  $\partial y$ . Para calcular el flujo de agua en una planicie de inundación se debe resolver el sistema de ecuaciones diferenciales conformado por las ecuaciones anteriores y considerando ciertas condiciones iniciales y de frontera.

### 1.49.3 Modelo hidraulico para la cuenca del río Yaguarón

El objetivo final de este estudio será evaluar el riesgo físico ante efectos de inundación considerando edificaciones como elementos expuestos. Para la evaluación de la amenaza se desarrolló un modelo hidrodinámico con punto de concentración en la ciudad de Río Branco. Durante el proceso de generación del modelo se contemplaron dos alternativas: un modelo acoplado 1D/2D (modelo unidimensional a lo largo del cauce del río y un modelo bidimensional en el área del municipio de Río Branco) y un modelo 2D completo.

#### Modelo hidraulico acoplado 1D/2D

Para la zona de estudio, Ciudad de Río Branco, se generó un modelo hidraulico combinado 1D/2D, donde la parte unidimensional se encarga de modelar el flujo o cauce principal del río Yaguarón y el modelo bidimensional cubre el área correspondiente a la ciudad de Río Branco, como se observa en la Figura 256.





Figura 256. Configuración geométrica río Yaguarón (1D) y área bidimensional, Ciudad de Río Branco.

El modelo corresponde a una combinación unidimensional y bidimensional (1D/2D), el cual parte de la configuración geométrica para el río Yaguarón a la altura de la ciudad de Río Branco.

### **Modelo hidraulico 2D para la cuenca del río Yaguarón**

De la misma forma, para la zona de estudio se generó un modelo hidráulico 2D completo como se observa en la Figura 257. Esto debido a que el río Yaguarón a la altura de la ciudad de Río Branco, es un río de planicie o llanura.



Figura 257. Área bidimensional, Ciudad de Río Branco.

El modelo corresponde a un área de flujo bidimensional (2D), el cual parte de la configuración geométrica para el río Yaguarón a la altura de la ciudad de Río Branco.

#### 1.49.4 Geometría del Modelo Hidráulico

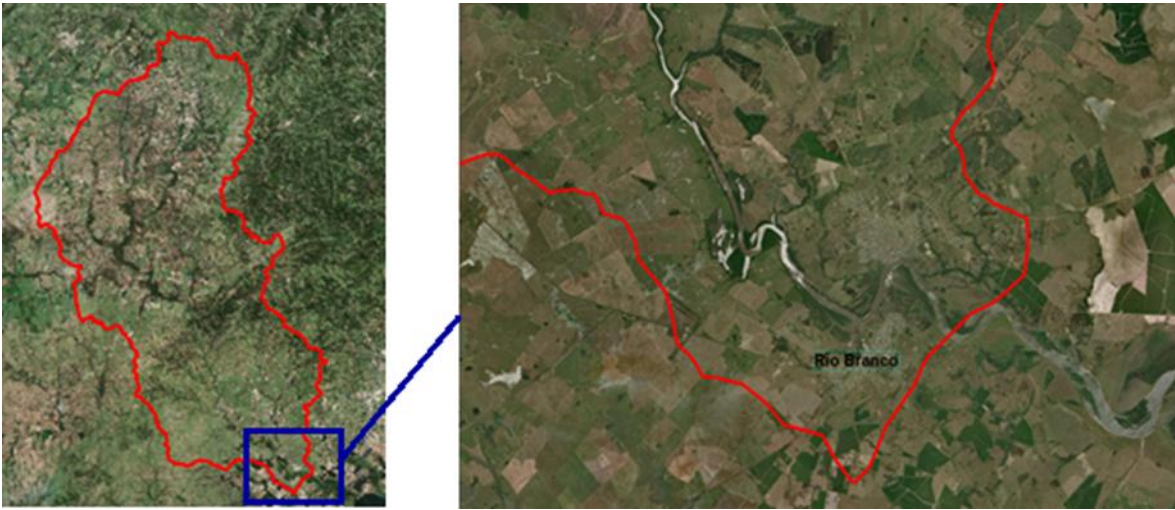
La información geométrica del modelo combinado 1D/2D y del modelo 2D, se obtuvo a partir de la topografía de las zonas inundables del Río Yaguarón, definida en el modelo digital de elevación (DEM-JAXA,METI). Este modelo tiene una resolución espacial de 12.5m, que corresponde al modelo digital de elevación con mayor resolución disponible.

##### ***Tratamiento DEM Zona de estudio: HydroTools***

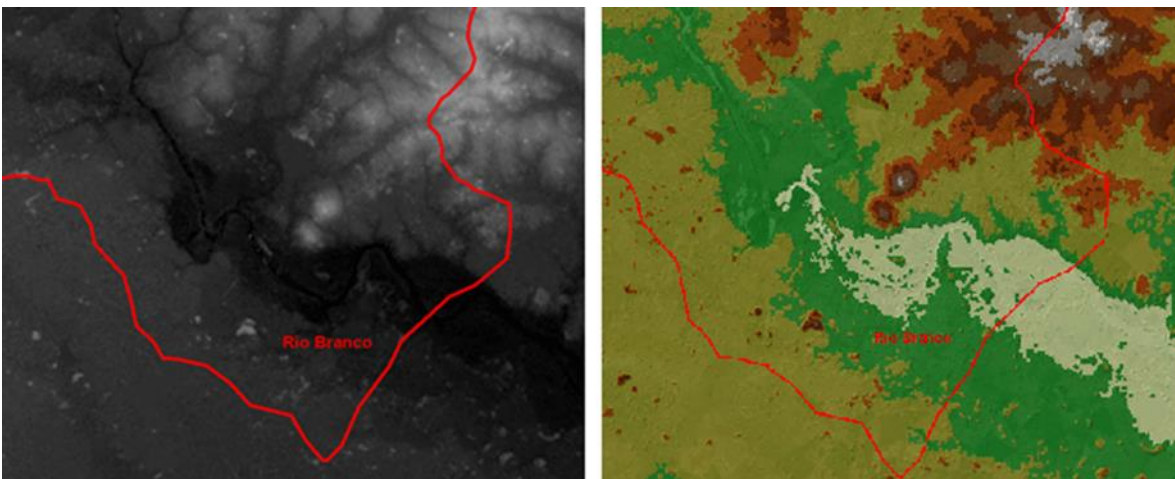
Con el fin de evitar posibles errores en el modelamiento, el DEM es sometido a un pretratamiento para corregir posibles vacíos en el archivo, rellenar sumideros o eliminar picos; los cuales representan errores por la resolución de los datos o redondeo de



elevaciones al entero más próximo. Las imágenes del tratamiento del DEM se muestran en la Figura 258.



Zona de estudio y acercamiento a ciudad de Río Branco



DEM antes del procesamiento

DEM después del procesamiento

Figura 258. Tratamiento del DEM.

### **Hec-GeoRas**

A partir de la información corregida y de imágenes satelitales se trazan líneas que caracterizan el río Yaguaron:

- Eje del río
- Límites del cauce o bancos
- Zonas de flujo
- Trazados transversales

Estos elementos se muestran en la Figura 259. La distancia entre secciones transversales disminuye al aproximarse a la ciudad de Río Branco con la intención de que el modelo sea lo más preciso posible.



Figura 259. Caracterización del río, modelo unidimensional.

### **HEC-Ras: Geometría 1D**

A partir de la información corregida se obtienen las secciones transversales con el fin de definir la geometría para el modelo unidimensional o 2D del río Yaguarón, como se muestra en la Figura 260 **Error! Reference source not found.** y Figura 261. Del modelo se extraen las secciones transversales las cuales se completan, dando ubicación exacta de los bancos y los diques naturales, de igual manera asignando los valores  $n$  de Manning para las secciones transversales los cuales se tomaron del “Estudio de la Zona Costera de Río Branco, CONVENIO UDELAR FING IMFIA – MTOP DNH”.

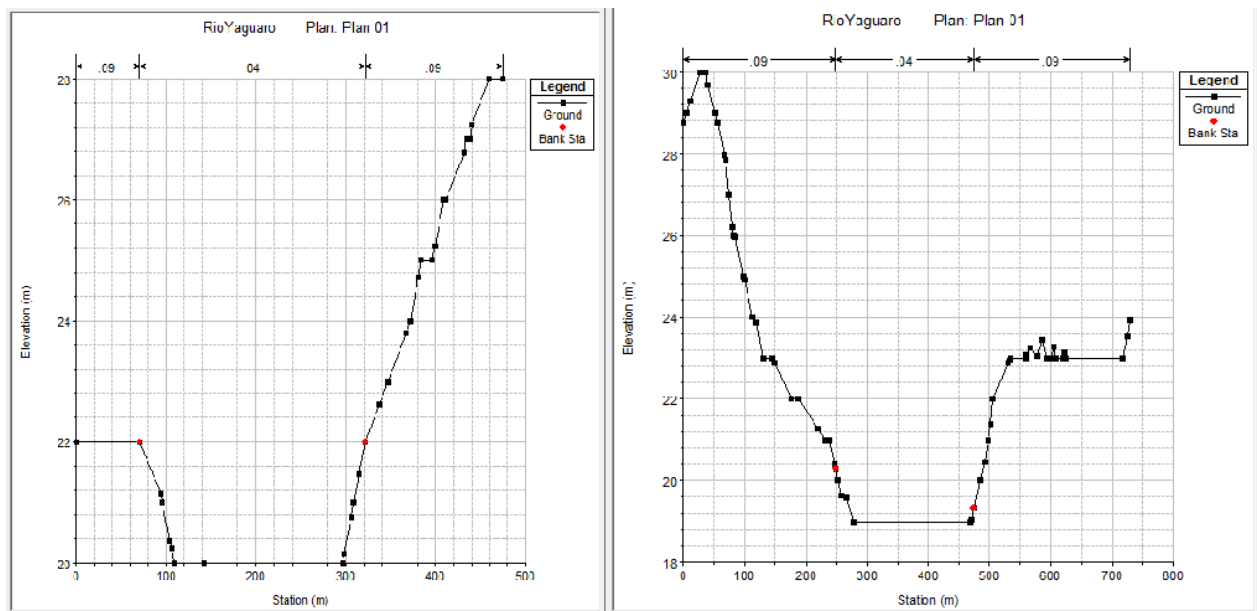


Figura 260. Secciones transversales, zona inicial del modelo unidimensional.

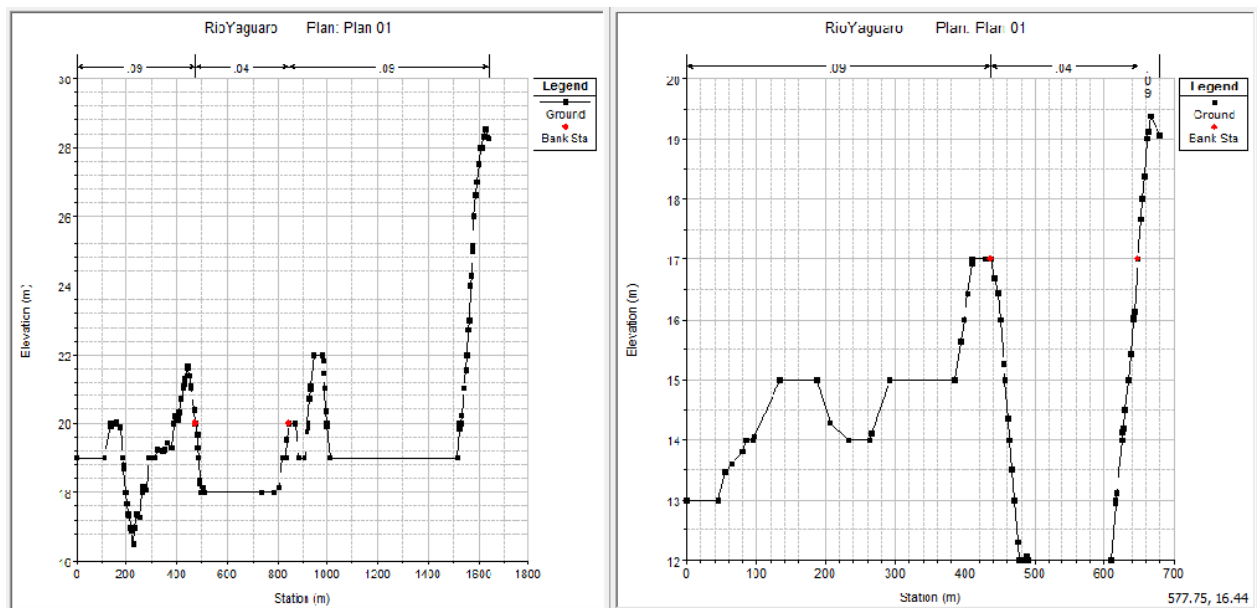


Figura 261. Secciones transversales, zona intermedia y frente a la ciudad de Río Branco del modelo unidimensional.

Es de resaltar que el que el río Yaguarón a la altura de la ciudad de Río Branco, es un río de planicie o llanura, por ende, se debe tener especial cuidado con las secciones transversales, las cuales deben estar muy bien delimitadas, indicar los bancos y los diques naturales que estas secciones presentan. Las secciones transversales de

este modelo tienen una resolución espacial de 12.5m, que corresponde al modelo digital de elevación usado con mayor resolución disponible. En algunas secciones transversales se modificaron los valores de elevación de puntos más bajos con el fin de eliminar pozos para evitar inestabilidad en el modelo. Un ejemplo de estos ajustes se muestra en la Figura 262

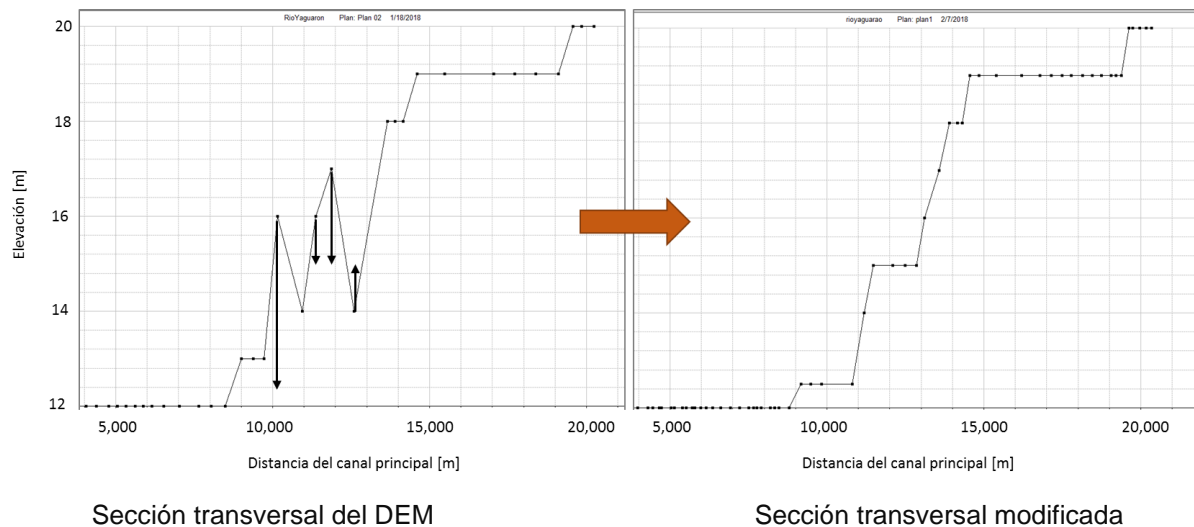
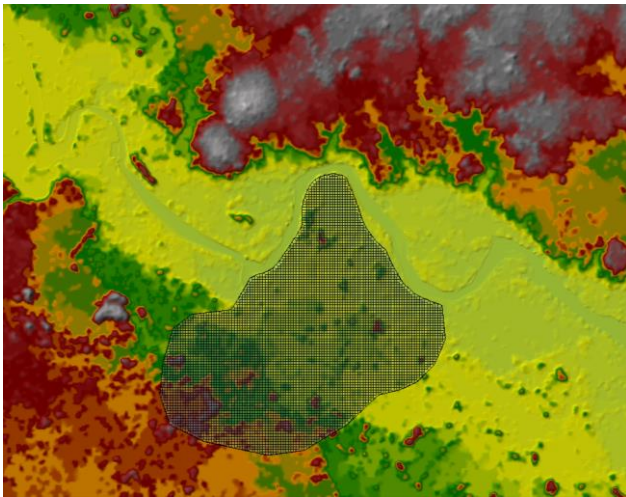


Figura 262. Adecuación perfil longitudinal del río.

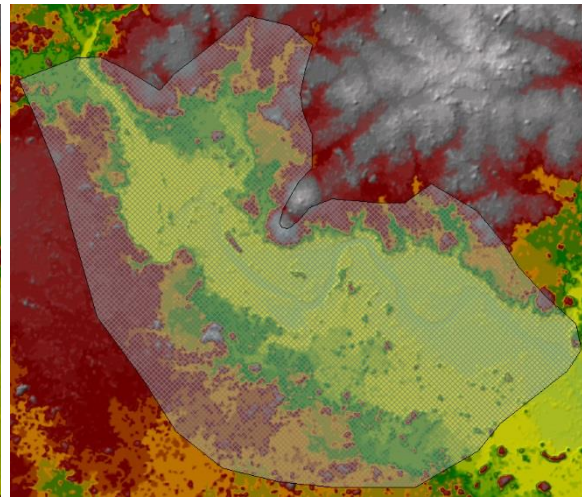
### HEC-Ras: Geometría 2D

El procedimiento para definir el área para modelación 2D inicia con el DEM corregido. Luego se dibuja el área de flujo 2D, en la cual esta contenida la ciudad de Río Branco. Se obtiene como resultado una malla de resolución por pixel de 50mx50m. Para el área de estudio se asignó un valor  $n$  de Manning de 0.03 correspondiente a urbano disperso y pradera natural. La Figura 263 y la Figura 264





a) Modelo acoplado 1D/2D



b) Modelo 2D

Figura 263. Configuración geométrica área bidimensional (DEM), Río Branco.



a) Modelo acoplado 1D/2D



b) Modelo 2D

Figura 264. Configuración geométrica área bidimensional (Imagen satelital), Río Branco.

Para el área de estudio se agrega un shape de coberturas el cual contiene poligonos con diferentes valores de  $n$  de Manning como lo muestra la Figura 265.



Figura 265. Shape de polígonos, n de Manning, para el modelo 2D completo.

### ***HEC-Ras: Flujo no Estacionario***

Para completar el modelo en HEC-RAS se ingresan los valores de hidrograma, resultados del método Clark Modificado, junto con las condiciones iniciales de caudales. Para este estudio se definió un caudal base de  $260 \text{ m}^3/\text{s}$ , que es el promedio del caudal base usado en “Estudio de la Zona Costera de Río Branco, CONVENIO UDELAR FING IMFIA – MTOP DNH”.



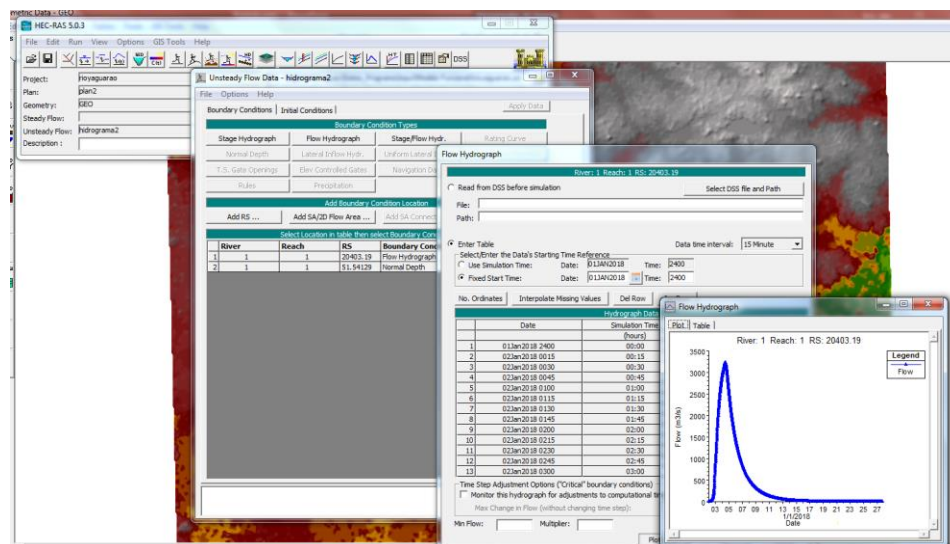


Figura 266. Flujo no estacionario, Ingreso de hidrogramas al modelo hidraulico.

### Selección del modelo a utilizar

Después de hacer las pruebas de evaluación de la amenaza, tanto con el modelo acoplado 1D/2D, como con el modelo 2D completo, se determinó que el modelo 2D completo brinda mejores resultados y tiene menor demanda de capacidad computacional, reduciendo el tiempo de cálculo de 4 horas a una hora. Además, el modelo acoplado 1D/2D reportaba valores de velocidad de flujo inconsistentes con los resultados esperados, caso que no se presentó en el modelo 2D completo.

Entonces, haciendo uso del modelo 2D completo se procede a evaluar la amenaza por inundación en la ciudad de Río Branco.

### HEC-Ras: RAS-MAPPER: Visualización de inundación

Los resultados del modelo hidráulico del HEC-RAS se pueden visualizar con la herramienta RASMapper. Para cada uno de los escenarios modelados (de los 50 hidrogramas calculados) se pueden observar las mallas de inundación como se muestra en la Figura 267.

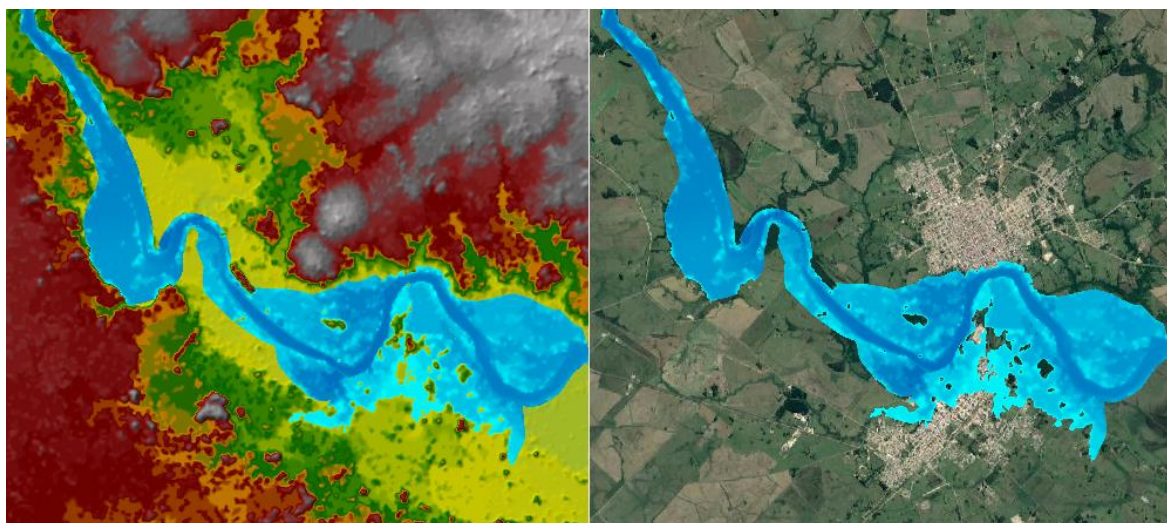


Figura 267. Ras-Mapper: Ejemplo de visualización mancha de inundación.

#### 1.49.5 Condición de borde

La condición de borde considerada aguas arriba está dada por los hidrogramas calculados en el modelo hidrológico, mientras que la condición de borde aguas abajo está dada únicamente por la pendiente ya que la longitud de un remanso hidráulico en un río se calcula mediante la formula  $L_b = \frac{H_d}{S}$ , donde  $H_d$  es la profundidad del flujo en la perturbación,  $S$  es la pendiente del río y  $L_b$  es la longitud del remanso (Parker, 2014).

Teniendo esto en cuenta, para el caso de Río Branco y la laguna Merín, la pendiente del río es de 0.0004 m/m y la profundidad promedio en el límite con la laguna es de 3.49 m, obteniendo una longitud de remanso de 8.7 km, distancia inferior a la presente entre Río Branco y la Laguna Merín (24 Km aprox.), por este motivo no se tiene en cuenta la presencia de algún efecto producido por la laguna aguas arriba en la zona de Río Branco. Así mismo, la profundidad máxima histórica conocida en la llegada del río a la laguna es de 6.73 m, generando una longitud de 16.8 Km de remanso, la cual tampoco alcanza a generar efectos en la zona de Río Branco.

#### 1.49.6 Comparación de inundación de 1984 con modelo Hidráulico

Con el fin de verificar los resultados del modelo de inundación para Río Branco, se utilizó como referencia el evento registrado en 1984, el cual cuenta con información de la línea de inundación registrada. A partir de los registros históricos de lluvias del dataset de

Princeton, se obtuvieron lluvias del 27 y 28 de mayo de 1984. Luego, se calcularon los respectivos hidrogramas, que se muestran en la Figura 268, los cuales se ubican de manera cronológica para calcular un hidrograma envolvente. El hidrograma envolvente se simula en el modelo hidráulico 2D completo, dando como resultado una mancha de inundación mostrada en la Figura 269.

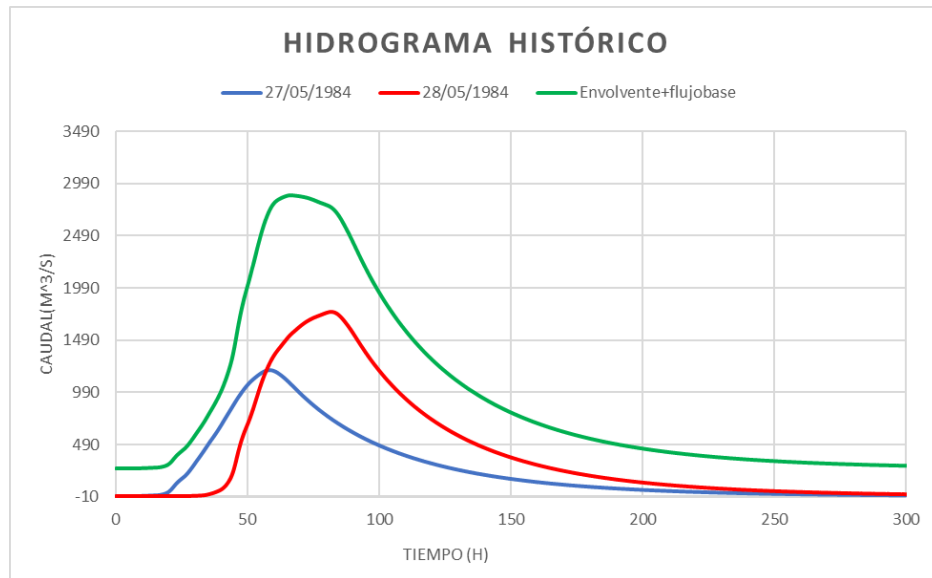


Figura 268. Hidrogramas Históricos.

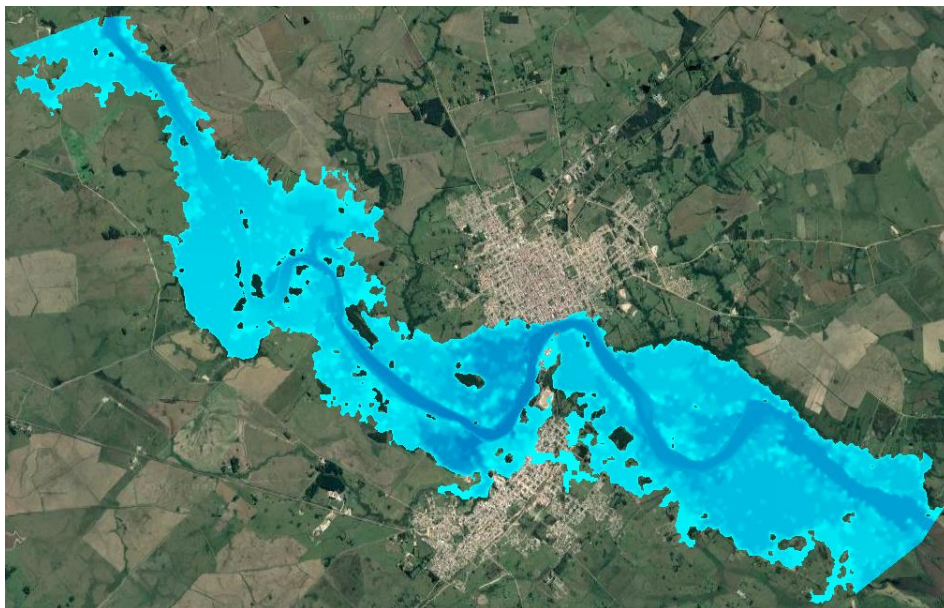


Figura 269. Mancha de inundación para el escenario de inundación de 1984.

Con la mancha de inundación obtenida con el modelo hidráulico, se realiza la siguiente comparación con el “Mapa de vivienda y población en área inundable para Río Branco”. Como se muestra en la Figura 270. Se puede observar que la mancha de inundación está contenida dentro del límite o margen del mapa de áreas inundables de la ciudad de Río Branco y la línea de inundación máxima es muy semejante al borde del área de inundación definida en el modelo.

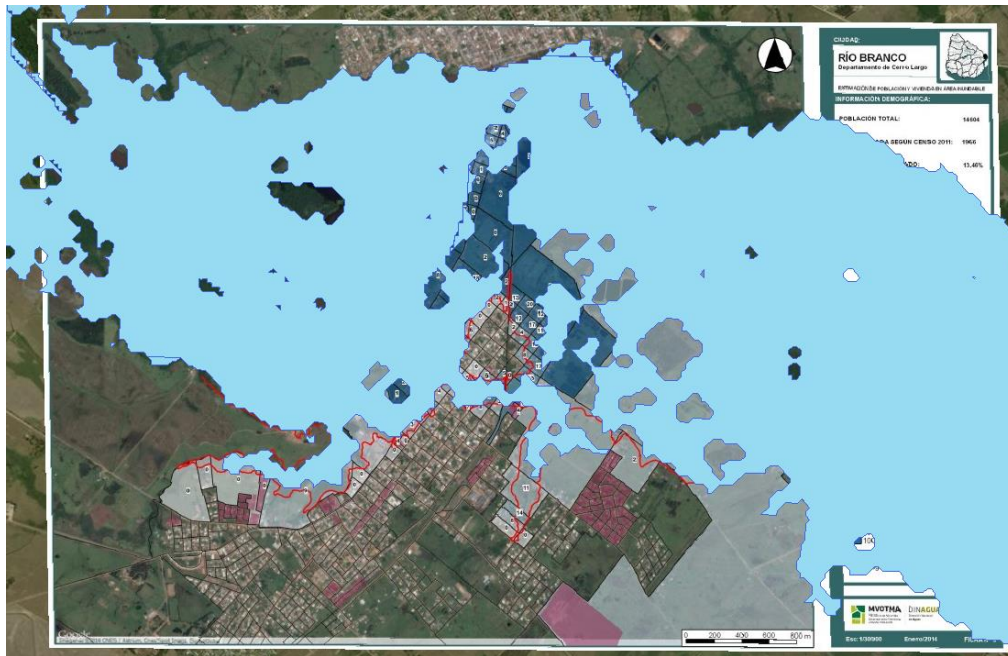


Figura 270. Comparación mancha de inundación histórica y mapa de vivienda y población en área inundable.

### 1.50 Mapas de amenaza por inundación para la cuenca del río Yaguarón y ciudad Río Branco

Los resultados de la modelación de la amenaza por inundación se presentan en formato de mapas de amenaza por escenario y mapas de amenaza integrada para la extensión del modelo hidráulico dentro de la cuenca de estudio. Los mapas de amenaza por escenario permiten comparar extensión y profundidad de la inundación de un único evento. Los mapas de amenaza integrada permiten comparar la extensión y profundidad de la inundación según el periodo de retorno y establecer zonas, con una frecuencia asociada, que están más o menos expuestas sufrir inundaciones dentro de la ciudad.



### 1.50.1 Mapas por escenario

En la Figura 271 se muestran los mapas de profundidad de inundación (en metros) para cuatro escenarios modelados.

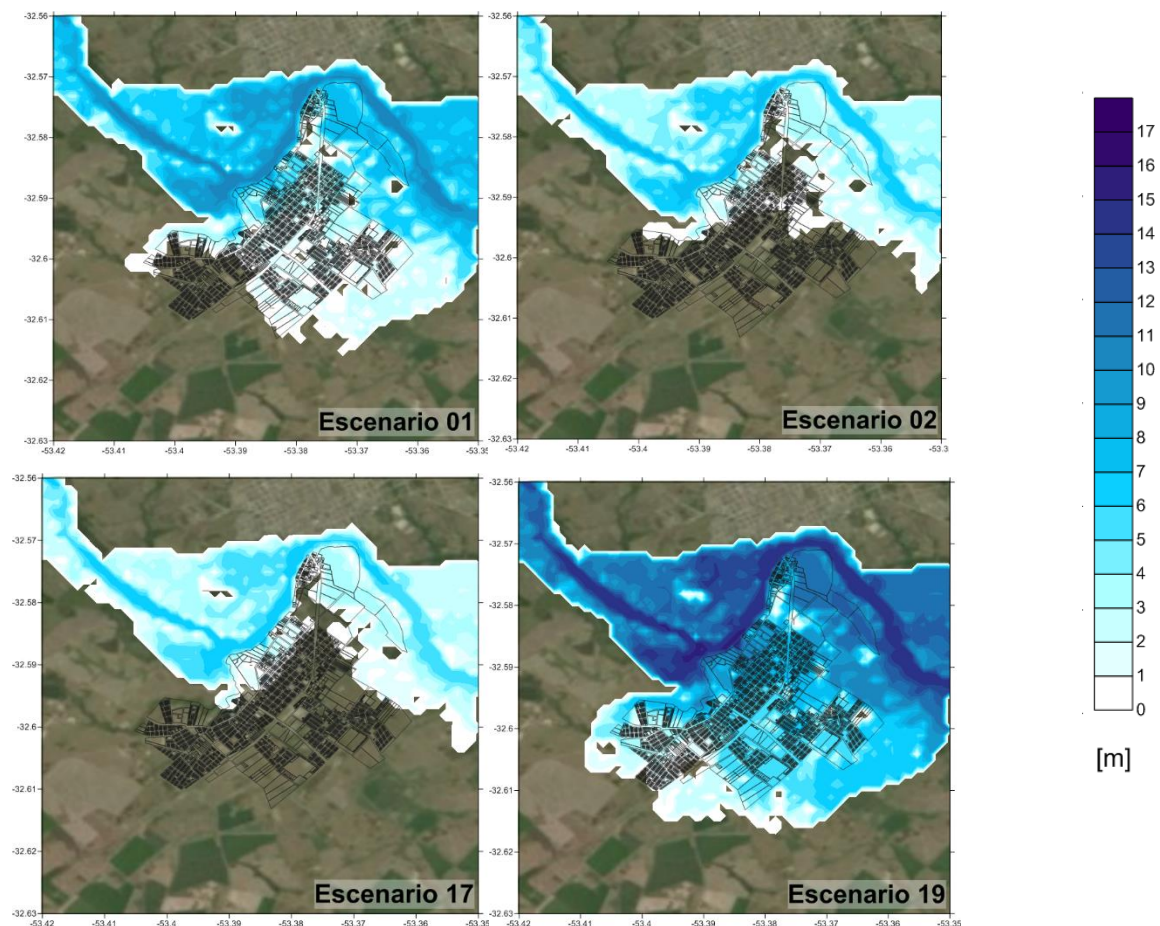


Figura 271. Mapas de profundidad de agua para cuatro escenarios de inundación.

En total se modelaron 50 eventos. En los mapas se puede ver que, para cada escenario, tanto la extensión de la inundación (mancha en azul) como las profundidades son diferentes en todos los sitios analizados. Al estar representados en la misma escala, se puede ver como la inundación del Escenario 19 muestra profundidades de lámina de agua considerablemente más altas que para el Escenario 1. Con esto se muestra que los escenarios generados son todos diferentes, y son el producto de diferentes escenarios de lluvia estocástica sobre la cuenca.

Estos son escenarios de inundación que se consideran mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos.

### 1.50.2 Mapas de amenaza integrada

La amenaza se integra mediante un proceso matemático que permite definir las curvas de excedencia de intensidad en cada punto de la malla de cálculo. La tasa de excedencia es una cantidad que mide el número de veces al año que un valor de intensidad es igualado o excedido. Sea  $a$  la medida de intensidad calculada (e.g. profundidad de lámina de agua), su tasa de excedencia  $v(a)$ , para una ubicación en la ciudad de análisis, se determina como

$$v(a) = \sum_{i=1}^N P(A > a | E_i) F_i \quad (\text{Ec. 0-30})$$

En donde  $N$  es el número total de escenarios calculados,  $\Pr(A > a | E_i)$  es la probabilidad de exceder  $a$ , condicionada a la ocurrencia del escenario  $i$  y  $F_i$  es la frecuencia anual de ocurrencia del escenario  $i$ .

Teniendo las tasas de excedencia de la medida de intensidad en todos los puntos del área de cálculo, es posible generar mapas de igual periodo de retorno, por medio de la selección de una tasa de excedencia (que es inversa al periodo de retorno) y la lectura en cada curva del correspondiente valor de intensidad. Los valores leídos son entonces mapeados en una malla que tiene el mismo periodo de retorno en todas las ubicaciones. Estos mapas son una herramienta útil para la toma de decisiones, ya que no están representando un único evento de amenaza, sino que integran los efectos de todos los eventos que potencialmente pueden ocurrir en el futuro. También permiten comparar los niveles de amenaza con diferentes períodos de retorno y establecer cuáles ubicaciones o regiones en el territorio tienen una mayor o menor propensión a ser inundadas. Por lo tanto, son un insumo fundamental en el diseño y ejecución de regulaciones de uso de la tierra.

Los mapas de amenaza uniforme se calculan mediante la aplicación del teorema de la probabilidad total en la colección de escenarios estocásticos de precipitación y posterior tránsito por la cuenca. Los resultados para 20, 50, 100, 200 y 250 años de periodo de retorno se muestran en la Figura 272 **Error! Reference source not found.** a la Figura 276. Para todos los casos se presentan afectaciones en la ciudad. Hacia el

oriente la inundación es recurrente y con altas profundidades, por lo que las construcciones en esta zona son muy pocas. Por el contrario, hacia la zona occidental de la ciudad, existen construcciones a pesar de ser también un área inundable.

Al compararlo con el mapa de la mancha de inundación del evento de 1984 (ver Figura 221), se puede ver que las zonas susceptibles a inundación son las mismas. Incluso, como el modelo de amenaza incluye eventos de precipitación que no se han presentado aún, el resultado de inundación en la ciudad también deriva en escenarios que no se han presentado, por lo que la extensión de la mancha de inundación y las profundidades pueden alcanzar valores más altos a los registrados en la historia, es particular en el evento de 1984.

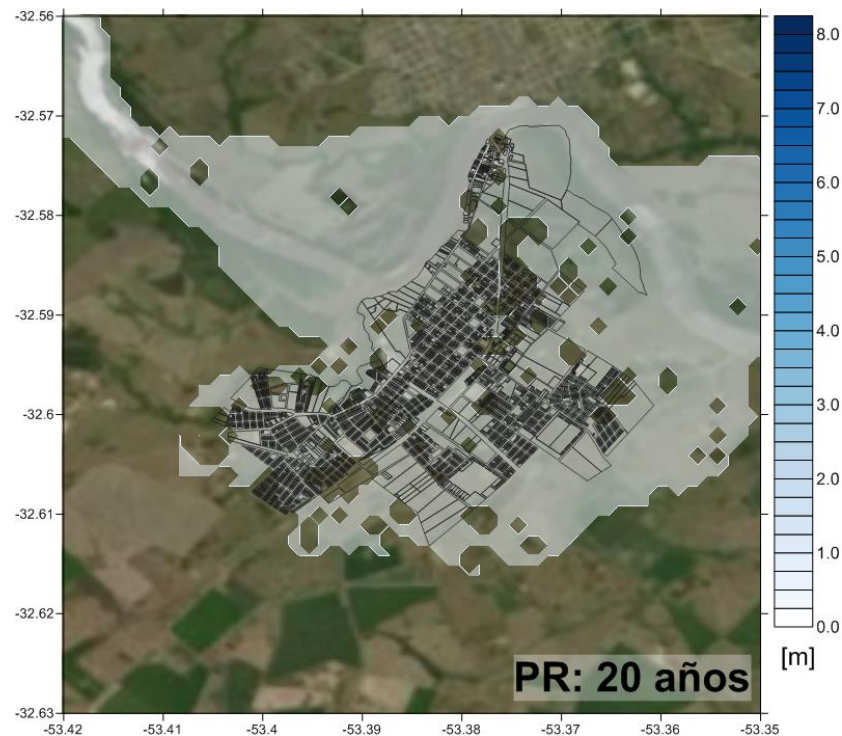


Figura 272. Mapas de amenaza integrada de inundación para 20 años de periodo de retorno en la ciudad de Río Branco.

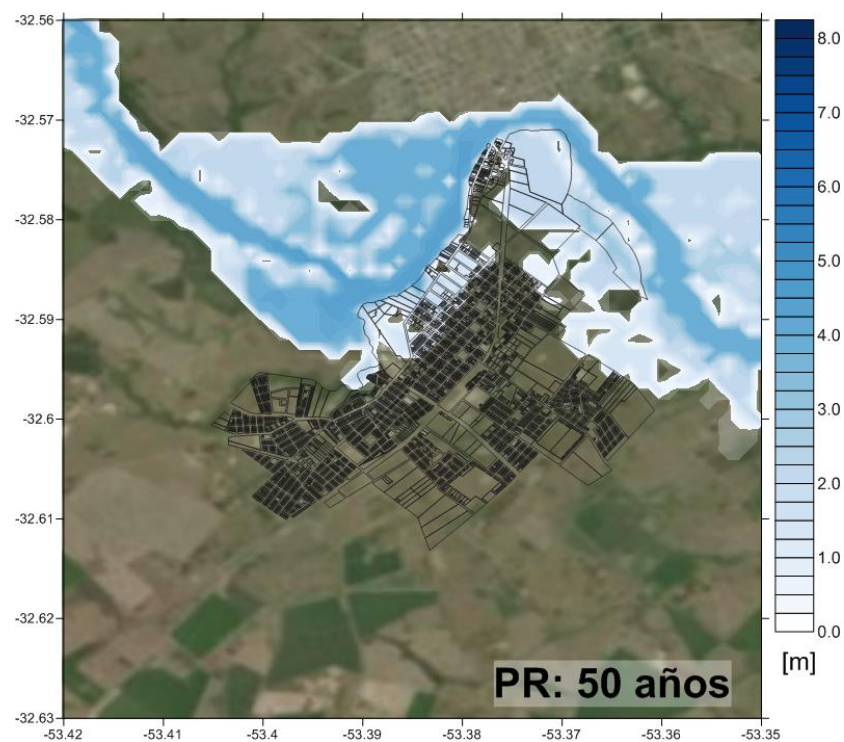


Figura 273. Mapas de amenaza integrada de inundación para 50 años de periodo de retorno en la ciudad de Río Branco.

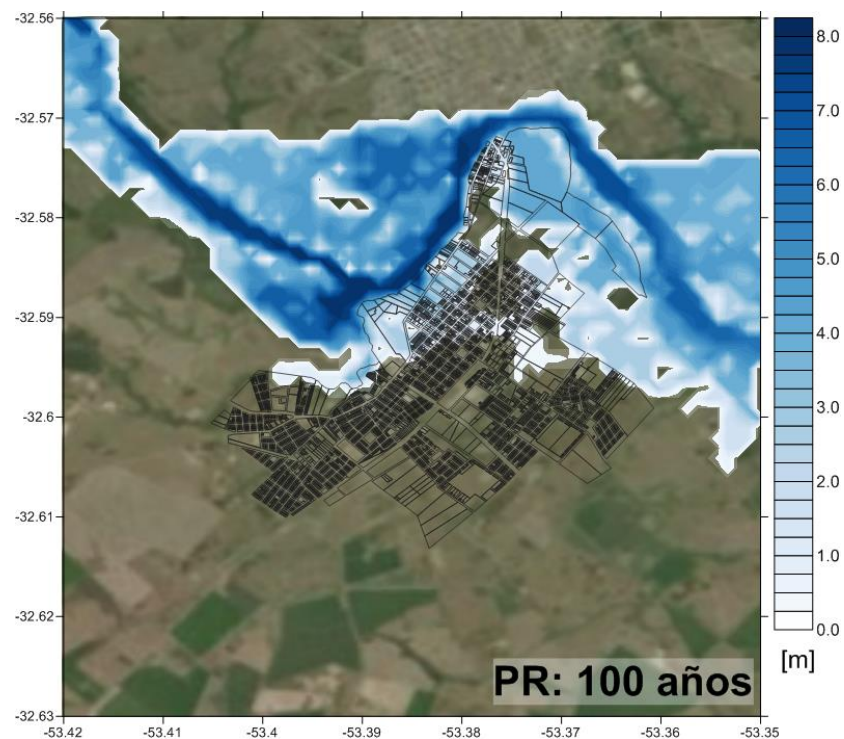


Figura 274. Mapas de amenaza integrada de inundación para 100 años de periodo de retorno en la ciudad de Río Branco.



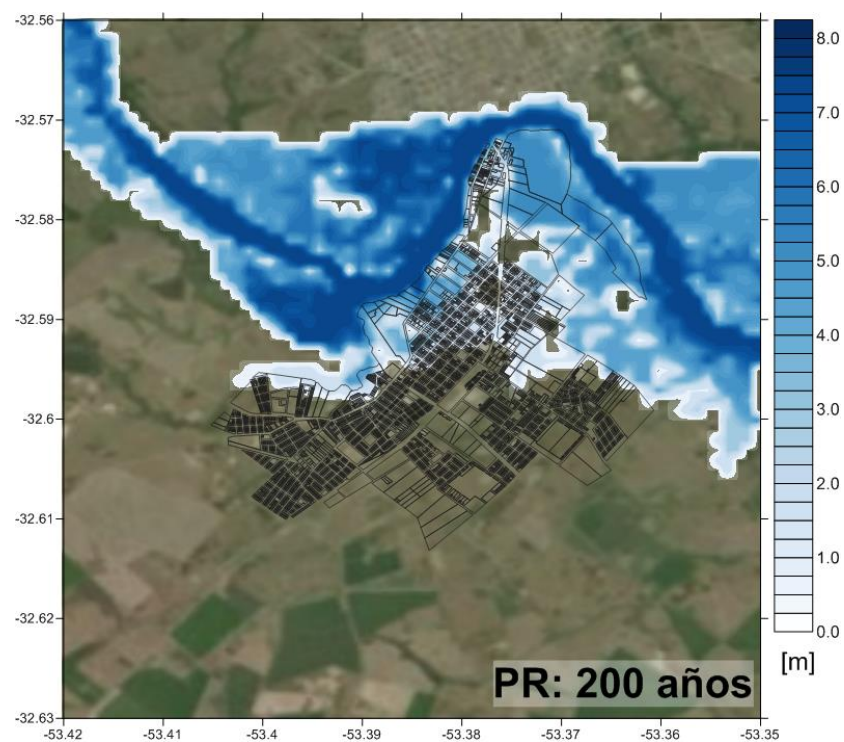


Figura 275. Mapas de amenaza integrada de inundación para 200 años de periodo de retorno en la ciudad de Río Branco..

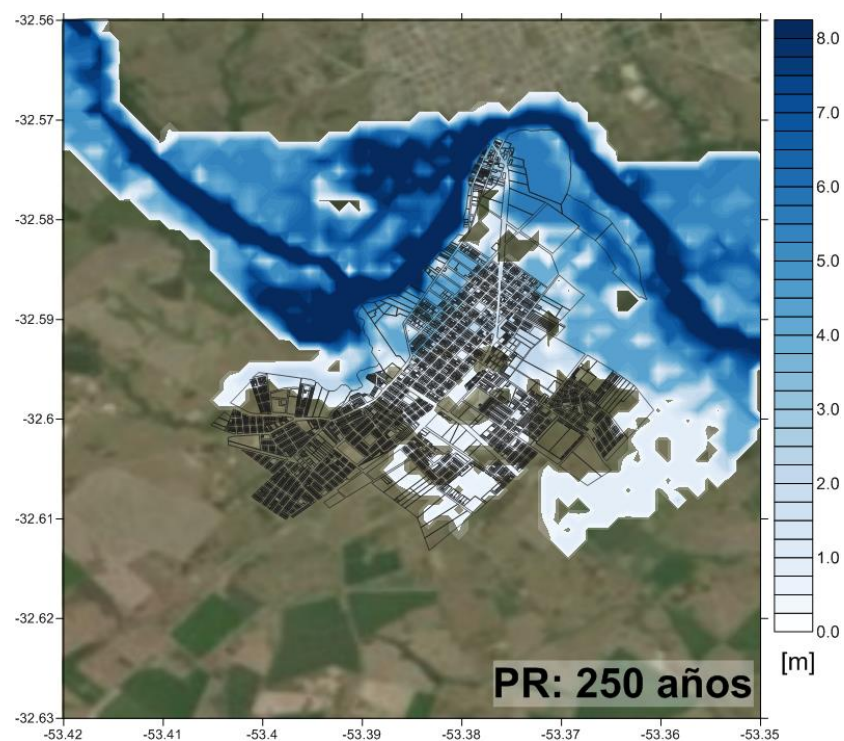


Figura 276. Mapas de amenaza integrada de inundación para 250 años de periodo de retorno en la ciudad de Río Branco.

### **1.50.3 Curva de excedencia de niveles máximos diarios**

Las curvas de amenaza presentan la variación de la tasa de excedencia de un indicador de amenaza dado. En el caso de la evaluación de la amenaza por inundación en la cuenca del Río Yaguarón en Uruguay, se calculó la curva de amenaza para el valor de nivel máximo diario medido en la Estación Río Branco (Latitud 32° 34' 28" Longitud 53° 22' 40". Nivel (m Wharton) = 0,79) sobre el Río Yaguarón, donde también se tiene información de registros históricos de niveles diarios (periodo de registro disponible entre 01/06/1918 y 31/08/2017). Se presentan curvas con la estimación de la tasa de excedencia de los niveles máximos obtenidos a partir del modelo de amenaza por inundación, así como las tasas de excedencia estimadas de la información histórica (de manera análoga a lo presentado en el capítulo 3 de este informe para el cálculo de la curva empírica de excedencia de pérdidas).

La Figura 277 muestra las curvas de amenaza histórica (también conocida como la curva empírica), se calcula en función de los niveles máximos registrados en 99 años la Estación Río Branco. Dado que la estimación histórica tiene incertidumbre, se presenta la correspondiente banda de incertidumbre (+/- una desviación estándar). La curva histórica brinda información sobre la frecuencia de ocurrencia de los niveles máximos registrados en la estación, por ejemplo, un nivel por encima de 6 m tiene una tasa de excedencia de 0.01 que el lo mismo a 100 años de periodo de retorno.



Figura 277. Curva histórica de tasa de excedencia de amenaza, según nivel máximo diario en la Estación Río Branco.

La Figura 278 muestra la curva de amenaza histórica y la curva de amenaza derivada los resultados de nivel máximo medidos en el mismo punto de la Estación Río Branco obtenidos del modelo (también conocida como la curva *analítica*). Nótese que las simulaciones permiten ampliar el espectro de valores de nivel máximo y capturar eventos que son más extremos y menos frecuentes.

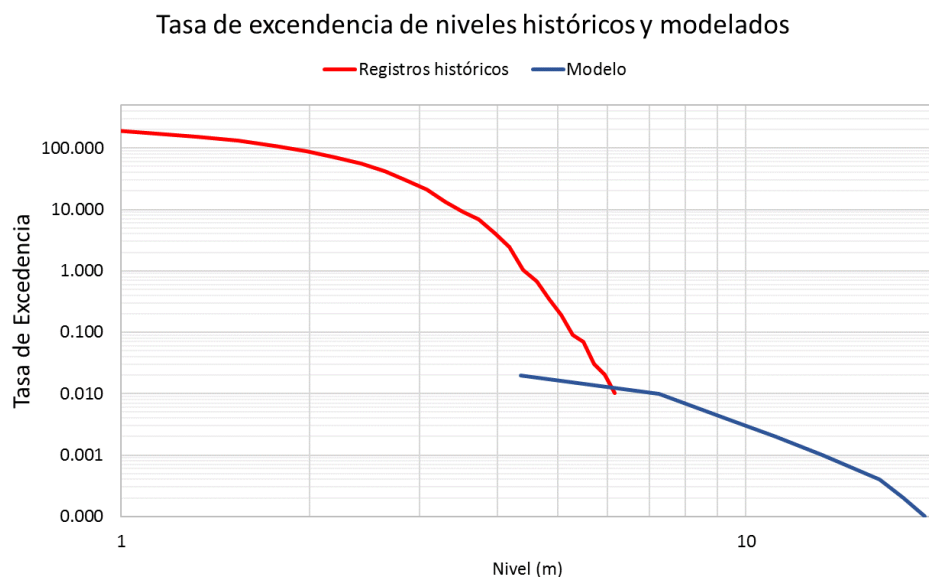


Figura 278. Curva histórica y modelada de tasa de excedencia de amenaza, según nivel máximo diario en la Estación Río Branco.

Finalmente, la Figura 279 muestra la curva envolvente de la curva de excedencia de niveles máximos diarios registrados en la Estación Río Branco.

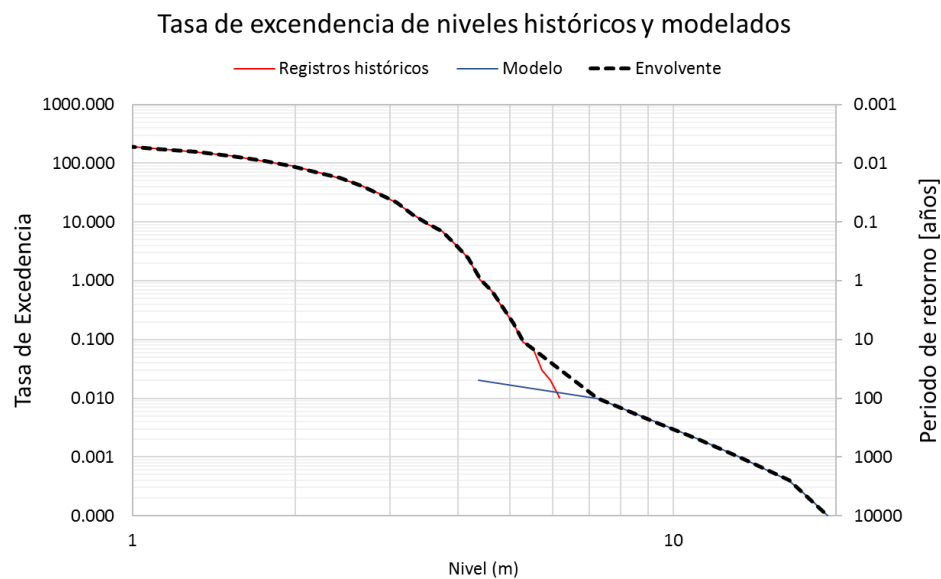


Figura 279. Curva híbrida de tasa de excedencia de amenaza, según nivel máximo diario en la Estación Río Branco.

Esta curva permite identificar la tasa de excedencia anual o periodo de retorno de cierto valor del indicador de nivel máximo diario medido en la Estación Río Branco. Por ejemplo, para un valor de Nivel = 2m, la curva muestra el resultado de la tasa de excedencia anual cercana a 100, lo que es lo mismo que un periodo de retorno de 0.01 años o aproximadamente 4 días. Para un valor de Nivel=10 m, la curva para la Estación Río Branco muestra una tasa de excedencia anual de 0.003 que es lo mismo a 333 años de periodo de retorno, lo que implica que es un escenario muy intenso y poco frecuente.

## EXPOSICIÓN DE RIO BRANCO

---

La información de exposición de bienes inmuebles en términos de costos y de población representa un componente fundamental en el análisis de riesgos por eventos naturales peligrosos, debido a que comprenden los objetos sobre los cuales se evalúan las pérdidas, es decir, son la fuente de las pérdidas potenciales debido al hecho de estar expuestos a una amenaza y ser susceptibles de sufrir un daño. Su adecuada caracterización es de gran importancia para la adecuada estimación de las pérdidas.

La base de datos de elementos expuestos se puede definir mediante diferentes niveles de resolución dependiendo de la disponibilidad de la información y del tipo de análisis que se pretende llevar a cabo. Debe incluir la localización geográfica para cada uno de los elementos expuestos, así como los siguientes parámetros (como mínimo):

- Valor físico o costo de reposición del bien
- Valor humano o número de ocupantes estimado
- Clase estructural a la que pertenece el bien

Cuando no se cuenta con información al detalle es necesario realizar estimaciones aproximadas que representen o den cuenta de dicho inventario de activos expuestos en forma aproximada.

De acuerdo con los criterios de selección de la cuenca para realizar el cálculo probabilista de riesgo por inundación se tuvo en cuenta que se tratara de una cuenca natural, así como la historia de eventos de inundación y el nivel de impacto que estos pueden tener sobre las poblaciones expuestas. Por sugerencia de DINAGUA, en el presente estudio se analiza la cuenca del río Yaguarón y la amenaza de inundación en la ciudad de Río Branco sobre la cual se presentará a continuación la metodología para la conformación de la base de elementos expuestos. En la Figura 280 se presenta la localización de la cuenca, así como la ubicación de la ciudad de Río Branco en el país.

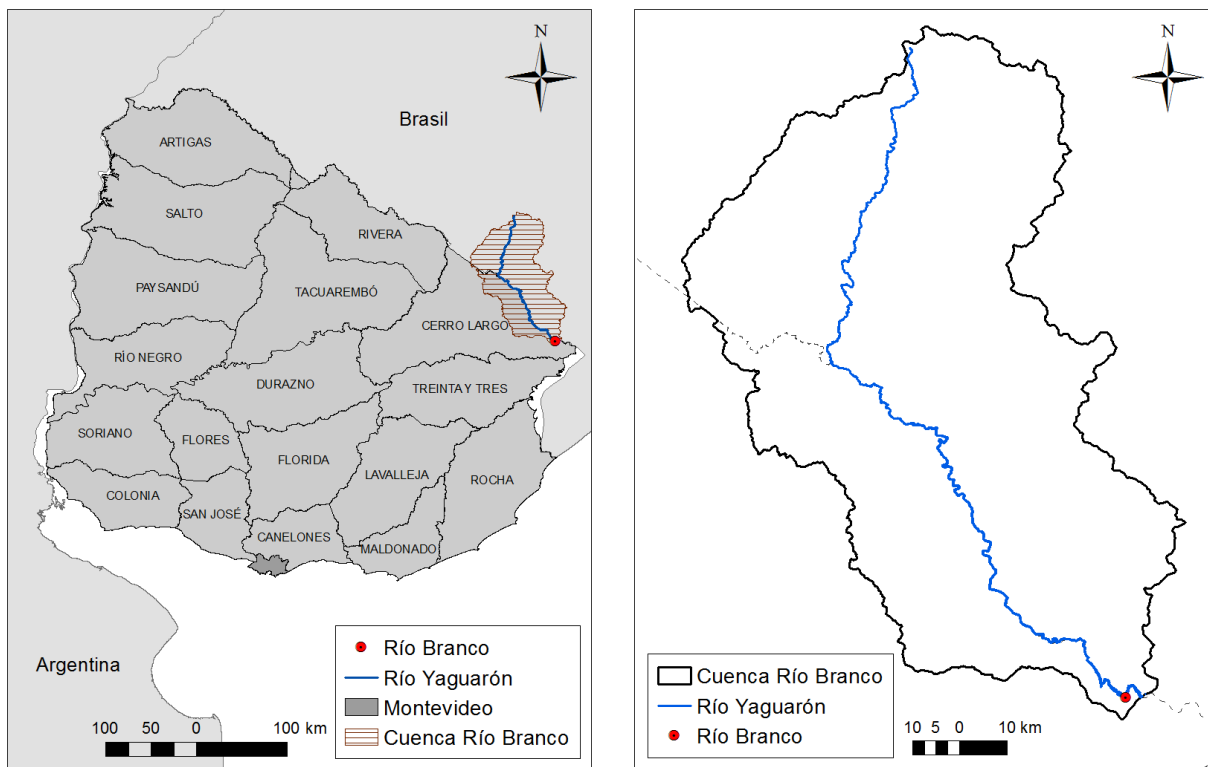


Figura 280. Ubicación y detalle de la cuenca y de la ciudad de Río Branco.

## 1.51 Metodología para conformar la base de edificaciones expuestas

Para conformar la base de datos de las edificaciones expuestas en la ciudad de Río Branco se consultaron diversos tipos y fuentes de información. Dichos tipos de información se componen de información recopilada en campo a través del relevamiento realizado por la Intendencia de Cerro Largo, bases de datos existentes, el uso de imágenes satelitales y el uso de herramientas geoespaciales.

### 1.51.1 Insumos de entrada para la determinación de edificaciones expuestas

Para el levantamiento y recopilación de información relevante se llevó a cabo la revisión, depuración y complementación tanto de la información suministrada por entidades locales a través de DINAGUA como de la información consultada en las diferentes fuentes oficiales. A continuación, se indica las fuentes de información consultadas y la información recopilada de cada una de las mismas.

### 1.51.1.1 Información relevada

Para el presente estudio, la Intendencia de Cerro Largo suministró a través de DINAGUA el relevamiento realizado para el sector de la ciudad ubicado por debajo de la curva de inundación extraordinaria de 1984. En la Figura 281 se presentan los padrones sobre los cuales se llevó a cabo el relevamiento de información requerida.

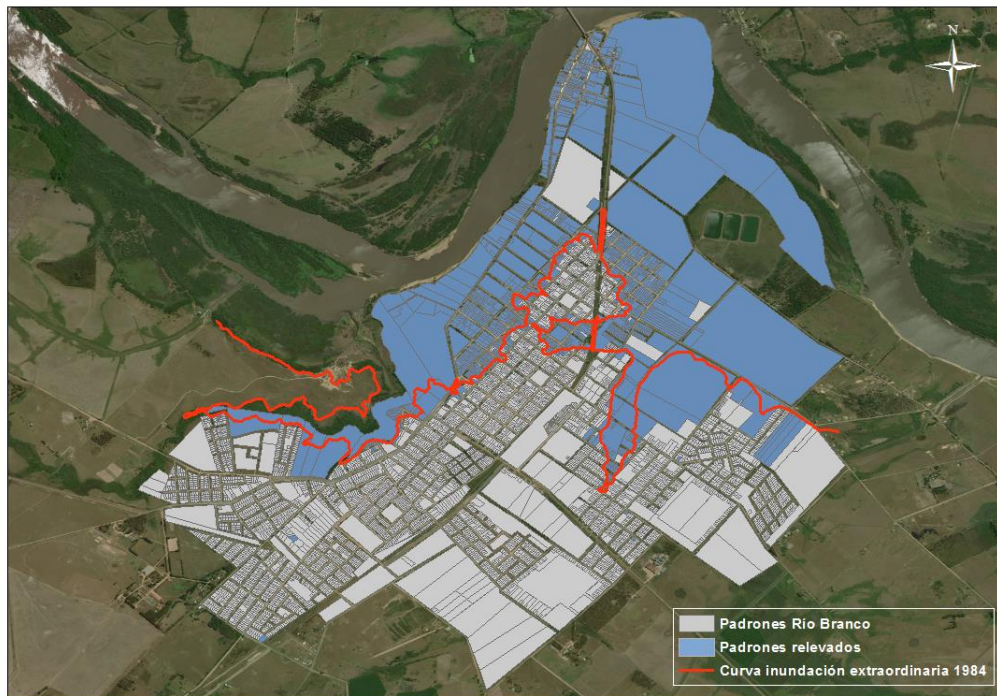


Figura 281. Relevamiento Río Branco.

De la misma forma, las siguientes figuras representan mediante mapas la distribución geográfica de la caracterización de la información relevada por padrón.



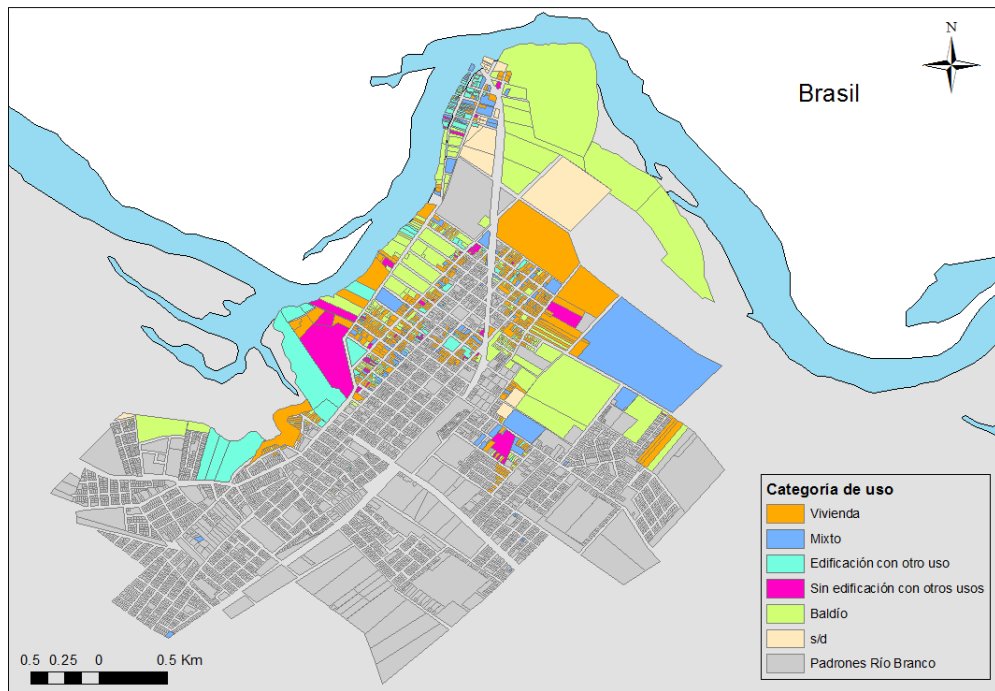


Figura 282. Categoría de uso o destino.

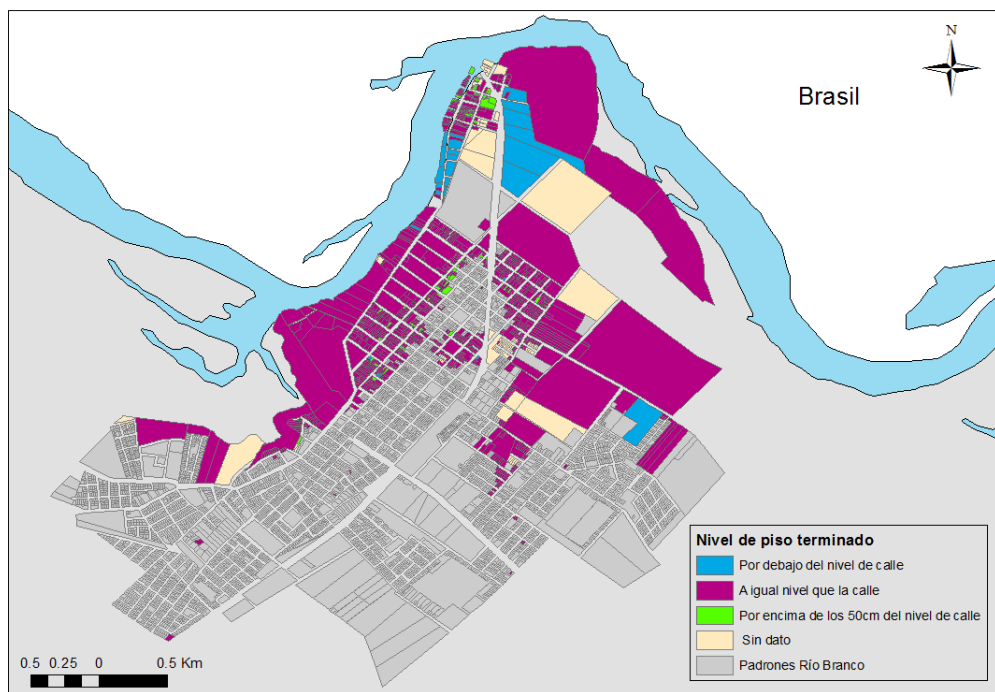


Figura 283. Nivel de piso terminado de las edificaciones.



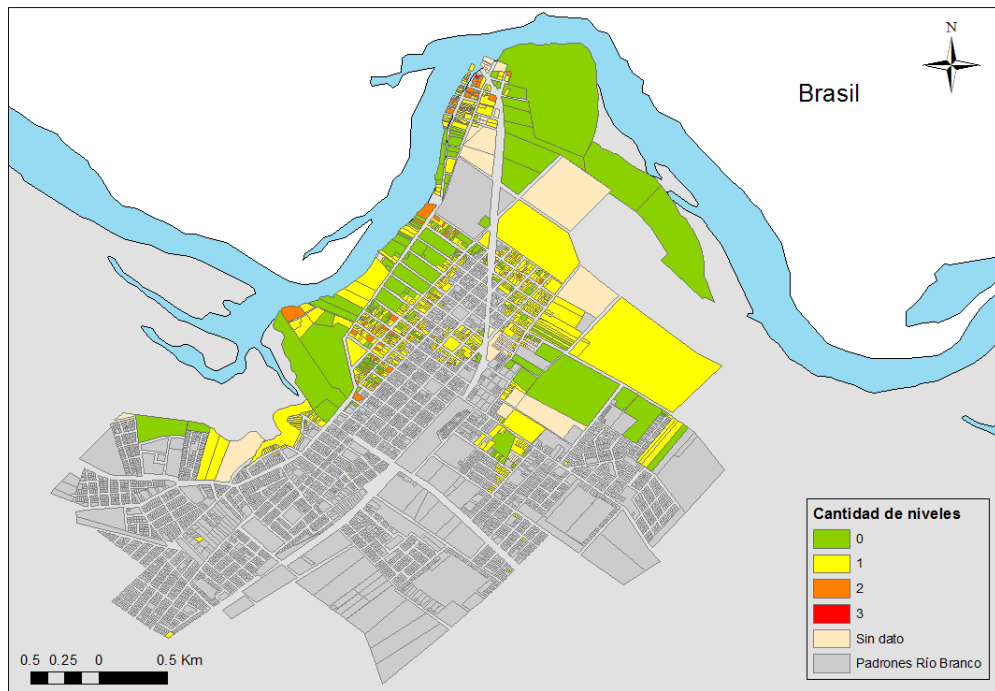


Figura 284. Cantidad de niveles de la edificación.

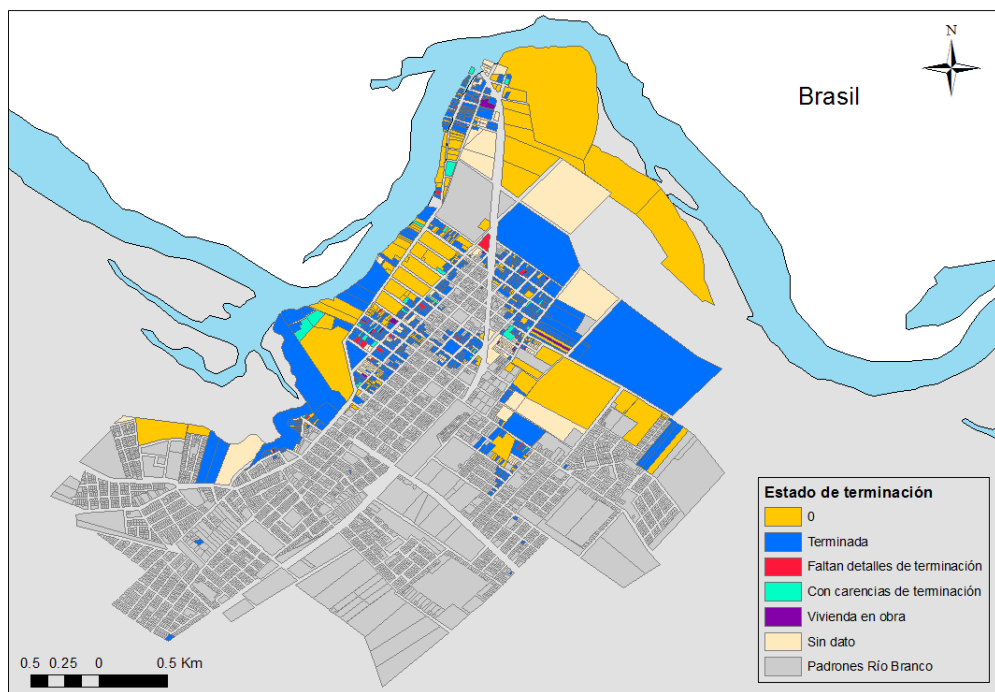


Figura 285. Estado de terminación de la edificación.

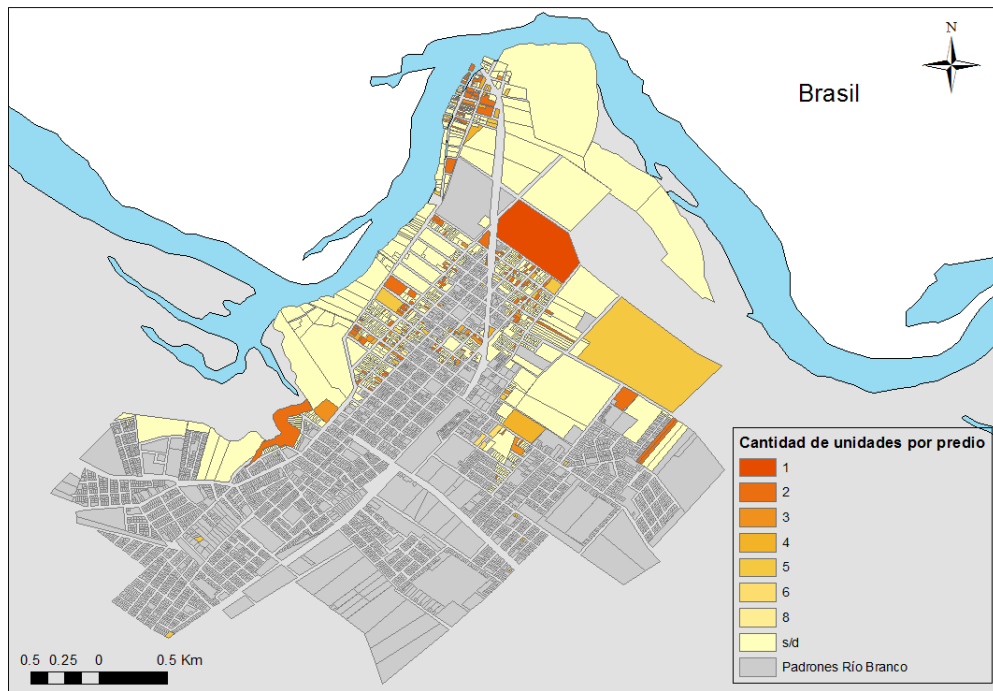


Figura 286. Cantidad de unidades por predio.

#### 1.51.1.2 Información catastral

Se recibió información proveniente de la Dirección Nacional de Catastro, la cual se compone de un archivo en formato shape que contiene los padrones del departamento de Cerro Largo. A partir de esta información fue posible obtener la georreferenciación para los padrones de la ciudad de Río Branco. Adicionalmente, se consultó la sede electrónica de la misma entidad, en donde se publican en forma abierta los datos catastrales asociados a los padrones de todo el país.

La información catastral es presentada por la Dirección Nacional de Catastro mediante dos niveles de desagregación. El primero corresponde al nivel de padrones urbanos y se compone de 6,516 registros, el segundo nivel hace referencia a las líneas de construcción y se compone de 11,030 registros. A continuación, se indica la información disponible según el nivel de desagregación.

##### Nivel de padrones urbanos

- Régimen (Común, propiedad horizontal, urbanización)
- Departamento

- Localidad
- Padrón
- Manzana
- Entrepiso/subsuelo
- Unidad
- Área predio
- Área edificada
- Valor real total
- Valor para impuestos

#### **Nivel de líneas de construcción**

- Régimen
- Departamento
- Localidad
- Padrón
- Manzana
- Entrepiso/subsuelo
- Unidad
- Nivel
- Destino
- Categoría construcción
- Estado conservación
- Tipo de cubierta
- Indicador Cielorraso
- Tipo de obra
- Área construida
- Año de construcción

Como se puede observar la desagregación de la información a nivel de líneas de construcción permite diferenciar las edificaciones según el destino económico, la categoría de la construcción, el estado de conservación, el área construida y el año de construcción, entre otros parámetros. Es por esto que la construcción de la base de datos de elementos expuestos se realizó a partir de la base de líneas de construcción. Para

determinar la valoración económica de cada una de las construcciones se tuvo en cuenta la información por padrón contenida en la base de padrones urbanos y se distribuyó en las líneas de construcción de acuerdo con el área construida respectiva.

A continuación, se presenta mediante gráficos de frecuencias la descripción de la información contenida en la base de líneas de construcción.

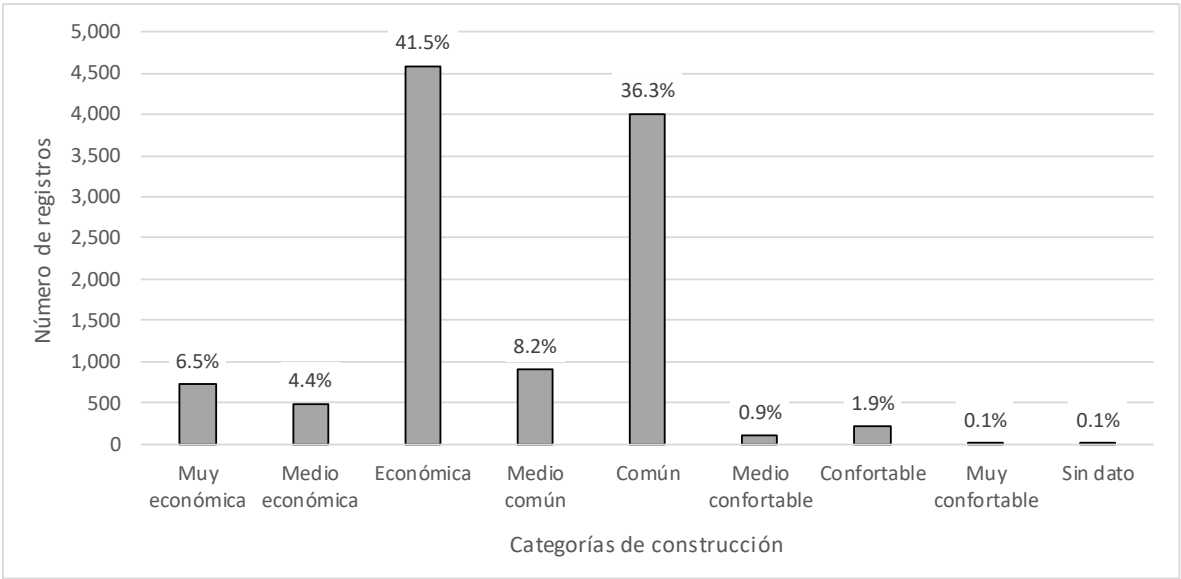


Figura 287. Categorías de construcción.

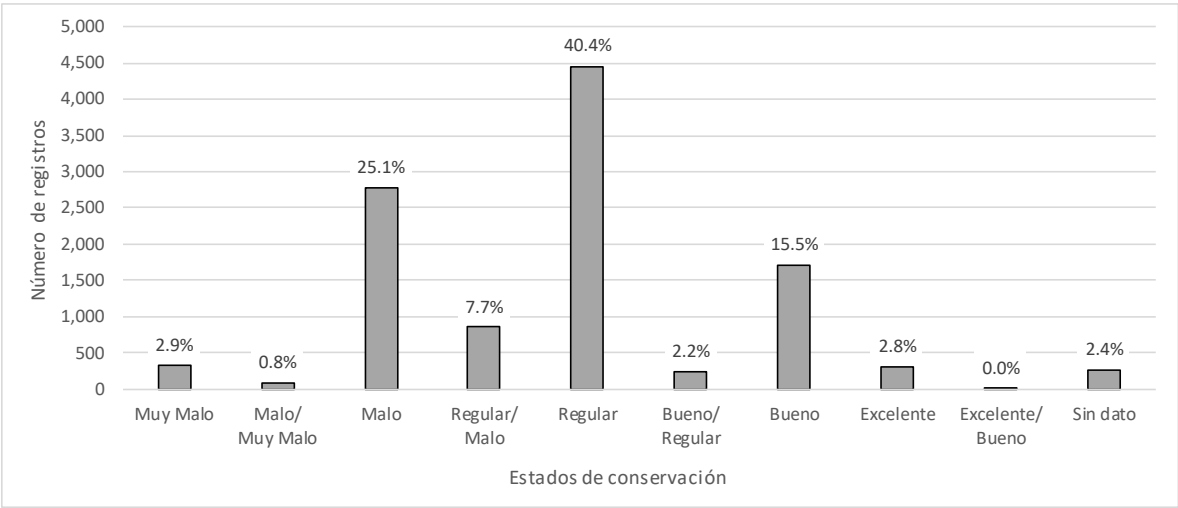


Figura 288. Estados de conservación.

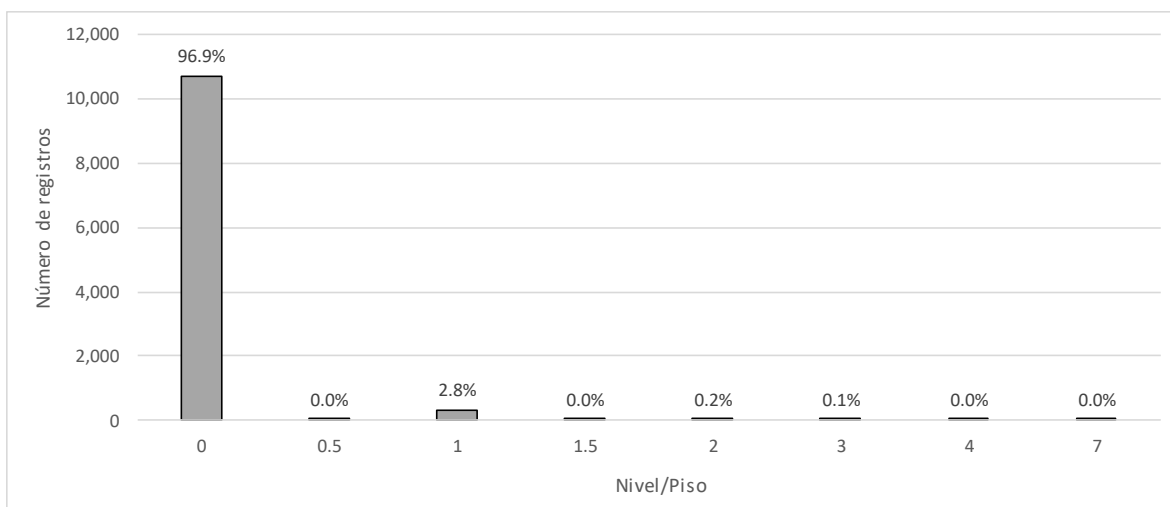


Figura 289. Nivel/Piso.

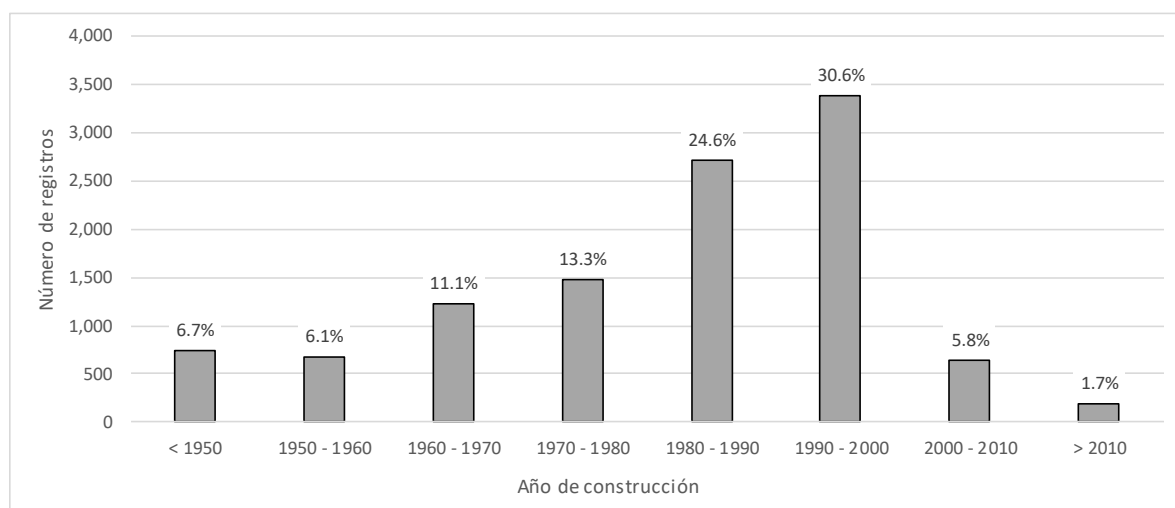


Figura 290. Año de construcción.

En la Tabla 103 **Error! Reference source not found.** se presenta la distribución de destinos o usos según la información consignada en la base de líneas de construcción.

Tabla 103. Destino económico según Dirección Nacional de Catastro.

Destino	Número de registros	Porcentaje de participación
ACCESO	4	0.04%
BALCON	5	0.05%
BARBACOA	36	0.33%
BOHARDILLA,ALTILLO	2	0.02%
CAMARA DE FRIO	1	0.01%
CANCHA DEPORTIVA	3	0.03%
CANTINA	1	0.01%
CASILLA, RANCHO	1	0.01%
CENTRO DE CULTOS	38	0.34%
CENTRO DE ENSEÑANZA	39	0.35%
CENTRO DE ESPECTACULOS	5	0.05%
CENTRO DE SALUD	8	0.07%
CHIMENEA	2	0.02%
CHURRASQUERA	3	0.03%
CLUB DEPORT, SOCIAL	36	0.33%
COCHERA	26	0.24%
COMERCIO	484	4.39%
CONSULTORIO	36	0.33%
CUBIERTA,TECHADO,COBERTIZO	837	7.59%
DEPOSITO	2,065	18.72%
ESCALERA	4	0.04%
ESCRITORIO,ESTUDIO,OFICINA	56	0.51%
ESTACION DE SERVICIO	6	0.05%
GALERIA DE VIVENDA	1	0.01%
GARAGE	197	1.79%
GIMNASIO	1	0.01%
HOTEL, MOTEL	6	0.05%
INDUSTRIA	56	0.51%
JARDIN	126	1.14%
LABORATORIO	44	0.40%
LAVADERO DE VIVIENDA	2	0.02%
MUROS	5	0.05%
PALIER	2	0.02%
PATIO	46	0.42%
PISCINA	1	0.01%
PLAYA DE ESTACIONAMIENTO	3	0.03%
PORCHE	99	0.90%
SALON	111	1.01%
SOTANO	3	0.03%

Destino	Número de registros	Porcentaje de participación
SS HH INDEPENDIENTES	15	0.14%
SUB-SUELO	2	0.02%
TALLER	22	0.20%
TANQUE DE AGUA	1	0.01%
TERRAZA	23	0.21%
VIVIENDA	6,566	59.53%

Por otra parte, en las siguientes figuras se muestra la distribución de valores expuestos y áreas construidas agrupadas por padrón de acuerdo con la información consignada en la base de datos catastral a nivel de padrones urbanos.

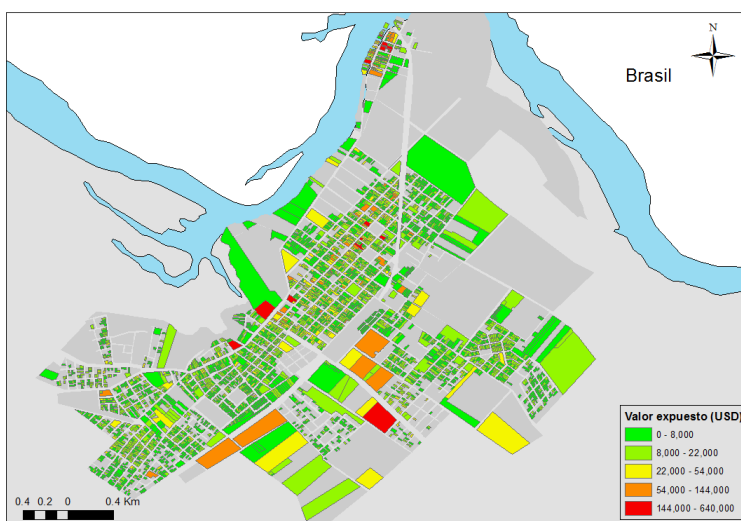


Figura 291. Valor expuesto por padrón.

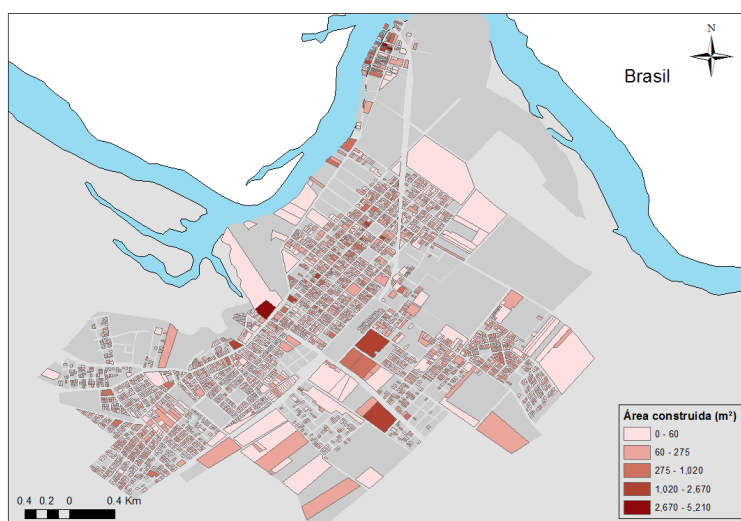


Figura 292. Área construida por padrón.

### 1.51.1.3 Censo de Población y Vivienda

Se recibió información proveniente del Instituto Nacional de Estadística de Uruguay que corresponde a un archivo en formato shape con nivel de resolución de manzana y que contiene principalmente información sobre cantidad de viviendas y su condición de ocupación. En la Figura 293 se muestra la cantidad de viviendas por manzana y en la Figura 294 la ocupación correspondiente.

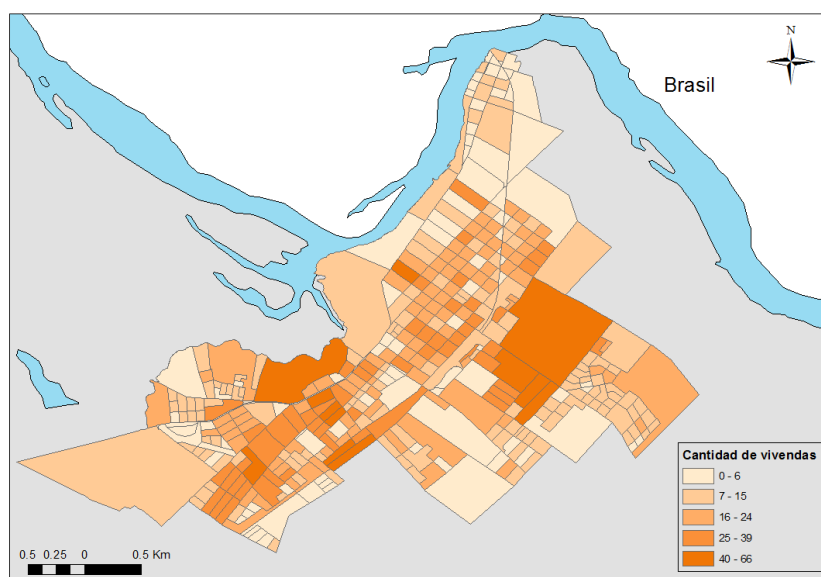


Figura 293. Cantidad de viviendas.



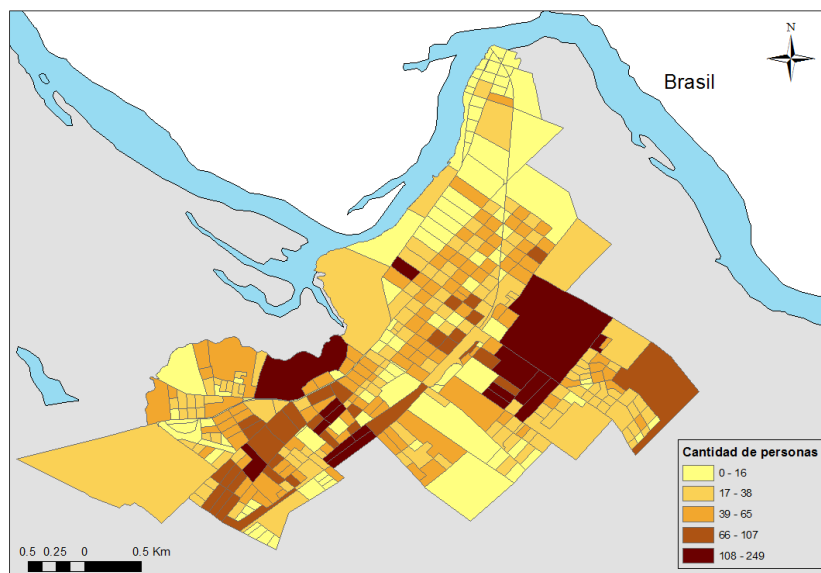


Figura 294. Condición de ocupación.

Adicionalmente, se consultó información del Censo de Población y Vivienda del año 2011 en la página del Instituto Nacional de Estadística, la cual dispone de estadísticas de vivienda como material predominante en las paredes exteriores y tipo de vivienda. Esta información fue consultada a través del sistema de procesamiento censal en línea (Redatam), en el cual encontramos que el máximo nivel de resolución de la información es a nivel unidades geoestadísticas de segmentos censales, que como pudimos observar se componen de varias manzanas.

Aunque la distribución de material predominante en las paredes exteriores no se encuentra a nivel de detalle de padrón o línea de construcción, permite identificar los sistemas estructurales predominantes en las viviendas de la ciudad de Río Branco así como una distribución general de los mismos. En la siguiente figura se muestra la distribución de viviendas según material predominante en las paredes exteriores.

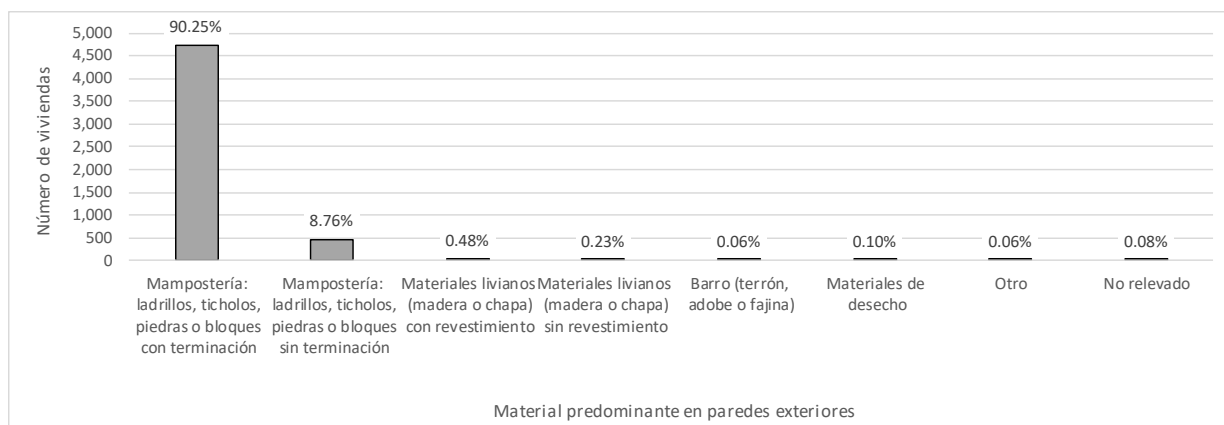


Figura 295. Material predominante en las paredes exteriores.

Por otra parte, información censal disponible como tipo de vivienda permite realizar una aproximación muy general sobre la altura de las edificaciones, cuando no se cuenta con información disponible a un mayor nivel de resolución o es necesario complementar la información existente. De la misma forma, permite identificar una distribución general de las viviendas por sector de uso. En la siguiente tabla se presenta la información disponible a nivel de segmento censal sobre tipo de vivienda para la ciudad de Río Branco.

Tabla 104. Tipo de vivienda. (Fuente: INE,2011).

Tipo de vivienda	Número de viviendas	Porcentaje de participación
Casa	6,885	95.12%
Apartamento en edificio en altura con ascensor	2	0.03%
Apartamento en edificio en altura sin ascensor	38	0.53%
Apartamento en edificio de una planta	134	1.85%
Apartamento o cuarto en local o vivienda colectiva	65	0.90%
Local no construido para vivienda	49	0.68%
Otra particular	19	0.26%
Hotel, pensión u otra casa de hospedaje	25	0.35%
Residencial de ancianos	5	0.07%
Casa de peones	8	0.11%
Internado religioso	1	0.01%

Cuartel militar o policial	1	0.01%
Otra colectiva	2	0.03%
Ignorado Particular	4	0.06%

### **1.51.2 Conformación de la base de edificaciones expuestas**

Para construir la base de datos de edificaciones expuestas en la ciudad de Río Branco se partió de las bases de datos de líneas de construcción y padrones urbanos actualizados al año 2018, elaboradas por la Dirección Nacional de Catastro. La información contenida en estas bases fue complementada con la información recopilada en el relevamiento realizado por la Intendencia de Cerro Largo y con la información disponible en el Censo de Población y Vivienda. En los siguientes numerales se describe la información tomada de cada una de las fuentes y se explica, en algunos casos mediante algoritmos, el proceso llevado a cabo para asignar los diferentes parámetros requeridos para consolidar la base de edificaciones expuestas.

Cabe recordar que, como se mencionó anteriormente, la desagregación de la información a nivel de líneas de construcción permite diferenciar las edificaciones según el destino económico, la categoría de la construcción y el estado de conservación, entre otros parámetros. Por lo que la construcción de la base de datos de elementos expuestos se realizó a partir de la base de líneas de construcción.

#### **1.51.2.1 Localización**

La georreferenciación de las líneas de construcción se realizó mediante la asignación de la geometría y localización del padrón al cual pertenece, tomado del archivo shape de padrones urbanos suministrado por la Dirección Nacional de Catastro. De esta forma, se debe tener en cuenta que varias líneas de construcción pueden pertenecer a un mismo padrón.

#### **1.51.2.2 Valoración económica**

Para determinar el valor expuesto de las construcciones se tomó como base el valor reportado en el campo "Valor real total" de la base de datos de padrones urbanos. Dado que el valor expuesto se encuentra agrupado por padrón, se hizo necesario realizar su

distribución teniendo en cuenta la participación de área construida de cada línea de construcción dentro del padrón.

### 1.51.2.3 Número de pisos

La asignación de número de pisos se realizó con nivel de detalle de padrón, dado que la información del relevamiento se encuentra con este nivel de resolución. Para los padrones relevados se tomó la cantidad de niveles de la edificación recopilada mediante las visitas a las construcciones. Para los demás padrones que no contaban con esta información, se procedió a realizar una inspección visual general por manzana, mediante el uso de imágenes satelitales y la herramienta Street View presente en la plataforma de Google Earth.

En la Figura 296 se muestran algunas las imágenes del recorrido realizado por las calles de la ciudad de Río Branco, que además de recopilar la información de número de pisos, permitió validar visualmente la información reportada por las demás fuentes consultadas como las bases de información catastral y el censo de población y vivienda. Las condiciones de la ciudad permitieron realizar este ejercicio debido a que consiste en una ciudad pequeña, con una distribución muy homogénea de número de pisos (principalmente un piso) y sistemas constructivos. Además, presenta habilitada la herramienta para la mayor parte de las calles de la ciudad.





Figura 296. Inspección visual mediante la herramienta Street View de Google Earth.

#### 1.51.2.4 Sector de uso

Mediante el siguiente algoritmo se describe el proceso de asignación del uso o destino económico a cada una de las construcciones. Finalmente, cada uno de estos destinos fue asignado a un sector de uso general, con el fin de simplificar este parámetro para su uso en el algoritmo de asignación de sistema estructural, como se verá en el siguiente numeral.

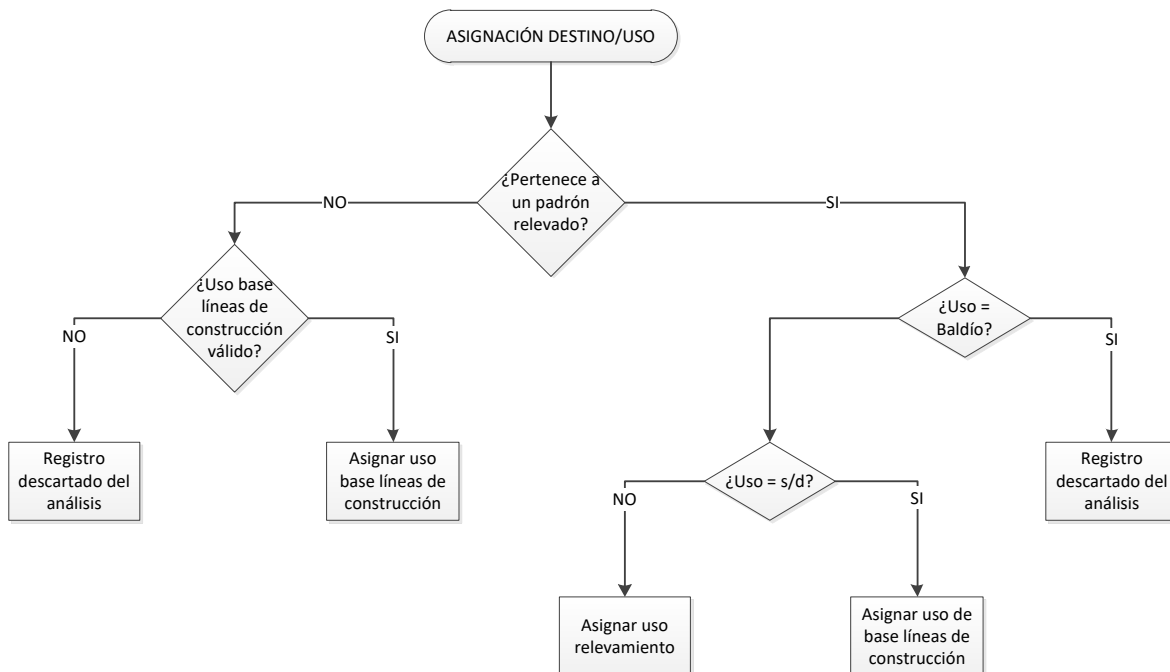


Figura 297. Asignación de sector de uso.

### 1.51.2.5 Sistema estructural

Cada elemento expuesto identificado debe ser asociado a un sistema estructural que permitirá caracterizar el comportamiento de la construcción durante la ocurrencia de fenómenos amenazantes. Basados en información disponible en el Censo de Población y Vivienda (INE, 2011) se cuenta con una distribución general de material de paredes exteriores, que nos indica los materiales predominantes en las viviendas de la ciudad y su porcentaje de participación.

Para realizar una caracterización más detallada de las edificaciones, se partió de esta información general reportada en el censo, y se realizó la asignación para cada una de las edificaciones de cada uno los parámetros descritos en los numerales anteriores (sector de uso, número de pisos, categoría de la construcción y destino económico). De acuerdo con esta información es posible realizar procedimientos de asignación de un sistema estructural a cada construcción como el descrito mediante el siguiente algoritmo. De esta forma se estima un sistema constructivo esperado de acuerdo con las características propias de cada edificación.

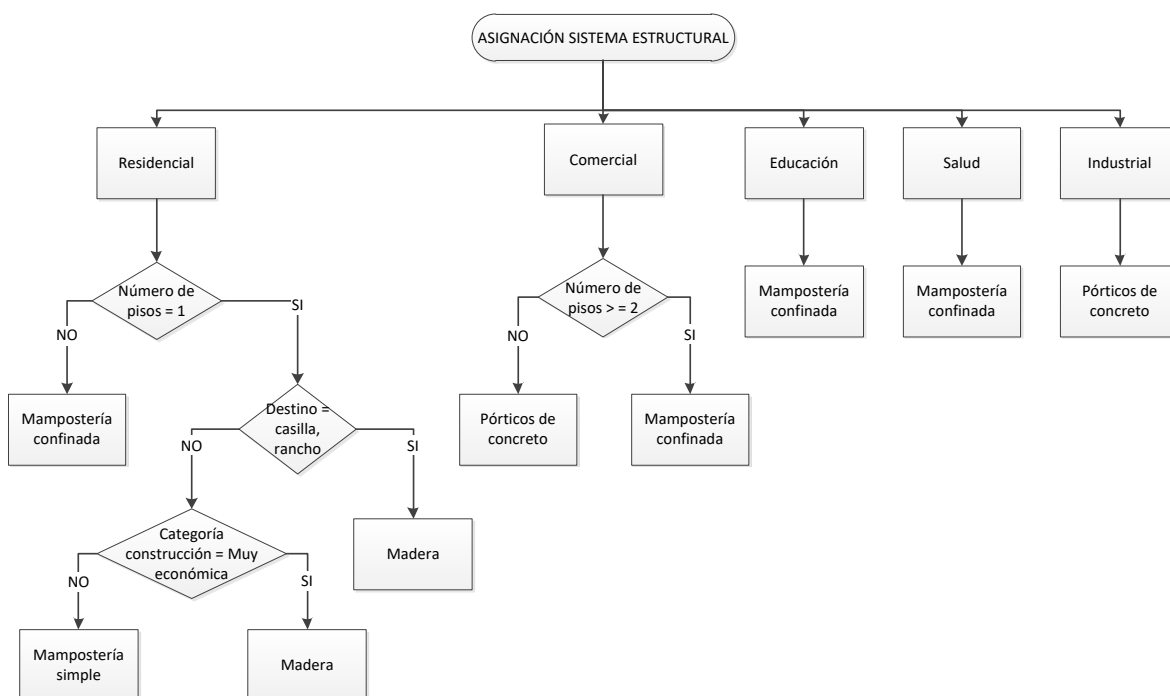


Figura 298. Asignación de sistema estructural.

### 1.51.3 Caracterización de la base de edificaciones expuestas

En los siguientes mapas se presenta de forma espacial la distribución de las características asignadas a cada uno de los padrones, las cuales comprenden entre otros:

- Sistema estructural
- Número de pisos
- Sector de uso
- Categoría de la construcción
- Área construida
- Valor expuesto

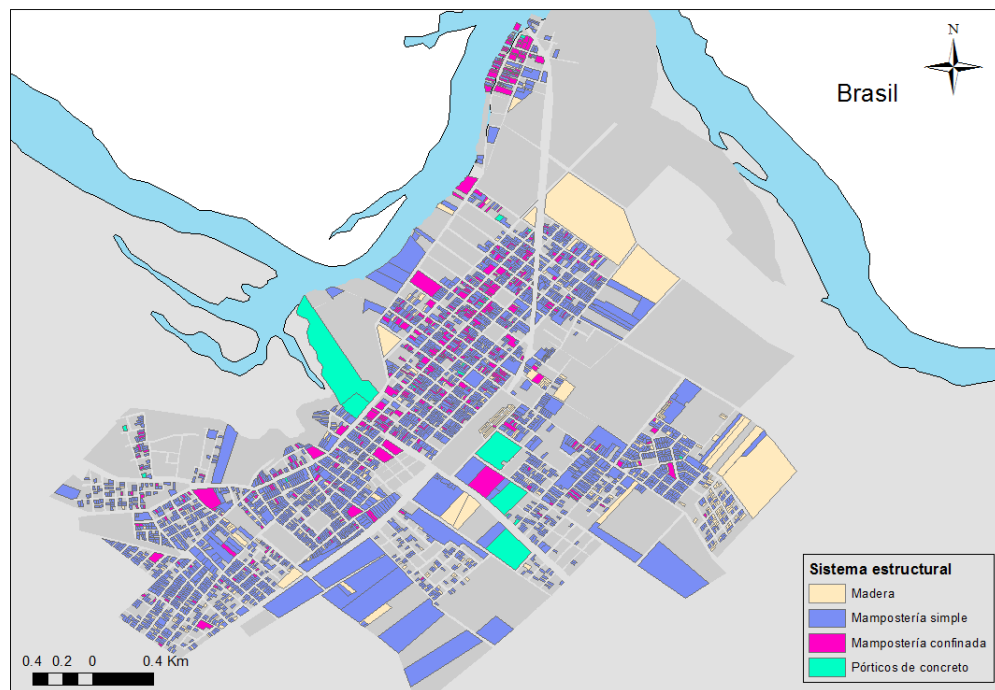


Figura 299. Distribución de sistema estructural.

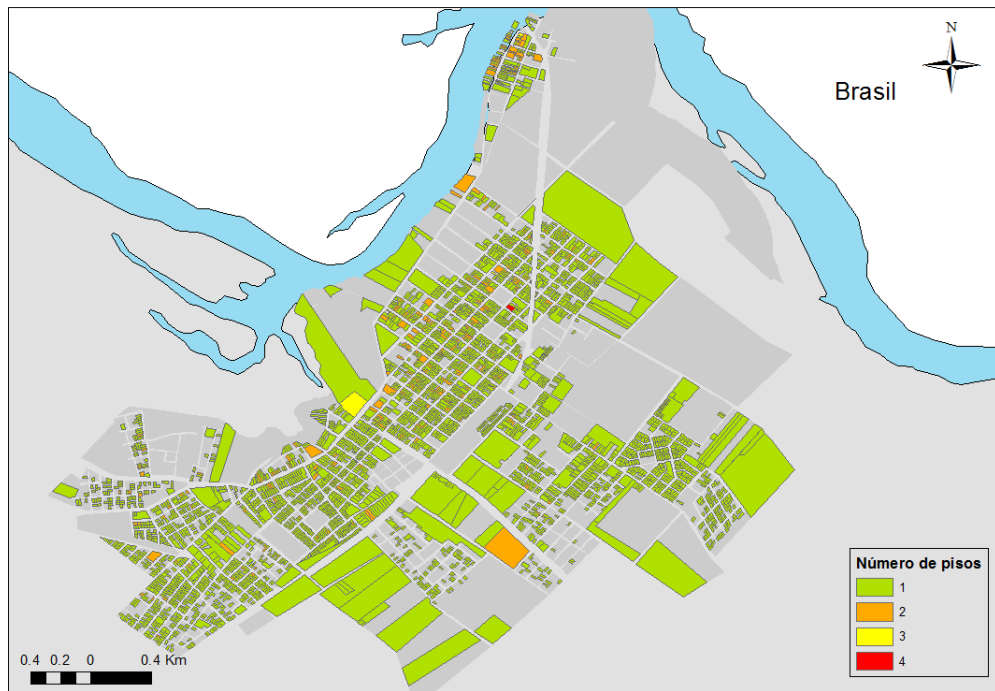


Figura 300. Distribución de número de pisos.

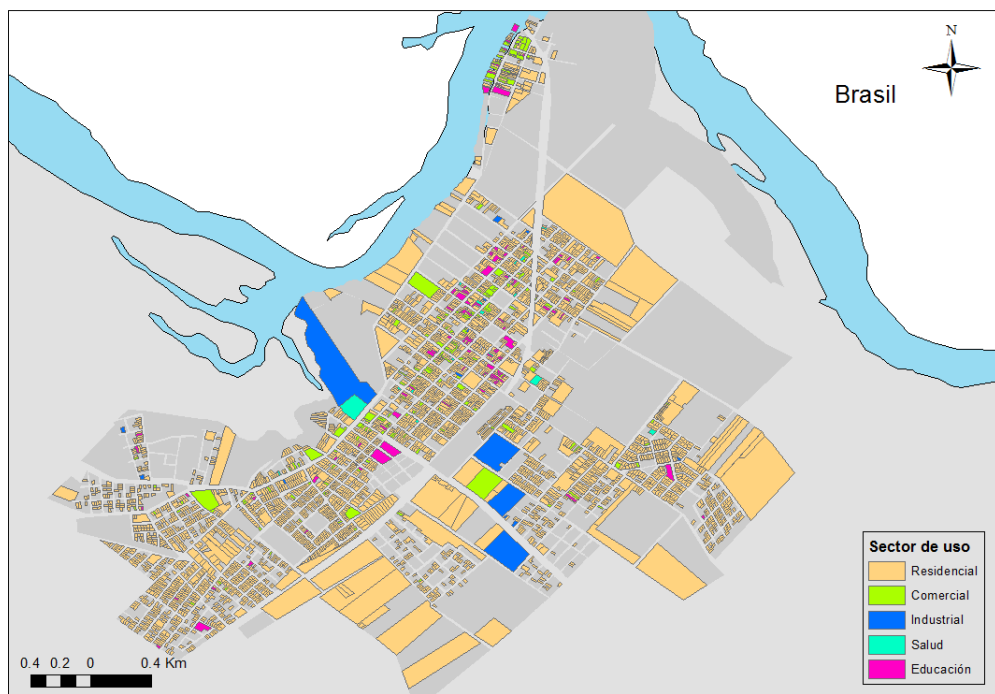


Figura 301. Distribución de sector de uso.



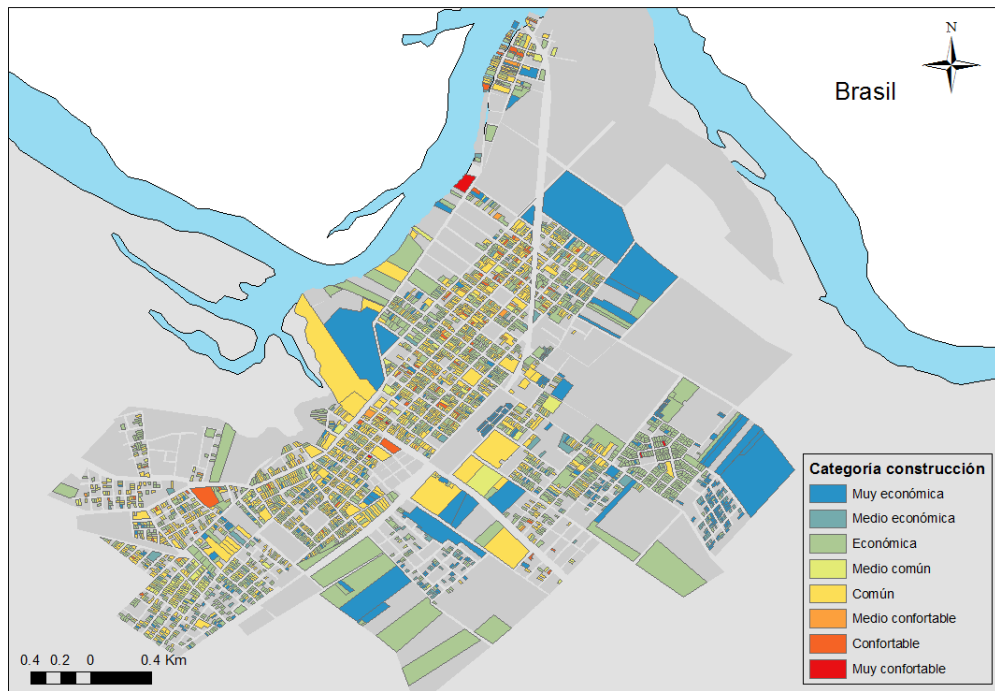


Figura 302. Distribución de categoría de la construcción.

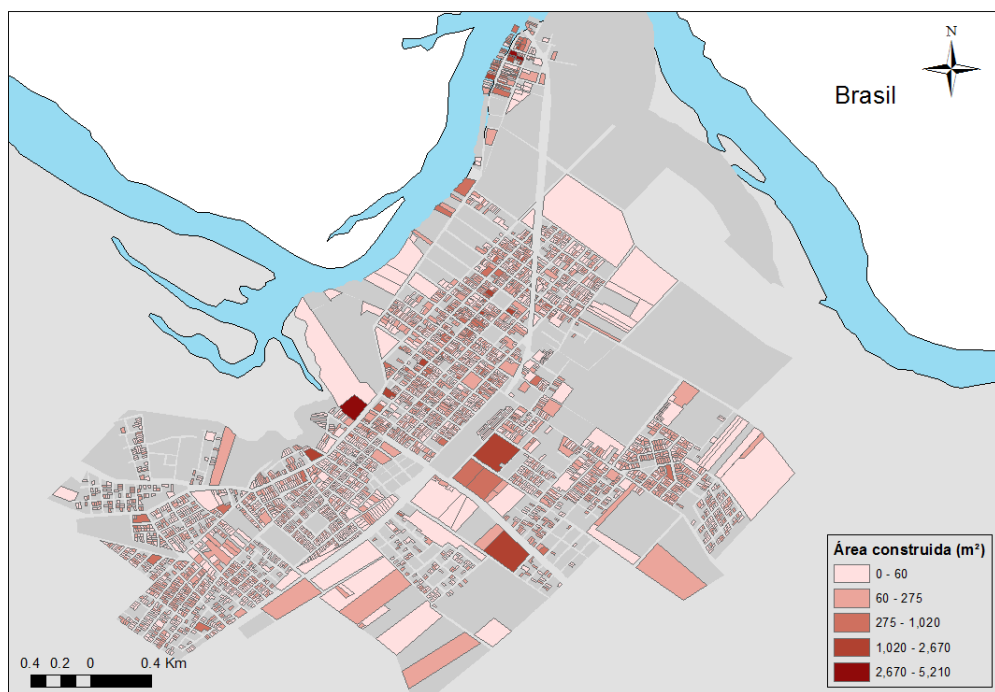


Figura 303. Distribución de área construida.

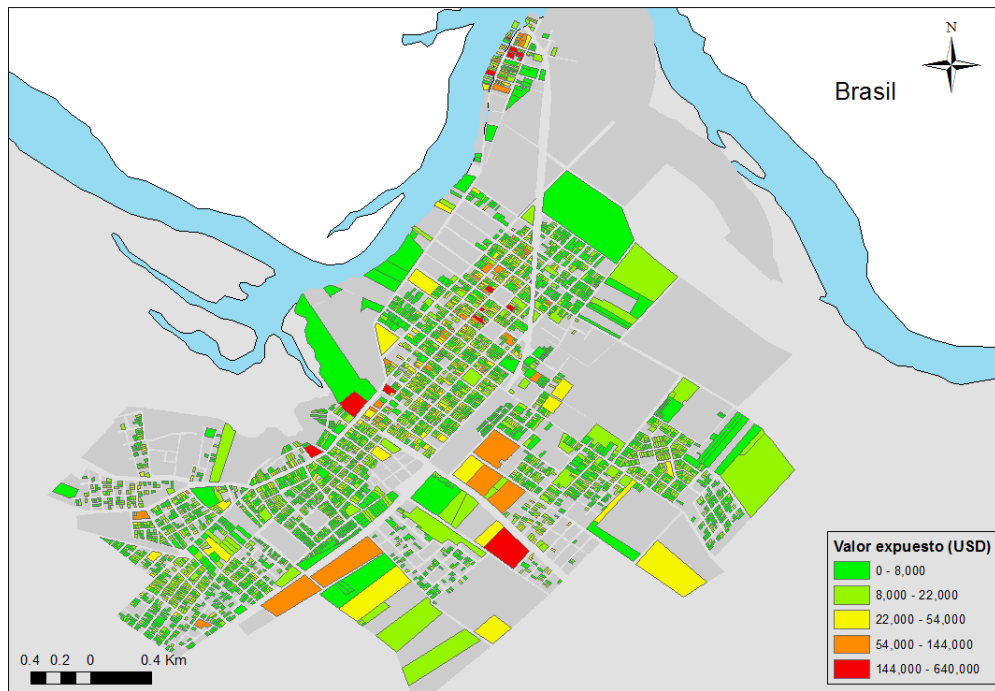


Figura 304. Distribución de valor expuesto.

## VULNERABILIDAD DE EDIFICACIONES ANTE INUNDACIONES

---

Un desastre puede definirse como la coincidencia temporal y espacial entre un evento amenazante o peligroso, cuyo origen puede ser natural o antrópico, con determinadas condiciones de fragilidad del entorno construido ante este. En consecuencia, el riesgo de desastre corresponde a la probabilidad de que uno o más eventos peligrosos se manifiesten en concordancia con un entorno construido vulnerable. En términos matemáticos, puede entenderse el riesgo como una función de la amenaza y la vulnerabilidad. El riesgo es, por tanto, una condición latente o potencial y en teoría intervenible.

La amenaza corresponde a la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno peligroso, ya sea de origen natural o antrópico, sobre una determinada región en un momento particular del tiempo. Las amenazas naturales pueden entenderse como manifestaciones propias de la dinámica terrestre, sobre las cuales el hombre no tiene influencia de ningún tipo en su ocurrencia. Por su parte las amenazas socio-naturales se refieren igualmente a fenómenos de la naturaleza, pero cuya manifestación está socialmente inducida. Es decir, se producen o se acentúan por algún tipo de actividad humana.

Ahora bien, la vulnerabilidad puede entenderse como las características del entorno construido para resistir el impacto derivado de la ocurrencia de un evento peligroso. Estas características determinan el grado en el cual la integridad del entorno construido, así como la vida y medios de subsistencia de quienes habitan dicho entorno, quedan en riesgo por cuenta del evento peligroso. La vulnerabilidad cuantifica entonces las condiciones de inseguridad del entorno construido, las cuales responden a un proceso social de generación, acumulación e incremento.

Por lo tanto, la vulnerabilidad debe entenderse como un fenómeno de origen social, controlado por las condiciones sociales, políticas y económicas de una región, el cual deriva en un estado vulnerable del entorno construido que, desde el punto de vista físico, materializa dicho proceso en términos de las pérdidas que pudieran ocurrir. Es esta vulnerabilidad física, asociada a pérdidas económicas directas, la que es objeto de modelación dentro de la evaluación probabilista del riesgo. No obstante, se hace especial

énfasis en establecer que la vulnerabilidad física del entorno construido en una región depende de factores no físicos, como los mencionados anteriormente, y que, dentro de una estrategia integral de desarrollo, deben ser objeto de intervención para evitar la propagación de la vulnerabilidad y la creación de nuevos riesgos.

El impacto asociado a la ocurrencia de las inundaciones puede dividirse en cuatro tipos (Jongman et. al., 2012): *directo tangible* (i.e. el daño asociado al contacto con el agua en la inundación), *indirecto tangible* (i.e. las pérdidas derivadas de la ocurrencia del evento, como el lucro cesante), *directo intangible* (i.e. la pérdida de vidas humanas) e *indirecto intangible* (i.e. traumas en la población derivados del evento). En el caso de este estudio, se evaluarán siguiendo la metodología probabilista, únicamente las pérdidas directas tangibles, es decir, la afectación económica directa sobre bienes expuestos, como viviendas y cultivos.

En este sentido, la vulnerabilidad es una característica intrínseca de los elementos expuestos y que caracteriza su comportamiento ante la acción adversa de un fenómeno peligroso. Está definida mediante curvas de vulnerabilidad, las cuales relacionan los momentos de probabilidad (valor esperado y varianza) de la pérdida en el elemento expuesto, como función de la intensidad de la amenaza que ocurra en su ubicación

Las inundaciones asociadas a desbordamiento de ríos son la amenaza natural más frecuente y costosa, afectando a la mayoría de países en el mundo de forma constante (UN ISDR, 2011). La práctica común por parte de las agencias gubernamentales, compañías de seguros e instituciones de investigación, es el uso de funciones de daño por inundaciones para la valoración de las pérdidas asociadas con la ocurrencia de futuras inundaciones. De esta manera, se modelan los impactos económicos directos ex-ante, con el fin de incorporarlos en el ordenamiento territorial, así como evaluar concentraciones de riesgo y hacer análisis de la relación costo-beneficio de medidas de mitigación.

### **1.52 Funciones de daño**

La generación de modelos de daño ante inundaciones es un proceso complejo que involucra el conocimiento de un gran número de factores hidráulicos, constructivos y socioeconómicos. En general los modelos de daño se definen de manera generalizada,

intentando envolver en un solo modelo el comportamiento de múltiples elementos expuestos de similares características.

En la actualidad, existen diferentes modelos de daño usados alrededor del mundo, los cuales intentan representar de la manera más aproximada, el comportamiento de los elementos expuestos ante inundaciones. Estos modelos son generalmente definidos por agencias gubernamentales para su aplicación dentro del contexto nacional en cada país. Cabe resaltar los modelos de daño propuestos por el sistema HAZUS-MH (Estados Unidos), Multi-Coloured Manual (Reino Unido), FLEMO (Alemania), Damage Scans (Holanda) y el modelo JRC (Comisión Europea). En casi todos los modelos de daño existentes, se usa la profundidad del agua como parámetro de intensidad de la inundación. Es posible, aunque raro, encontrar también relaciones de daño complementarias basadas en la velocidad, duración, contaminación del agua, e incluso el tiempo de anticipación en la alerta temprana. Sin embargo, la manera más común e internacionalmente aceptada para la estimación de las pérdidas directas ante inundaciones es mediante el uso de relaciones profundidad-daño.

Existe un alto grado de incertidumbre en la definición y generación de modelos de daño ante inundaciones. La incertidumbre que aporta el modelo de daño a la estimación de las pérdidas es muy superior a la derivada del modelo de amenaza (De Moel y Aerts, 2011). Si bien, esta es una problemática ampliamente reconocida en el contexto internacional, los modelos de daño, particularmente las relaciones profundidad-daño no tienen en cuenta una medida de su incertidumbre. Es más, la metodología de evaluación de las pérdidas comúnmente aplicada al contexto de riesgo por inundaciones es de tipo determinista, lo cual impide llevar a cabo evaluaciones de riesgo que integren de manera racional dicha incertidumbre.

Dentro del contexto de la evaluación probabilista del riesgo, las pérdidas derivadas de la afectación que sufren los elementos expuestos se modelan mediante funciones de vulnerabilidad. Las funciones de vulnerabilidad guardan similitud con las relaciones de daño, en el sentido que también son comúnmente definidas en términos de la profundidad de agua, y también devuelven un valor estimado de pérdida económica en el elemento afectado. Sin embargo, se diferencian de las anteriores en que dicha pérdida no es determinista, sino que es una variable aleatoria con una distribución de

probabilidad asociada. De esta manera, se considera directamente en la evaluación de las pérdidas la incertidumbre existente en la manera como se dañan los elementos expuestos, la cual es combinada con la incertidumbre asociada a la ocurrencia de un determinado nivel de intensidad (profundidad) de inundación en la ubicación del elemento, para calcular la distribución de probabilidad de la pérdida en cada elemento expuesto como consecuencia de una inundación.

### 1.53 Funciones de vulnerabilidad

La vulnerabilidad de los elementos expuestos se caracteriza mediante curvas de vulnerabilidad, las cuales caracterizan el comportamiento de una construcción durante la ocurrencia de un fenómeno peligroso. Las funciones de vulnerabilidad definen la distribución de probabilidad de la pérdida ( $p$ ) como función de la intensidad producida durante un evento específico, es decir, condicional a la ocurrencia de un nivel de intensidad ( $s$ ) en la ubicación del elemento expuesto. La pérdida  $p$  generalmente se entiende como la pérdida relativa al valor de reposición del elemento expuesto.

Estas funciones de vulnerabilidad se definen entonces mediante curvas que relacionan el valor esperado del daño y la desviación estándar del daño con la intensidad del fenómeno. La pérdida se asume típicamente como distribuida Beta, con su función de densidad de probabilidad dada como (Ordaz 2008),

$$f(p|s) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} p^{a-1} (1-p)^{b-1} \quad \text{Ec. 0-1}$$

En donde  $\Gamma$  es la función Gamma y los parámetros  $a$  y  $b$  están dados por,

$$a = \frac{1 - (1 + c^2(p|s)) \cdot E(p|s)}{c^2(p|s)} \quad \text{Ec. 0-2}$$

$$b = a \cdot \frac{1 - E(p|s)}{E(p|s)} \quad \text{Ec. 0-3}$$

En donde  $E(p|s)$  es el valor esperado de la pérdida y  $c(p|s)$  es su coeficiente de variación, dada la intensidad de movimiento en el sitio. ( $c(p|s) = \sigma(p|s)/E(p|s)$ , en donde  $\sigma(p|s)$  es la desviación estándar de la pérdida).

Es práctica común definir de manera general la forma funcional de las funciones de vulnerabilidad de la siguiente manera. La curva de valor esperado de la pérdida,  $E(p|s)$ , puede generalizarse como:

$$E(p | s) = 1 - \exp \left( \ln 0.5 \left( \frac{s}{s_0} \right)^\varepsilon \right) \quad \text{Ec. 0-4}$$

En donde  $s_0$  corresponde a la intensidad que produce un valor esperado de pérdida del 50%, y  $\sigma$  es un exponente que controla la pendiente de la curva para la intensidad  $s_0$ .

Existe poca información para determinar la varianza (o el coeficiente de variación) de la pérdida. Se sabe, sin embargo, que cuando el valor esperado de la pérdida es nulo la dispersión también lo es. De igual forma, cuando el valor esperado de la pérdida es total, la dispersión es también nula. Para valores intermedios es difícil precisar, con bases empíricas, cuánto vale la varianza de la pérdida.

Para fijar la variación de la varianza de la pérdida se emplea comúnmente la expresión de la distribución de probabilidad asignada en el informe ATC-13 (ATC-13, 1985) cuya varianza tiene la siguiente forma funcional:

$$\sigma^2(p | s) = Q (E(p | s))^2 (1 - E(p | s))^{m-1} \quad \text{Ec. 0-5}$$

En donde,

$$Q = \frac{V_{\max}}{D_0^2 (1 - D_0)^{m-1}} \quad \text{Ec. 0-6}$$

$$m = \frac{2}{D_0} - r + 2 \quad \text{Ec. 0-7}$$

$V_{max}$  y  $D_0$  son parámetros que dependen del tipo estructural.  $V_{max}$  es la varianza máxima y  $D_0$  es el nivel de daño para el que ocurre esta varianza máxima. La Figura 305 presenta un ejemplo de una función de vulnerabilidad con sus dos curvas características.

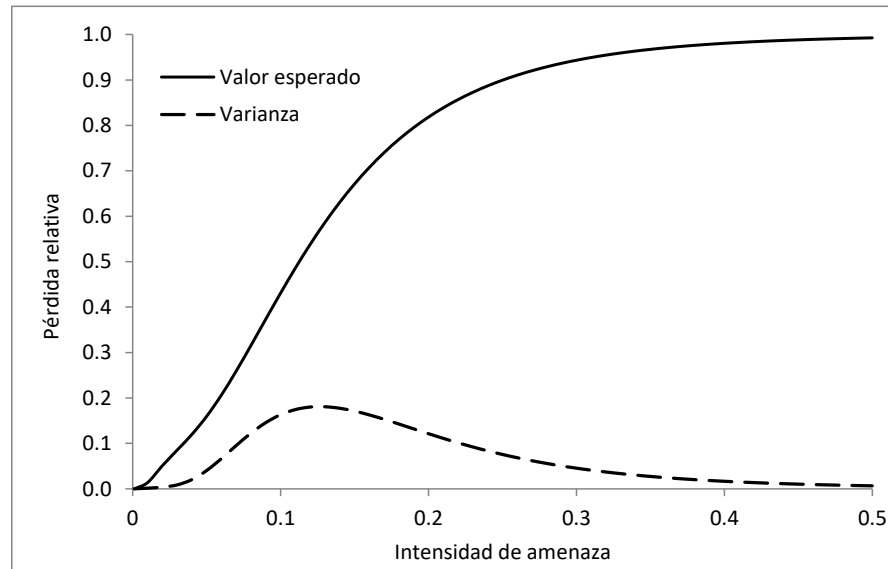


Figura 305. Ejemplo de una función de vulnerabilidad.

Las funciones de vulnerabilidad determinan entonces la manera como se comportará un elemento expuesto ante una sollicitación adversa en su ubicación, en términos de las pérdidas potenciales que puede sufrir su propietario o responsable. Ahora bien, la capacidad de resistir el fenómeno peligroso, tal cual como aparece definida por una función de vulnerabilidad, es generalizada para elementos expuestos de características similares. Usualmente al conjunto de características para las cuales aplica la misma función de vulnerabilidad se le conoce como tipo constructivo. De manera que, dentro del modelo general de riesgo, la vulnerabilidad de un elemento expuesto no está caracterizando su propia vulnerabilidad sino la del tipo constructivo al cual pertenece.

Esto nos lleva a considerar una característica importante de las funciones de vulnerabilidad en el contexto de la evaluación del riesgo. Es necesario contar con un número suficientemente grande de elementos expuestos asociados al mismo tipo constructivo con el fin de caracterizar correctamente su comportamiento por medio de una función de vulnerabilidad. Esto se debe a que, en términos matemáticos, las pérdidas individuales en cada elemento expuesto son variables aleatorias todas igualmente distribuidas, por lo tanto, siguiendo la ley de los grandes números, el promedio de la



agregación de las pérdidas convergerá al promedio de las variables aleatorias individuales conforme aumenta el número de sumandos.

Si bien las funciones de vulnerabilidad representan de manera completa, en términos de probabilidad, la capacidad del elemento expuesto para resistir la intensidad de la amenaza es usual en ingeniería el uso de funciones de fragilidad, las cuales representan de manera diferente la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Cabe anotar que las funciones de fragilidad pueden derivarse de las de vulnerabilidad, y que implican en ese proceso pérdida de información y resolución.

### 1.54 Funciones de fragilidad

El daño en los elementos expuestos suele representarse comúnmente por medio de funciones de fragilidad. En términos generales, las funciones de fragilidad estipulan cuánto vale la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño como función de cierto parámetro de intensidad.

Supongamos que existen  $N$  estados de daño, que llamaremos  $ED_i$ ,  $i=0...N$ . Entonces, las funciones de fragilidad estipulan que la probabilidad ( $P_i$ ) de que se alcance o exceda el  $i$ -ésimo estado de daño ( $ds_i$ ), dado que se presentó una intensidad  $s$ , de la siguiente manera:

$$P_i = \Pr(DS \geq ds_i | s) \quad \text{Ec. 0-8}$$

En donde  $DS$  es una variable aleatoria en el vector de estados de daño  $\{ds_0, ds_1, \dots, ds_N\}$ . Ahora bien, al ser los estados de daño variables discretas, la probabilidad de encontrarse exactamente en un estado de daño es:

$$\Pr(DS = ds_i | s) = \Pr(DS \geq ds_{i+1} | s) - \Pr(DS \geq ds_i | s) \quad \text{Ec. 0-9}$$

Los estados de daño se asocian normalmente a estados de comportamiento del elemento expuesto, por lo tanto están relacionados a niveles cualitativos de daño. Es común entonces encontrar juegos de curvas de fragilidad, una para cada estado de daño, con estados de daño entendidos como, por ejemplo, “leve”, “moderado”, “severo” o “colapso”. Si bien es importante e interesante obtener una medida cualitativa del daño,

con fines de la evaluación del riesgo hace falta determinar el estado de daño en forma cuantitativa, es decir, asignarle un valor de pérdida a cada estado de daño.

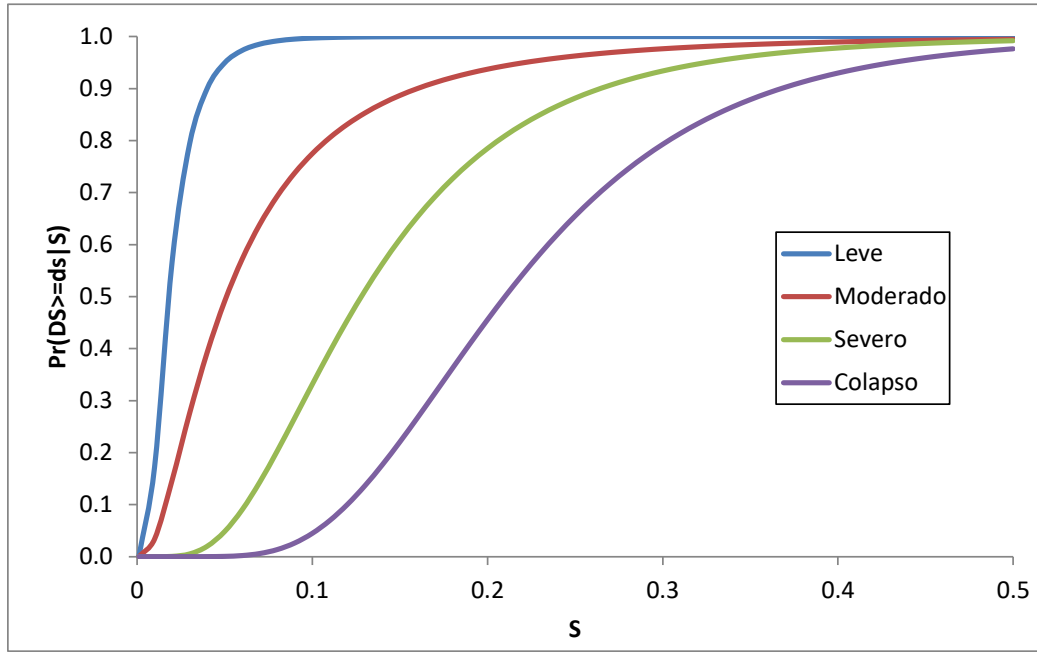


Figura 306. Ejemplo de funciones de fragilidad.

### 1.55 Relación entre funciones de fragilidad y de vulnerabilidad

Se pueden establecer relaciones matemáticas entre las curvas de fragilidad y las funciones de vulnerabilidad. Supongamos que tenemos un número  $N$  de estados límite, para cada uno de los cuales se cuenta con una curva de fragilidad y un valor de pérdida asociado ( $L_i$ ). Entonces, el valor esperado y la varianza de la pérdida, para una intensidad  $s$ , pueden obtenerse como:

$$E(p | s) = \sum_{i=0}^N L_i \Pr(DS = ds_i | s) \quad \text{Ec. 0-10}$$

$$\sigma^2(p | s) = \sum_{i=0}^N (L_i - E(p | s))^2 \Pr(DS = ds_i | s) \quad \text{Ec. 0-11}$$

De esta manera, se establece una relación general entre funciones de vulnerabilidad y curvas de fragilidad. Esta relación es importante dado que las curvas de

fragilidad no contienen toda la información necesaria para hacer estimaciones económicas de las pérdidas.

## **1.56 Modelación de la vulnerabilidad ante inundaciones**

### **1.56.1 Generalidades**

El riesgo por inundaciones es un problema muy particular que debe evaluarse de manera adecuada según sus características y complejidades. En el caso de los terremotos o los ciclones tropicales, la pérdida en las propiedades y activos expuestos está directamente correlacionada con la magnitud del evento y sus características físicas. En el caso de las inundaciones, no es tan directo. Las pérdidas causadas por inundaciones dependen de la falla de las defensas en ríos o costas cercanas, las cuales constituyen la barrera por excelencia ante las inundaciones. Una vez ocurrida la falla, el evento puede ser de dimensiones catastróficas en las regiones protegidas, sin mucho que los propietarios puedan hacer para proteger sus bienes.

La construcción de un modelo probabilista de riesgo por inundaciones no es una tarea trivial, dado que involucra la evaluación de las probabilidades de falla del sistema de protección a través de matemáticas combinatorias, en donde la falla puede presentarse de diferentes maneras y así mismo derivar en diferentes consecuencias en las áreas inundables.

La modelación probabilista del riesgo por inundaciones requiere entonces de la modelación probabilista de la vulnerabilidad. La vulnerabilidad, entendida desde el punto de vista de la predisposición de un elemento a sufrir daño físico, puede ser modelada en términos matemáticos, tal y como se ha presentado en la sección anterior de este informe. Este marco matemático es necesario para mantener la robustez del modelo y poder obtener las métricas adecuadas de riesgo que permitan tomar decisiones informadas.

En la práctica tradicional de evaluación del riesgo por inundaciones, es común asumir que las incertidumbres están asociadas completamente a la modelación meteorológica, hidrológica e hidráulica. No obstante, el entorno construido aporta

incertidumbres importantes a la modelación, que en algunos casos pueden ser de mayor relevancia que las asociadas al fenómeno físico.

En términos generales, la pérdida causada por la ocurrencia de una inundación puede representarse matemáticamente como una función de diversos aspectos:

$$p = f(F, B, S, W, R)$$

Ec. 0-12

Los aspectos físicos de la inundación (F) son todos aquellos que tienen que ver con el nivel de inundación o la velocidad del agua en una ubicación específica, desde el punto de vista del comportamiento físico de la masa de agua. Los aspectos del entorno construido (B) están relacionados con la capacidad de las edificaciones y componentes de infraestructura de resistir a la inundación. Los aspectos sociales (S) son esas condiciones subyacentes al problema que causan la construcción y generación misma de la vulnerabilidad. Los sistemas de alerta (W) modifican las condiciones de exposición minutos antes de presentarse el desastre. Y finalmente, los aspectos relacionados con la respuesta al desastre aportan una complejidad adicional dentro de los niveles residuales de riesgo. Si bien todos estos aspectos tienen grandes incertidumbres, los tres últimos (S, W, R) son difícilmente modelables y por lo tanto deben ser atendidos mediante técnicas indirectas. Los aspectos iniciales (F, B) admiten una modelación probabilista y son por lo tanto los principales componentes del modelo.

La amenaza por inundación (la cual atiende los aspectos iniciales F) debe ser modelada de manera adecuada para la evaluación del riesgo. En este sentido se plantea un procedimiento metodológico para la generación probabilista de escenarios de amenaza por inundación. Estos escenarios consideran incertidumbre tanto en la ocurrencia de las inundaciones en el tiempo, como en la ocurrencia de valores de intensidad de inundación (p.g. profundidad, velocidad) en cualquier ubicación dentro de la zona de estudio.

De manera similar, la vulnerabilidad (relacionada con los aspectos iniciales B) debe también ser probabilista. Es entonces evidente que la pérdida  $p$  presentada en la ecuación Ec. 0-1 es una variable aleatoria, la cual puede ser representada matemáticamente por una función de densidad de probabilidad. Esta representación solo

es posible mediante el uso de funciones de vulnerabilidad. Los otros enfoques existentes presentados en las secciones anteriores de este informe (funciones de daño y funciones de fragilidad) han sido ampliamente aplicados en evaluaciones de riesgo alrededor del mundo, y se cuenta con un estado del conocimiento importante en este sentido. No obstante, manteniendo el espíritu de innovación, se optó desde la concepción de este estudio por el uso de funciones de vulnerabilidad, las cuales cuentan con ventajas de suma importancia para los fines del estudio.

### 1.56.2 Vulnerabilidad de edificaciones

En este caso se usará una representación matemática de la vulnerabilidad, basada en el enfoque dado en las funciones de vulnerabilidad, es decir, en términos de la pérdida económica esperada sobre el valor de reposición de los elementos expuestos. La representación propuesta está basada en la combinación de funciones de pérdida de los componentes de la edificación o elemento de infraestructura expuesto.

En términos generales, puede afirmarse que la pérdida total derivada de la afectación de una inundación sobre un elemento expuesto corresponde a la suma de las pérdidas individuales de todos los componentes de dicho elemento. En caso de una edificación los componentes son su estructura, elementos no estructurales y contenidos. La Figura 307 presenta de manera esquemática esta condición.



Figura 307. Esquema de distribución de componentes en un elemento expuesto.

Un elemento expuesto como el que se muestra en la Figura 307, se subdivide en el número de niveles (pisos) que lo conforman. Para cada nivel se desarrolla una función de vulnerabilidad como la agregación de las vulnerabilidades de los componentes ubicados en dicho nivel. Los componentes del nivel son la estructura, elementos no estructurales y contenidos, cada uno de los cuales tiene un identificador único en el modelo, una posición relativa con relación a la cota del nivel y una dimensión en altura. Cada componente tiene también un valor económico, el cual aporta al valor total de reposición del predio. Adicionalmente, cada componente se caracteriza por una función de daño, la cual relaciona la profundidad de inundación en la ubicación relativa del componente, con los momentos de probabilidad de la pérdida del mismo. Es decir que la pérdida en cada componente se define como una variable aleatoria con distribución Beta. Esto debido a que las curvas de daño se establecen para componentes típicos y no los específicos de cada edificación, es decir, la pérdida individual conlleva incertidumbre. La Figura 308 presenta una función de daño típica de un componente.

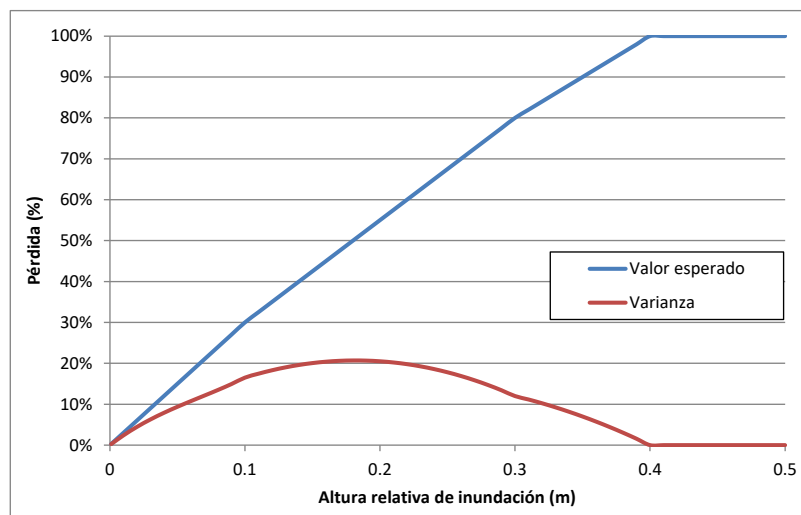


Figura 308. Función de daño típica.

Dado que se define la pérdida total como la suma de todas las pérdidas individuales de los componentes del elemento expuesto, es posible establecer los momentos de probabilidad de la pérdida  $p$ , para una profundidad de inundación  $h$  dada, como

$$E(p|h) = \sum_{i=1}^N E(p)_i \quad \text{Ec. 0-13}$$

$$\sigma^2(p|h) = \sum_{i=1}^N \sigma^2(p_i) + 2 \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{i=2}^N \rho_{j,i} \sigma(p_j) \sigma(p_i) \quad \text{Ec. 0-14}$$

En donde  $E(p|h)$  es el valor esperado de la pérdida dado que ocurrió el tirante  $h$  de inundación,  $\sigma^2(p|h)$  es la varianza de la pérdida dado que ocurrió  $h$ ,  $E(p)_i$  es el valor esperado de la pérdida en el componente  $i$  ante el nivel relativo de inundación asociado con  $h$ ,  $\sigma^2(p)_i$  es la varianza de la pérdida en el componente  $i$ ,  $\sigma(p)_i$  su desviación estándar,  $N$  es el número total de componentes en el elemento expuesto y  $\rho_{j,i}$  es el coeficiente de correlación entre los componentes  $i$  y  $j$ . De esta manera, ante cualquier nivel de inundación, es posible determinar, para cualquier combinación de estructura, contenidos y elementos no estructurales, la función de vulnerabilidad de un elemento expuesto. El procedimiento anterior debe repetirse para cada nivel del edificio, en función de los elementos contenidos en dicho nivel.

Para determinar la función de vulnerabilidad de un elemento expuesto, se superponen las funciones individuales generadas para cada nivel, de la siguiente manera:

$$E_T(p|h) = \sum_{i=1}^{Niv} E_i(p|H_i - h) \quad \text{Ec. 0-15}$$

$$\sigma_T^2(p|h) = \sum_{i=1}^{Niv} \sigma_i^2(p|H_i - h) \quad \text{Ec. 0-16}$$

En donde  $E_T(p|h)$  es la función de valor esperado de la pérdida para la edificación y  $\sigma_T^2(p|h)$  es su varianza,  $E_i(p|h)$  y  $\sigma_i^2(p|h)$  son el valor esperado y varianza del nivel  $i$ , y  $H_i$  es la altura respecto al terreno a la que se encuentra el nivel  $i$ .

### 1.56.3 Metodología

En este numeral se presentan los resultados de la aplicación de la metodología desarrollada para obtener funciones de vulnerabilidad por inundación a los contenidos y

estructuras. La expresión que representa el daño para estructuras de un nivel es una función polinomial de tercer grado que inicia en cero, como la presentada en la siguiente ecuación.

$$\delta_{N1}(t) = a \cdot t^3 + b \cdot t^2 + c \cdot t \quad \text{Ec. 0-17}$$

Donde:

$t$  = Profundidad de inundación para el sitio analizado

$a, b, c$  = Constantes que definen el ajuste de la función a los valores promedio

Para varios niveles se extrapoló la función de daño de un nivel, suponiendo que los valores y la densidad de contenidos se mantendrán constantes con el número de niveles. De esta forma se puede plantear una expresión general para cualquier número de niveles y para cualquier profundidad de inundación, la cual se muestra en la siguiente ecuación.

$$\delta = \frac{\delta_{N1max}(N_{st} - 1)}{N_T} + \frac{\delta_{N1}(\tilde{t})}{N_T} \quad \text{Ec. 0-18}$$

Donde:  $\delta_{N1max}$  = Daño máximo de la función para un nivel para la profundidad máxima

$\delta_{N1}(\tilde{t})$  = Daño para una profundidad relativo sobre los niveles completamente inundados

$\tilde{t} = t - h_N \cdot (N_{st} - 1)$ , profundidad relativa sobre los niveles inundados

$h_N$  = Altura de entrepiso

$N_{st} = Ent_{SUP}(\frac{t}{h_N})$ , nivel donde se encuentra la superficie de inundación del agua, definido como el valor entero superior de la relación indicada.

$N_T$  = Es el número total de niveles

#### 1.56.4 Parámetros de cálculo

En el desarrollo de funciones de vulnerabilidad para inundaciones se tuvo en cuenta además del número de pisos y altura de entrepiso, el material de construcción, a



partir del cual se definen los parámetros de daño para una profundidad relativa,  $\delta_{N1}(t)$ , y el daño máximo para la profundidad máxima  $\delta_{N1max}$ .

Los parámetros para la definición de las funciones según el tipo constructivo y el número de pisos se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 105. Parámetros de cálculo para vulnerabilidad de edificaciones.

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Madera 1 piso</b>	<b>Mampostería 1 piso</b>	<b>Mampostería 2 pisos</b>	<b>Mampostería 3 pisos</b>	<b>Mampostería 4 pisos</b>	<b>Concreto 1 piso</b>	<b>Concreto 2 pisos</b>	<b>Concreto 3 pisos</b>
$N_t$	Número total de niveles	1	1	2	3	4	1	2	3
$h_N$	Altura de entrepiso	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
$\varepsilon$	Desviación del daño	3	3	3	3	3	4.3	4.3	4.3
$\delta_{N1}(t)$	Estado de daño definido	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$t$	Intensidad del estado de daño	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$\delta_{N1max}$	Daño máximo	1	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
$D_0$	Daño en máxima varianza	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$V_{max}$	Máxima varianza	0.06 25	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.062 5	0.062 5	0.062 5

De acuerdo con los anteriores parámetros y aplicando la ecuación Ec. 0-18 se pueden obtener las curvas de daño para cualquier número de niveles en función de las curvas obtenidas para un nivel. En las siguientes figuras se presenta las funciones de vulnerabilidad que relacionan la pérdida económica esperada sobre el valor de reposición de los elementos expuestos con la intensidad del fenómeno, que corresponde a profundidad de inundación.

Para las construcciones incluidas en el portafolio de elementos expuestos de la ciudad de Río Branco, se definieron 3 tipos constructivos a partir de la asignación de sistema estructural, que incluye el material de la estructura (madera, mampostería o concreto) y su correspondiente número de pisos. En la Figura 309 se presenta la curva para edificaciones de madera de 1 piso, en la Figura 310 se presentan las curvas para edificaciones de mampostería de 1 a 4 pisos y en la Figura 311 se presentan las curvas para edificaciones en concreto de 1 a 3 pisos.

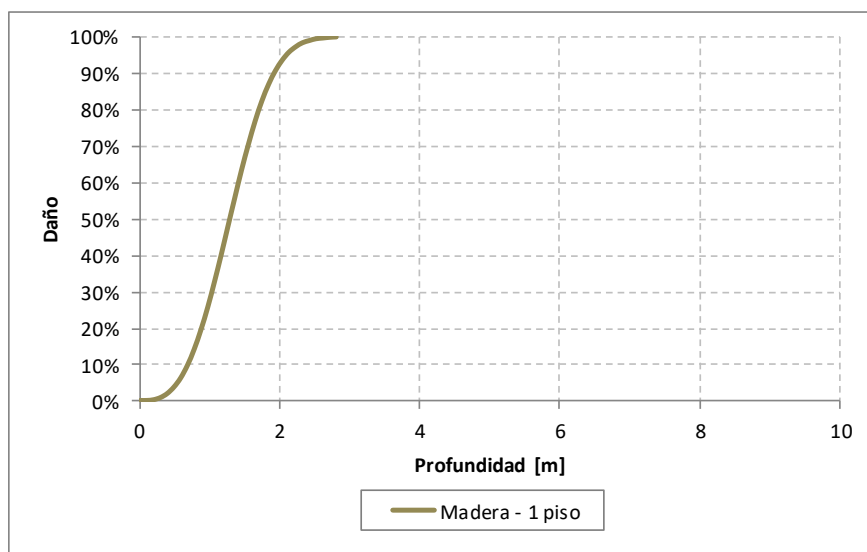


Figura 309. Funciones de vulnerabilidad ante inundación para edificaciones en madera.

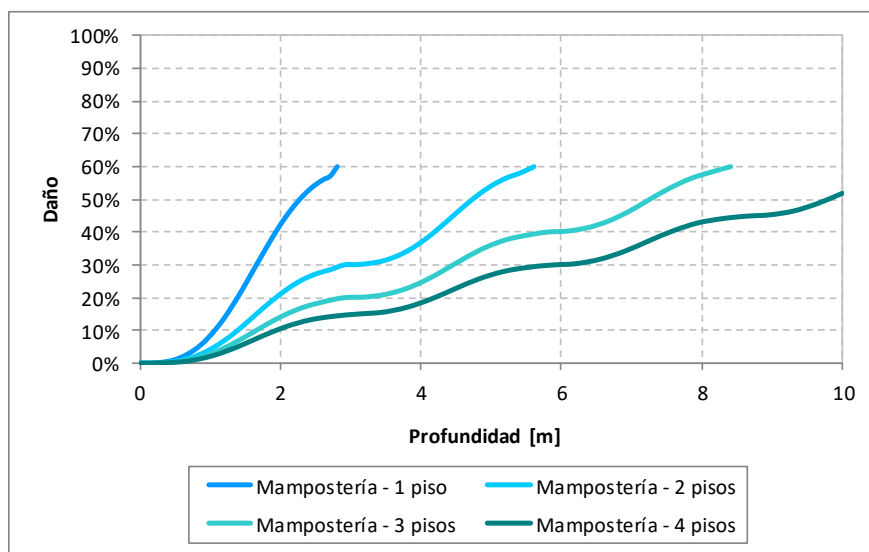


Figura 310. Funciones de vulnerabilidad ante inundación para edificaciones en mampostería.

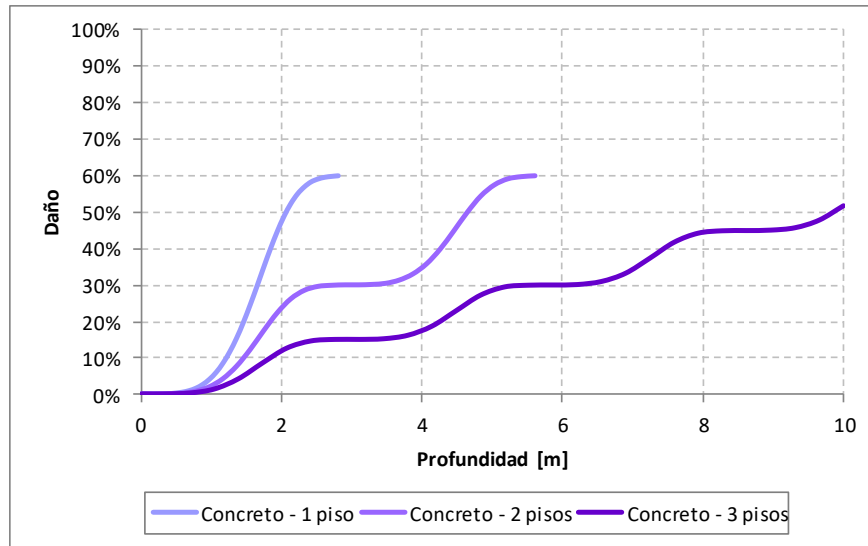


Figura 311. Funciones de vulnerabilidad ante inundación para edificaciones en concreto.

Según la información contenida en el relevamiento realizado por la Intendencia de Cerro Largo, algunas de las edificaciones se encuentran a una altura por encima del nivel de la calle, por lo que las curvas de vulnerabilidad fueron modificadas para tener en cuenta esta condición. La modificación consiste en desplazar la curva de vulnerabilidad 50cm a la derecha en el eje que representa la profundidad del agua como parámetro de intensidad de la inundación, como se muestra en las siguientes figuras de acuerdo con el tipo constructivo correspondiente.

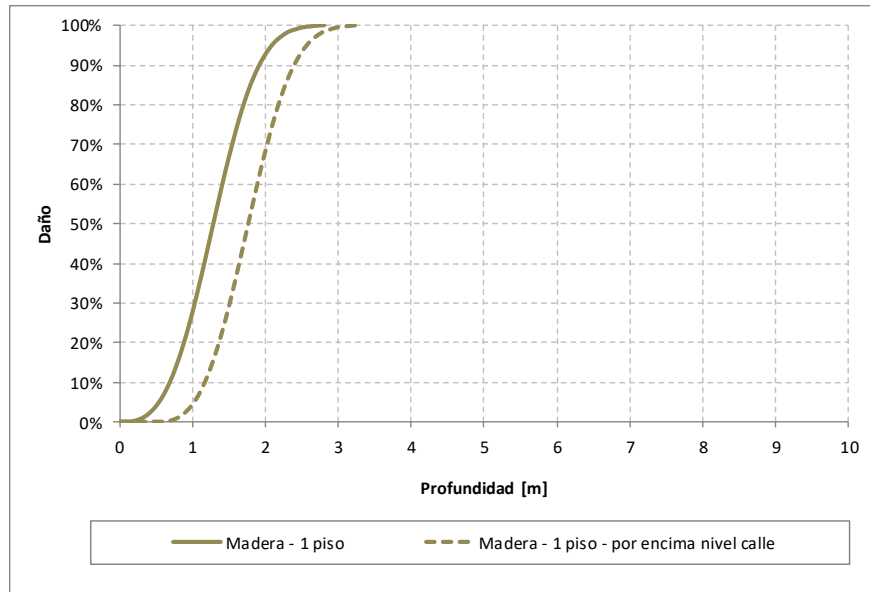


Figura 312. Funciones de vulnerabilidad ante inundación para edificaciones en madera por encima del nivel de la calle.

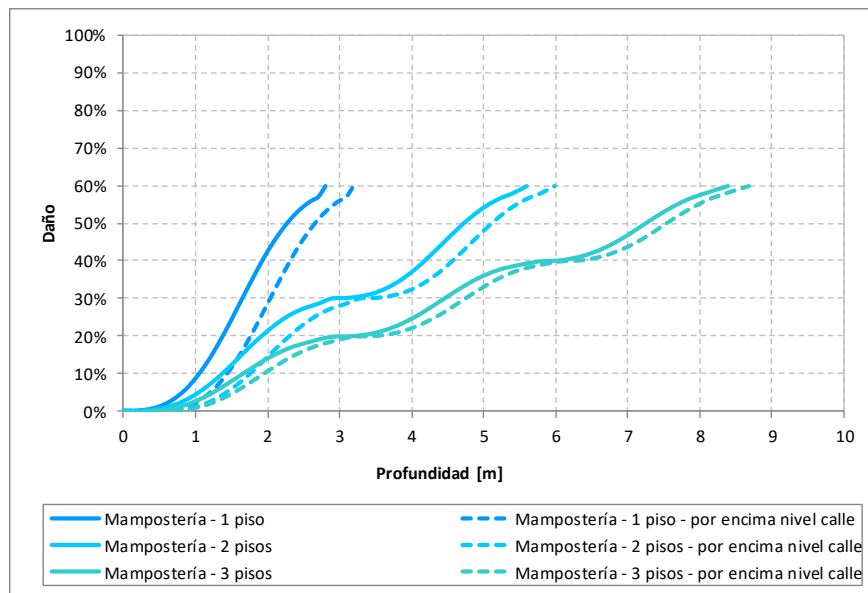


Figura 313. Funciones de vulnerabilidad ante inundación para edificaciones en mampostería por encima del nivel de la calle.

## EVALUACIÓN PROSPECTIVA DEL RIESGO POR INUNDACIÓN EN LA CIUDAD DE RÍO BRANCO

---

La Tabla 106 muestra un resumen de los resultados de riesgo para el portafolio completo de edificaciones en Río Branco; esta tabla muestra la pérdida anual esperada (PAE) en valor absoluto y relativo al valor total expuesto, y también muestra los valores de las pérdidas máximas probables (llamadas PML por sus siglas en inglés).

Como se muestra en la Tabla 106 el valor expuesto total de las edificaciones suma un total de \$76 millones de dólares aproximadamente, de los cuales se espera que se pierda \$180 mil dólares cada año por eventos de inundación, que equivale a una pérdida de 2.4‰ (2.4 al millar o 0.24%). Este valor representa el valor de la pérdida anual esperada (PAE), también llamada prima pura en el sector de los seguros ya que es la anualización de todas las pérdidas que se tendrán a futuro, y por lo tanto equivaldría al valor que se tendría que pagar cada año para cubrir dichas pérdidas. En el contexto del riesgo de desastres es práctica común expresar la PAE al millar y no en porcentaje ya que estos valores suelen ser pequeños y al verlo en porcentaje este puede ser desestimado por el lector. Para el caso de Río Branco, esta PAE de 2.4‰ equivale a realizar pagos anuales de \$180 mil dólares durante 425 años para cubrir las pérdidas en un evento de inundación.

Además de esto, también se presentan los valores de las pérdidas máximas probables para 100, 250, 500 y 1,000 años de periodo de retorno, las cuales varían del 6.0% hasta el 25.7% del valor total expuesto; la curva completa de estas pérdidas (llamada curva de PML) se muestra en la Figura 315. Por otro lado, la Figura 314 muestra la curva de excedencia de pérdidas que relaciona el valor de pérdida con la tasa de excedencia que no es más que el inverso del periodo de retorno.

Tabla 106. Resultados de riesgo por inundación para las edificaciones de Río Branco.

Resultados		
Valor Expuesto	USDx10 <sup>6</sup>	76.25
Pérdida anual esperada	USDx10 <sup>6</sup>	0.18
	‰	2.36
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	USD x10 <sup>6</sup>	%
100	\$4.61	6.05
250	\$8.32	10.91
500	\$12.00	15.74
1000	\$19.60	25.71

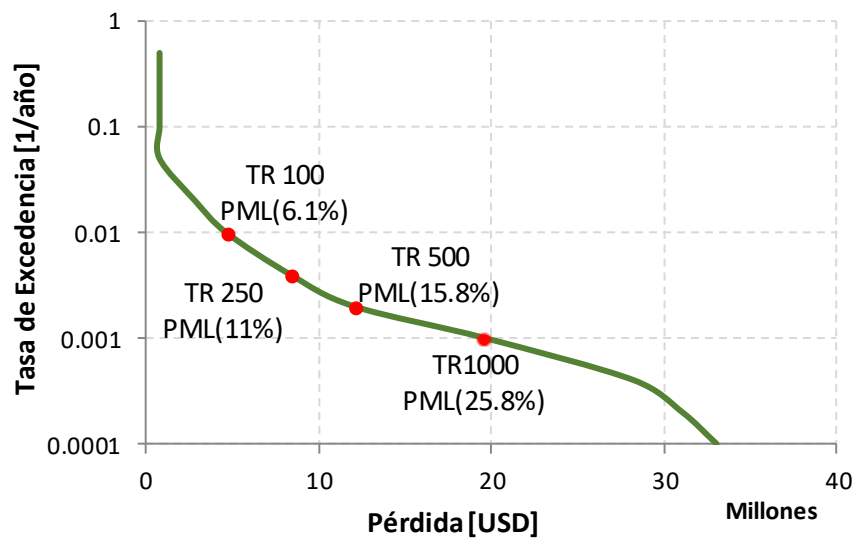


Figura 314. Curva de excedencia de pérdidas.

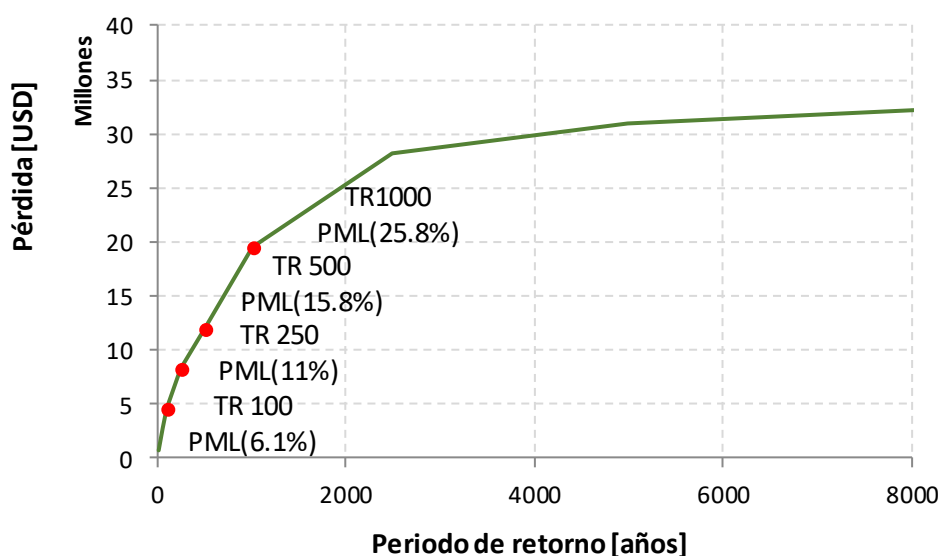


Figura 315. Curva de pérdidas máximas probables.

Por último, la Figura 316 muestra tres curvas que relacionan la pérdida con la probabilidad de tener o exceder ese valor para diferentes tiempos de exposición del conjunto de elementos. De estas curvas se pueden determinar o analizar diferentes niveles de seguridad que se tendrían para un determinado tiempo de exposición y nivel de pérdida; por ejemplo, para el portafolio completo de Río Branco se tiene una probabilidad del 13% de exceder una pérdida de \$10 millones de dólares en 50 años, mientras que tan sólo se tiene una probabilidad del 1% de exceder \$30 millones de dólares en 50 años; de forma similar se tiene una probabilidad del 24% de exceder \$10 millones de dólares en 100 años y una probabilidad del 2% de exceder \$30 millones de dólares en 100 años. De esta manera se proporciona una perspectiva adicional frente a los resultados de riesgo, y permite analizar qué nivel de riesgo se tiene y qué nivel de riesgo se quiere aceptar cuando llegue el momento de proponer acciones de prevención, mitigación o manejo del riesgo.

Existe una relación matemática entre las probabilidades de excedencia, el tiempo de exposición y el periodo de retorno de la siguiente manera: combinaciones diferentes de probabilidades de excedencia y tiempos de exposición equivalen a distintos periodos de retorno, por ejemplo, un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años corresponde

a un periodo de retorno de 475 años. Usando esta relación se puede entender de mejor manera qué implica un cierto periodo de retorno, y nuevamente puede dar indicios del nivel de seguridad que se tiene para un cierto valor de periodo de retorno.

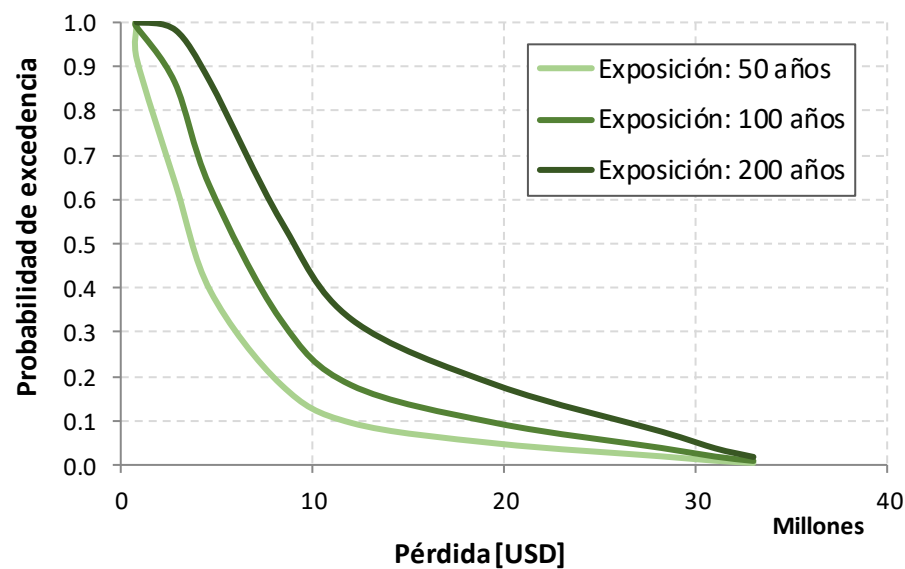


Figura 316. Probabilidad de excedencia de pérdidas.

### 1.57 Resultados de riesgo por sector de uso

En la Tabla 107 se presenta la distribución de valores expuestos y de pérdidas anuales esperadas según el sector de uso. Como se puede observar el 81% del valor expuesto se concentra en las edificaciones de uso residencial, las cuales representan el 76% de las pérdidas absolutas respecto al valor expuesto total y una pérdida anual esperada de 2.2‰.

Tabla 107. Resultados de riesgo por sector de uso.

Sector de uso	Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	USD	% respecto al total	USD	% respecto al total	‰
Residencial	61,727,048	81%	137,204	76%	2.2
Comercial	8,334,003	11%	27,111	15%	3.3
Industrial	1,325,779	2%	1,247	1%	0.9
Educación	3,487,128	5%	12,520	7%	3.6
Salud	1,374,999	2%	1,486	1%	1.1
<b>Total</b>	<b>76,248,957</b>	<b>100%</b>	<b>179,567</b>	<b>100%</b>	<b>2.4</b>



En la Figura 317 se relaciona en el eje de la izquierda la pérdida anual esperada en valor absoluto (dólares) y en el eje de la derecha expresada como fracción del valor expuesto del uso correspondiente (al millar). Como se puede observar, en términos absolutos el sector de uso que presenta las mayores pérdidas es el sector residencial debido a que es el sector que concentra el mayor valor expuesto. En términos relativos el sector comercial y educación presentan las mayores pérdidas relativas con 3.3‰ y 3.6‰ respectivamente.

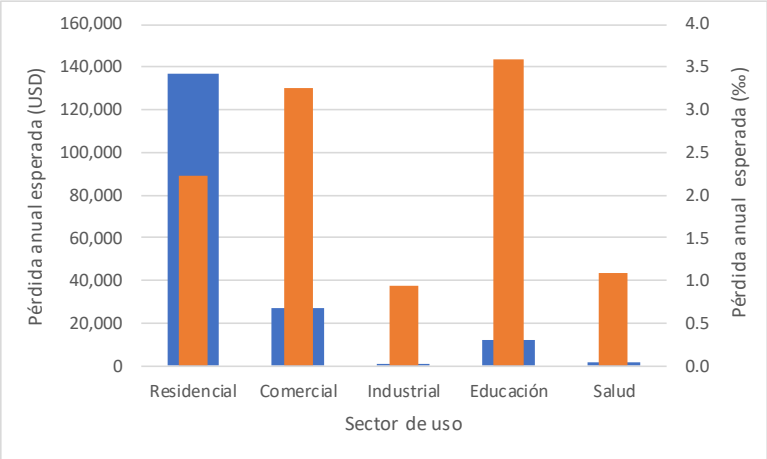


Figura 317. Distribución de pérdida anual esperada según sector de uso.

### 1.58 Resultados de riesgo por sistema estructural

La Tabla 108 presenta la distribución de valor expuesto y de pérdida anual esperada según el sistema estructural. Como se puede observar, en valores absolutos (dólares), las estructuras en mampostería concentran 95% de la pérdida anual esperada, que relativo al valor expuesto corresponde a una prima de 2.3‰ (al millar).

Tabla 108. Resultados de riesgo por sistema estructural.

Sistema estructural	Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	USD	% respecto al total	USD	% respecto al total	‰
Madera	2,082,880	3%	8,214	5%	3.9
Mampostería	72,317,824	95%	169,176	94%	2.3
Concreto	1,848,253	2%	2,178	1%	1.2
<b>Total</b>	<b>76,248,957</b>	<b>100%</b>	<b>179,567</b>	<b>100%</b>	<b>2.4</b>

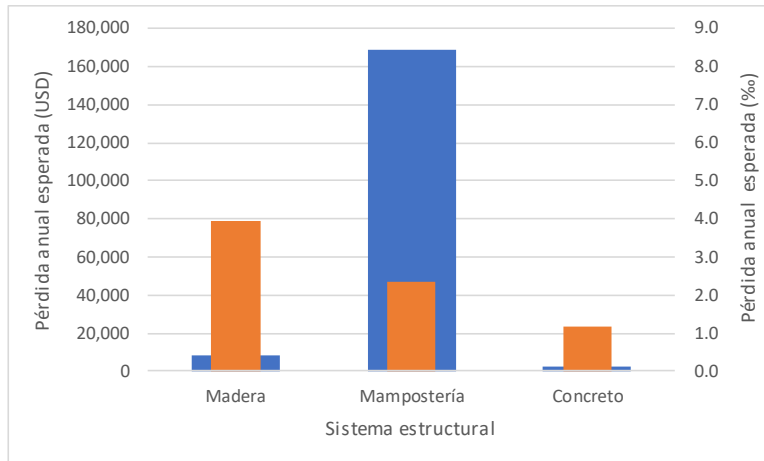


Figura 318. Distribución de pérdida anual esperada según sistema estructural.

### 1.59 Resultados de riesgo por número de pisos

En la Tabla 109 se presenta la distribución de valores expuestos y de pérdidas anuales esperadas según el número de pisos de las edificaciones. Como se puede observar el 87% del valor expuesto se concentra en las edificaciones de 1 piso, las cuales representan el 86% de las pérdidas absolutas respecto al valor expuesto total y una pérdida anual esperada de 2.3‰.

Tabla 109. Resultados de riesgo por número de pisos.

Número de pisos	Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	USD	% respecto al total	USD	% respecto al total	‰
1	66,509,504	87.2%	154,169	85.9%	2.3
2	9,038,431	11.9%	24,501	13.6%	2.7
3	444,409	0.6%	861	0.5%	1.9
4	256,613	0.3%	37	0.0%	0.1
<b>Total</b>	<b>76,248,957</b>	<b>100%</b>	<b>179,567</b>	<b>100%</b>	<b>2.4</b>

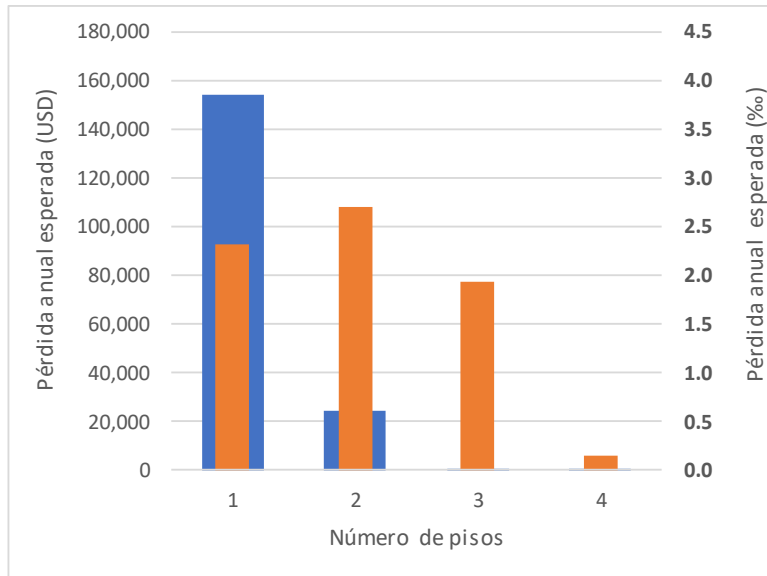


Figura 319. Distribución de pérdida anual esperada según número de pisos.

### 1.60 Mapas de pérdida anual esperada

En las siguientes figuras se ilustra la distribución de la pérdida anual esperada para las edificaciones de la ciudad de Río Branco. En primer lugar, se presenta la pérdida anual esperada por padrón en valor absoluto (dólares) y en segundo lugar, se presenta expresada como fracción del valor expuesto por padrón (al millar).

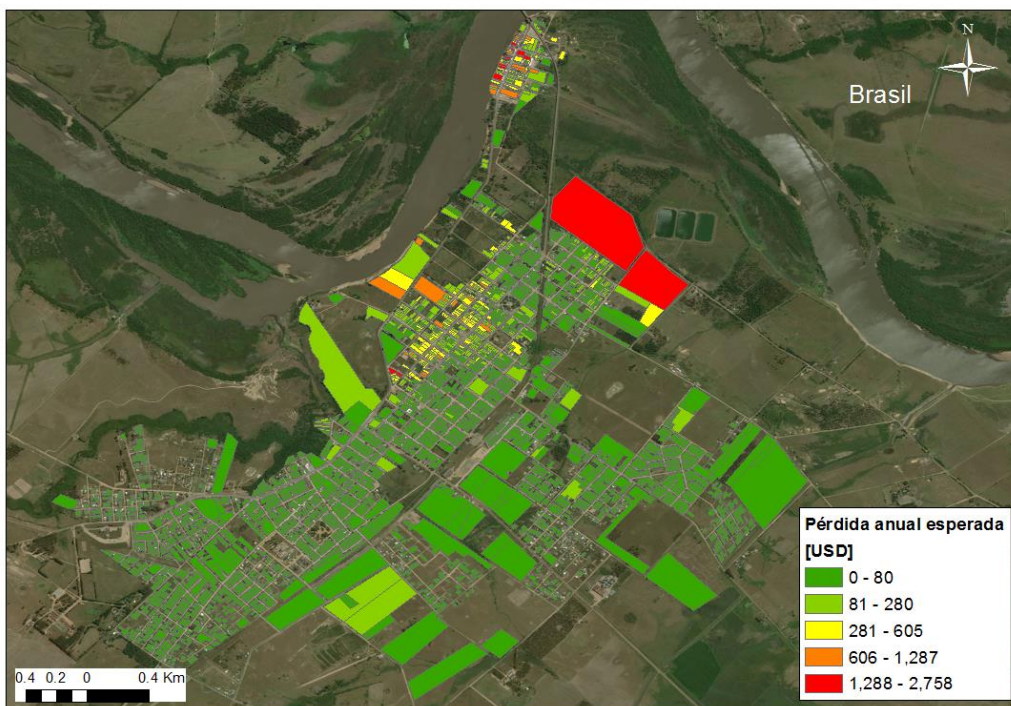


Figura 320. Pérdida anual esperada absoluta (dólares) por padrón.

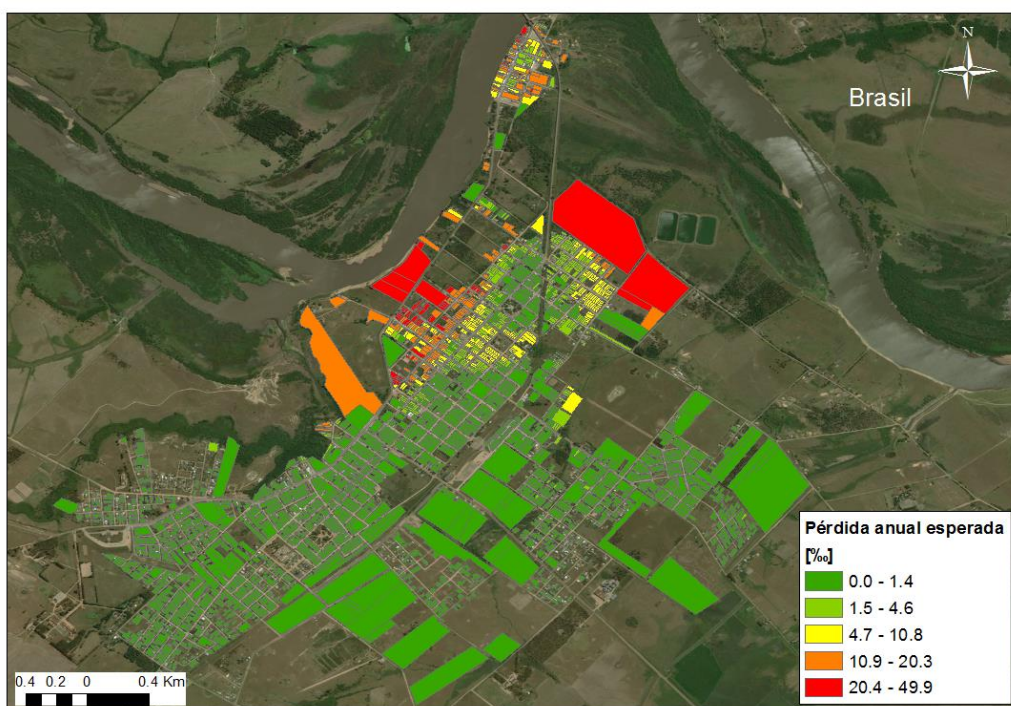


Figura 321. Pérdida anual esperada relativa (al millar) por padrón.

## CONCLUSIONES

---

En cuanto a la evaluación de riesgo por sequía en Uruguay se concluye que:

- Las sequías agrícolas ocurren cuando el contenido de agua del suelo no satisface la demanda de agua de los cultivos, hay un aumento de la evaporación del suelo y la transpiración de la planta. La base de datos de registros climáticos utilizada en este estudio se generó a partir de información climática procesada por agencias internacionales como las bases de datos CHIRPS y de la Universidad de Princeton. En el modelo de evaluación de la amenaza por sequía, los escenarios se derivaron de la simulación estocástica de las condiciones meteorológicas (simulación de las series de lluvias y temperaturas), después de lo cual se identificaron las sequías mediante el indicador RDI que mejor se ajustó a las condiciones del territorio.
- La evaluación de la amenaza por sequía en el Uruguay se completó con el análisis del efecto del cambio climático en la ocurrencia de eventos por sequía. Se seleccionó el modelo global de circulación CCSM4 (Community Climate System Model) que mejor se ajusta a las condiciones históricas del clima del territorio analizado en su versión Mean para los cuatro escenarios de análisis RCP 2.6, 4.5, 6 y 8.5.
- El modelo de exposición conforma una base de elementos expuestos en el área donde se estima el riesgo de sequía. Para Uruguay se evalúa el riesgo por sequía en el sector agropecuario por lo que los elementos expuestos son cultivos y ganado. En total el modelo de exposición y vulnerabilidad incluye ocho productos agrícolas únicos y pasturas como vínculo entre la producción de alimento y producción pecuaria (ganado, lácteos, lana). Para cada uno de estos productos se tiene un mapa de localización en el país y su caracterización fenológica. Los parámetros de vulnerabilidad se ajustan también a las condiciones locales del estudio, en especial las variables asociadas al calendario de los cultivos (fecha de siembra y cosecha), la densidad de siembra, las temperaturas límite (mínima y máxima) y los valores de rendimiento típico.

- El modelo de vulnerabilidad de este estudio sigue la metodología de cálculo de rendimiento de productos agrícolas propuesta por la FAO. En el marco de este estudio, la vulnerabilidad se define en términos de la pérdida de rendimiento que sufre el cultivo durante un período prolongado de escasez de agua. Dado que se aplica un modelo agronómico de respuesta de cultivos, no se emplean curvas o funciones de vulnerabilidad. En el caso de la producción pecuaria, el modelo considera que la reducción de la oferta de alimento, por menor crecimiento de pastizales naturales durante épocas de sequía, está asociada a reducción de rendimiento de productos pecuarios.
- Finalmente, la evaluación del riesgo probabilista por sequía se hace al integrar los módulos de amenaza, exposición y vulnerabilidad. Dentro de esta consultoría se utilizó el software Drought Pro, desarrollado por el mismo grupo consultor, que implementa la metodología completa de evaluación de riesgo por sequía en el sector agrícola. La evaluación de riesgo por sequía de este estudio se hizo sobre el portafolio de productos agrícolas previamente seleccionados y que está avaluado en \$1,541 millones de dólares, de los cuales el valor de pérdida anual esperada se estima en más de \$23 millones de dólares, lo que equivale al 1.51% de su valor expuesto. Las cifras de valor expuesto muestran que los cultivos más importantes, en términos económicos, son la soja y el arroz. Los productos que reportan las PAE relativas más altas son el sorgo de segunda siembra y el maíz de primera siembra, mientras que los productos que reportan las menores PAE relativas son los viñedos, trigo y cítricos.
- En términos generales, los productos que tienen mayores valores de PML para los períodos de retorno determinados son los cultivos de verano de segunda siembra (soja, maíz y sorgo) y la cebada que para 100 años de periodo de retorno alcanzan valores mayores al 27% de PML relativa. Los productos que tienen menores valores de PML son los viñedos, los cítricos, el arroz y el sorgo de primera siembra. Se observa que en el caso del maíz de primera siembra y el trigo no se presentan variaciones significativas en los valores de PML a medida que aumentan los períodos de retorno.

- Los efectos del cambio climático en la evaluación del riesgo por sequía en la producción agrícola del país son evidentes con el aumento de la PAE nacional ante los escenarios de cambio climático, siendo el escenario RCP8.5 el que genera la mayor PAE relativa en Uruguay. Esto permite inferir que a nivel nacional un aumento de la temperatura repercute negativamente en la producción total agrícola.
- Es importante anotar que incluso sin los efectos del cambio climático, la evaluación de amenaza y riesgo por sequía indica que se pueden presentar eventos de una alta gravedad que tiene impactos directos en el sector de la agricultura, generando altas pérdidas anuales esperadas y pérdidas máximas probables en el sector agrícola. Esta es la primera vez que en el país se realiza una evaluación prospectiva del riesgo por sequía y se evalúan sus impactos en el sector agrícola. Estos resultados son el insumo para desarrollar iniciativas que busquen mitigar los efectos de la sequía, y haciendo uso de mejores prácticas agrícolas, reducir las pérdidas probables económicas y en producción que tienen un impacto considerable en la economía nacional y en términos de seguridad alimentaria.

En cuanto a la evaluación de riesgo por inundación en la ciudad de Río Branco se concluye que:

- La base de datos de edificaciones expuestas en la ciudad de Río Branco se construyó a partir de las bases de datos de líneas de construcción y padrones urbanos actualizadas al año 2018, elaboradas por la Dirección Nacional de Catastro y se complementó con la información recopilada en el relevamiento realizado por la Intendencia de Cerro Largo y con la información disponible en el Censo de Población y Vivienda. La base de edificaciones expuestas se compone de aproximadamente 8,430 líneas de construcción agrupadas en 3,964 padrones y se caracteriza por edificaciones en su gran mayoría de un piso de altura, generalmente de uso residencial y con un sistema constructivo predominante en mampostería.
- El valor expuesto total de las edificaciones de la ciudad de Río Branco suma un total de \$76 millones de dólares aproximadamente, de los cuales se espera que

se pierda \$180 mil dólares cada año por eventos de inundación, que equivale a una pérdida anual esperada de 2.4‰ (2.4 al millar o 0.24%). Los valores de pérdida máxima probable entre 100 y 1,000 años de periodo de retorno varían del 6.0% hasta el 25.7% del valor total expuesto.



## REFERENCIAS

---

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, (56), 300. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- Almanza Merchán, P. J. (2011). Determinación del crecimiento y desarrollo del fruto de vid (*Vitis vinifera* L.) bajo condiciones de clima frío tropical. Escuela de Posgrados. Universidad Nacional de Colombia. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4606.4485>
- ARU (Asociación Rural del Uruguay). (2009). Cuantificación de Pérdidas Ocasionadas por la Sequía 2008/2009. Montevideo: ARU. Recuperado de: <http://www.aru.org.uy/documentos/documentoprensa.pdf>
- Asensio, I., Moreno Ramón, S., Gisbert Blanquer, H. & M, J., 2011. Morfología de las cuencas hidrográficas, UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA: s.n.
- Baethgen, W. & Gimenez, A. (s.f.) Aplicación de Pronósticos Climáticos Estacionales e Información Satelital para mejorar la Toma de decisiones en el Sector Agropecuario: ejemplos de la sequía 1999-2000 en Uruguay y otros. INIA La Estanzuela. Actividades de Difusión No. 26. Recuperado de: <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/111219220807180055.pdf>
- Banco Mundial. (2017). Datos de libre acceso del Banco Mundial, PIB (US\$ a precios actuales). Disponible en: [https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.CD?locations=UY&name\\_desc=false](https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.CD?locations=UY&name_desc=false)
- Barbat AH, Cardona, OD, (2003). Vulnerability and disaster risk indices from engineering perspective and holistic approach to consider hard and soft variables at urban level. BID/IDEA Programa de Indicadores para la Gestión de Riesgos, Universidad Nacional de Colombia, Manizales. <http://idea.unalmzl.edu.co>

- Barbat AH, Carreño ML, Cardona OD, Marulanda MC (2001). Evaluación holística del riesgo sísmico en zonas urbanas, Revista int. de métodos numér. para calc. y diseño en ing. 27(1): 3-27.
- Barbat AH, Carreño ML, Pujades LG, Lantada N, Cardona OD, Marulanda MC (2010). Seismic vulnerability and risk evaluation methods for urban areas. A review with application to a pilot area, Struct. and infraestruct. eng. 6(1-2): 17-38.
- Bartaburu, D. (2010). Estrategias de adaptación a las sequías de los ganaderos de Basalto. Revista Plan Agropecuario, Diciembre (136). Recuperado a partir de <https://www.planagropecuario.org.uy/web/146/revistas/diciembre-2010-nº136.html>
- Bartaburu, D., Duarte, E., Montes, E., Morales, H. & Pereira, M. 2009. Las Sequías: Un Evento que Afecta la Trayectoria de las Empresas y su Gente. En Morales, H. y Dieguez, F. (Eds.) Familias y Campo. Rescatando Estrategias de Adaptación. (pp. 155-167). Montevideo: Instituto Plan Agropecuario.
- Bernal, G. A., Escovar, M. A., Zuloaga, D., & Cardona, O. D. (2017). Agricultural Drought Risk Assessment in Northern Brazil: An Innovative Fully Probabilistic Approach. En V. Marchezini, B. Wiesner, S. Saito, & L. Londe (Eds.), Reduction of Vulnerability to Disasters: from Knowledge to Action (RiMa Editio, pp. 331–356). Recuperado a partir de <https://preventionroutes.weebly.com/livrobooklibro.html>
- Bernal, G., Rincón, D., Cardona, O.D. (2018) Drought Pro: Computer program for probabilistic drought risk assessment of crops and livestock systems.
- Berretta, E. J. (2003). Uruguay: Perfiles del recurso pastura- forraje. INIA Tacuarembó.
- Birkmann J, Cardona OD, Carreño ML, Barbat AH, Pelling M, Schneiderbauer S, Kienberger S, Keiler M, Alexander D, Zeil P, Welle T (2013). Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework, Nat. Hazards 67:193-211.

- Bonilla, F. (2013). Elementos a tener en cuenta para seleccionar población y grupos de madurez en suelos arroceros. Resultados experimentales Arroz-Soja 2012-2013. INIA.
- Bresciano, D., Rodríguez, C., Lezama, F., & Altesor, A. (2014). Patrones de invasión de los pastizales de Uruguay a escala regional. *Ecología Austral*, 24(1), 83–93.
- Bruno, A. (2006). Prevención de los efectos de la sequía en los departamentos del norte de Uruguay. En Anuario OPYPA. Recuperado de: <http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/descarga/prevencion-de-los-efectos-de-la-sequia-en-los-departamentos-del-norte-de>
- Bruno, Y., Casares, I., Grasso, A., & Tommasino, H. (2003). La citricultura en Uruguay. Contribución a su conocimiento. Montevideo.
- Calistro, E. (2015). Meses en los cuales se realizan operativas de siembra y cosecha de Cultivos y Forrajeras en Uruguay. INIA.
- Carámbula, M. (1993). Cultivos forrajeros de alta eficiencia. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) Boletín de Divulgación, 38, 1–22.
- Cardona OD (2001). Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos. Ph.D. Thesis. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- Cardona OD (2005). Gestión integral de riesgos y desastres. Curso virtual por Internet, Structuralia – CIMNE, a Universidad Politécnica de Cataluña. Madrid/Barcelona, Spain. Available at: <http://www.structuralia.com/cdl1/cvdata/curso70/info/default.asp>.
- Cardona OD (2007). Curriculum Adaptation and Disaster Prevention in Colombia. In: Lidstone J., Dechano L.M., Stoltman J.P. (eds): International Perspectives on

Natural Disasters: Occurrence, Mitigation, and Consequences. Advances in Natural and Technological Hazards Research, 21. Springer, Dordrecht

Cardona OD, Barbat AH (2000). El Riesgo Sísmico y su Prevención, Cuaderno Técnico 5, Calidad Siderúrgica, Madrid.

Cardona OD, Bernal GA, Marulanda MC, Marulanda PM (2017). World at Risk: Revealing the Latent Disasters, INGENIAR: Risk Intelligence, [www.ingeniar-risk.com](http://www.ingeniar-risk.com), Bogotá.

Cardona OD, Carreño ML, Bernal GA, Salgado-Gálvez MA, Suárez DC, Barbat AH (2018). Decision-making based on holistic seismic risk assessment, including socioeconomic, resilience and governance risk drivers. Proceedings of 16th European Conference on Earthquake Engineering. Thessaloniki.

Cardona OD, Hurtado J (2000). Holistic seismic risk estimation of a metropolitan center, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland.

Cardona OD, Ordaz MG, Reinoso E, Yamín LE, Barbat AH (2012). CAPRA- Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment: International Initiative for Risk Management Effectiveness, in Proceedings of 15WCEE, Lisbon.

Cardona, O. D., Bernal, G., Escovar, M. A., Villegas, C., Molina, J., Brenes, A., & Velásquez, C. (2017). Perfil de riesgo por sequía e inundación de Uruguay – Análisis retrospectivo de consecuencias y evaluación probabilista de la amenaza. Preparado para el Banco Interamericano de Desarrollo BID. Bogotá: Consorcio INGENIAR – CIMNE.

Cardona, O.D., Bernal, G., Escovar, M. A., Villegas, C., González, D. (2018). Perfil de riesgo por sequía e inundación de Uruguay – Estimación del valor expuesto y modelación de la vulnerabilidad. Preparado para el Banco Interamericano de Desarrollo BID. Consorcio INGENIAR – CIMNE. Bogotá.

- Carrasco, N., Zamora, M., & Melin, A. (2011). Manual de sorgo. Publicaciones Regionales Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Carreño ML (2006). Técnicas innovadoras para la evaluación del riesgo sísmico y su gestión en centros urbanos: Acciones ex ante y ex post. PhD. Thesis. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Carreño ML, Cardona OD, Barbat AH (2007). Urban seismic risk evaluation: a holistic approach, Nat. Hazards. 40(1): 137-172.
- Carreño ML, Cardona OD, Barbat AH (2012). New methodology for urban seismic risk assessment from a holistic perspective, Bull. of earthq. eng. 10(2): 547-565.
- Carreño ML, Cardona OD, Barbat AH (2014). Método numérico para la evaluación holística del riesgo sísmico utilizando la teoría de conjuntos difusos, Revista int. de métodos numér. para calc. y diseño en ing. 30(1): 24-34.
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2. (2015). La mega sequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Santiago.
- Chow, V. T. (1994). Hidráulica de canales abiertos. Illinois: Universidad de Illinois.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). Applied Hydrology. Mc Graw Hill.
- CIMNE, INGENIAR, ITEC & EAI. (2013). Probabilistic Modelling of Natural Risks at the Global Level: The Hybrid Loss Exceedance Curve. Background Paper prepared for the 2013 Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. Geneva, Switzerland.
- CIMNE, Ingeniar, ITEC & ERN (2011). Modelación Probabilista de Riesgos Naturales a Nivel Global: La Curva Híbrida de Excedencia de Pérdidas. Desarrollo Metodológico e Implementación de Casos de Estudio Fase 1A: Colombia, México y Nepal. Informe preparado para el GAR 2011. Ginebra, Suiza: EIRD/ONU.

- Clark, C. (1945). Storage and the unit hydrograph. American Society of Civil Engineers Transactions, 100, 1419-1446.
- Climate Prediction Center. (2018). Cold & Warm Episodes by Season. Recuperado a partir de [http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)
- Corporación OSSO. (2015). DesInventar. Obtenido de Sistema de inventario de efectos de desastres: <https://www.desinventar.org>
- D. Raes, P. Steduto, T. C. Hsiao, and E. F. (2017). Users ' Guide. In AquaCrop Version 6.0 Reference Manual. Rome: FAO.
- Dlugokencky, E., & Tans, P. (2018). Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Retrieved from [www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/)
- Doorenbos, J., Kassam, A. H., Bentvelsen, C. L. M., Branscheid, V., & Plusje, J. M. G. A. (1979). Yield response to water (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33). Rome.
- Durán, A. (1997). Clasificación hidrológica de los suelos del Uruguay. Agrociencia, Vol.I(No.1), 15-29.
- FAO. (2017). AquaCrop training handbooks Book I Understanding AquaCrop. Rome.
- FAO. (2018). Crop Water Information - Grape. Retrieved from <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/grape/en/>
- Fassio, A., Ibáñez, W., Rodríguez, M., Ceretta, S., Pérez, O., Rabaza, C., ... Restaino, E. (n.d.). Predicción de estados fenológicos para Soja, Girasol, Maíz, Sorgo granífero, forrajero, dulce y silero. In INIA La Estanzuela (Ed.), Alertas y herramientas.

Fenología de cereales y oleaginoso-duración estadios. (n.d.).

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., ... Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 150066. Recuperado a partir de <http://dx.doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

Gasó, D., & Nuñez, A. (2015). Herramientas de manejo para el cultivo de soja. Programa Nacional de Cultivos de Secano. *Revista INIA*, (42), 13–18.

Hoffman, E., & Castro, A. (2012). Cambios en la fecha de siembra de los cultivos de invierno en Uruguay: Implicancias sobre el rendimiento y el riesgo. *Cangüé*, (Figura 2), 16–21.

Hoffman, E., Arbeletche, P., Fassana, N., Locatelli, A., Gutiérrez, G., Viega, L., & Castro, A. (2015). Relevamiento del cultivo de Cebada cervecera en Uruguay. *Revista Cangüé*, 36, 19–22.

Hoffman, E., Fernández, R., Baeten, A., & Cadenazzil, M. (2009). Caracterización de Cultivares de Trigo Año 2008. Facultad de Agronomía EEMAC, 1–27.

Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H. & Gisbert Blanquer, J. M., 2010. Métodos para la determinación del tiempo de concentración (tc) de una cuenca hidrográfica, s.l.: s.n.

INIA Salto Grande. (2009). Reduciendo Incertidumbres: el riego en la productividad de los cítricos. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) Avances de Investigación, 576.

INIA Treinta y Tres, INIA Tacuarembó. (2005). Seminario de actualización técnica. Reproducción ovina: recientes avances realizados por el INIA. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2403/1/14432120510090700.pdf>

- INIA, Facultad de Agronomía, JUNAGRA, & AHPI. (2004). Directivas y Normas - Maíz Dulce. Programa de Producción Integrada, 1–14.
- INIA. (n.d.). Predicción de estados fenológicos de soja y otros cultivos de verano. In E. Hoffman, L. Viega, O. Ernst, & L. Gimenez (Eds.), *Alertas y Herramientas*. Montevideo: Facultad de Agronomía UDELAR.
- Instituto Nacional de Carnes [INAC]. (2017). Anuario Estadístico 2017.
- Instituto Nacional de Vitivinicultura [INAVI]. (2017). Estadísticas de Viñedos 2017. Datos departamentales.
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*. (Intergovernmental Panel on Climate Change, Ed.). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Irigoyen, A. (2009). Presupuestación forrajera – Parte 1. *Plan Agropecuario*, 132, 48–53.
- Irigoyen, A. (2011). *Presupuestación Forrajera*. Montevideo: Banco Interamericano de Desarrollo. MGAP. Instituto Plan Agropecuario.
- Irigoyen, A., & Perrachon, J. (2002). Sorgo granífero. *Revista Del Plan Agropecuario*, 123, 52–55.
- Jaramillo N (2014). Evaluación holística del riesgo sísmico en zonas urbanas y estrategias para su mitigación. Aplicación a la ciudad de Mérida-Venezuela. Ph.D. Thesis. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Khazai B, Bendimerad F, Cardona OD, Carreño ML, Barbat AH, Burton CG (2015). A guide to measuring urban risk resilience. Principles, tools and practice of urban indicators. Earthquake Megacities Initiative, Manila.
- Kirpich, Z. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 6, 362.



- Koutsoyiannis, D., & Onof, C. (2001). Rainfall disaggregation using adjusting procedures on a Poisson cluster model. *Journal of Hydrology*, 246, 109-122.
- Kull, D., & Feldman, A. (1998). Evolution of Clark's Unit Graph Method to Spatially Distributed Runoff. *Journal of Hydrologic Engineering*, 3(1), 9-18.
- Mari, S. (2003). Sorgo: Planificando la siembra. *Revista Del Plan Agropecuario*, 56–58.
- Marulanda MC, Cardona OD, Barbat AH (2009). Robustness of the holistic seismic risk evaluation in urban centers using the USRi, *Nat. Hazards*. 49(3): 501-516.
- Marulanda MC, Carreño ML, Cardona OD, Ordaz M, Barbat AH (2013). Probabilistic earthquake risk assessment using CAPRA: application to the city of Barcelona, Spain, *Nat. Hazards*. 69:59-84.
- Marulanda, MC, Cardona OD, Marulanda, P, Carreño ML, Barbat AH (2018). Evaluating seismic risk from a holistic perspective to improve resilience: the un evaluation at global level. *Proceedings of 16th European Conference on Earthquake Engineering*. Thessaloniki.
- Methol, M. & Silveira, D. (2013). Las Condiciones de Sequía y Estrategias de Gestión en Uruguay. Recuperado de: [http://www.droughtmanagement.info/literature/UNW-DPC\\_NDMP\\_Country\\_Report\\_Uruguay\\_2013.pdf](http://www.droughtmanagement.info/literature/UNW-DPC_NDMP_Country_Report_Uruguay_2013.pdf)
- MGAP, Mesa Nacional de Trigo, Mesa Tecnológica de Oleaginosas, & Mesa Nacional de Entidades de Cebada Cervecera. (2013). *Guía de Buenas Prácticas Agrícolas para sistemas con agricultura de secano en Uruguay*.
- MGAP. (2014). Información requerida para el Análisis de Riesgo de Plagas para el ingreso de grano de maíz (*Zea mays*) procedente de Uruguay. Dirección General de Servicios Agrícolas. División Protección Agrícola.

- MGAP. (2015). Información requerida para el Análisis de Riesgo de Plagas para el ingreso de grano de arroz (*Oryza sativa*) de Uruguay. Dirección General de Servicios Agrícolas. División Protección Agrícola.
- MGAP. (2017). Información requerida para el Análisis de Riesgo de Plagas para el ingreso de grano de trigo (*Triticum aestivum*) de Uruguay. Dirección General de Servicios Agrícolas. División Protección Agrícola.
- MGAP-FAO. (2013). Clima de Cambios. Nuevos Desafíos de Adaptación en Uruguay. Compilado. Montevideo: FAO. Recuperado de: <http://www.fao.org/climatechange/84982/es/>
- MGAP-FAO. (2013). Clima de Cambios. Nuevos Desafíos de Adaptación en Uruguay. Compilado. Montevideo: FAO. Recuperado de: <http://www.fao.org/climatechange/84982/es/>
- Micheloud, N. (2012). Comportamiento Fenológico - Reproductivo de variedades de cítricos en la zona centro de la Provincia de Santa Fe. Universidad Nacional del Litoral.
- Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. República Oriental del Uruguay [MGAP]. (2015) El Desarrollo Agropecuario y Agroindustrial del Uruguay. Montevideo: MGAP- Recuperado de: <http://cienciassociales.edu.uy/wp-content/uploads/sites/2/2016/07/Libro-50AniversarioOPYPA.pdf>
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Dirección de Estadísticas Agropecuarias [MGAP-DIEA]. (2016a). Encuesta Agrícola "Primavera 2016".
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Dirección de Estadísticas Agropecuarias [MGAP-DIEA]. (2016b). Encuesta Citrícola "Primavera 2016".
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Dirección de Estadísticas Agropecuarias [MGAP-DIEA]. (2017a). Anuario Estadístico Agropecuario 2017.

Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Dirección de Estadísticas Agropecuarias [MGAP-DIEA]. (2017b). Encuesta Agrícola "Invierno 2017".

Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente [MVOTMA]. (2011). Manual de diseño y construcción de pequeñas presas (Vol. Volumen 1: Diseño Hidrológico / Hidráulico). Montevideo. Obtenido de [http://www.fagro.edu.uy/hidrologia/riego/Manual%20Pequeñas%20Presas%20V1-v1\\_01.pdf](http://www.fagro.edu.uy/hidrologia/riego/Manual%20Pequeñas%20Presas%20V1-v1_01.pdf)

Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente [MVOTMA]. (2018). Mapa de Cobertura del Suelo del 2015.

Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. Journal of Hydrology, 391(1–2), 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>

Monfreda, C., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2008). Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. Global Biogeochemical Cycles, 22(1), 1–19. <https://doi.org/10.1029/2007GB002947>

Montes, E., & Bartaburu, D. (2007). Aprendiendo de las sequías: Análisis de las estrategias de los productores de Artigas y Salto en base a los datos de DICOSE. Revista Plan Agropecuario, Mayo (122). Recuperado a partir de <https://www.planagropecuario.org.uy/web/magazine/view/id/131.html#>

Oficina de las Naciones Unidas para Reducción de Riesgo de Desastres [UNISDR]. (2016). Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030. Disponible en línea [https://www.unisdr.org/files/43291\\_spanishsendaiframeworkfordisasterri.pdf](https://www.unisdr.org/files/43291_spanishsendaiframeworkfordisasterri.pdf)

Organizacion de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2017). The impact of disasters and crises on agriculture and food security. 2018. <http://www.fao.org/3/I8656EN/i8656en.pdf>

Otero, A. (2004). Raleo de frutos en Mandarina Satsuma y otros cítricos. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) Serie Técnica, 140.

Paolino, C., Methol, M. & Quintans, D. (2010) Estimación del Impacto de una Eventual Sequía en la Ganadería Nacional y Bases para el Diseño de Políticas de Seguros. En Anuario OPYPA Montevideo. Recuperado de: <http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/oficina-de-programacion-y-politicas-agropecuarias/publicaciones/anuarios-opypa/2010>

Paolino, C., Methol, M., & Quintans, D. (2010). Estimación del impacto de una eventual sequía en la ganadería nacional y bases para el diseño de políticas de seguros. Montevideo.

Parker, G. (2014). Hydraulics of mountain rivers.

Paullier, J., Arboleda, J., Campelo, E., Maeso, D., & Giménez, G. (2014). Producción integrada de maíz dulce. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) Boletín de Divulgación, 106.

Peters, J., & Easton, D. (1996). Runoff Simulation Using Radar Rainfall Data. Water Resources Bulletin, 32(4), 753-760.

PNUD (2007). Uruguay: El Cambio Climático Aquí y Ahora. Material Complementario del Informe Mundial sobre Desarrollo Humano 2007-2008. Montevideo: PNUD. Recuperado de: [http://archivo.presidencia.gub.uy/\\_web/noticias/2007/12/pnud/UruguayIDHElcambioclimaticoaquiyahora2007.pdf](http://archivo.presidencia.gub.uy/_web/noticias/2007/12/pnud/UruguayIDHElcambioclimaticoaquiyahora2007.pdf)

PNUD (2018). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Disponible en línea <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>

- Poppe, M. (2016). Simulating the water footprint of woodies in AquaCrop and Apex. University of Twente.
- Posada, L., 1994. Transporte de sedimentos. Medellín: Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Minas.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2011). FAO cropwater productivity model to simulate yield response to water AquaCrop. In Reference Manual of AQUACROP (p. 56).
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T., & Fereres, E. (2017). Calculation Procedures. In AquaCrop Version 6.0 Reference Manual. Rome: FAO.
- Rao, A., & Kao, S. (2006). Statistical Analysis of Indiana Rainfall Data. West Lafayette, Indiana: Publication FHWA/IN/JTRP-2006/08. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University. Obtenido de <https://doi.org/10.5703/1288284313446>
- República de Uruguay. (2016). Uruguay XXI. Oportunidades de Inversión: Agronegocios. Recuperado a partir de <http://www.uruguayxxi.gub.uy/inversiones/agronegocios/>
- Roa-Lobo Jose, K. U., 2012. Uso del índice topográfico de humedad (ITH) para el diagnóstico de la amenaza por desborde fluvial, estado Trujillo-Venezuela. Revista Geografica Venezolana, Volumen 53, pp. 109-126.
- Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D., & Isham, V. (1987). Some models for rainfall based on stochastic point processes. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical, 410(1839), 269-288.
- Rojo, J., 1997. Morfometría de cuencas, s.l.: s.n.
- Romero, R. (n.d.). Vulnerabilidad y adaptación de la cebada cervecera al cambio climático en el Uruguay. Colonia.

- Salgado-Gálvez MA, Zuloaga D, Velásquez CA, Carreño ML, Cardona OD, Barbat AH (2016). Urban seismic risk index for Medellín, Colombia, based on probabilistic loss and casualties' estimations, *Natural Hazards*. 80(3):1995-2021.
- Sartori, A., Lombardi Neto, F., & Genovez, A. (Out/Dez de 2005). Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 10(4), 5-18. Obtenido de <http://132.248.9.34/hevila/Revistabrasileiraderecursoshidricos/2005/vol10/no4/1.pdf>
- Sheffield, J., Goteti, G., & Wood, E. F. (2006). Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. *Journal of Climate*, 19(13), 3088–3111. <https://doi.org/10.1175/JCLI3790.1>
- Sheppard, J., & Hoyle, F. (2018). Water availability. Retrieved from <http://soilquality.org.au/factsheets/water-availability>
- Singh, V. P. (1988). *Hydrologic systems (Vols. Volume 1: Rainfall-runoff modelling)*. New Jersey: Prentice Hall.
- Soares de Lima Lapetina, JM. (2009). *Modelo Bioeconómico para la Evaluación del Impacto de la Genética y otras Variables sobre la Cadena Cárnica Vacuna en Uruguay*. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de estadística e Investigación Operativa Aplicadas y Calidad. Tesis de doctorado.
- Soil Conservation Service. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds*. Technical Release 55. Obtenido de [https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf)
- Soil Survey Staff. (2014). Keys to soil taxonomy. *Soil Conservation Service*, 12, 410. <https://doi.org/10.1109/TIP.2005.854494>

- Spínola, I. M. (1997). Cultivo de uva de mesa en Uruguay. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) Serie Técnica, 86.
- Springall, R. (1970). Hidrología. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería UNAM.
- Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Crop yield response to water (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66). Rome.
- Stricevic, R., Simic, A., Kusvuran, A., & Cosic, M. (2017). Assessment of AquaCrop model in the simulation of seed yield and biomass of Italian ryegrass. Archives of Agronomy and Soil Science, 63(9), 1301–1313. <https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1275580>
- Taub, D. (2010). Effects of Rising Atmospheric Concentrations of Carbon Dioxide on Plants. Nature Education Knowledge, 3(10), 21.
- Teixeira, L., Chreties, C. & Crisci, M., 2013. Estudio de la zona costera de Río Branco, s.l.: s.n.
- Tsakiris, G., Pangalou, D., & Vangelis, H. (2007). Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). Water Resources Management, 21(5), 821–833. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9105-4>
- Unidad GRAS del INIA [INIA-GRAS] (2012). Sistema de Información Geográfica. Disponible en: <http://sig.inia.org.uy/sigras/#Visualizador:departamentos,suelosHorizonteABaseConeatModificados>
- UNISDR (2011). GAR2011: Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction: Revealing risk, redefining development. Geneva, Switzerland: United Nations International Strategy for Disaster Reduction. ISBN 978-92-1-132030-5
- UNISDR (2013). GAR2013: Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction – From shared risk to shared value: The business case for disaster risk reduction.

Geneva, Switzerland: United Nations International Strategy for Disaster Reduction.  
ISBN 978-92-1-132038-1

UNISDR (2015). GAR2015: Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction – Making Development Sustainable: The Future of Disaster Risk Management. Geneva, Switzerland: United Nations International Strategy for Disaster Reduction. ISBN 978-92-1-132042-8

UNISDR. (2009). Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres. Estrategia Internacional Para La Reducción de Desastres de Las Naciones Unidas, 43.

UNISDR. (2015a). GAR. Informe de Evaluación Global Sobre la Reducción del Riesgo de Desastres. Hacia El Desarrollo Sostenible: El Futuro de La Gestión Del Riesgo de Desastres, 352.

UNISDR. (2015b). Proposed Updated Terminology on Disaster Risk Reduction: A Technical Review, (August), 1–31.

Uruguay XXI. (2018). Informe de Agronegocios. Montevideo: Uruguay XXI. Recuperado de: <http://www.uruguayxxi.gub.uy/informacion/wp-content/uploads/sites/9/2018/04/Informe-Agronegocios-Marzo-2018-Uruguay-XXI.pdf>

US Army Corps of Engineers. (2016a). Hydrologic Engineering Center - River Analysis System.

US Army Corps of Engineers. (2016b). 2DModeling – User’s Manual.

Velásquez C.A. (2015). La curva híbrida de riesgo: análisis retrospectivo y prospectivo del riesgo por fenómenos naturales. Ph.D. Thesis. Polytechnic University of Catalonia. Barcelona, Spain. <http://www.tdx.cat/handle/10803/392621>

Velásquez C.A., Cardona O.D., Carreño M.L. and Barbat A.H. (2014b) Retrospective assessment of risk from natural hazards, International Journal of Disaster Risk



Reduction, Volume 10, Part B, December 2014, Pages 477-489, ISSN 2212-4209, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdr.2014.05.005>.

Velásquez C.A., Cardona O.D., Mora M.G., Yamín L.E., Carreño M.L. and Barbat A.H. (2014a). Hybrid loss exceedance curve (HLEC) for disaster risk assessment. *Natural Hazards*. 72:455-479.

Vélez, J. J. y otros, 2013. Caso del anillo vial de región centro-sur del departamento de Caldas. Manizales: Universidad Nacional de Colombia: s.n.

Vélez, J. J., 2014. Apuntes de Clase. Modelación Hidrológica de cuencas. Manizales: s.n.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

Vilaró, F., Pereira, G., & Rodríguez, G. (2004). Características y recomendaciones de manejo del cultivar de papa INIA-IPORÁ. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) Boletín de Divulgación, 86, 4.

Vinetur. (2016). El trabajo de la viña, mes a mes. Retrieved from <https://www.vinetur.com/2016081025029/el-trabajo-de-la-vina-mes-a-mes.html>

Vyeniello, D. L. (2014). Determination of Seasonal Crop Coefficients for the Cal Poly Campus Vineyard Using the “ Paso Panel ” A Senior P. California Polytechnic State University.

Wilhite, D. A. (1993). The Enigma of Drought. En D. A. Wilhite (Ed.), *Drought Assessment, Management, and Planning: Theory and Case Studies* (pp. 3–15). Boston, MA: Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3224-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3224-8_1)

Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, 10(3), 111–120.

Williams, L. E., & Ayars, J. E. (2005). Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132(3–4), 201–211.  
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.07.010>

## **Glosario de Términos**

---

La lista de términos que se incluye en este glosario tomó como referencia el documento de Terminología sobre Reducción de Riesgo de Desastres de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR, 2009) y el Glosario de los documentos GAR Evaluación Global sobre la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR, 2015).

### **Amenaza**

Un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales.

### **AquaCrop**

Software que implementa la metodología de respuesta de cultivos al agua desarrollada por la FAO.

### **Cambio climático**

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) define al cambio climático como un “cambio en el estado del clima que se puede identificar (por ejemplo mediante el uso de pruebas estadísticas) a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede obedecer a procesos naturales internos o a cambios en los forzantes externos, o bien, a cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera o en el uso del suelo”.

### **Catástrofe**

Ruptura grave del funcionamiento de una sociedad, con pérdidas de vidas humanas, materiales y medio ambientales, y de una tal amplitud que excede las capacidades de la mencionada sociedad para enfrentarla.

### **Desastre**

Una seria interrupción en el funcionamiento de una comunidad o sociedad que ocasiona una gran cantidad de muertes al igual que pérdidas e impactos materiales, económicos

y ambientales que exceden la capacidad de la comunidad o la sociedad afectada para hacer frente a la situación mediante el uso de sus propios recursos.

### **Duración de la sequía**

Periodo de tiempo continuo, expresado en años, meses o semanas, en el que el parámetro indicador de sequía se encuentra por debajo de cierto valor crítico (Mishra & Singh, 2010).

### **ENOS El Niño Oscilación Sur**

Una interacción compleja del Océano Pacífico tropical y la atmósfera global que da como resultado episodios cíclicos de cambios en los patrones oceánicos y meteorológicos en diversas partes del mundo, frecuentemente con impactos considerables durante varios meses, tales como alteraciones en el hábitat marino, precipitaciones, inundaciones, sequías y cambios en los patrones de las tormentas.

### **Elementos expuestos**

La población, las propiedades, los sistemas u otros elementos presentes en las zonas donde existen amenazas y, por consiguiente, están sujetos a experimentar pérdidas potenciales. En el caso de las sequías agrícolas los elementos expuestos son los cultivos.

### **Evaluación del riesgo**

Una metodología para determinar la naturaleza y el grado de riesgo a través del análisis de posibles amenazas y la evaluación de las condiciones existentes de vulnerabilidad que conjuntamente podrían dañar potencialmente a la población, la propiedad, los servicios y los medios de sustento expuestos, al igual que el entorno del cual dependen.

### **Fenología**

Parte de la meteorología que estudia las repercusiones del clima sobre los fenómenos biológicos de los seres vivos.

### **Forcings antropogénicos (Representative Concentration Pathways RCPs)**

Escenarios que incluyen las series de tiempo de emisiones y concentraciones del conjunto total de gases de efecto invernadero, aerosoles y gases químicamente activos, así como uso de suelo y coberturas. Son escenarios representativos de las

características radiativas específicas según la combinación de niveles de concentración de gases en la atmósfera y sus trayectorias en el tiempo (IPCC, 2013).

### **Georeferenciación**

Es la técnica de posicionamiento espacial de un elemento en una localización geográfica única bien definida en un sistema de coordenadas específico.

### **Gestión del riesgo**

El enfoque y la práctica sistemática de gestionar la incertidumbre para minimizar los daños y las pérdidas potenciales.

### **Gestión del riesgo de desastres**

El proceso sistemático de utilizar directrices administrativas, organizaciones, destrezas y capacidades operativas para ejecutar políticas y fortalecer las capacidades de afrontamiento, con el fin de reducir el impacto adverso de las amenazas naturales y la posibilidad de que ocurra un desastre.

### **Gestión prospectiva del riesgo de desastres**

Actividades de gestión que abordan y buscan evitar el aumento o el desarrollo de nuevos riesgos de desastres.

### **Indicadores de sequía**

Variables o parámetros utilizados para describir las condiciones de las sequías (precipitación, temperatura, caudales). También se pueden entender como índices que son representaciones numéricas informatizadas de la gravedad de las sequías, determinadas mediante datos climáticos o hidrometeorológicos. (Organización Meteorológica Mundial (OMM) & Asociación Mundial para el Agua, 2016)

### **Intensidad de la sequía**

Es el valor medio de un parámetro indicador de sequía por debajo de un nivel crítico. Se mide como la severidad de la sequía dividida su duración (Mishra & Singh, 2010).

### **Modelos de circulación global**

Modelos matemáticos que simulan el clima con componentes acoplados de atmósfera, superficie terrestre y océano. Son ampliamente utilizados en el pronóstico del tiempo y para proyectar el cambio climático.

### **Pérdida anual esperada (PAE)**

Pérdida promedio estimada anualizada durante un largo período de tiempo, teniendo en cuenta todos los escenarios posibles de pérdidas en relación con distintos períodos de retorno

### **Pérdida máxima probable (PMP)**

Pérdida máxima que podría esperarse para un período de retorno determinado

### **Periodo de retorno**

Frecuencia promedio con la que se espera que se produzca una pérdida dada. Por lo general, se expresa en años, tales como 1 en X número de años. Esto no significa que se producirá una pérdida cada X número de años, sino más bien que ocurrirá una vez en promedio cada X número de años

### **Probabilidad**

Posibilidad de que ocurra una pérdida en comparación con todas las pérdidas posibles que pudieran suceder

### **Probabilidad de excedencia**

Posibilidad de que ocurra una pérdida de una magnitud determinada o que esta sea excedida en un lapso de tiempo definido

### **Pronóstico**

Una declaración certera o un cálculo estadístico de la posible ocurrencia de un evento o condiciones futuras en una zona específica.

### **Riesgo**

La combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas.

### **Riesgo de desastres**

Las posibles pérdidas que ocasionaría un desastre en términos de vidas, las condiciones de salud, los medios de sustento, los bienes y los servicios, y que podrían ocurrir en una comunidad o sociedad particular en un período específico de tiempo en el futuro.

### **Riesgo intensivo**

El riesgo asociado con la exposición de grandes concentraciones poblacionales y actividades económicas a intensos eventos relativos a las amenazas existentes, los cuales pueden conducir al surgimiento de impactos potencialmente catastróficos de desastres que incluirían una gran cantidad de muertes y la pérdida de bienes.

### **Riesgo extensivo**

El riesgo generalizado que se relaciona con la exposición de poblaciones dispersas a condiciones reiteradas o persistentes con una intensidad baja o moderada, a menudo de naturaleza altamente localizada, lo cual puede conducir a un impacto acumulativo muy debilitante de los desastres.

### **Sequía**

Ausencia prolongada o déficit notable de precipitación (OMM, Organización Meteorológica Mundial).

### **Severidad de la sequía**

Indica una deficiencia acumulada de un parámetro indicador de sequía por debajo de un nivel crítico (Mishra & Singh, 2010).

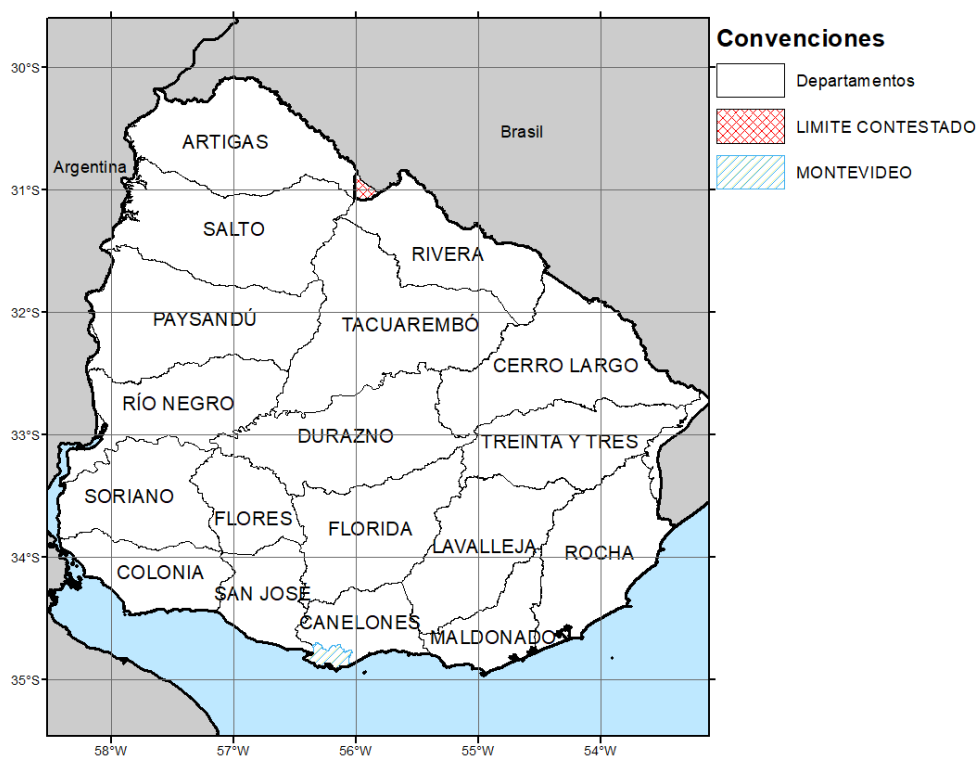
### **Vulnerabilidad**

Las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza.

## ANEXOS

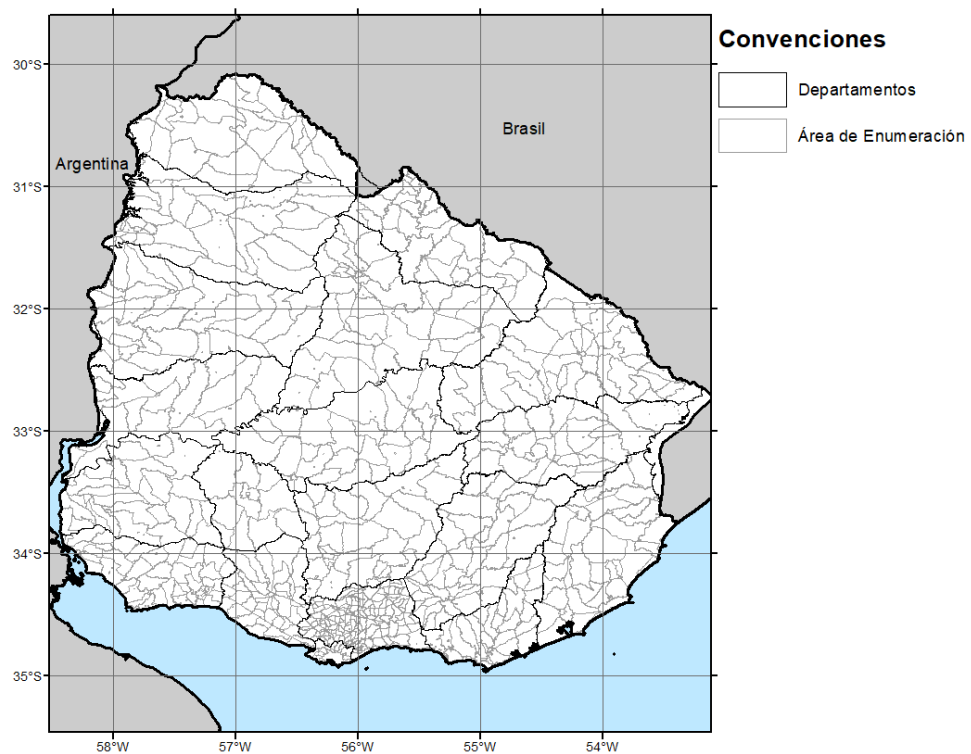
### A.1 Cartografía de referencia

En este Anexo se presentan mapas de referencia para los lectores que no estén familiarizados con la división política administrativa de Uruguay y a la cuál se hace referencia a lo largo del documento.



Mapa de departamentos de la República de Uruguay





Mapa de Áreas de Enumeración Censal

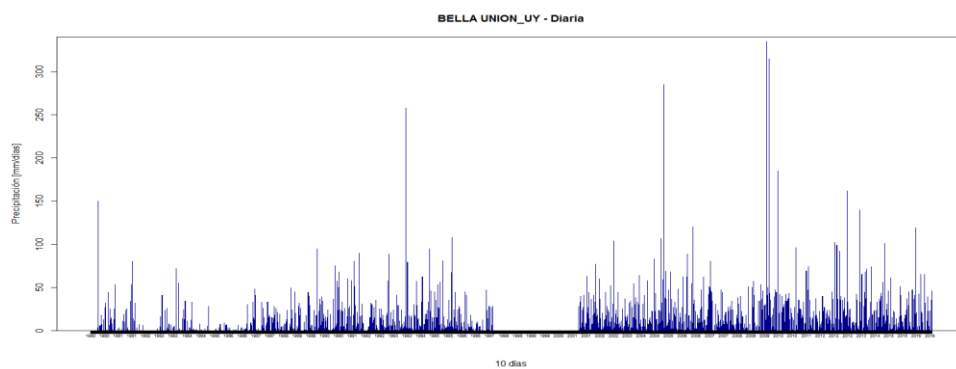
## A. 2 Fuentes de información climática

---

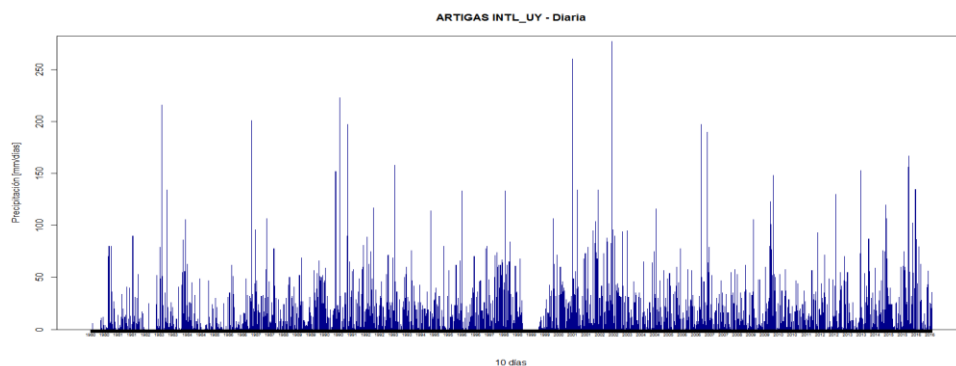
### A. 2.1 Información disponible en base de datos NCEI

A continuación, se presenta la serie de información de precipitación total disponible para las estaciones de Uruguay de la base de datos del Centro Nacional de Información Ambiental de Estados Unidos, información obtenida de la página web <https://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/cdo>. La información se presenta para 18 estaciones ubicadas en Uruguay, administradas por el Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET). Las series que se presentan muestran la información faltante.

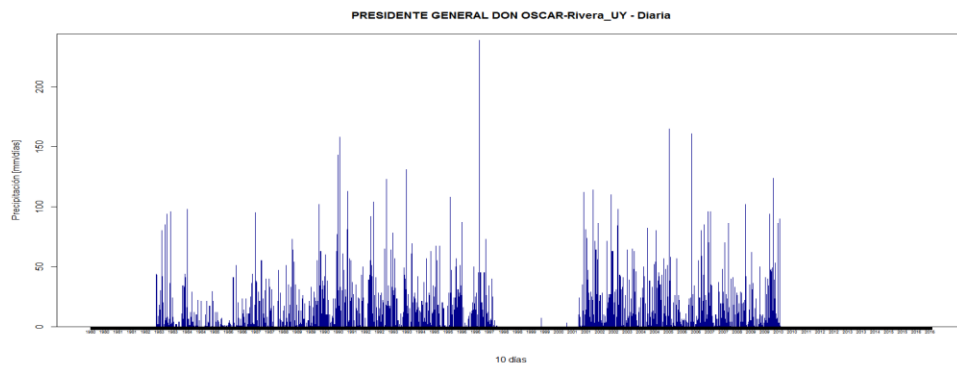
#### BELLA UNION



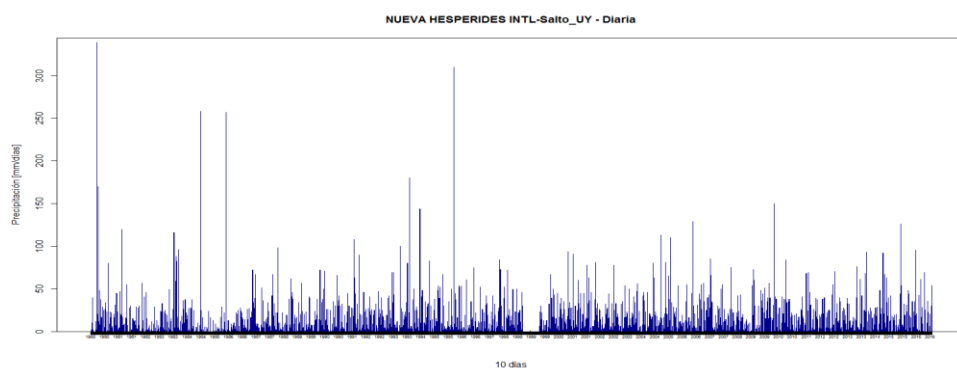
#### ARTIGAS INTL



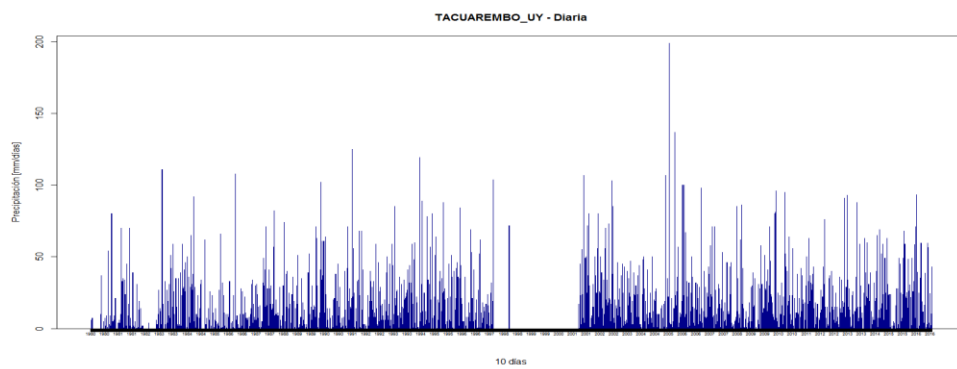
#### PRESIDENTE GENERAL DON OSCAR-Rivera



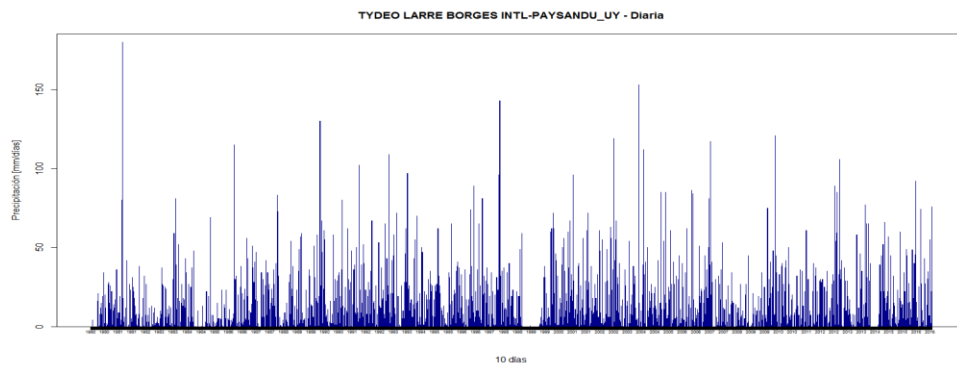
## NUEVA HESPERIDES INTL-Salto



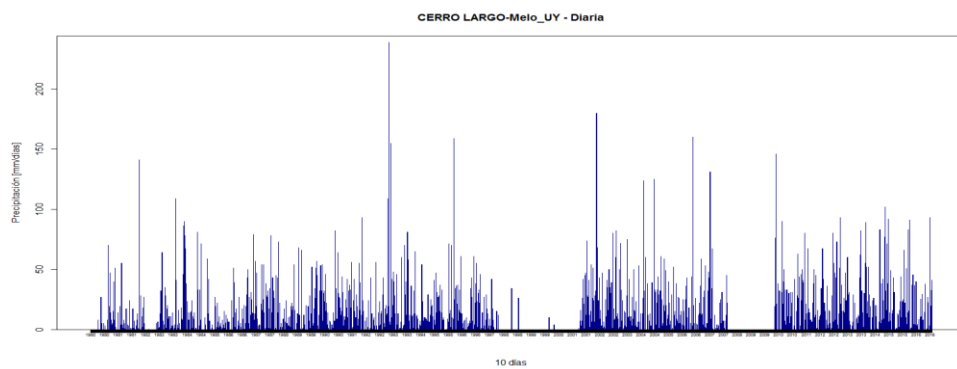
## TACUAREMBO



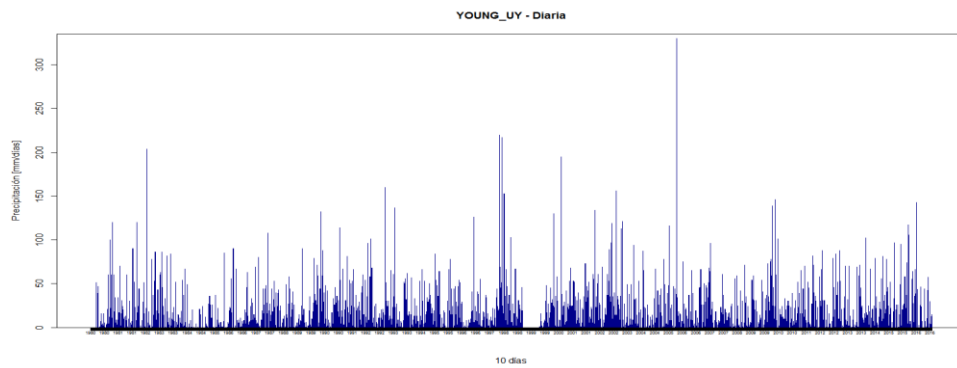
## TYDEO LARRE BORGES INTL-PAYSANDU



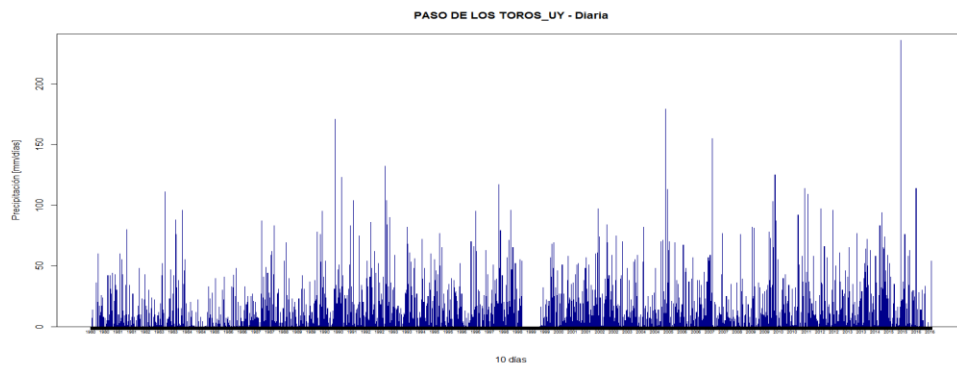
## CERRO LARGO-MELO



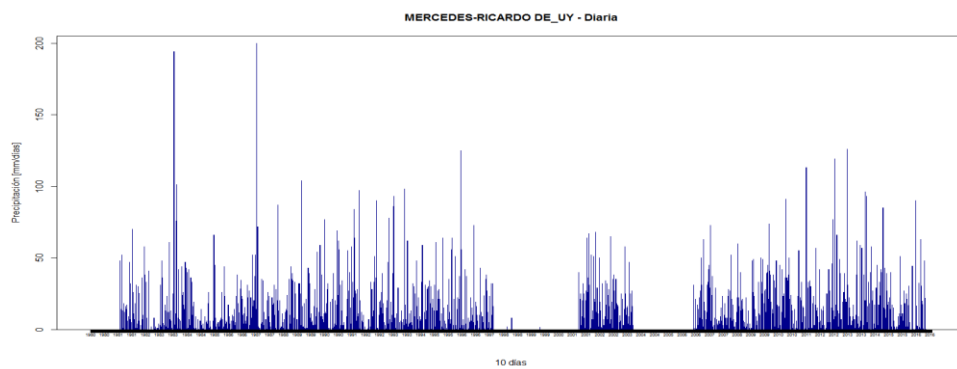
## YOUNG



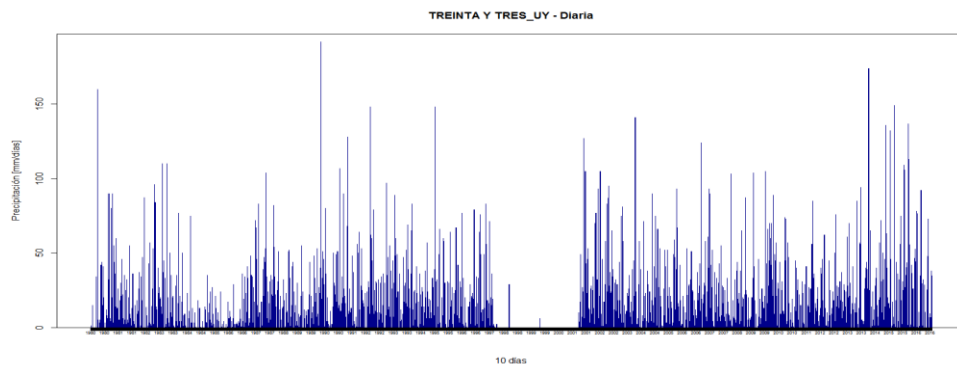
## PASO DE LOS TOROS



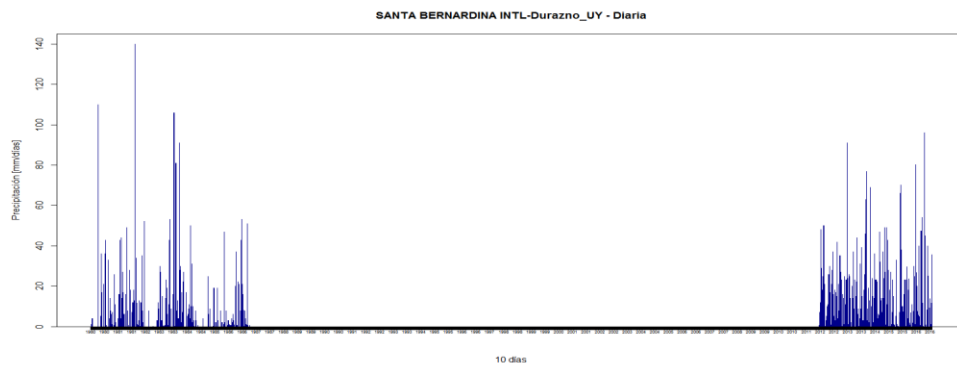
## MERCEDES-RICARDO DE



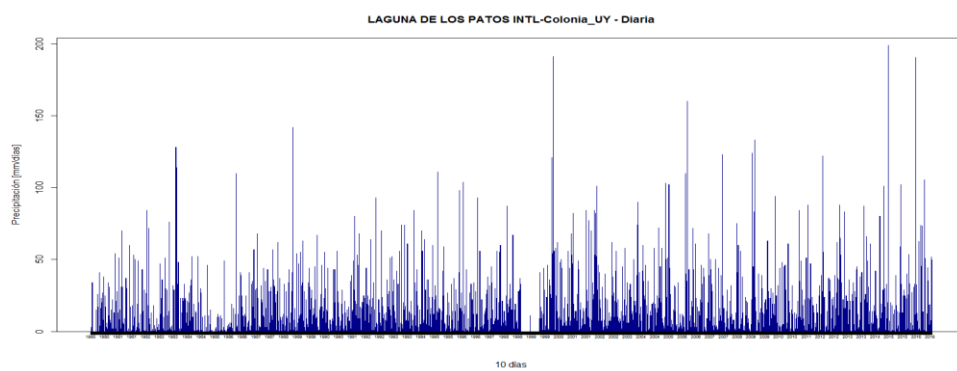
## TREINTA Y TRES



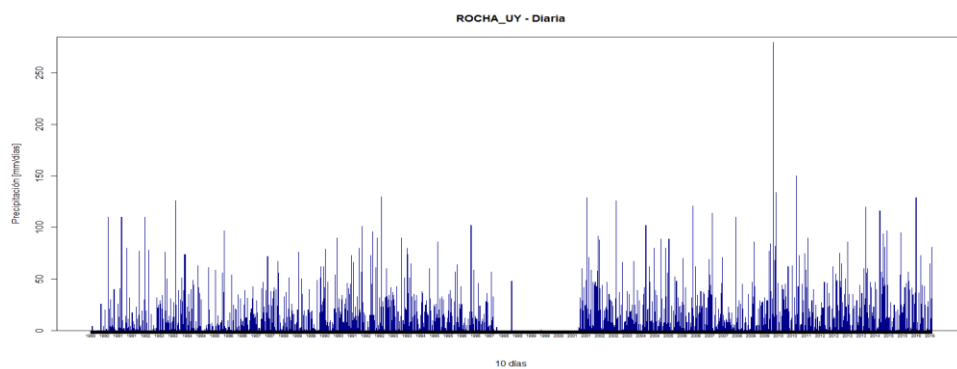
## SANTA BERNARDINA INTL-DURAZNO



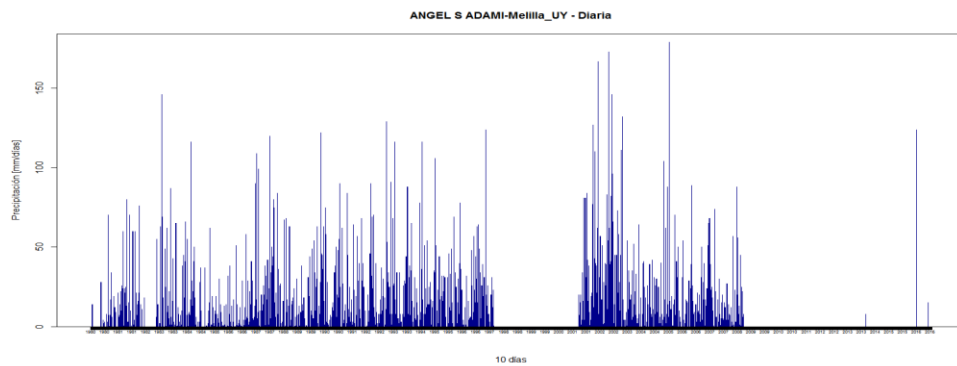
## LAGUNA DE LOS PATOS INTL-Colonia



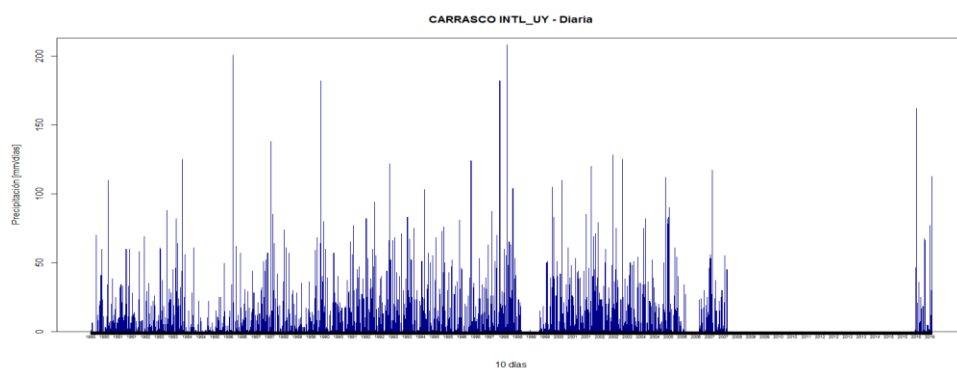
## ROCHA



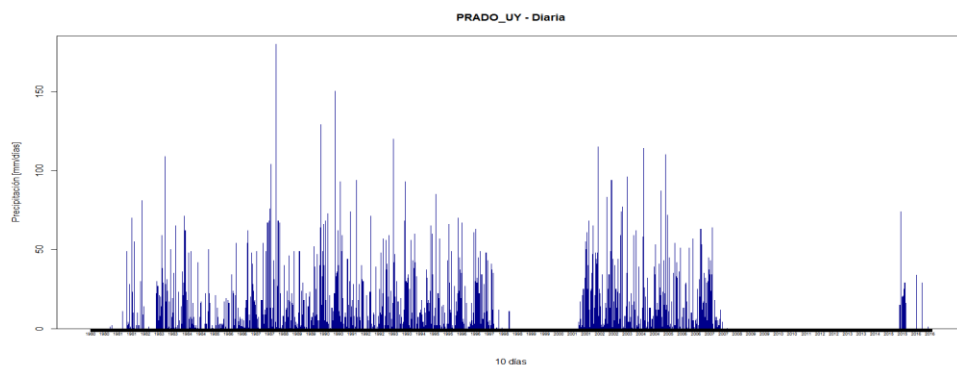
## ANGEL S ADAMI-MELILLA



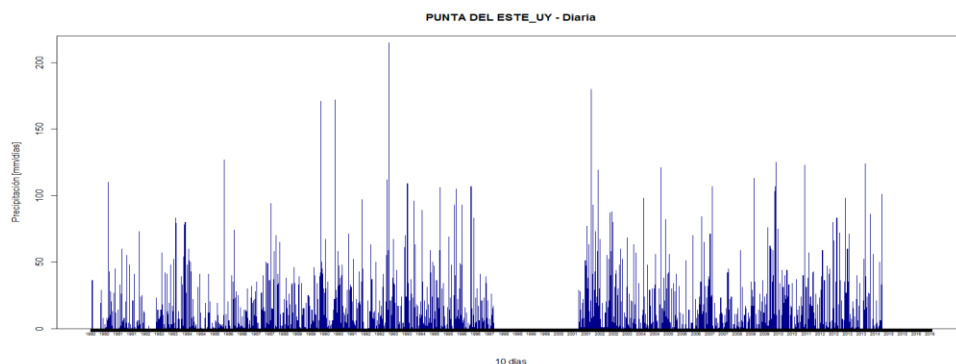
## CARRASCO INTL



## PRADO



## PUNTA DEL ESTE



### A. 2.2 Información suministrada por IDU DINAGUA para evaluación a escala nacional

Se recibieron registros diarios de precipitación de 50 estaciones del DINAGUA, resumido en la siguiente tabla:

<b>Cod_est</b>	<b>Lat</b>	<b>Long</b>	<b>Nombre</b>	<b>Nom_2</b>
1013	-30.2	-57.6	Bella Unión	BU
1040	-30.4	-57.5	Tomas Gomenzoro	TG
1050	-30.4	-56.5	Artigas	ART
1147	-30.92	-55.52	EM Rivera	EM Rivera
1232	-31.3	-57.4	Valentín	VA
1283	-31.4	-58.0	Salto	SAL
1374	-31.60	-55.47	Minas de Corrales	MdC
1405	-31.7	-56.0	Tacuarembó	TAC
1440	-31.9	-56.2	Valle Eden	VE
1496	-31.88	-54.20	Acegua	Acegua
1537	-31.98	-54.15	Pueblo Noblia	PN
1665	-32.27	-54.18	Tres Boliches	TB
1672	-32.2	-58.1	Paysandú	PAY
1709	-32.4	-54.2	Melo	MEL



<b>Cod_est</b>	<b>Lat</b>	<b>Long</b>	<b>Nombre</b>	<b>Nom_2</b>
1712	-32.35	-53.83	Cañas	Cañas
1766	-32.59	-57.4	Paso de la Cruz	PC
1792	-32.52	-54.70	Tres Islas	Tres Islas
1841	-32.66	-54.24	Arbolito	Arbolito
1856	-32.7	-57.6	Young	YOU
1914	-32.8	-56.5	Paso de Toros	PDT
1983	-32.88	-54.27	Dionisio	DI
2145	-33.3	-58.1	Mercedes	MER
2154	-33.3	-57.1	Marincho	MA
2179	-33.2	-54.4	Treinta y Tres	TYT
2206	-33.4	-56.5	Durazno	DUR
2272	-33.4	-54.5	J.P. Varela	JV
2289	-33.5	-57.8	Palmitas	PA
2297	-33.5	-57.0	Trinidad	TRI
2422	-33.7	-53.5	Chuy	CH
2430	-33.75	-57.62	Sta. Catalina	Sta. Catalina
2476	-33.90	-57.82	Ombúes de Lavalle	OdL
2480	-33.90	-57.38	Florencio Sánchez	FS
2486	-33.9	-56.8	Pintos	PI
2498	-33.9	-55.5	Cerro Colorado	CC
2520	-33.98	-58.23	El Cerro	El Cerro
2583	-34.1	-56.1	Florida	FLO
2611	-34.17	-58.02	Conchillas	Conchillas
2670	-34.28	-56.22	Mendoza	Mendoza
2704	-34.35	-57.00	Ecilda Paullier	EP
2774	-34.5	-57.8	Colonia	COL
2804	-34.5	-54.3	Rocha	ROC

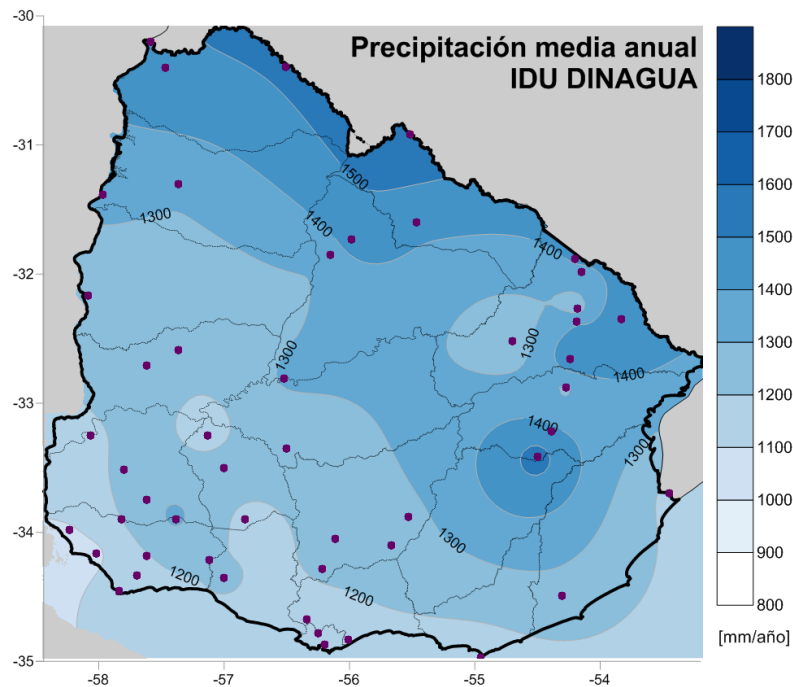
Cod_est	Lat	Long	Nombre	Nom_2
2867	-34.78	-56.25	EM Melilla	EM Melilla
2887	-34.87	-56.20	Prado	PR
2889	-34.8	-56.0	Carrasco	CAR
2588A	-34.10	-55.67	Casupá	Casupá
2657A	-34.18	-57.62	Tarariras	Tarariras
2662A	-34.22	-57.12	Cufre	Cufre
	-34.97	-54.95	Punta del Este	PE
	-34.34	-57.69	La Estanzuela	La Estanzuela
	-34.67	-56.34	Las Brujas	Las Brujas

Su ubicación se muestra en el siguiente mapa:



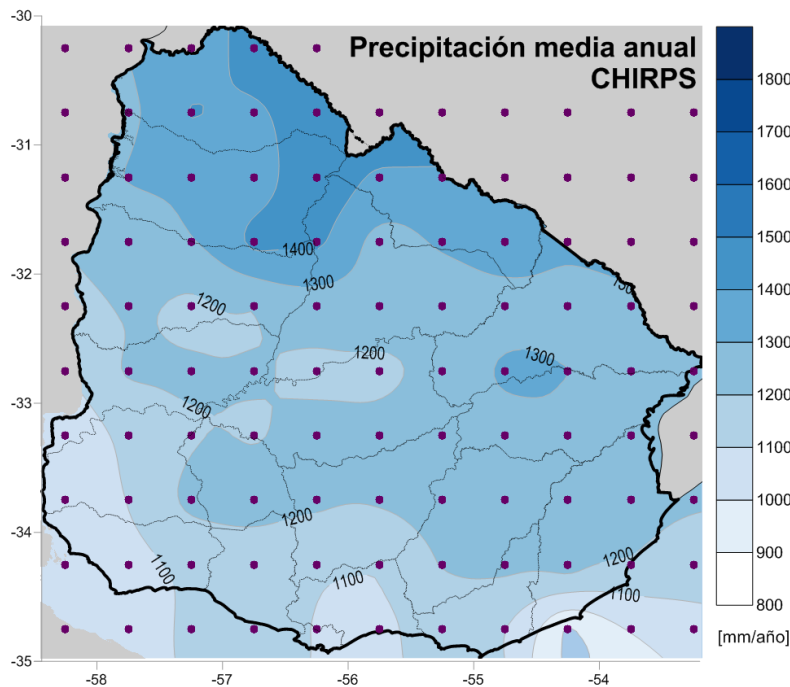
La media multianual de precipitación a partir de los registros del DINAGUA se muestran en el siguiente mapa. Es importante anotar que el mapa se obtuvo luego de un proceso de interpolación espacial tipo kriging, que permite estimar el valor de la precipitación anual en cada punto del mapa a partir del variograma según la ubicación de los puntos. Por la dispersión de los puntos, hay departamentos como Lavalleja, Maldonado y Paysandú que no tienen estaciones mientras que en el área de Montevideo la densidad de

estaciones es alta. Estas diferencias de densidad de estaciones en el área del país tienen efecto sobre la interpolación espacial y el mapa resultante.



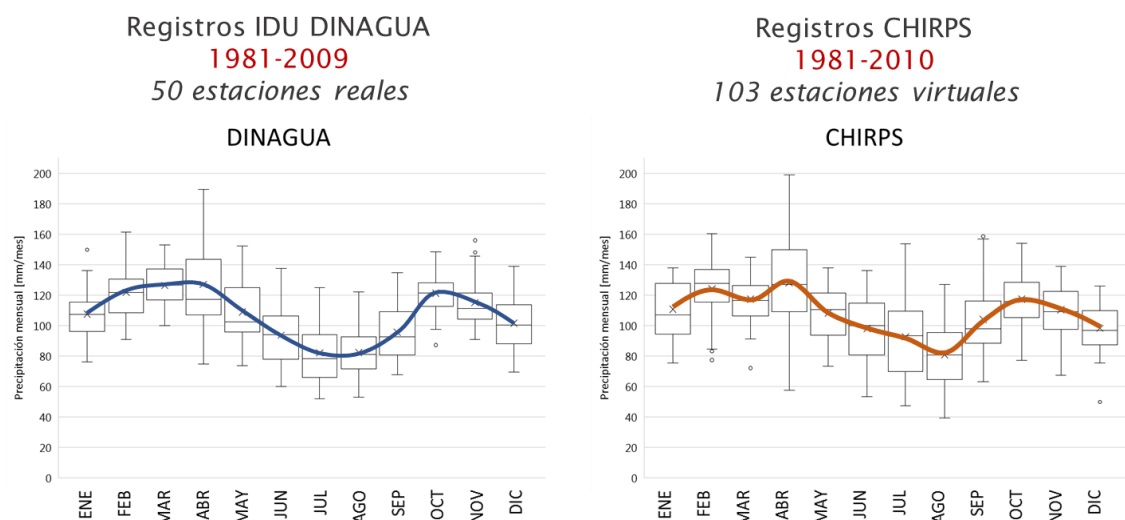
### A. 2.3 Comparación dataset CHIRPS con respecto a registros de estaciones en tierra para análisis de amenaza por sequía

A continuación se compara la información diaria de precipitación suministrada por DINAGUA con la información diaria de precipitación de la base de datos CHIRPS. La siguiente imagen es el mapa de la media multianual de la precipitación total anual a partir de los datos de CHIRPS. En este caso se obtuvo información para 103 estaciones virtuales, cuya ubicación también se muestra en el mapa.

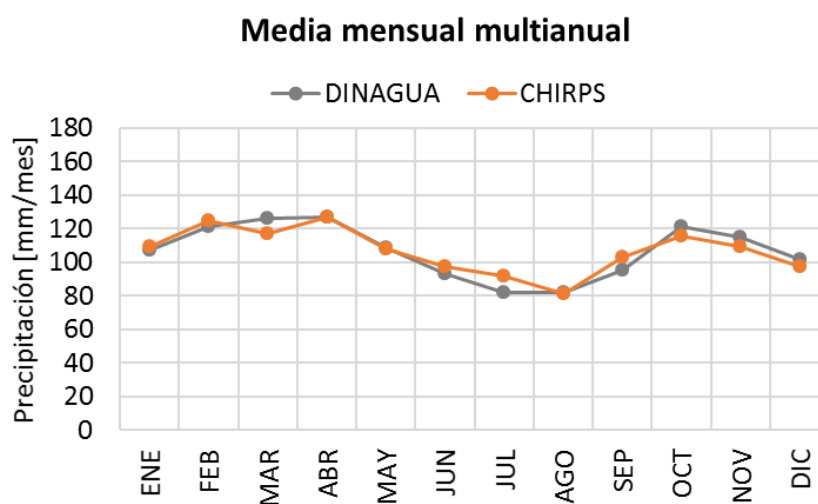


Al comparar los dos mapas anteriores (en los que los puntos indican la ubicación de estaciones reales o virtuales) se puede ver que en general los valores de precipitación anual son más altos según los registros del DINAGUA, en especial hacia la zona norte del país. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, estos mapas son resultado de interpolación espacial que depende de la ubicación de los puntos de información, por lo que la comparación de los mapas no brinda mucha información y si tiene una alta incertidumbre.

Si se comparan los valores medios mensuales de las dos fuentes de información, se obtiene que las medias de precipitación mensual siguen el mismo régimen de precipitación con temporadas de lluvias entre febrero y abril y una segunda en octubre, mientras que los meses de menos lluvia están entre junio y septiembre que coincide con la época de verano. Los diagramas de cajas y dispersión de la precipitación mensual acumulada para las 50 estaciones de DINAGUA y las 103 estaciones virtuales para CHIRPS se muestran a continuación.

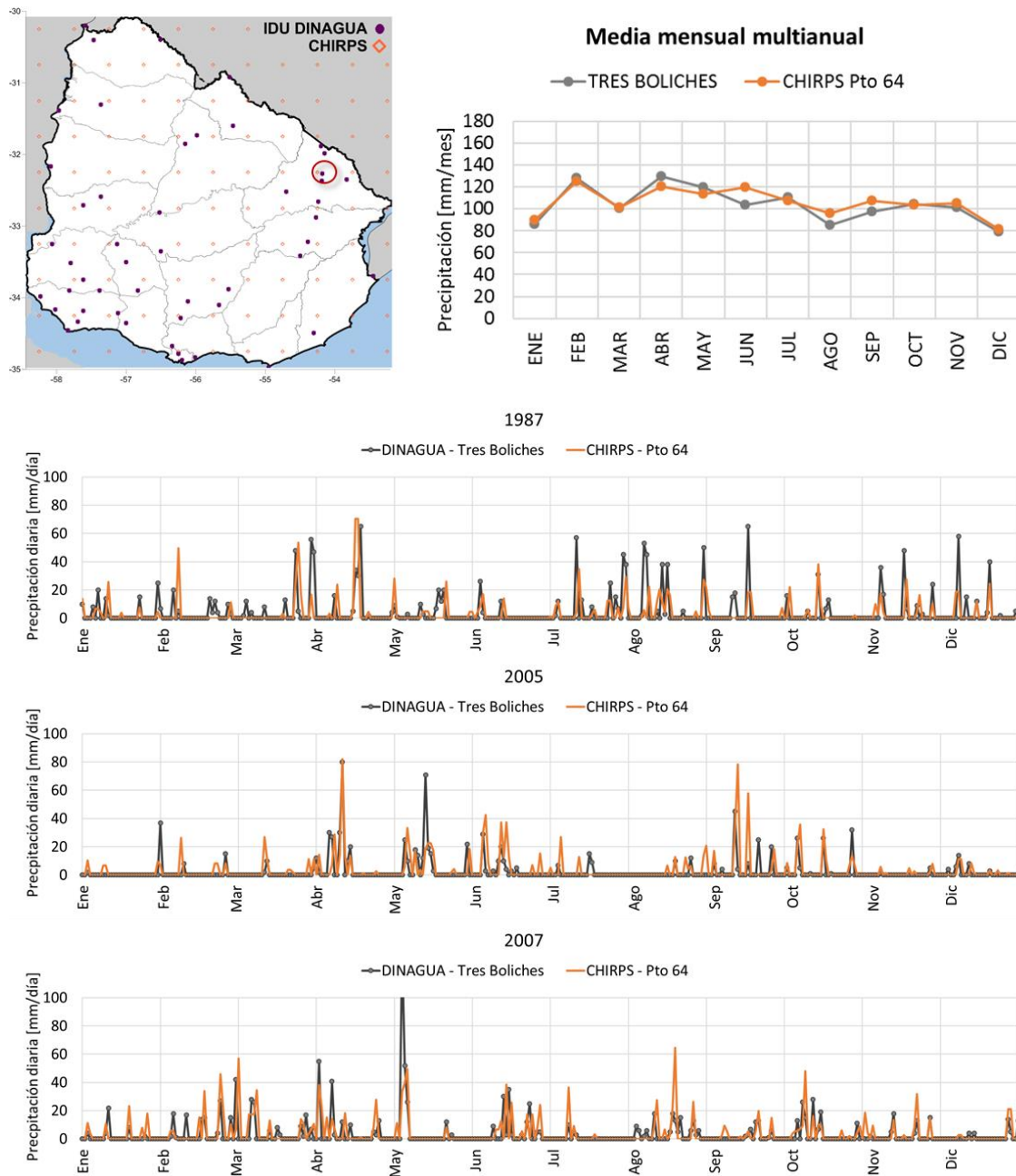


Se presenta una diferencia considerable en el mes de marzo, en la que la media de precipitación mensual es mayor para los registros de DINAGUA que para los registros de CHIRPS. Por el contrario, en los meses de junio y septiembre los registros de precipitación mensual de CHIRPS parecen sobreestimar los registros de DINAGUA, como se ve en la siguiente gráfica de la media mensual multianual.



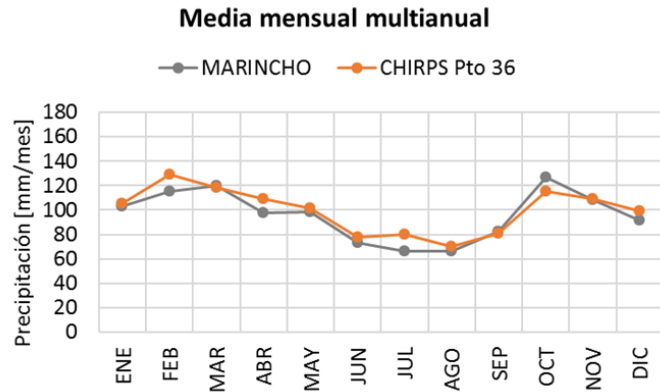
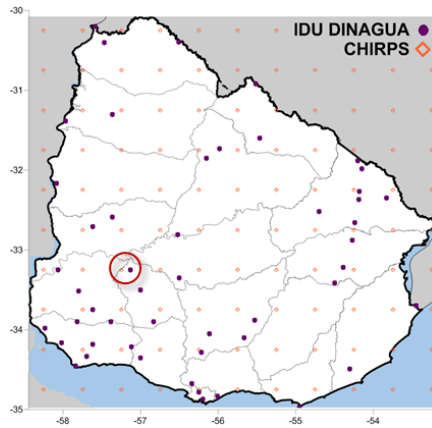
El análisis de la información se complementó con la comparación de puntos cercanos de los registros del DINAGUA a los puntos de la malla 0.5°x0.5° usada para extraer los datos de CHIRPS. Para cada par de puntos cercanos (que no implica que estén en la misma ubicación exacta) se muestra la media mensual y los registros diarios para años seleccionados (1987,2005,2007) con el fin de examinar la diferencia entre registros disponibles.

- DINAGUA Estación Tres Boliches vs. CHIRPS Pto 64 Departamento Cerro Largo

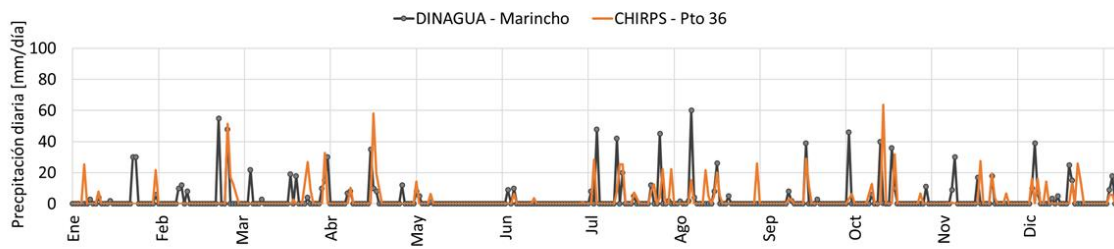


La comparación entre las medias mensuales de precipitación indica que los datasets presentan diferencias principalmente en los meses de junio, agosto y septiembre, que son los meses típicamente secos. Los valores diarios permiten concluir que el dataset de CHIRPS coincide en la fecha de ocurrencia de lluvias, aunque la magnitud de la lluvia tienda a subestimarse, con respecto a los registros de DINAGUA.

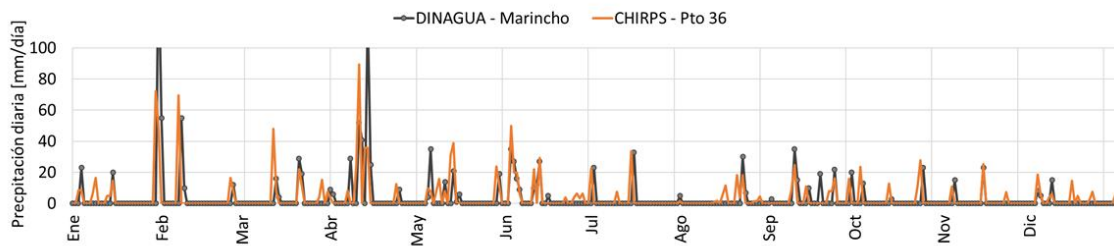
- DINAGUA Estación Marincho vs. CHIRPS Pto 36 Departamento Flores



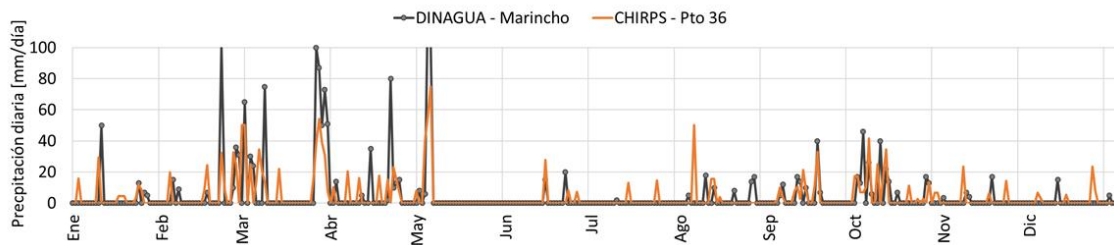
1987



2005

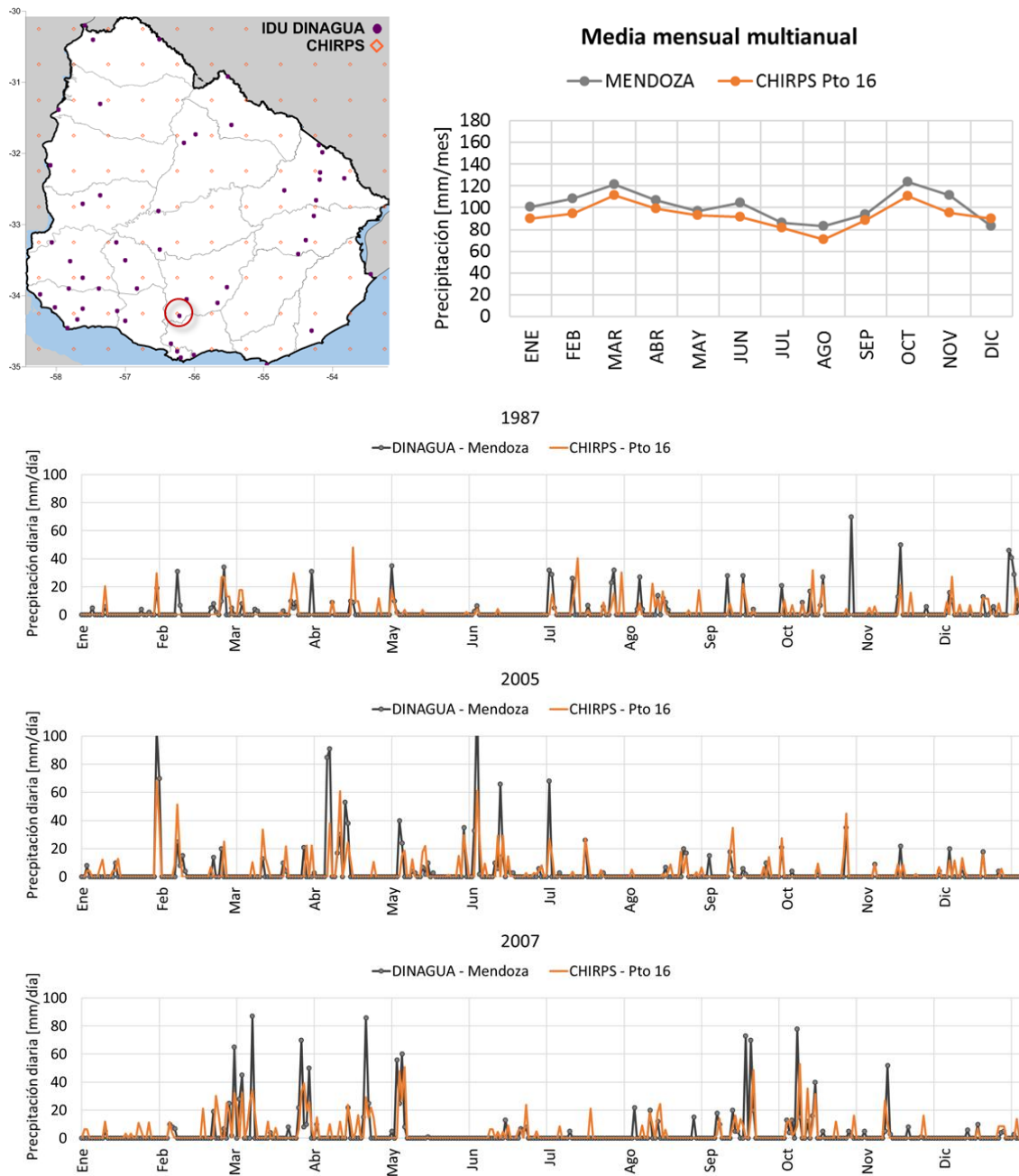


2007



La comparación entre las medias mensuales de precipitación indica que los datasets presentan diferencias principalmente en los meses de febrero, abril, julio y octubre, aunque se respeta el régimen pluvial de la zona. Los valores diarios permiten concluir que el dataset de CHIRPS coincide en la fecha de ocurrencia de lluvias, aunque la magnitud de la lluvia tienda a subestimarse, con respecto a los registros de DINAGUA. Para efectos de la evaluación de la amenaza por sequía es importante notar que el dataset CHIRPS se ajusta a los periodos de no lluvia típicos de mitad de año.

- DINAGUA Estación Mendoza vs. CHIRPS Pto 16 Departamento Florida

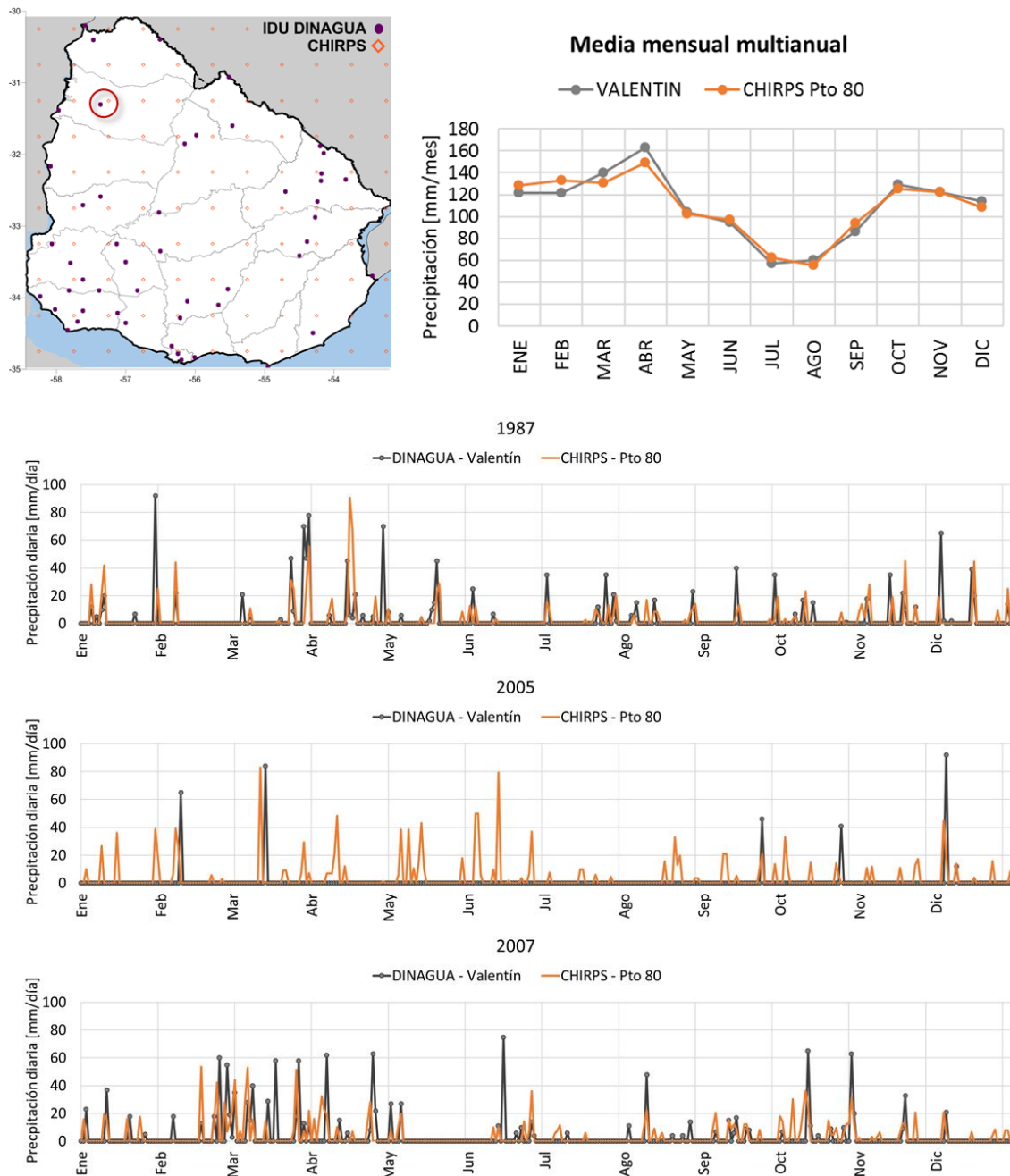


La comparación entre las medias mensuales de precipitación indica que para todos los meses el dataset de DINAGUA tiene valores más altos de precipitación que el dataset de CHIRPS para estos puntos cercanos, sin embargo se respeta la variabilidad intra-anual de la lluvia. Los valores diarios permiten concluir que el dataset de CHIRPS coincide en la fecha de ocurrencia de lluvias, aunque la magnitud de la lluvia tiende a subestimarse, con respecto a los registros de DINAGUA, que explica las medias



mensuales menores. Para efectos de la evaluación de la amenaza por sequía es importante notar que el dataset CHIRPS se ajusta a los periodos de no lluvia típicos de mitad de año.

- DINAGUA Estación Valentín vs. CHIRPS Pto 80 Departamento Salto



La comparación entre las medias mensuales de precipitación indica que se presentan diferencias en el primer cuatrimestre del año (enero a abril) entre los datasets de DINAGUA y CHIRPS. Sin embargo, las diferencias no son muy altas y se mantiene el

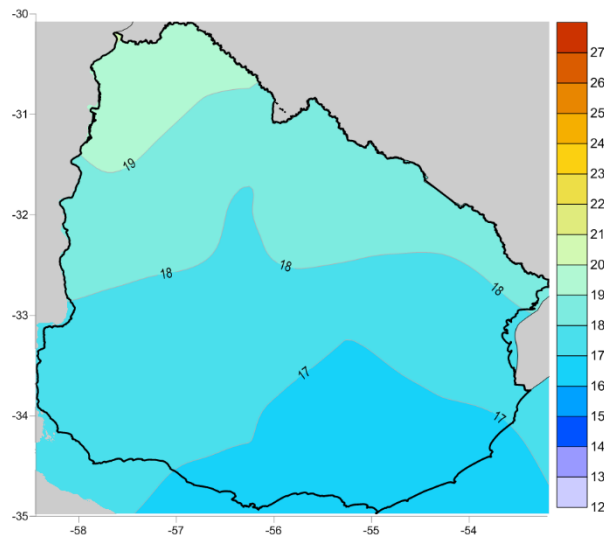
régimen pluvial de la zona. Los valores diarios permiten concluir que el dataset de CHIRPS coincide en la fecha de ocurrencia de lluvias, aunque la magnitud de la lluvia tienda a subestimarse en algunos casos, con respecto a los registros de DINAGUA. En este caso es importante notar las diferencias de los registros diarios para el año 2005. En ese caso, el dataset de DINAGUA no registra precipitaciones entre mediados de marzo y finales de septiembre; por el contrario, CHIRPS si registra precipitaciones en esta época. Esto no parece ser un comportamiento típico del área de estudio y no se cuenta con una estación cercana para validar los registros de DINAGUA, aunque se tengan reportes de sequía en la zona norte de Uruguay para el año 2005.

#### **A. 2.4 Comparación de valores medios anuales de temperatura entre datos del dataset de la Universidad de Princeton y Caracterización Agroclimática del Uruguay 1980-2009**

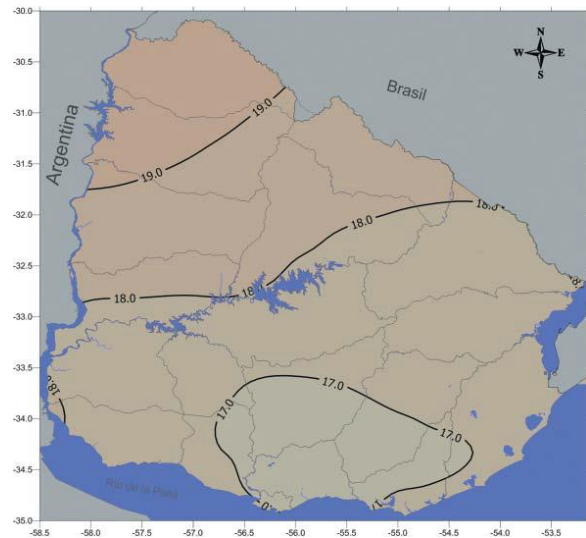
Al no contar con información de temperatura suministrada por agencias nacionales a los consultores, los valores de promedio anuales de temperatura (media, mínima y máxima) se compararon con los mapas reportados en el documento Caracterización Agroclimática del Uruguay 1980-2009 (INIA, 2011) que se presenta a continuación.

- **Temperatura media**

Al comparar los valores medios del dataset de la Universidad de Princeton con los reportados por el INIA, se observa una correspondencia en la magnitud y distribución espacial de la temperatura media anual.



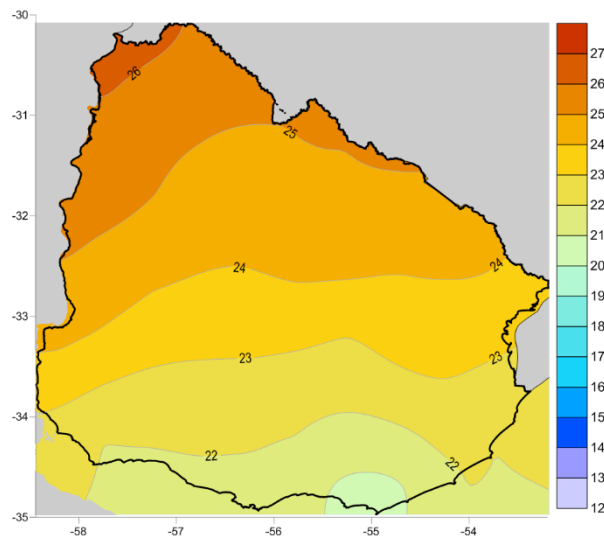
*U. de Princeton*



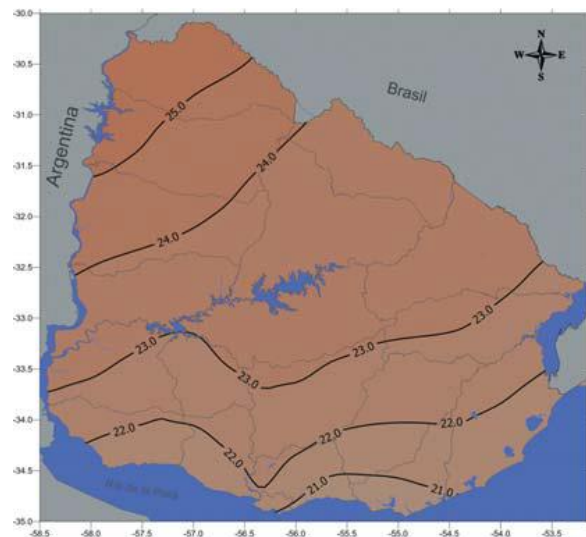
*INIA, 2011*

- Temperatura máxima

Al comparar los valores medios del dataset de la Universidad de Princeton con los reportados por el INIA, se observa una correspondencia en la magnitud y distribución espacial de la temperatura máxima anual.



*U. de Princeton*

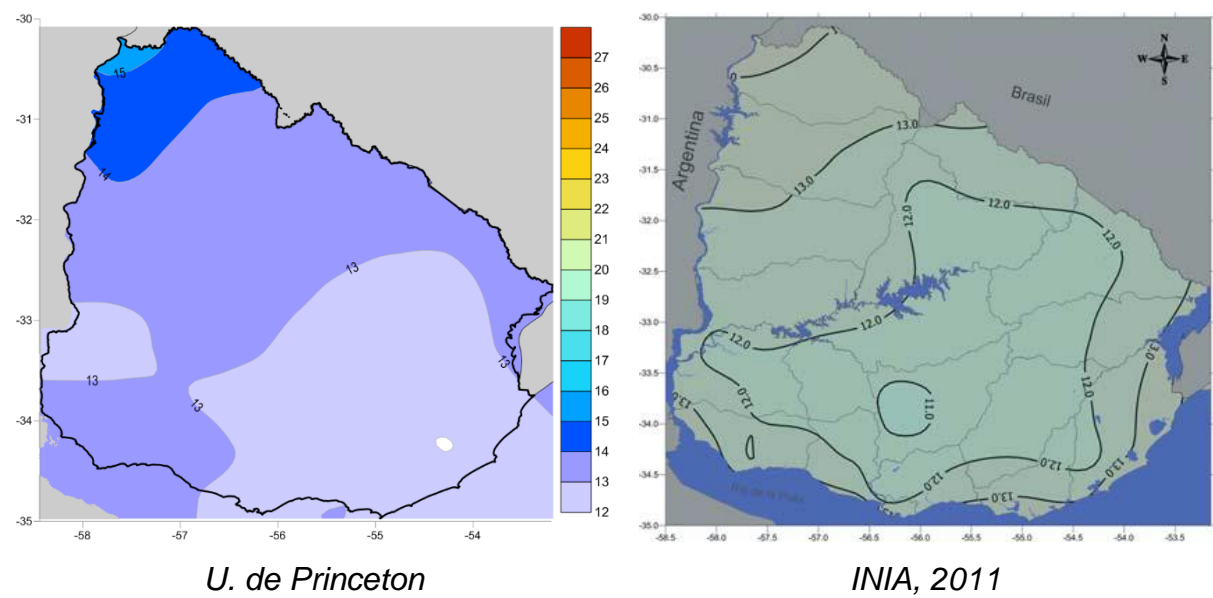


*INIA, 2011*

- Temperatura mínima

Al comparar los valores medios del dataset de la Universidad de Princeton con los reportados por el INIA, se observa que el dataset de Princeton está un poco por encima

que lo reportado por el INIA, pero en términos generales existe correspondencia en la distribución espacial de la temperatura mínima anual.



Al no contar con información adicional para realizar un análisis comparativo o calibración de los datos del dataset global con mediciones hechas en tierra, se considera que el dataset de Princeton brinda información suficiente y precisa para adelantar el análisis de amenaza por sequía en Uruguay.

**A. 2.5 Información suministrada por IDU DINAGUA para evaluación de inundación en la cuenca Río Branco**

El grupo de Inundación y Drenaje Urbano (IDU) de la Dirección Nacional de Agua (DINAGUA) suministró información de 12 estaciones pluviométricas del INUMET ubicadas en la cuenca de estudio o sus cercanías. El periodo de registros está entre el año 2000 hasta agosto del año 2017 para 11 estaciones, mientras que para la Estación Sarandí del Yaguarón el periodo de registro inicia el 30 de diciembre de 2002. El resumen de la información de las 12 estaciones se muestra en la siguiente tabla:

ID	NOMBRE	Lat	Long	Fecha inicio	Fecha Fin	Datos faltantes	
149	Acegua	-	-	01/01/2000	26/09/201	164	2.5%
6		31.88	54.20		7		

ID	NOMBRE	Lat	Long	Fecha inicio	Fecha Fin	Datos faltantes	
179 8	Arroyo Malo			01/01/2000	26/09/201 7	1233	19.0%
180 3	Bañado de Paja			01/01/2000	26/09/201 7	1095	16.9%
171 2	Cañas	- 32.35	- 53.83	01/01/2000	26/09/201 7	294	4.5%
162 6	Centurión			01/01/2000	26/09/201 7	420	6.5%
153 7	Isidoro Noblia			01/01/2000	26/09/201 7	89	1.4%
194 5	Laguna Merin			01/01/2000	26/09/201 7	1200	18.5%
170 9	Melo	-32.4	-54.2	01/01/2000	26/09/201 7	210	3.2%
194 1	Placido Rosas			01/01/2000	26/09/201 7	300	4.6%
184 9	Rio Branco			01/01/2000	26/09/201 7	162	2.5%
166 8	Sarandí del Yagaron			30/12/2002	26/09/201 7	778	14.5%
166 5	Tres Boliches	- 32.27	- 54.18	01/01/2000	26/09/201 7	296	4.6%

La localización de ocho de las 12 estaciones no se pudo establecer porque no se encontró una estación equivalente en la información suministrada que incluye un archivo de Excel del catálogo de 270 estaciones y tres archivos tipo shape de estaciones hidrométricas.

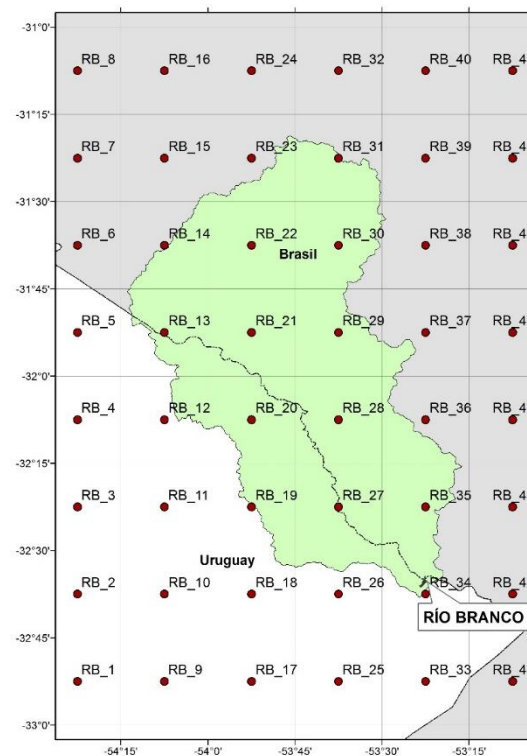
Sobre esta información se puede decir que:

- No fue posible establecer la ubicación de todas las estaciones.

- El tiempo de registro es corto (alrededor de 16 años) para obtener un análisis estadístico robusto de la media normal del clima en la zona.
- La información de precipitación diaria de las estaciones no está completa (valores vacíos y TRAZA) y no se cuenta con información de calidad para completar las series con metodologías estándar.
- No se suministró información de precipitación horaria en estaciones en tierra.

#### A. 2.6 Análisis estadístico dataset PRINCETON para evaluación de amenaza por inundación

Para la evaluación de la amenaza por inundación, el análisis de lluvias intensas se hizo a partir de los datos de precipitación registrados en el dataset de la Universidad de Princeton. En total se utilizaron 48 estaciones virtuales como se muestra en el mapa:



A continuación, se presentan las tablas con la estadística descriptiva para los datos proporcionados por Princeton diarios y mensuales, se muestran los nombres de las estaciones, los valores máximos, la media, la varianza, la desviación estándar y los cuantiles 1, 2 y 3 correspondientes a los percentiles 25, 50 y 75, respectivamente.

**Datos diarios (Valores en mm/día):**

<b>Estación</b>	<b>Máximo mm/día</b>	<b>Media</b>	<b>Varianza</b>	<b>Desv. E.</b>	<b>Q1(P25)</b>	<b>Q2(P50)</b>	<b>Q3(P75)</b>
<b>RB_1</b>	281.0	3.8	167.4	12.9	0.0	0.0	0.0
<b>RB_2</b>	263.1	3.8	165.7	12.9	0.0	0.0	0.0
<b>RB_3</b>	247.8	3.8	163.1	12.8	0.0	0.0	0.0
<b>RB_4</b>	223.7	3.9	167.3	12.9	0.0	0.0	0.0
<b>RB_5</b>	215.9	4.0	159.8	12.6	0.0	0.0	1.0
<b>RB_6</b>	217.5	4.2	170.2	13.0	0.0	0.0	1.1
<b>RB_7</b>	218.6	4.3	180.2	13.4	0.0	0.0	1.2
<b>RB_8</b>	218.9	4.4	190.0	13.8	0.0	0.0	1.2
<b>RB_9</b>	274.7	3.8	166.6	12.9	0.0	0.0	0.0
<b>RB_10</b>	254.8	3.8	165.6	12.9	0.0	0.0	0.0
<b>RB_11</b>	238.9	3.8	162.3	12.7	0.0	0.0	0.0
<b>RB_12</b>	220.4	3.9	166.7	12.9	0.0	0.0	0.0
<b>RB_13</b>	205.2	4.0	159.5	12.6	0.0	0.0	1.0
<b>RB_14</b>	206.6	4.2	169.8	13.0	0.0	0.0	1.1
<b>RB_15</b>	207.3	4.3	179.8	13.4	0.0	0.0	1.2
<b>RB_16</b>	214.2	4.5	189.7	13.8	0.0	0.0	1.2
<b>RB_17</b>	219.2	3.8	140.5	11.9	0.0	0.0	1.2
<b>RB_18</b>	229.7	3.8	141.9	11.9	0.0	0.0	1.2
<b>RB_19</b>	222.5	3.9	140.6	11.9	0.0	0.0	1.2
<b>RB_20</b>	215.7	3.9	143.2	12.0	0.0	0.0	1.3
<b>RB_21</b>	225.0	4.0	135.2	11.6	0.0	0.0	1.9
<b>RB_22</b>	222.4	4.2	142.9	12.0	0.0	0.0	2.0
<b>RB_23</b>	219.9	4.3	151.6	12.3	0.0	0.0	2.1
<b>RB_24</b>	218.5	4.5	160.3	12.7	0.0	0.0	2.2
<b>RB_25</b>	227.6	3.8	139.7	11.8	0.0	0.0	1.2
<b>RB_26</b>	241.2	3.8	142.8	11.9	0.0	0.0	1.2
<b>RB_27</b>	233.1	3.9	142.8	11.9	0.0	0.0	1.3
<b>RB_28</b>	216.6	4.0	144.6	12.0	0.0	0.0	1.3

Estación	Máximo mm/día	Media	Varianza	Desv. E.	Q1(P25)	Q2(P50)	Q3(P75)
RB_29	223.6	4.1	133.7	11.6	0.0	0.0	1.9
RB_30	219.9	4.2	140.6	11.9	0.0	0.0	2.0
RB_31	216.7	4.3	149.2	12.2	0.0	0.0	2.1
RB_32	214.0	4.4	157.9	12.6	0.0	0.0	2.2
RB_33	226.6	3.8	139.4	11.8	0.0	0.0	1.3
RB_34	245.1	3.8	143.2	12.0	0.0	0.0	1.3
RB_35	240.6	3.9	144.1	12.0	0.0	0.0	1.3
RB_36	224.8	4.0	145.3	12.1	0.0	0.0	1.3
RB_37	223.6	4.1	131.8	11.5	0.0	0.0	2.0
RB_38	218.9	4.2	137.8	11.7	0.0	0.0	2.0
RB_39	214.2	4.3	145.9	12.1	0.0	0.0	2.1
RB_40	209.8	4.4	154.2	12.4	0.0	0.0	2.2
RB_41	215.9	3.8	138.5	11.8	0.0	0.0	1.3
RB_42	235.2	3.8	141.8	11.9	0.0	0.0	1.3
RB_43	237.6	3.9	143.1	12.0	0.0	0.0	1.3
RB_44	227.1	4.0	144.6	12.0	0.0	0.0	1.4
RB_45	221.2	4.1	130.0	11.4	0.0	0.0	2.0
RB_46	217.4	4.2	135.4	11.6	0.0	0.0	2.1
RB_47	211.5	4.3	143.0	12.0	0.0	0.0	2.1
RB_48	205.6	4.4	151.0	12.3	0.0	0.0	2.2

**Datos mensuales (Valores en mm/mes):**

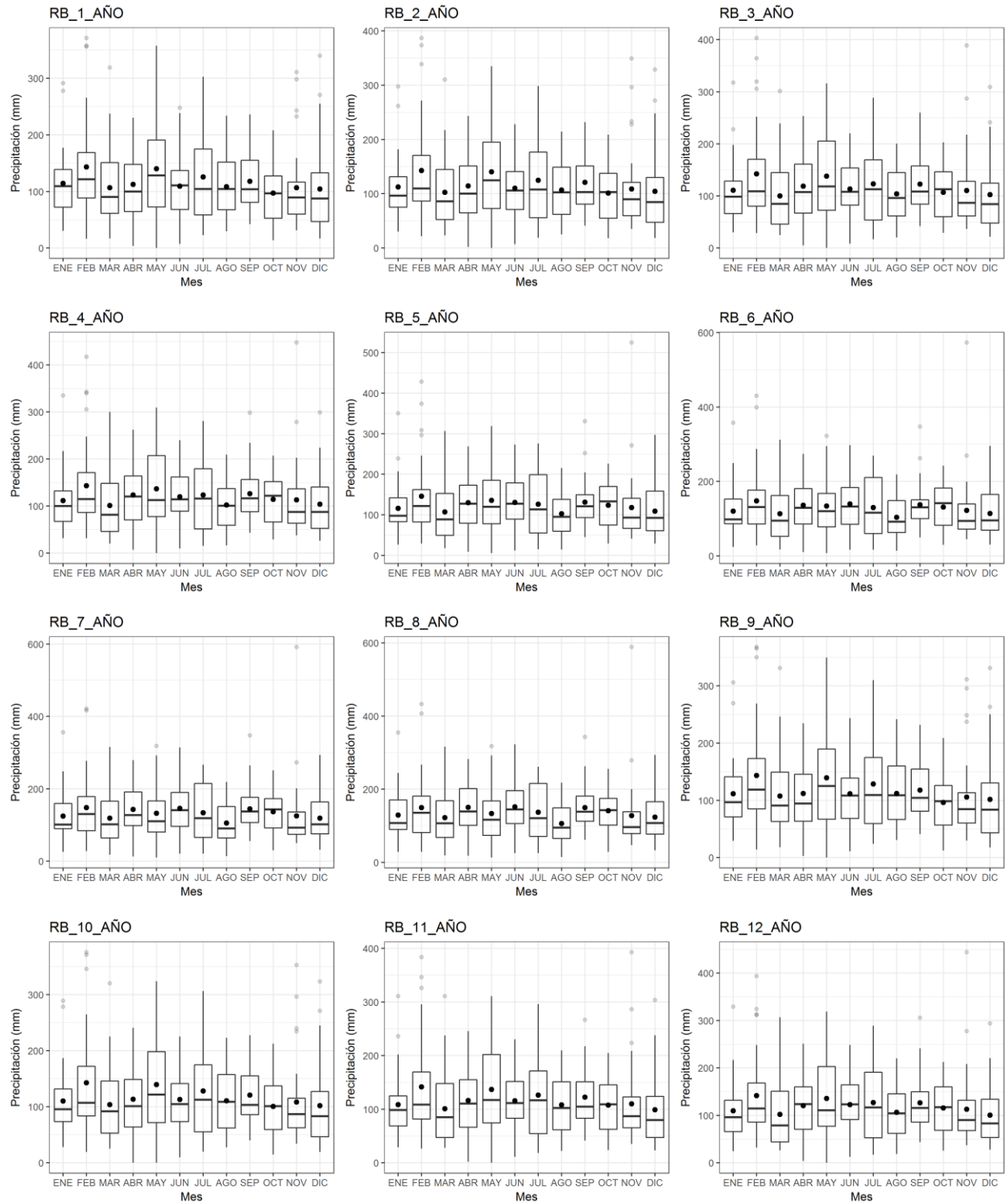
Estación	Máximo mm/mes	Media	Varianza	Desv. E.	Q1(P25)	Q2(P50)	Q3(P75)
RB_1	371.4	115.6	5188.2	72.0	63.0	100.0	152.6
RB_2	386.8	115.8	5147.9	71.7	62.8	102.4	150.8
RB_3	403.2	116.0	5004.0	70.7	63.1	102.2	155.0
RB_4	447.7	118.4	5100.6	71.4	64.8	105.6	158.1
RB_5	525.2	122.9	5401.1	73.5	66.1	110.5	161.8

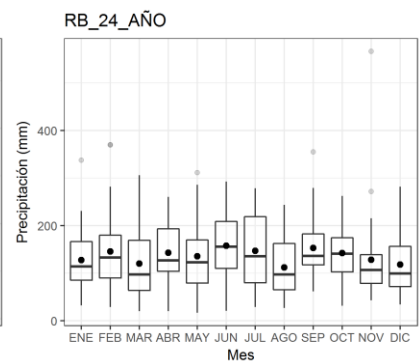
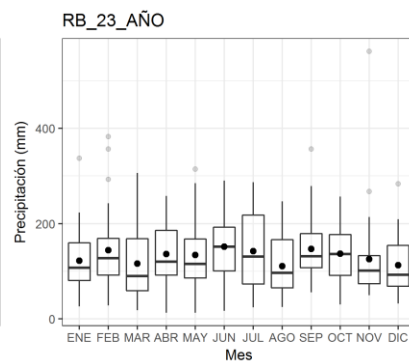
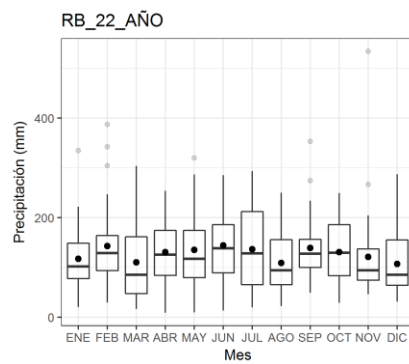
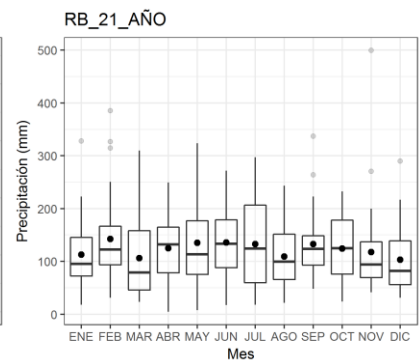
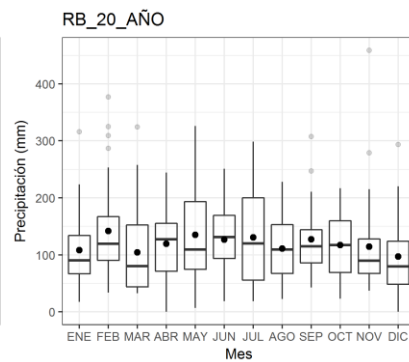
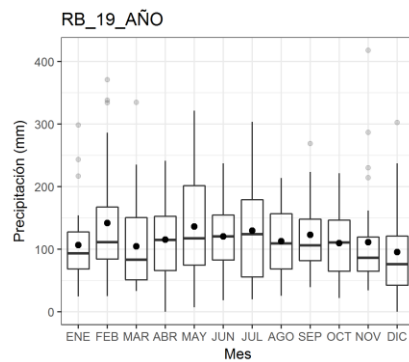
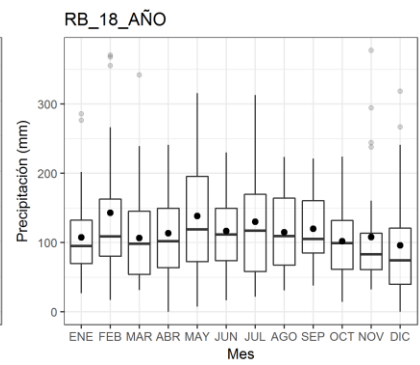
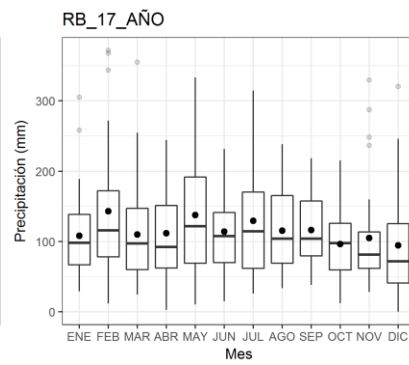
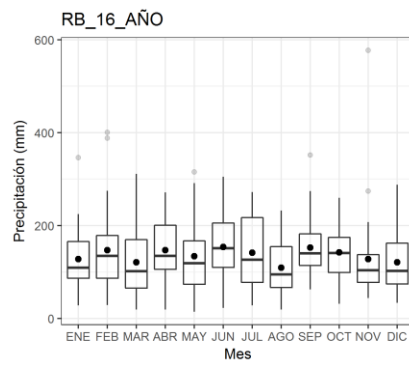
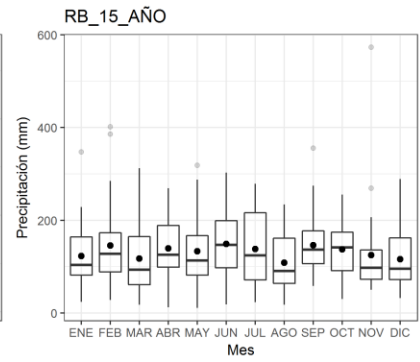
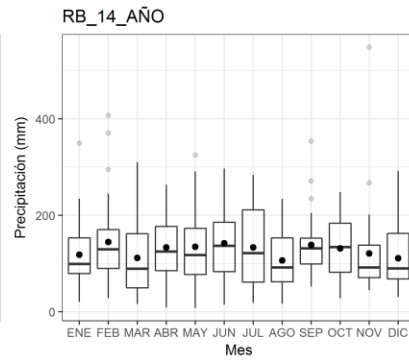
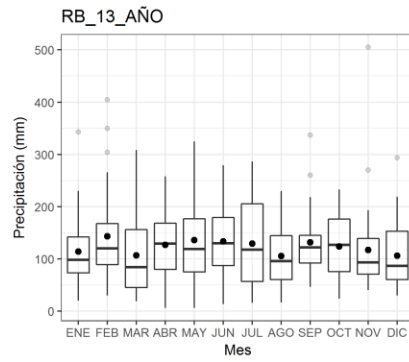


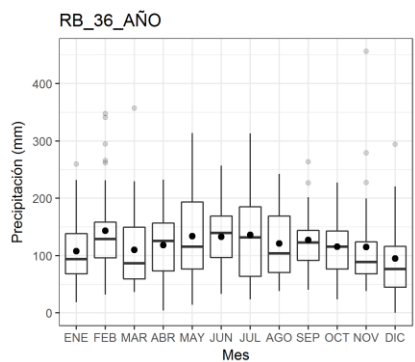
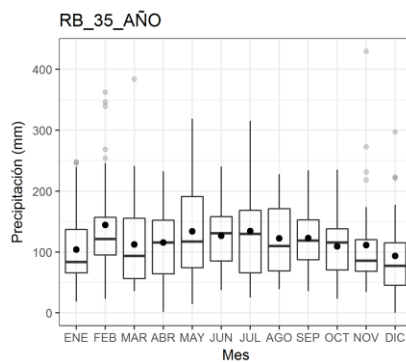
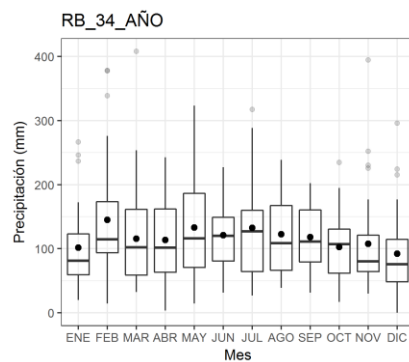
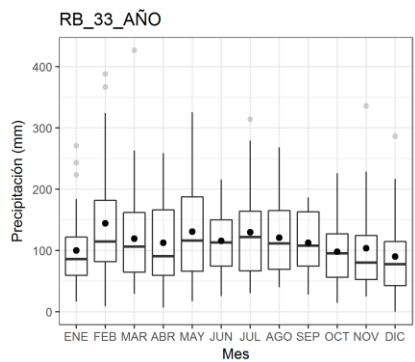
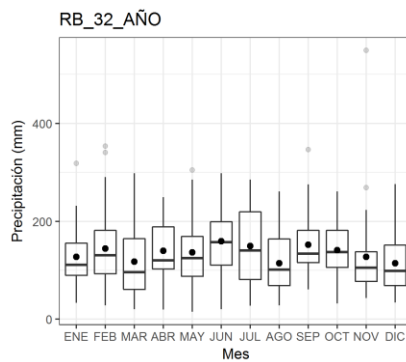
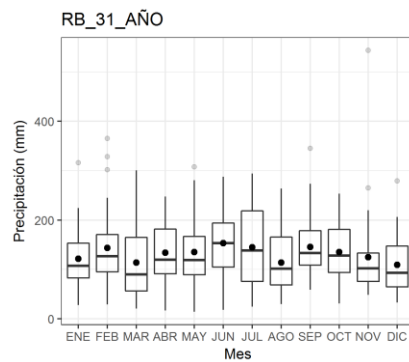
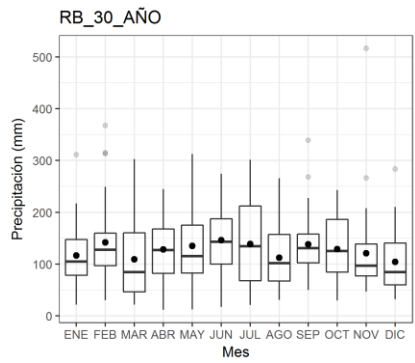
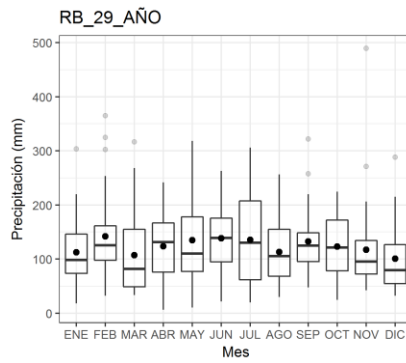
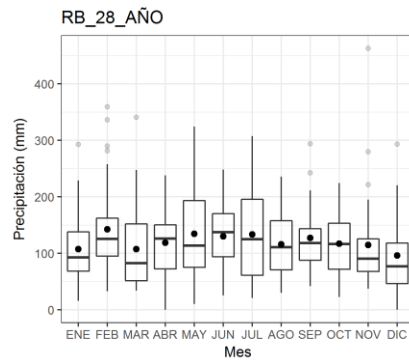
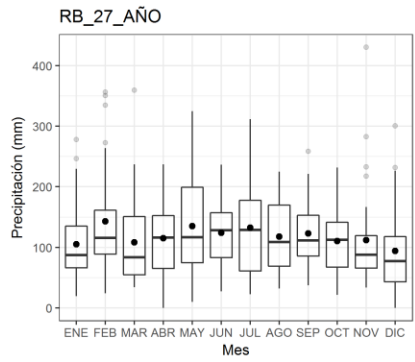
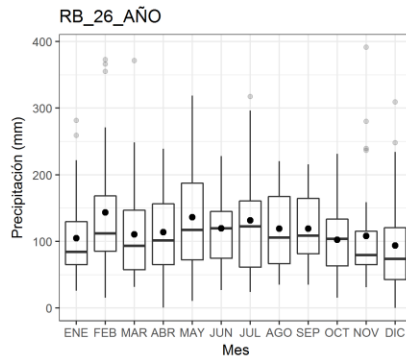
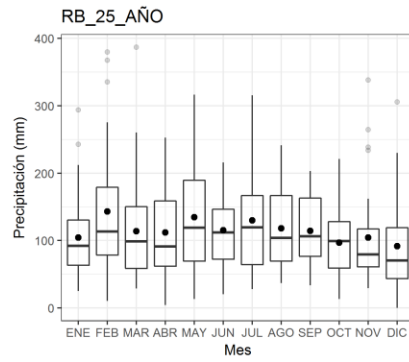
<b>Estació n</b>	<b>Máximo mm/mes</b>	<b>Medi a</b>	<b>Varianz a</b>	<b>Desv. E.</b>	<b>Q1(P25 )</b>	<b>Q2(P50 )</b>	<b>Q3(P75 )</b>
<b>RB_6</b>	573.3	127.2	5609.5	74.9	71.0	114.4	164.4
<b>RB_7</b>	592.1	131.4	5662.8	75.3	75.1	119.2	170.7
<b>RB_8</b>	588.7	135.3	5688.3	75.4	79.2	123.6	175.2
<b>RB_9</b>	368.0	115.6	5234.5	72.3	63.6	99.7	152.1
<b>RB_10</b>	375.6	116.0	5196.8	72.1	63.4	98.9	152.8
<b>RB_11</b>	393.1	116.1	4981.8	70.6	64.1	101.5	153.3
<b>RB_12</b>	444.0	118.4	5050.0	71.1	64.4	104.9	157.8
<b>RB_13</b>	505.3	122.9	5317.5	72.9	67.7	108.5	162.4
<b>RB_14</b>	548.4	127.2	5482.8	74.0	71.3	114.9	166.1
<b>RB_15</b>	573.3	131.5	5517.7	74.3	76.0	118.9	170.4
<b>RB_16</b>	577.2	135.5	5531.2	74.4	82.7	124.1	175.8
<b>RB_17</b>	372.0	115.1	5199.8	72.1	63.1	100.0	152.7
<b>RB_18</b>	377.6	116.4	5267.4	72.6	63.5	100.7	154.3
<b>RB_19</b>	418.2	117.3	5059.9	71.1	63.4	103.1	154.7
<b>RB_20</b>	458.9	119.5	5074.1	71.2	65.7	106.1	156.7
<b>RB_21</b>	499.8	123.0	5200.8	72.1	68.4	109.2	163.7
<b>RB_22</b>	534.0	127.0	5317.2	72.9	72.5	115.7	169.5
<b>RB_23</b>	561.5	131.5	5370.8	73.3	76.6	119.7	173.5
<b>RB_24</b>	566.8	135.6	5381.6	73.4	82.6	123.3	179.6
<b>RB_25</b>	386.9	115.0	5071.8	71.2	63.9	97.3	150.6
<b>RB_26</b>	391.5	116.8	5200.2	72.1	65.3	101.7	156.4
<b>RB_27</b>	430.4	118.4	5017.2	70.8	65.6	104.4	154.9
<b>RB_28</b>	463.1	120.5	4953.6	70.4	68.0	105.8	155.4
<b>RB_29</b>	489.6	123.3	4965.4	70.5	70.3	109.9	163.1
<b>RB_30</b>	516.6	126.8	5048.3	71.1	72.9	114.7	165.2
<b>RB_31</b>	544.1	131.2	5121.4	71.6	77.2	119.4	173.9
<b>RB_32</b>	549.4	135.3	5140.9	71.7	82.3	122.8	178.7
<b>RB_33</b>	426.7	114.9	4972.9	70.5	63.8	101.9	154.0

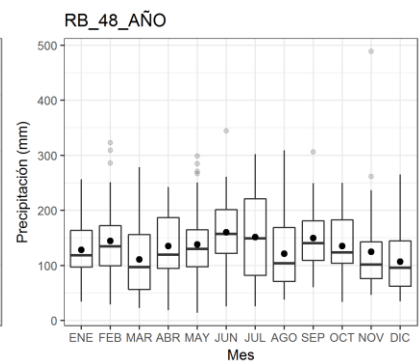
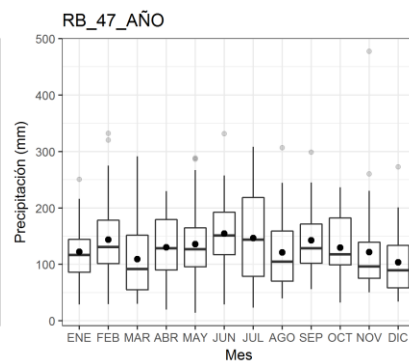
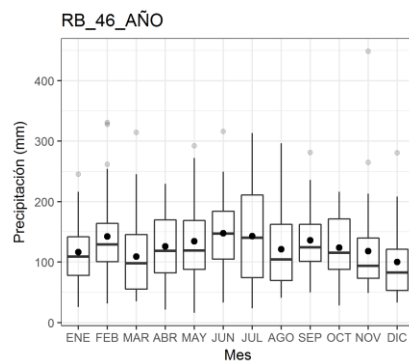
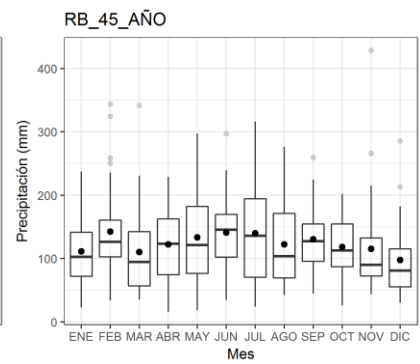
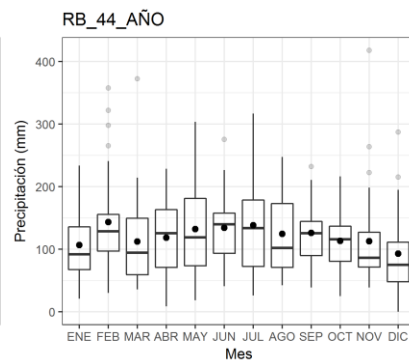
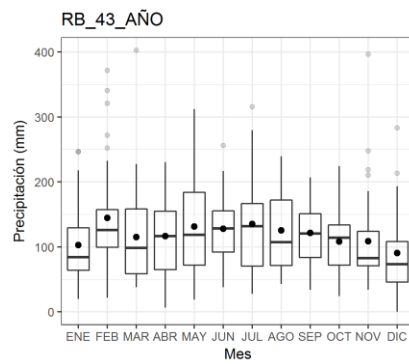
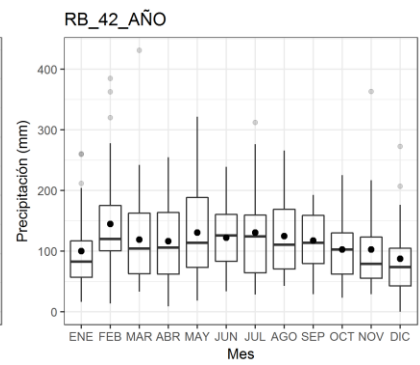
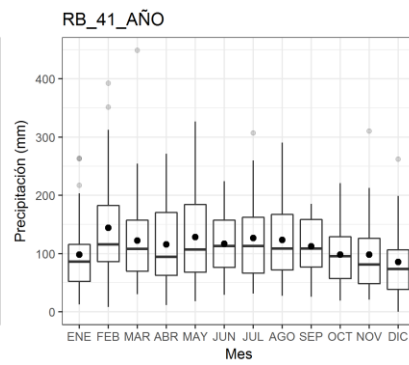
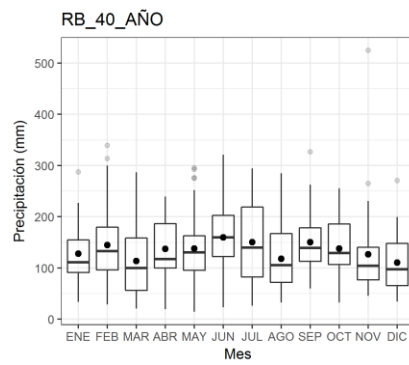
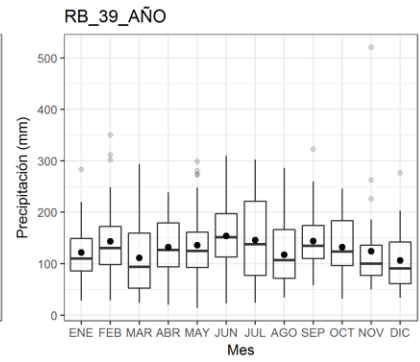
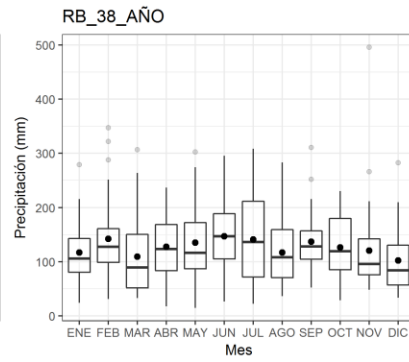
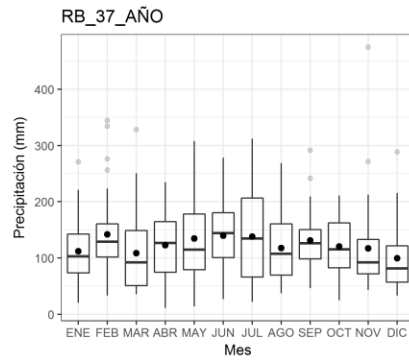
<b>Estación</b>	<b>Máximo mm/mes</b>	<b>Medi a</b>	<b>Varianz a</b>	<b>Desv. E.</b>	<b>Q1(P25 )</b>	<b>Q2(P50 )</b>	<b>Q3(P75 )</b>
<b>RB_34</b>	408.0	117.2	5076.7	71.3	64.6	105.1	157.3
<b>RB_35</b>	429.7	119.2	4888.0	69.9	68.0	105.8	156.7
<b>RB_36</b>	456.5	121.3	4739.1	68.8	69.9	107.0	156.8
<b>RB_37</b>	474.7	123.6	4649.8	68.2	71.8	112.4	164.1
<b>RB_38</b>	496.2	126.7	4704.5	68.6	74.8	115.1	164.8
<b>RB_39</b>	521.0	130.7	4799.4	69.3	78.1	121.6	172.5
<b>RB_40</b>	525.1	134.6	4834.6	69.5	82.2	123.8	179.0
<b>RB_41</b>	448.9	114.2	4873.0	69.8	63.0	102.2	154.1
<b>RB_42</b>	431.4	116.7	4858.3	69.7	65.2	103.9	158.2
<b>RB_43</b>	402.7	119.1	4632.0	68.1	69.4	109.1	155.2
<b>RB_44</b>	418.3	121.4	4451.6	66.7	71.8	110.2	158.2
<b>RB_45</b>	428.8	123.7	4324.5	65.8	72.2	111.3	161.8
<b>RB_46</b>	448.5	126.5	4367.8	66.1	74.1	114.5	165.9
<b>RB_47</b>	477.5	130.1	4507.8	67.1	78.5	121.0	171.8
<b>RB_48</b>	489.0	133.8	4596.9	67.8	82.0	122.7	176.4

Los gráficos de cajas para cada estación por mes se presentan a continuación.

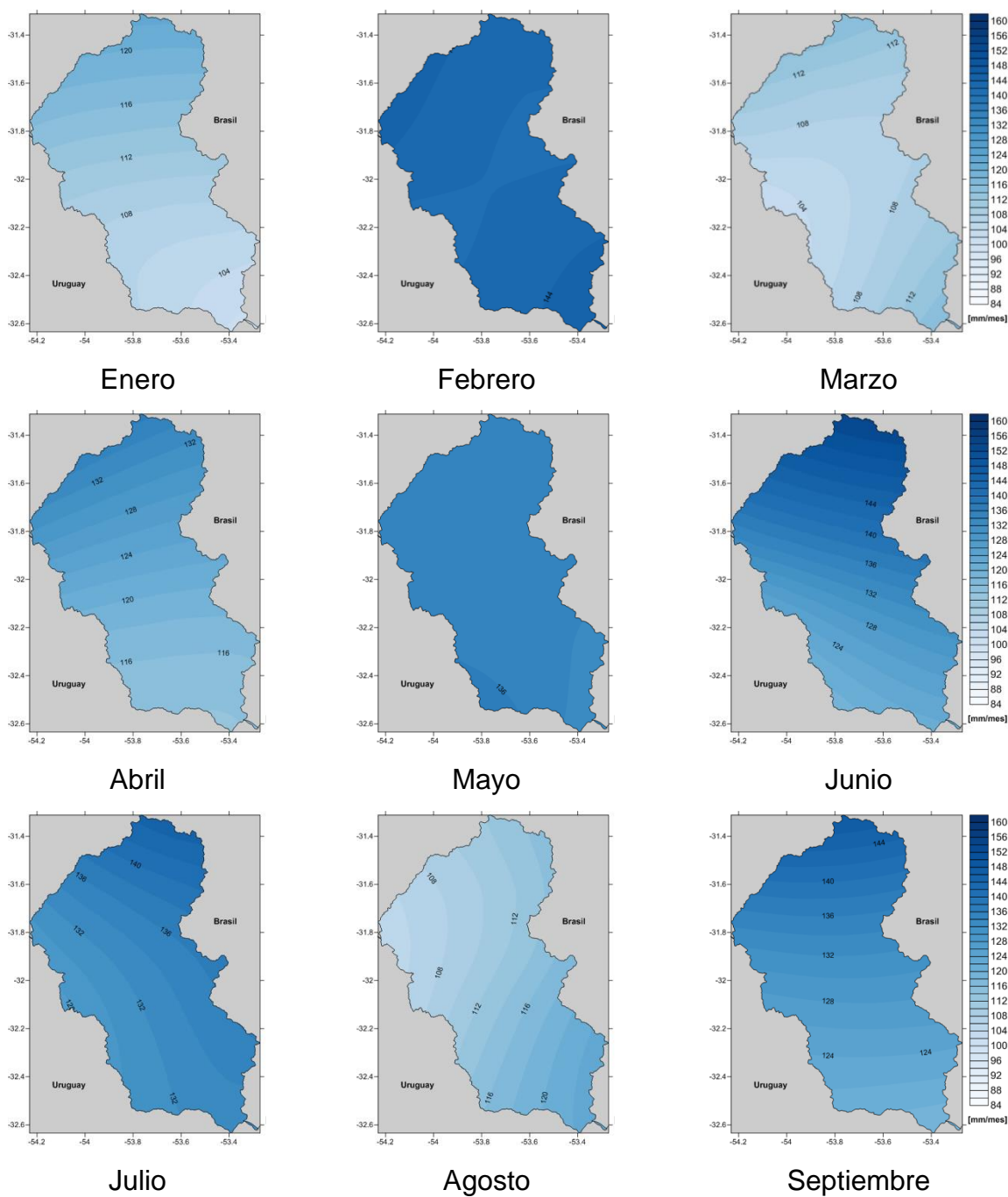


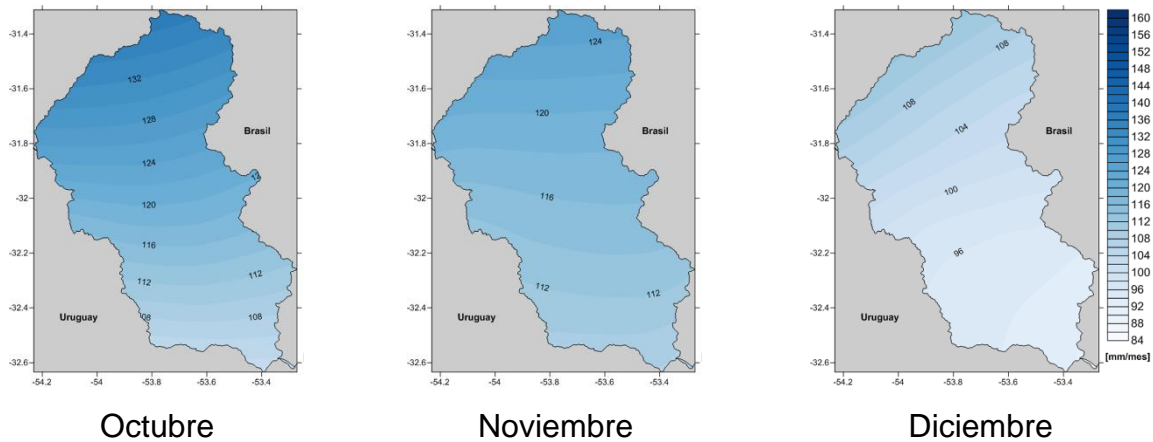






Mapas de precipitación media mensual (1981-2010) según base de datos Princeton.



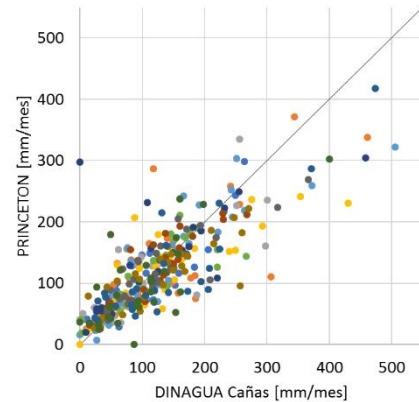
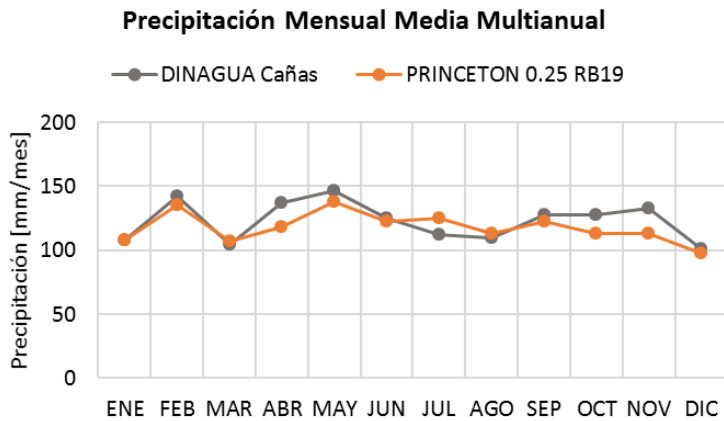
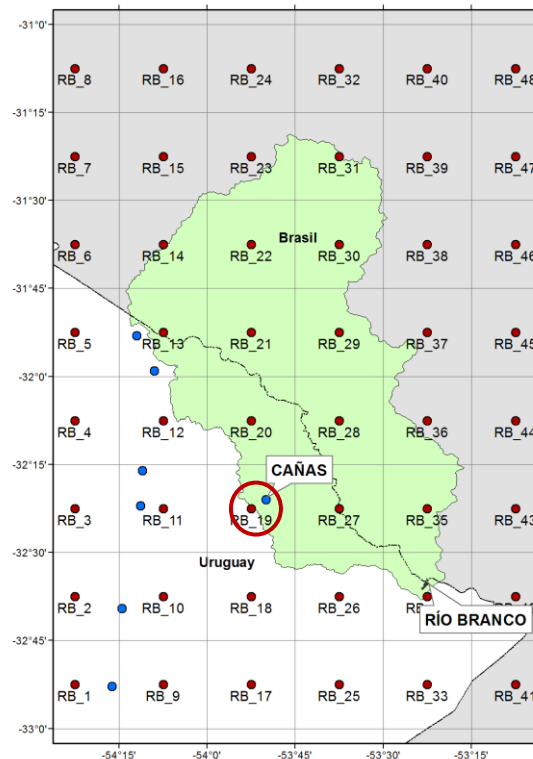


El análisis de la información se complementó con la comparación de puntos cercanos de los registros del DINAGUA a los puntos de la malla  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  usada para extraer los datos de Princeton. Para el par de puntos cercanos (que no implica que estén en la misma ubicación exacta) entre la Estación Cañas de DINAGUA y el punto RB19 de Princeton se muestra la media mensual y los registros diarios para años seleccionados (1987,2005,2007) con el fin de examinar la diferencia entre registros disponibles.

- DINAGUA Estación Cañas vs. PRINCETON Pto RB19

En el siguiente mapa se muestra la ubicación de la Estación Cañas del DINAGUA y el punto RB19 de la malla de Princeton, utilizada en la cuenca de estudio.



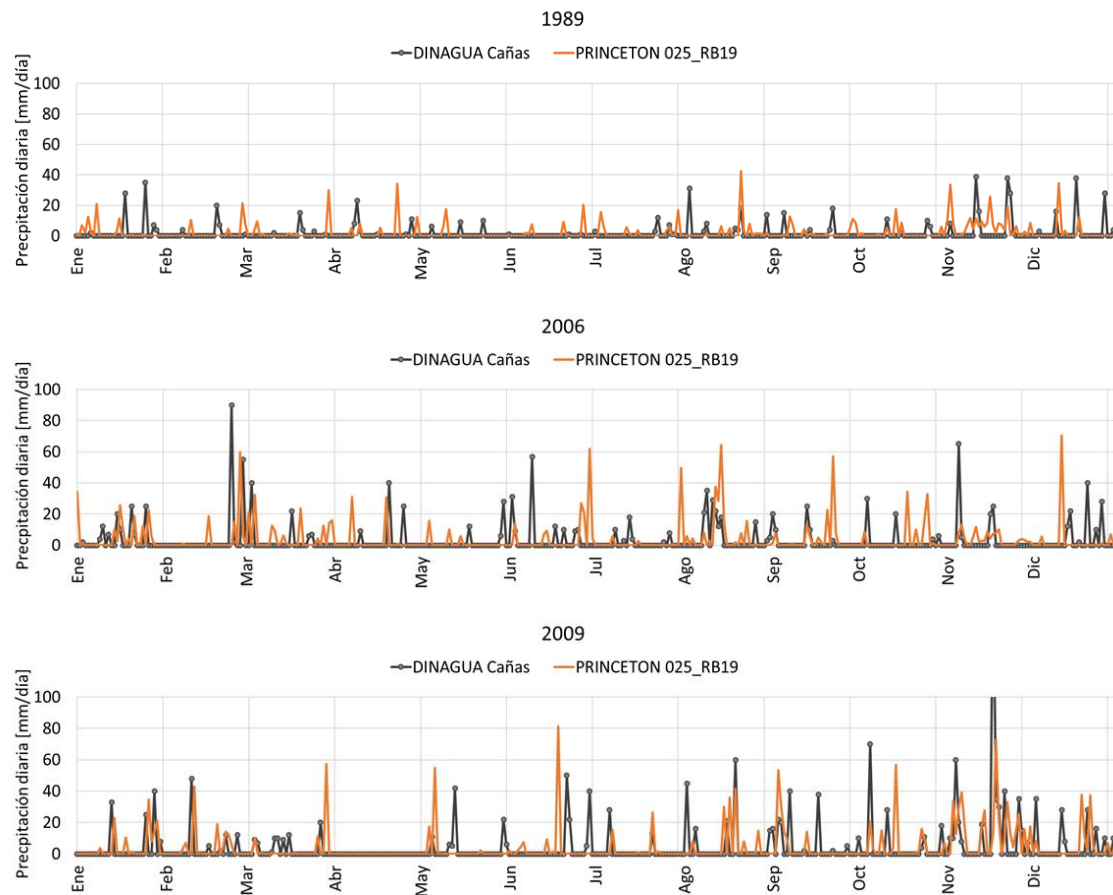


Para los valores diarios:

- Error cuadrático medio RMSE: 16.89 mm/día
- Probabilidad de detección de lluvia: 0.81
- Relación falsa alarma: 0.27
- Índice de éxito crítico: 0.63

La comparación entre las medias mensuales de precipitación indica que los datasets presentan diferencias principalmente en los meses de abril, julio, octubre y noviembre.

Los gráficos que se presentan a continuación con valores de registros diarios para los años 1989, 2006 y 2009, permiten concluir que el dataset de PRINCETON coincide en la fecha de ocurrencia de lluvias, aunque la magnitud de la lluvia tienda a subestimarse, con respecto a los registros de DINAGUA.



Vale la pena recordar que el uso del dataset de la Universidad de Princeton para la evaluación de la amenaza por inundación en la cuenca del Río Yaguarón responde a la falta de suministro de información de registros históricos de precipitación diaria e intra-diaria en estaciones en tierra.

### A.3 Evapotranspiración de referencia

El cálculo de la serie de evapotranspiración potencial se hace siguiendo el Manual *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements* (Allen et al., 1998). En esta sección se explica de forma general el procedimiento para aplicar la metodología de Penmann-Monteith de la FAO. Para más información, consultar el estudio de la FAO publicado en el Artículo 56 de la división de Riego y Drenaje.

La evapotranspiración de referencia se entiende como el potencial de evaporación de la atmósfera; se calcula en una superficie vegetal uniforme sin restricciones hídricas. La superficie de referencia es un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, una resistencia superficial fija de 70 s/m y un albedo de 0,23 (Allen et al., 1998); es independiente del tipo de cultivo, de su desarrollo o de su manejo. Al no tener restricciones en el contenido de agua, las características del suelo tampoco influyen en su resultado. Estas condiciones permiten comparar los resultados en diferentes localizaciones o estaciones para evaluar las condiciones evaporativas de la atmósfera ya que el ETo únicamente varía según las condiciones climáticas presentes.

#### A.3.1 Método de Penman-Monteith

El método de Penman-Monteith permite cuantificar los procesos de evaporación (vaporización de agua desde una superficie: suelo, vegetación húmeda) y transpiración (vaporización del agua contenida en los tejidos vegetales), que ocurren simultáneamente. Los parámetros necesarios para el cálculo son el brillo solar, la temperatura, la humedad, la velocidad del viento (asociada con la evaporación), el flujo de vapor y la resistencia aerodinámica (asociada con la transpiración).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (\text{Ec. A. 2-1})$$

en donde

$ET_0$  es la evapotranspiración de referencia [mm/d]

$R_n$  es la radiación neta [MJ/m<sup>2</sup>d]

$G$  es el flujo de calor del suelo [MJ/m<sup>2</sup>d]

$\gamma$  es la constante psicrométrica [kPa/°C]

$T$  es la temperatura promedio diaria [°C]

$u_2$  es la velocidad del viento (a 2m de la superficie) [m/s]

$(e_s - e_a)$  representa el déficit de presión de vapor [kPa]

$\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C]

La aplicación de la metodología de Penman-Monteith implica la recopilación de información meteorológica que puede no estar disponible en todos los casos. Los parámetros meteorológicos faltantes se establecen a partir de criterio de expertos, información meteorológica general de la región y las reglas de cálculo recomendadas por la FAO (Raes, 2009). Para el caso del presente estudio, se consultó la base de datos de la Universidad de Princeton (Sheffield et al., 2006) de parámetros climáticos que incluye radiación, presión atmosférica, velocidad de viento y humedad específica con el fin de obtener datos más precisos para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la región de análisis.

### **A. 3.2 Parámetros atmosféricos**

#### **A. 3.2.1 Presión atmosférica $P$**

La presión atmosférica es la presión ejercida por el peso de la atmósfera terrestre. La presión atmosférica se puede calcular a partir de la elevación sobre el nivel del mar, en el punto de interés.

$$P = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (\text{Ec. A. 0-1})$$

donde

$P$  es la presión atmosférica [kPa]

$z$  es la elevación sobre el nivel del mar [m]

En caso de contar con mediciones de la presión atmosférica en estaciones de monitoreo, se utiliza es valor registrado cuidando que las unidades sean las correctas (pascales).

#### **A. 3.2.2 Constante psicrométrica $\gamma$**

La constante psicrométrica se define como:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.664742 \times 10^{-3} P \quad (\text{Ec. A. 0-2})$$

donde

$\gamma$  es la constante psicrométrica [kPa/°C]

$P$  es la presión atmosférica [kPa]

$\lambda$  es el calor latente de vaporización, 2.45 MJ/kg a 20°C

$c_p$  es el calor específico a presión constante,  $1.013 \times 10^{-3}$  MJ/kg°C

$\varepsilon$  es el cociente del peso molecular de vapor de agua/aire seco, 0.622

### A. 3.3 Temperatura del aire

Sin información de temperatura no se puede calcular la evapotranspiración de referencia. La temperatura media diaria del aire ( $T_{media}$ ) se emplea en la ecuación de Penman-Monteith para calcular la pendiente de la curva de la presión de saturación de vapor ( $\Delta$ ) y del impacto de la densidad media del aire ( $P_a$ ). Los valores de temperatura media se obtienen de registros medidos en estaciones meteorológicas o son reportados dentro de las bases de datos globales como la publicada por la Universidad de Princeton. En el caso del cálculo de la serie de evapotranspiración para las series modeladas, que luego se utilizan en el análisis probabilista del riesgo por sequía, la serie de temperatura modelada se utiliza directamente en la ecuación de Penman-Monteith.

### A. 3.4 Humedad del aire

#### A. 3.4.1 Presión media de vapor de la saturación $e_s$

La presión media de vapor de saturación se calcula como:

$$e^o(T) = 0.6108 * \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \quad (\text{Ec. A. 0-3})$$

donde

$e^o(T)$  es la presión de saturación de vapor a la temperatura del aire  $T$  [kPa]

$T$  es la temperatura del aire [°C]

La presión media de vapor de saturación se calcula a partir de la temperatura máxima y mínima diaria:

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{max}) + e^\circ(T_{min})}{2} \quad (\text{Ec. A. 0-4})$$

donde

$e_s$  es la presión media de saturación de vapor [kPa]

$T_{max}$  es la temperatura máxima diaria del aire [°C]

$T_{min}$  es la temperatura mínima diaria del aire [°C]

Se recomienda el cálculo de la presión media de vapor de saturación a partir de las temperaturas máximas y mínimas diarias, dado que el cálculo con la temperatura media puede llevar a subestimación del parámetro por la naturaleza no lineal de la relación presión de vapor-temperatura.

#### A. 3.4.2 Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor $\Delta$

La pendiente de la curva de presión de saturación de vapor para una cierta temperatura T se define como:

$$\Delta = \frac{4098 * \left[ 0.6108 * \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \right]}{(T + 237.3)^2} \quad (\text{Ec. A. 0-5})$$

donde

$\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C]

T es la temperatura media del aire [°C]

#### A. 3.4.3 Presión real de vapor $e_a$

Según el manual de la FAO, la presión real de vapor se puede derivar de la temperatura del punto de rocío (Tdew), de datos psicrométricos o de datos de la humedad relativa. El método que utilizar depende de la disponibilidad de datos.

- $e_a$  a partir de la temperatura del punto de rocío (Tdew)

$$e_a = e^\circ(T_{dew}) = 0.6108 * \exp\left(\frac{17.27T_{dew}}{T_{dew} + 237.3}\right) \quad (\text{Ec. A. 0-6})$$

- $e_a$  a partir de la humedad máxima (RHmax) y mínima (RHmin)

$$e_a = \frac{e^\circ(T_{\min})RH_{\max} + e^\circ(T_{\max})RH_{\min}}{2} \quad (\text{Ec. A. 0-7})$$

- $e_a$  a partir de la temperatura de la humedad relativa máxima

$$e_a = e^\circ(T_{\max})RH_{\min} \quad (\text{Ec. A. 0-8})$$

- $e_a$  a partir de la temperatura de la humedad relativa media

Para este estudio, se hace uso de la base de datos de la Universidad de Princeton (Sheffield et al., 2006), que incluye la humedad específica media entre los parámetros que reporta.

A partir de la humedad específica, se calcula la humedad relativa:

$$RH = 0.263 P shum \left[ \exp \left( \frac{17.67(T - T_o)}{T - 29.65} \right) \right]^{-1} \quad (\text{Ec. A. 0-9})$$

donde

RH es la humedad relativa [-]

P es la presión atmosférica [Pa]

shum es la humedad específica [-]

T es la temperatura media [Kelvin]

$T_o$  es la temperatura de referencia, 273.16 K

Lo que es equivalente a:

$$RH = \frac{P shum}{0.622 e_s} \quad (\text{Ec. A. 0-10})$$

donde  $e_s$  es la presión media de saturación de vapor [kPa].

Una vez se tiene el valor de la humedad relativa, la presión real de vapor se calcula como:

$$e_a = e^\circ(T_{media})RH_{media} \quad (\text{Ec. A. 0-11})$$

donde  $e_a$  es la presión real de saturación de vapor [kPa] y RH la fracción de la humedad relativa. Si el valor de RH se da en porcentaje, se debe ingresar el valor de la fracción a la ecuación anterior.

### A. 3.5 Radiación

El cálculo de la radiación neta se puede hacer a partir de parámetros como la radiación extraterrestre, la radiación solar, la radiación de cielo despejado y la radiación de onda larga, a partir de constantes y funciones previamente calibradas. También se puede hacer el cálculo a partir de mediciones de radiación registrados en estaciones especializadas o incluidos en los registros de bases de datos que incluyen información de radar. A continuación, se muestran las posibilidades para el cálculo de la radiación neta.

#### A. 3.5.1 Radiación extraterrestre

La radiación extraterrestre se calcula a partir de la latitud y el día del año, a partir de las siguientes funciones:

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega_s)] \quad (\text{Ec. A. 0-12})$$

donde

$R_a$  es la radiación extraterrestre [MJ/m<sup>2</sup>d]

$G_{sc}$  es la constante solar = 0,082 MJ/m<sup>2</sup>min

$d_r$  es la distancia relativa inversa Tierra-Sol [-](Ec. A. 0-13)

$\omega_s$  es el ángulo de radiación a la puesta del sol [rad]

$\varphi$  es la latitud [rad] (Ec. A. 0-15)

$\delta$  es la declinación solar [rad] (Ec. A. 0-14)

La distancia relativa inversa Tierra-Sol,  $d_r$ , y la declinación solar,  $\delta$ , están dadas por:

$$d_r = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad (\text{Ec. A. 0-13})$$

$$\delta = 0.409 * \sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right) \quad (\text{Ec. A. 0-14})$$

donde  $J$  es el número del día del año entre 1 (1 de enero) y 365 (31 de diciembre).

El ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol,  $\omega_s$ , se da por:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (\text{Ec. A. 0-15})$$



### A. 3.5.2 Duración máxima de la insolación (N)

La duración máxima de la insolación N, está dada por:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (\text{Ec. A. 0-16})$$

donde  $\omega_s$  es el ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol calculado con la Ecuación (Ec. A. 0-15). El número máximo de horas de luz o insolación se utiliza para calcular la radiación solar.

### A. 3.5.3 Radiación solar o de onda corta

Los valores de radiación solar se pueden obtener de mediciones directas o se pueden calcular utilizando la fórmula de Angstrom, que relaciona la radiación solar extraterrestre ( $R_a$ ) con la duración de la insolación (N).

- Cálculo a partir de la fórmula de Angstrom

$$R_s = \left( a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (\text{Ec. A. 0-17})$$

donde

$R_s$  es la radiación solar o de onda corta [ $\text{MJ}/\text{m}^2\text{d}$ ]

$n$  es la duración real de la insolación [horas]

$N$  es la duración máxima posible de la insolación [horas] (Ec. A. 0-19)

$R_a$  es la radiación extraterrestre [ $\text{MJ}/\text{m}^2\text{d}$ ] (Ec. A. 0-12)

$a_s$  es la constante de regresión, que expresa la fracción radiación extraterrestre que llega a la tierra en días muy nublados ( $n = 0$ ),  $a_s = 0.25$  si no existe calibración

$a_s + b_s$  es la fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados ( $n = N$ ),  $b_s = 0.50$  si no existe calibración

La radiación solar neta, que es la diferencia entre la radiación solar entrante y la reflejada se calcula como:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (\text{Ec. A. 0-18})$$

donde  $\alpha$  es el albedo o coeficiente de reflexión del cultivo. Al calcular la evapotranspiración de referencia, el albedo para el cultivo estándar es 0.23.

- Mediciones disponibles

Para la base de datos de variables climáticas de la Universidad de Princeton, se cuenta con información diaria de mediciones de radiación solar. El parámetro que se relaciona con la radiación solar o radiación de onda corta es  $dswrf$  o *downward shortwave radiation*. Esta radiación es la de onda corta de entrada a la atmósfera, equivalente a  $R_s$  calculada a partir de la (Ec. A. 0-18). Para calcular el valor neto de radiación de onda corta se debe estimar el valor de reflexión de la onda corta, que se estima a partir del albedo:

$$R_{ns} = dswrf * (1 - \alpha) \quad \text{(Ec. A. 0-19)}$$

donde  $dswrf$  es el valor medido de radiación de onda corta expresado en MJ/m<sup>2</sup>d.

#### A. 3.5.4 Radiación neta de onda larga

La radiación neta de onda larga se puede obtener a partir de mediciones o haciendo uso de la ley de Stefan-Boltzmann, que para esta metodología es corregida para incluir el efecto de la humedad y la nubosidad en la radiación de onda larga.

- A partir de la ley Stefan-Boltzmann

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad \text{(Ec. A. 0-20)}$$

donde

$R_{nl}$  es la radiación neta de onda larga [MJ/m<sup>2</sup>d]

$\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann,  $4.903 \times 10^{-9}$  MJ/K<sup>4</sup>m<sup>2</sup>día

$T_{max,K}$  la temperatura máxima absoluta diaria [K]

$T_{min,K}$  la temperatura mínima absoluta diaria [K]

$e_a$  es la presión de vapor real [kPa],

$R_s/R_{so}$  es la radiación relativa de onda corta (valores  $\leq 1,0$ )

$R_s$  es la radiación solar medida o calculada [MJ/m<sup>2</sup>d]

$R_{so}$  es la radiación en un día despejado [MJ/m<sup>2</sup>d] (Ec. A. 0-21)

La radiación solar en un día despejado  $R_{so}$  se calcula como:

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad \text{(Ec. A. 0-21)}$$

donde  $z$  es la elevación de la estación o punto de interés sobre el nivel del mar [m].

- Mediciones disponibles

Para la base de datos de variables climáticas de la Universidad de Princeton, se cuenta con información diaria de mediciones de radiación solar. El parámetro que se relaciona con la radiación de onda larga es  $dlwrf$  o *downward longwave radiation*. Esta radiación es la de onda larga de entrada a la atmósfera. Para calcular el valor neto de radiación de onda larga  $R_{nl}$  se considera que la cantidad de emisión de energía de onda larga es proporcional a la temperatura absoluta de la superficie elevada a la cuarta potencia siguiendo la ecuación de Stefan-Boltzmann:

$$R_{nl} = dlwrf - (\varepsilon_o \sigma T_{media,K}^4 + (1 - \varepsilon_o) * dlwrf) \quad \text{(Ec. A. 0-22)}$$

donde

$dlwrf$  es el valor medido de radiación de onda larga [MJ/m<sup>2</sup>d]

$\varepsilon_o$  es la emisividad, 0.98 para vegetación

$\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann,  $4.903 \times 10^{-9}$  MJ/K<sup>4</sup>m<sup>2</sup>día

$T_{media,K}$  la temperatura media diaria [K]

El término  $(\varepsilon_o \sigma T_{media,K}^4 + (1 - \varepsilon_o) * dlwrf)$  expresa la radiación de onda larga reflejada a la atmósfera.

### A. 3.5.5 Radiación neta

La radiación neta ( $R_n$ ) es la diferencia entre la radiación neta de onda corta ( $R_{ns}$ ) y la radiación neta de onda larga ( $R_{nl}$ ):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad \text{(Ec. A. 0-23)}$$

Los valores de radiación neta de onda corta y larga se pueden obtener a partir de funciones teóricas mediciones (Ec. A. 0-18) y (Ec. A. 0-20) o de mediciones (Ec. A. 0-19) y (Ec. A. 0-22).

### A. 3.6 Velocidad del viento

La velocidad del viento se debe incluir en el cálculo de la evapotranspiración, y se expresa como el promedio de la variable en un día. Las mediciones en estaciones deben establecer a qué altura se hacen, ya que la velocidad aumenta con la altura, debido a la fricción de la superficie. La velocidad de viento para el uso en la ecuación Penmann-Monteith debe ser a 2 m. Para mediciones para alturas diferentes se deben corregir de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (\text{Ec. A. 0-24})$$

donde

$u_2$  es la velocidad del viento a 2 m sobre la superficie [m/s]

$u_z$  es la velocidad del viento medida a  $z$  metros sobre la superficie [m/s]

$z$  es la altura de medición sobre la superficie [m]

En caso de no contar con información medida de velocidad del viento, la FAO en su publicación No. 56 recomienda los siguientes valores:

Viento suave  $u_2 = 0.5 \text{ m/s}$

Viento suave a moderado  $u_2 = 2 \text{ m/s}$

Viento moderado a fuerte  $u_2 = 4 \text{ m/s}$

Viento fuerte  $u_2 = 5.5 \text{ m/s}$

### A. 3.7 Variables climáticas a partir de base de datos Universidad de Princeton

Para hacer uso de información contenida en bases de datos, se debe verificar que las variables climáticas se ajusten a los parámetros de entrada de la ecuación de Penmann-Monteith. Por ejemplo, para hacer uso de la información contenida en la base de datos de la Universidad de Princeton se hicieron los siguientes ajustes:

- Radiación

Las unidades de radiación de la base de datos son watts por metro cuadrado [ $\text{W/m}^2$ ], que se transforman a mega julios por metro cuadrado [ $\text{MJ/m}^2$ ] para el uso de la ecuación de Penmann-Monteith. Hay que considerar que la información de la base de datos es radiación entrante de onda corta o larga, no es la radiación neta.

- Humedad relativa

La información contenida en la base de datos es humedad específica. Se debe hacer el ajuste, siguiendo la (Ec. A. 0-9) o la (Ec. A. 0-10) para obtener el valor de humedad relativa.

No se hicieron ajustes para la velocidad del viento o la presión atmosférica.

El procedimiento que se siguió para calcular la evapotranspiración, a partir de la información histórica de variables climáticas diferentes a temperatura, consideró la variación en el tiempo de estas variables. Es decir, para cada punto donde hay información entre los años 1981 y 2010, se calculó la media multianual del parámetro en grupos de 10 días o decadales. Con esto, se obtienen 36 valores medios en el año que consideran la estacionalidad de cada variable. Por ejemplo, en época de verano el aire caliente tiende a almacenar mayor cantidad de vapor de agua que época de invierno. El cálculo del valor de la evapotranspiración de referencia diaria toma los valores del respectivo decadal del día en que se está haciendo el cálculo.

Las medias decadales (o de grupos de 10 días consecutivos) de los parámetros climáticos diferentes a la temperatura media se utilizan tanto para el cálculo de la serie de evapotranspiración histórica como la serie simulada. No se hace una modelación o simulación estocástica de estas variables (radiación, humedad, velocidad del viento o presión atmosférica) porque se requiere de modelos meteorológicos complejos que consideren interacciones físicas que sobrepasan el alcance de este proyecto.

### A. 3.8 Evapotranspiración de referencia

Luego de calcular los parámetros climáticos necesarios para el cálculo de la evapotranspiración de referencia, a partir de funciones teóricas o registros medidos en sitio, se aplica la ecuación de Penmann-Monteith que se presenta a continuación:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{(Ec. A. 0-25)}$$

donde

$ET_0$  es la evapotranspiración de referencia [mm/d]

$R_n$  es la radiación neta [MJ/m<sup>2</sup>d] (Ec. A. 0-23)

$G$  es el flujo de calor del suelo, para periodos cortos (diario) su valor es muy pequeño comparado con el valor de  $R_n$  por lo que se considera  $G = 0$

$\gamma$  es la constante psicrométrica [kPa/°C] (Ec. A. 0-2)

$T$  es la temperatura promedio diaria [°C]

$u_2$  es la velocidad del viento (a 2m de la superficie) [m/s]

$(e_s - e_a)$  representa el déficit de presión de vapor [kPa] (Ec. A. 0-4) y (Ec. A. 0-11)

$\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C] (Ec. A. 0-5)

El término 0.408 convierte la radiación neta de MJ/m<sup>2</sup>d al valor equivalente de evaporación en mm/día.

## A. 4 Indicadores de sequía

---

### A. 4.1 RDI

El Reconnaissance Drought Index (RDI), propuesto por Tsakiris et al. (2007), calcula la relación entre la precipitación y la evapotranspiración potencial, para diferentes escalas temporales. Esta relación se conoce como el valor inicial de RDI ( $\alpha_0$ ) y normalmente se calcula para el año  $i$ , en una base anual, utilizando la siguiente expresión acumulativa:

$$\alpha_0^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^{12} P_{ij}}{\sum_{j=1}^{12} PET_{ij}} \quad (\text{Ec. A. 0-26})$$

En donde  $P_{ij}$  y  $PET_{ij}$  son la precipitación y evapotranspiración potencial del mes  $j$  del año  $i$ . La media aritmética de todos los valores de  $\alpha$  calculados para todos los años con información disponible ( $\bar{\alpha}$ ), representa las condiciones climáticas normales de la región de estudio, y es igual al Indicador de Aridez (Aridity Index) propuesto por FAO. Este parámetro se emplea para normalizar los valores de  $\alpha$ , año a año, en lo que se conoce como el RDI normalizado ( $RDI_n$ ):

$$RDI_n^{(i)} = \frac{\alpha_0^{(i)}}{\bar{\alpha}_0} - 1 \quad (\text{Ec. A. 0-27})$$

Por otra parte, el RDI estandarizado ( $RDI_{st(k)}$ ), se determina mediante la definición de una variable  $y_i = \ln \alpha_0^{(i)}$ , en donde implícitamente se asume que la relación entre la precipitación y la evapotranspiración potencial sigue una distribución lognormal:

$$RDI_{st(k)}^{(i)} = \frac{y_k^{(i)} - \bar{y}_k}{\bar{\sigma}_{y_k}} \quad (\text{Ec. A. 0-28})$$

en donde  $\bar{y}_k$  es la media aritmética y  $\bar{\sigma}_{y_k}$  la desviación estándar de  $y_i$ .

Los beneficios de usar el RDI como indicador de sequía incluyen: el uso de la precipitación y la evapotranspiración potencial como parámetros para su definición, puede ser calculado para diferentes intervalos de tiempo (desde un mes hasta un año), puede asociarse con sequías agrícolas si el periodo de análisis se sobrepone a la temporada de desarrollo de los cultivos de la región, su cálculo generalmente provee valores representativos de la sequía y su versión estandarizada puede ser comparada

directamente con otros indicadores estandarizados, como el SPI (Standardized Precipitation Index) o el SPEI (Standardized Precipitation Evaporation Index).

#### A. 4.2 SPEI

El Standardized Precipitation Evaporation Index (SPEI), propuesto por Serrano et al. (2010), representa un balance hídrico en donde se calcula la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración, definiendo así el parámetro  $D$ , el cual es una medida del superávit o déficit de agua para el mes analizado.  $D^k$  es el parámetro agregado en una escala temporal específica ( $k$  meses), agregando en pasos de tiempo mensuales ( $n$  es el mes de cálculo):

$$D_i = P_i - PET_i \quad (\text{Ec. A. 0-29})$$

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} P_{n-i} - PET_{n-i} \quad (\text{Ec. A. 0-30})$$

Serrano et al. (2010), encontró que el parámetro  $D^k$  se ajusta a una distribución de probabilidad log-logística (Ec. A. 0-31), con parámetros de escala ( $\kappa$ ), forma ( $\lambda$ ) y origen ( $\mu$ ) que pueden ser estimados desde los datos históricos aplicando el método de los momentos.

$$f(x) = \frac{\lambda}{\kappa} \left( \frac{x - \mu}{\kappa} \right)^{\lambda-1} \left[ \left( 1 + \frac{x - \mu}{\kappa} \right)^{\lambda} \right]^{-2} \quad (\text{Ec. A. 0-31})$$

De manera similar al RDI (Reconnaissance Drought Index), el uso del SPEI presenta las ventajas del uso de la precipitación y la evapotranspiración potencial como parámetros para su definición, que puede ser calculado para diferentes intervalos de tiempo y puede asociarse fácilmente con sequías agrícolas.



#### A.5 Modelos de circulación global considerados en este estudio

Modelo	Nombre	País	Resumen	Referencia
ACCESS 1	Australian Community Climate and Earth System Simulator	Australia	Modelo que prescribe la temperatura de la superficie terrestre y por lo tanto produce un estado promedio de un modelo que permite libremente las variaciones en temperatura.	Ackerley, D. & Dommenges, D. (2016). Atmosphere-only GCM (ACCESS1.0) simulations with prescribed land surface temperatures. Geosci. Model Dev., 9, pp. 2077-2098, doi:10.5194/gmd-9-2077-2016, 2016.
BCC-CSM 1.1	Beijing Climate Center Climate System Model versión 1.1	China	Modelo en el cual el componente atmosférico (BCC_AGCM2.1), el componente oceánico (MOM4-L40), el componente terrestre (BCC_AVIM 1.0) y el componente de hielo oceánico (SIS) están completamente acoplados e interaccionan mutuamente a través de flujos de momento, energía, agua y carbono.	Wu T., Li W., Ji J., Xin X., et al. (2012). The 20th century global carbon cycle from the Beijing Climate Center Climate System Model (BCC_CSM). J. Climate
BNU-ESM	Beijing Normal University	China	Modelo acoplado que se compone de 5 componentes: atmósfera	D. Ji1, L. Wang1, J. Feng1, Q. Wu1, H. Cheng1, Q. Zhang1, J. Yang2, W.

<b>Modelo</b>	<b>Nombre</b>	<b>País</b>	<b>Resumen</b>	<b>Referencia</b>
	Earth System Model		(CAM4), tierra (CoLM), océano (MOM4pl), hielo oceánico (CICE 4.1) y ciclo del carbono.	Dong2, Y. Dai1, D. Gong2, R.-H. Zhang3,4,X. Wang4, J. Liu5, J. C. Moore1, D. Chen6, and M. Zhou7. (2014). Description and basic evaluation of Beijing Normal University Earth System Model (BNU-ESM) version 1. Geosci. Model Dev., 7, pp. 2039-2064.
CanESM2	Second Generation Canadian Earth System Model	Canadá	Modelo que acopla el modelo de circulación atmósfera-océano con un modelo de vegetación y el ciclo interactivo de carbono sobre tierra y océano.	P. Chylek1, J. Li2, M. K. Dubey1, M. Wang3, and G. Lesins4. (2011). Observed and model simulated 20th century Arctic temperature variability: Canadian Earth System Model CanESM2. Atmos. Chem. Phys. Discuss., 11, pp. 22893-22907.
CCSM4	Community Climate System Model	Estados Unidos	Modelo acoplado de 4 componentes: atmósfera, océano, superficie terrestre y hielo oceánico. Es un sub-set del modelo CESM1 (Community Earth System Model) de	PETER R. GENT,* GOKHAN DANABASOGLU,* LEO J. DONNER, MARIKA M. HOLLAND,* ELIZABETH C. HUNKE, # STEVE R. JAYNE, @ DAVID M. LAWRENCE,* RICHARD

Modelo	Nombre	País	Resumen	Referencia
			la UCAR y es mantenido por la NCAR.	B. NEALE,* PHILIP J. RASCH, & MARIANA VERTENSTEIN,* PATRICK H. WORLEY,** ZONG-LIANG YANG, 11 AND MINGHUA ZHANG. (2011). The Community Climate System Model Version 4. Journal of Climate, 24, pp. 4973-4991
CESM 1- BGC	Community Earth System Model Versión 1 - BioGeoChemical model	Estados Unidos	Modelo que acopla un modelo terrestre biogeoquímico (que incluye la dinámica del carbono-nitrógeno) a un modelo oceánico biogeoquímico y al Co2 atmosférico.	Keith Lindsay, Gordon B. Bonan, Scott C. Doney, Forrest M. Hoffman, David M. Lawrence, Matthew C. Long, Natalie M. Mahowald, J. Keith Moore, James T. Randerson, Peter E. Thornton. (2014). Preindustrial-Control and Twentieth-Century Carbon Cycle Experiments with the Earth System Model CESM1 (BCG). Journal of CLimate, 27(24), pp. 8981- 9005

<b>Modelo</b>	<b>Nombre</b>	<b>País</b>	<b>Resumen</b>	<b>Referencia</b>
CESM 1-CAM5	Community Earth System Model Version 1 - Community Atmospheric Model Version 5	Estados Unidos	El CAM5 corresponde al componente atmosférico del CESM1. Esta versión permite simular los efectos radiativos de los aerosoles.	NCAR. (2012). Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 5.0). NCAR Technical Note.
CMCC-CESM	Centro Euro-Mediterráneo sui Cambiamenti Climatici - Carbon Earth System Model	Italia	Modelo de circulación general entre la atmósfera y el océano de 5 componentes: océano (NEMO), atmósfera (ECHAM5), hielo oceánico (LIM2), biogeoquímica oceánica (PELAGOS) y vegetación terrestre (SILVA).	Fogli, P.G. & Iovino, D. (2014). CMCC-CESM-NEMO: toward the new CMCC Earth System Model. CMCC Research Papers, (RP0248).
CMCC-CM	Centro Euro-Mediterráneo sui Cambiamenti Climatici - Climate Model	Italia	Modelo acoplado de circulación general atmósfera-océano de 3 componentes: océano (OPA 8.2), hielo oceánico (LIM) y atmósfera (ECHAM5).	Bellucci, A., S. Gualdi, E. Scoccimarro, and A. Navarra, 2008: NAO–ocean circulation interactions in a coupled general circulation model. Climate Dyn., 31, 759–777, doi:10.1007/s00382-008-0408-4

Modelo	Nombre	País	Resumen	Referencia
CMC C- CMS	Centro Euro- Mediterráneo sui Cambiame nti Climatici - Climate Model with a resolved Stratospher e	Italia	Modelo basado en el CMCC-CM con modificaciones a la estratosfera.	Cagnazzo, C., Manzini E., Fogli, P. G., Vichi, M. and Davini P. (2012). "Role of Stratospheric Dynamics in the Ozone-Carbon connec)on in the Southern Hemisphere".
CNR M- CM5	Centre National de Recherches Météorologi ques - Coupled Model 5	Francia	Modelo acoplado de 5 componentes: atmósfera (ARPEGE-Climate), océano (NEMO), hielo oceánico (GELATO), tierra (SURFEX) y ríos (TRIP).	Voldoire, A., E. Sanchez- Gomez, D. Salas y Méliá, B. Decharme, C. Cassou, S.Sénési, S. Valcke, I. Beau, A. Alias, M. Chevallier, M. Déqué, J. Deshayes, H. Douville, E. Fernandez, G. Madec, E. Maisonnavé, M.-P. Moine, S. Planton, D.Saint-Martin, S. Szopa, S. Tyteca, R. Alkama, S. Belamari, A. Braun, L. Coquart, F. Chauvin. (2011). The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. Clim. Dyn., accepted,

Modelo	Nombre	País	Resumen	Referencia
				DOI:10.1007/s00382-011-1259-y
CSIRO-Mk3.6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization	Australia	Modelo de atmósfera-oceano acoplado que incluye hielo oceánico, y un esquema suelo-cobertura vegetal.	Jeffrey, S. J., Rotstayn, L. D., Collier, M. A., Dravitzki, S. M., Hamalainen, C., Moeseneder, C., Wong, K. K., and J. I. Syktus (2013). Australia's CMIP5 submission using the CSIRO Mk3.6 model. Australian Meteorological and Oceanographic Journal, 63, pp. 1–13, <a href="http://www.bom.gov.au/amoj/docs/2013/jeffrey_hres.pdf">http://www.bom.gov.au/amoj/docs/2013/jeffrey_hres.pdf</a> .
FGOALS-g2	Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System, Gridpoint version 2	China	Modelo de 4 componentes: atmósfera (GAMIL2), océano (LICOM2), hielo oceánico (CICE4-LASG) y tierra (CLM3).	Li, L., Lin, P., Yu, Y. et al. (2013). The flexible global ocean-atmosphere-land system model, Grid-point Version 2: FGOALS-g2. Adv. Atmos. Sci., 30:(543). doi:10.1007/s00376-012-2140-6
FGOALS-s2	Flexible Global Ocean-	China	Modelo de 4 componentes: atmósfera (SAMIL2), océano	Bao, Q., Lin, P., Zhou, T. et al. (2013). The flexible global ocean-atmosphere-

<b>Modelo</b>	<b>Nombre</b>	<b>País</b>	<b>Resumen</b>	<b>Referencia</b>
	Atmosphere-Land System, Spectral version 2		(LICOM2), hielo oceánico (CICE4-LASG) y tierra (CLM3).	land system model, Spectral Version 2: FGALS-s2. Adv. Atmos. Sci., 30(561). doi:10.1007/s00376-012-2113-9
FIO-ESM	First Institute of Oceanography-Earth System Model	China	Modelo climático acoplado con un modelo completo del ciclo del carbono de 5 componentes: olas superficiales oceánicas, atmósfera, océano, tierra y hielo oceánico.	Qiao, F., Song, Z., Bao, Y., Song, Y., Shu, Q., Huang, C., Zhao, W. (2013). Development and evaluation of an Earth System Model with surface gravity waves. Journal of Geophysical Research, 118(9), pp.4514-4524)
GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - Climate Model 3	Estados Unidos	Modelo acoplado de 5 componentes: atmósfera (AM3), tierra (LM2), vegetación, hielo oceánico (SIS) y océano (MOM).	Leo J. Donnera, Bruce L. Wyman, Richard S. Hemler, Larry W. Horowitz, Yi Ming, Ming Zhaob, Jean-Christophe Golaza, Paul Ginoux, S.-J. Lina, M. Daniel Schwarzkopf, John Austin, Ghassan Alakac, William F. Cook, Thomas L. Delworth, Stuart M. Freidenreich, C. T. Gordon, Stephen M. Griffies, Isaac M. Held,

Modelo	Nombre	País	Resumen	Referencia
				<p>William J. Hurlina, Stephen A. Kleine, Thomas R. Knutsona, Amy R. Langenhorstd, Hyun-Chul Leed, Yanluan Linb, Brian I. Magif, Sergey L. Malyshevf, P. C. D. Millyg, Vaishali Naikd, Mary J. Natha, Robert Pincush, Jeffrey J. Ploshaya, V. Ramaswamy, Charles J. Semana, Elena Shevliakovaf, Joseph J. Sirutisa, William F. Sterna, Ronald J. Stouffera, R. John Wilsona, Michael Wintona, Andrew T. Wittenberga, and Fanrong Zenga. (2011). The Dynamical Core, Physical Parametrizations, and Basic Simulation Characteristics of the Atmospheric Component AM3 of the GFDL Global Coupled Model CM3. Journal of CLimate. DOI: <a href="http://dx.doi.org/10.1175/2011JCLI3955.1">http://dx.doi.org/10.1175/2011JCLI3955.1</a></p>



Modelo	Nombre	País	Resumen	Referencia
GFDL - ESM2 G	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - Earth System Model 2G	Estados Unidos	Modelo de 4 componentes: océano (GOLD), tierra (LM3), atmósfera y hielo oceánico.	John P. Dunne*, Jasmin G. John*, Alistair J. Adcroft+, Stephen M. Griffies*, Robert W. Hallberg*, Elena Shevliakova#, Ronald J. Stouffer*, William Cooke@, Krista A. Dunne&, Matthew J. Harrison*, John P. Krasting**, Sergey L. Malyshev#, P. C. D. Milly&, Peter J. Phillipps*, Lori T. Sentman*, Bonita L. Samuels*, Michael J. Spelman@, Michael Winton*, Andrew T. Wittenberg*, and Niki Zadeh. (2012). GFDL's ESM2 Global Coupled Climate-Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics. Journal of Climate. DOI: <a href="http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00560.1">http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00560.1</a>

Modelo	Nombre	País	Resumen	Referencia
GFDL-ESM2G	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - Earth System Model 2M	Estados Unidos	Modelo de 4 componentes: océano (MOM4.1), tierra (LM3), atmósfera y hielo oceánico.	John P. Dunne*, Jasmin G. John*, Alistair J. Adcroft+, Stephen M. Griffies*, Robert W. Hallberg*, Elena Shevliakova#, Ronald J. Stouffer*, William Cooke@, Krista A. Dunne&, Matthew J. Harrison*, John P. Krasting**, Sergey L. Malyshev#, P. C. D. Milly&, Peter J. Philipps*, Lori T. Sentman*, Bonita L. Samuels*, Michael J. Spelman@, Michael Winton*, Andrew T. Wittenberg*, and Niki Zadeh. (2012). GFDL's ESM2 Global Coupled Climate-Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics. Journal of Climate. DOI: <a href="http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00560.1">http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00560.1</a>
GISS-E2	Goddard Institute for	Estados Unidos	Modelo de 4 componentes: océano, tierra, atmósfera, y hielo	Nazarenko, L., G.A. Schmidt, R.L. Miller, N. Tausnev, M. Kelley, R.

<b>Modelo</b>	<b>Nombre</b>	<b>País</b>	<b>Resumen</b>	<b>Referencia</b>
	Space Studies-E2	Unidos	oceánico; con capacidad de modelar interacciones entre química atmosférica, aerosoles, y el ciclo de carbono.	Ruedy, G.L. Russell, I. Aleinov, M. Bauer, S. Bauer, R. Bleck, V. Canuto, Y. Cheng, T.L. Clune, A.D. Del Genio, G. Faluvegi, J.E. Hansen, R.J. Healy, N.Y. Kiang, D. Koch, A.A. Lacis, A.N. LeGrande, J. Lerner, K.K. Lo, S. Menon, V. Oinas, J.P. Perlwitz, M.J. Puma, D. Rind, A. Romanou, Mki. Sato, D.T. Shindell, S. Sun, K. Tsigaridis, N. Unger, A. Voulgarakis, M.-S. Yao, and J. Zhang, 2015: Future climate change under RCP emission scenarios with GISS ModelE2. J. Adv. Model. Earth Syst., 7, no. 1, 244-267, doi:10.1002/2014MS000403.
HadCM3	Hadley Centre Coupled Model Version 3	Reino Unido	Modelo acoplado océano (Modelo HadOM3) -atmósfera (modelo HadAM3) usado en el tercer reporte de evaluación del IPCC.	Pope, V., M.L. Gallani, P.R. Rowntree, R.A. Stratton, 2000. The impact of new physical parameterizations in the Hadley Centre

<b>Modelo</b>	<b>Nombre</b>	<b>País</b>	<b>Resumen</b>	<b>Referencia</b>
				climate model: HadAM3. Clim. Dyn., 16, 123-146
HadGEM2	Hadley Centre Global Environment Model version 2	Reino Unido	Modelo acoplado océano-atmósfera, con modelación vertical que incluye un modelo de la estratósfera, e incluye interacciones del sistema terrestre como vegetación dinámica, biología marina y química atmosférica.	Collins, W.J., N. Bellouin, M. Doutriaux-Boucher, N. Gedney, T. Hinton, C. D. Jones, S. Liddicoat, G. Martin, F. O'Connor, J. Rae, C. Senior, I. Totterdell, S. Woodward, T. Reichler, J. Kim, 2008: Evaluation of the HadGEM2 model. Met Office Hadley Centre Technical Note no. HCTN 74, <a href="http://www.metoffice.gov.uk/publications/HCTN/index.html">http://www.metoffice.gov.uk/publications/HCTN/index.html</a>
INMCM4	Institute for Numerical Mathematics Climate Model 4	Rusia	Modelo acoplado océano-atmósfera.	Volodin, E.M., Dianskii, N.A. & Gusev, A.V. Izv. Atmos. Ocean. Phys. (2010) 46: 414. <a href="https://doi.org/10.1134/S00143381004002X">https://doi.org/10.1134/S00143381004002X</a>
IPSL-CM5	Institut Pierre Simon Laplace	Francia	Modelo del sistema terrestre completo, con dos conjuntos de modelos físicos.	Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5, Dufresne, J.-L., et al., Climate Dynamics,

Modelo	Nombre	País	Resumen	Referencia
	Climate Model			40, 9-10, 2123-2165, 2013, doi: 10.1007/s00382-012-1636-1
MIRO C4h	Model for Interdisciplinary Research on Climate 4	Japón	Modelo acoplado océano-atmósfera de alta resolución.	Takashi T. SAKAMOTO, Yoshiki KOMURO, Teruyuki NISHIMURA, Masayoshi ISHII, Hiroaki TATEBE, Hideo SHIOGAMA, Akira HASEGAWA, Takahiro TOYODA, Masato MORI, Tatsuo SUZUKI, Yukiko IMADA, Toru NOZAWA, Kumiko TAKATA, Takashi MOCHIZUKI, Koji OGOCHI, Seita EMORI, Hiroyasu HASUMI, Masahide KIMOTO, MIROC4h—A New High-Resolution Atmosphere-Ocean Coupled General Circulation Model, Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, Released June 30, 2012, Online ISSN 2186-9057, Print ISSN 0026-1165, <a href="https://doi.org/10.2151/jmsj">https://doi.org/10.2151/jmsj</a> . 2012-301,

<b>Modelo</b>	<b>Nombre</b>	<b>País</b>	<b>Resumen</b>	<b>Referencia</b>
				<a href="https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmsj/90/3/90_2012-301/_article/-char/en">https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmsj/90/3/90_2012-301/_article/-char/en</a> ,
MIROC5	Model for Interdisciplinary Research on Climate 5	Japón	Modelo acoplado océano-atmósfera con actualizaciones en esquemas de parametrización para obtener mejores resultados que versiones anteriores del modelo.	Watanabe et. Al. Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability and Climate Sensibility. December 2010 Journal of Climate 23:6312-6335
MIROC-ESM	Model for Interdisciplinary Research on Climate Earth System Model	Japón	Modelo del sistema terrestre, incluye atmósfera, océano, hielo oceánico, superficie terrestre, bioquímica oceánica y terrestre y química atmosférica.	Watanabe et al. MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. Geosci. Model Dev., 4, 845-872, 2011 <a href="https://doi.org/10.5194/gmd-4-845-2011">https://doi.org/10.5194/gmd-4-845-2011</a>
MPI-ESM	Max Planck Institut für Meteorologie Earth System Model	Alemania	Modelo acoplado de atmósfera (ECHAM6), océano (MPIOM), superficie terrestre (JSBACH) y bioquímica oceánica (HAMOCC).	Max Planck Institute for Meteorology Earth System Model. Journal of Advances in Modelling Earth Systems. Special Issue. 2018.
MRI-CGC-M3	Meteorological Research	Japón	Modelo acoplado de módulos atmósfera-superficie, aerosoles y	Yukimoto et al. A New Global Climate Model of the Meteorological Research

Modelo	Nombre	País	Resumen	Referencia
	Institute Global Climate Model 3		hielo oceánico. Es parte del modelo del sistema terrestre MRI-ESM1	Institute: MRI-CGCM3 - Model Description and Basic Performance. Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 90A, pp. 23--64, 2012.
NorESM1-M	Norwegian Earth System Model	Noruega	Modelo basado en CCSM4, con modelos avanzados para océano y de interacción entre química-aerosoles-nubosidad-radiación en la atmosfera.	Bentsen et al. The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M – Part 1: Description and basic evaluation of the physical climate. Geosci. Model Dev., 6, 687-720, 2013

#### A. 6 Interpolación espacial mediante el método kriging

Kriging es una metodología de interpolación geoestadística que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersos con valores “z” de los parámetros a interpolar, aplicando el principio de geografía que indica que es más probable que dos puntos cercanos sean más parecidos que dos puntos lejanos. Esta metodología estudia el comportamiento espacial de la variable a interpolar antes de seleccionar el mejor método de estimación para generar la interpolación resultante (ArcGIS, s/f).

Los métodos geoestadísticos de interpolación, como el kriging, están basados en modelos que incluyen las relaciones estadísticas entre puntos medidos (supone una correlación espacial entre puntos) y tienen la capacidad de proporcionar al modelador una medida de certeza o precisión de las predicciones. Este método es adecuado para casos en los que se conoce una influencia direccional entre los datos, y es típicamente utilizado en estudio hidrológicos y climatológicos (Verdin et al., 2016).

La metodología de interpolación con kriging se pueden resumir en los siguientes pasos:

1. Calcular el variograma empírico para todos los puntos con observaciones.

2. Ajustar el variograma teórico al variograma empírico (calculado en el paso anterior). Los variogramas teóricos pueden seguir funciones circulares, esféricas, exponenciales, gaussianas o lineales.
3. En cualquier ubicación, a partir del variograma empírico ajustado previamente, se realiza la predicción de la variable de interés siguiendo un procedimiento de ponderación con los valores medidos en puntos cercanos.

Al comparar con otros métodos de interpolación espacial, el kriging se considera un método robusto que utiliza los datos medidos para modelar el variograma. Por otro lado, métodos como el de la distancia inversa ponderada (IDW) es un método determinista que no brinda información sobre la certeza de los resultados, mientras que el método spline se define una covarianza generalizada sin considerar los datos medidos.



### A.7 Listado de información suministrada por OPYPA-MGAP

En este Anexo se presenta un listado de la información recibida de parte de la Oficina de Programación Y Política Agropecuaria (OPYPA) del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, con el fin de que sea posible identificar los documentos a partir de los cuales se obtuvieron datos para la elaboración de los modelos de exposición y vulnerabilidad.

No.	Item	Archivo	Observaciones	Fuente
1	Estudios previos de cultivos, ganado e infraestructura	Documento Clima de Cambios, capítulo 3.	Documento con informacion sobre los rubros en capítulo 3.	<a href="http://www.fao.org/americas/publicaciones-audio-video/clima-de-cambios/es/">http://www.fao.org/americas/publicaciones-audio-video/clima-de-cambios/es/</a>
2	Mapas de la localización de cultivos	sorgo_maiz.rar, soja.rar, cultivos_invierno.rar, arroz.rar	Datos agregados a nivel de Área de Enumeracion Censal	Procesado por OPYPA. Arroz: análisis de imágenes satelitales Landsat8 y Sentinel 2 Verano 2016-2017. Soja, Sorgo, Maíz y Cereales de Invierno: registros administrativos del MGAP
3		citrus.rar	Datos agregados a nivel de Área de Enumeracion Censal	Procesado por OPYPA con base en registros administrativos del MGAP año 2014
4	Comportamiento de los cultivos	Cereales-oleaginosos área-rend. 1973-2017.xlsx	Series históricas, incluye estacionalidad	MGAP (DIEA procesado por OPYPA)

No.	Item	Archivo	Observaciones	Fuente
5	Costos de producción de los cultivos del país	Costos de producción agrícolas y pecuarios.xls	Estructuras de costos de producción para Soja, Trigo, Maíz, Sorgo y Arroz (un cultivo por pestaña).	Mesa Tecnológica de Oleaginosos, COPAGRAN, Asociación Cultivadores de Arroz.
6	Valores comerciales de los cultivos	Valores comerciales agrícolas y pecuarios.xls	Precios puestos en puertos nacionales de granos.	Cámara Mercantil de Productos del País.
7	Mapas de la localización de pastos naturales	pastos_naturales.rar	Datos agregados a nivel de Área de Enumeracion Censal. No cubre todo el país.	Procesado por OPYPA con base en "Mapa de los pastizales naturales de las regiones geomorfológicas: Areniscas, Basalto, Cristalino Central, Cristalino del Este y Noreste" realizado con imágenes satelitales de 2015 y 2016. DGRN (sin publicar)
8	Mapas de la localización de pastos cultivado	pastos cultivados DJ 2017 por SP.rar	Datos agregados a nivel de Seccion Policial. Campo prad_perm refiere a	Datos del SNIG agregados por seccion policial de la Declaracion Jurada de Semovientes, invierno 2017. Procesado por OPYPA.

No.	Item	Archivo	Observaciones	Fuente
			<p>pasturas sembradas plurianuales, mezcla de leguminosas y gramíneas que duran 3-4 años. Campo forr_anual refiere a forrajeras anuales de invierno principalmente ryegrass y algo de avena.</p>	
9	Comportamiento de los pastos para efectos pecuarios	Producción y estacionalidad pasturas naturales URUGUAY.xlsx	Producción anual de pasturas naturales por regiones del país y por estación	Realizado en base a revisión bibliográfica e imágenes de mapas tomados de: "Desarrollo de un mapa SIG de los pastizales naturales de las regiones geomorfológicas: Areniscas, Basalto, Cristalino Central, Cristalino del Este y Noreste" (en prensa)

No.	Item	Archivo	Observaciones	Fuente
10	Costos de producción/mantenimiento de pastos	Costos de producción agrícolas y pecuarios.xls	Estimación de costos de implantación y mantenimiento de praderas de 3 años (promedio nacional).	OPYPA en base a fuentes primarias de datos e informantes calificados.
11	Costos de la actividad pecuaria	Costos de producción agrícolas y pecuarios.xls	Estructuras de costos de producción para ganadería de carne (promedio nacional).	OPYPA en base a fuentes primarias de datos e informantes calificados.
12	Valores comerciales de la actividad pecuaria	Valores comerciales agrícolas y pecuarios.xls	Precios del ganado gordo para faena (HACIENDA) y precios de venta de ganado de campo (ACG). Precios al productor de productos	Instituto Nacional de Carnes, Asociación Consignatarios de Ganado, Cámara Mercantil de Productos del País, Instituto Nacional de la Leche.

No.	Item	Archivo	Observaciones	Fuente
			derivados de la actividad pecuaria: lana, leche.	
13	Estudios previos de vulnerabilidad de cultivos frente a sequía	Documento Clima de Cambios, capítulo 3		<a href="http://www.fao.org/americas/publicaciones-audio-video/clima-de-cambios/es/">http://www.fao.org/americas/publicaciones-audio-video/clima-de-cambios/es/</a>
14	Estudios previos de vulnerabilidad de ganado frente a sequía	Documento Clima de Cambios, capítulo 3		<a href="http://www.fao.org/americas/publicaciones-audio-video/clima-de-cambios/es/">http://www.fao.org/americas/publicaciones-audio-video/clima-de-cambios/es/</a>
15	Calendario de cultivos	Fenología cereales y oleaginoso-duración estadios.xls; 6 archivos jpg complementarios	Fenología soja, maíz, sorgo, trigo, cebada, arroz, cítricos.	INIA. Predicción de estados fenológicos de soja y otros cultivos de verano: <a href="http://www.inia.uy/gras/Alertas-y-herramientas/Utilidades#">http://www.inia.uy/gras/Alertas-y-herramientas/Utilidades#</a> ; fenología por cultivo aportada por Facultad de Agronomía e INIA.
16	Biología y manejo de los cultivos del país	Dossier maíz, soja, trigo, arroz	Descripción del manejo de los cultivos, tipo de semillas, etc.	MGAP, Dossier. Información requerida para el Análisis del Riesgo de Plagas

## **A. 8 Metodología para estimar el avalúo de los cultivos**

---

En este anexo se describe la metodología implementada para determinar el avalúo en dólares de la producción de los ocho cultivos seleccionados para la evaluación de riesgo por sequía en Uruguay, incluyendo las fuentes de información empleadas y las suposiciones hechas. Todos los avalúos fueron estimados para el año 2017, el cual fue seleccionado como año de referencia.

### **A. 8.1 Identificación de información disponible**

Como parte de los insumos recibidos por parte de instituciones locales para la ejecución de este proyecto de consultoría, se recibieron las estructuras de costos en chacra para cultivos de soja de primera y segunda siembra, cebada, trigo, maíz de primera siembra, sorgo de primera y segunda siembra en el año agrícola 2016/2017 y para el cultivo de arroz en el año agrícola 2014/2015. Esta estructura de costos está desagregada en ítems como los costos de los insumos, las labores, y seguros en los que incurre un productor para producir una hectárea de cultivo y se presentan en dólares por hectárea. Sin embargo, para los cultivos de cebada, maíz de segunda siembra, cítricos y viñedos fue necesario consultar otras fuentes de información con el fin de obtener los avalúos de la fuente más confiable posible.

A continuación, se presenta la información disponible o consultada para cada uno de los cultivos:

#### **A. 8.1.1 Soja**

Se recibió la estructura de costos en chacra para el cultivo de soja tanto de primera como de segunda siembra para el año agrícola 2016/2017. Estos costos son estimados por el Observatorio de la Mesa Tecnológica de Oleaginosos de Uruguay y la DIEA del MGAP.

Estructura de costos en chacra, en USD/ha, para el cultivo de soja en el año agrícola 2016/2017

Item	Costo [USD/ha]	
	Primera siembra	Segunda siembra
Semilla	80	94
Inoculante	0.4	0.4
Agroquímicos fitosanitarios	53	31
Fertilizantes	67	56
Combustibles	38	34
Flete de insumos	5	4
Labranza, aplicaciones	134	129
Servicio técnico	10	10
Seguros	15	15
<b>Total (sin renta tierra)</b>	<b>402</b>	<b>373</b>
Renta de la tierra	232	232
<b>Total (con renta tierra)</b>	<b>634</b>	<b>605</b>

Para estimar el avalúo del cultivo se tienen en cuenta todos los ítems reportados y se incluye el valor de la renta de la tierra. Este valor, calculado en dólares por hectárea, se divide por el rendimiento reportado en la sección 1.22 de este informe para obtener el precio de producción por tonelada de soja cosechada.

#### A. 8.1.2 Trigo

Se recibió la estructura de costos en chacra para el cultivo de trigo para el año agrícola 2016/2017. Estos costos son estimados por la Cooperativa Agraria Nacional (COPAGRAN) y la DIEA del MGAP.

Estructura de costos en chacra, en USD/ha, para el cultivo de trigo en el año agrícola 2016/2017

Item	Costo [USD/ha]
Semillas, fertilizantes y agroquímicos	265
Labores y operaciones	153
Imprevistos 5 %	21
Seguros	37
Intereses S/Insumos	24
<b>Total (sin renta de la tierra)</b>	<b>455</b>
Renta de la tierra	232
<b>Total (con renta de la tierra)</b>	<b>687</b>

Para estimar el avalúo del cultivo se tienen en cuenta los ítems reportados a excepción de los imprevistos y los intereses sobre los insumos, y adicionalmente se incluye el valor de la renta de la tierra. Este valor, calculado en dólares por hectárea, se divide por el rendimiento reportado en la sección 1.22 de este informe para obtener el precio de producción por tonelada de trigo cosechado.

#### A. 8.1.3 Cebada

El costo de producción de la cebada usado es el reportado por la cooperativa Unión Rural de Flores<sup>26</sup>, quienes hacen una estimación de los costos asociados a la producción de cultivos cerealeros entre los cuales está la cebada y que incluyen los precios de labores que reporta la Cámara Uruguaya de Servicios Agropecuarios, actualizado a junio de 2017.

Estructura de costos en chacra, en USD/ha, para el cultivo de cebada actualizado a junio de 2017

Item	Costo [USD/ha]
Herbicida	27

<sup>26</sup> Obtenido de <http://www.urf.com.uy/archivos/cultivos.pdf>



Item	Costo [USD/ha]
Semilla	66
Fertilizantes	53
Urea	99
Insecticida	1
Funguicida	37
Labores	172
Seguro	14
<b>Total (sin renta tierra)</b>	<b>569</b>

Para estimar el avalúo del cultivo se tienen en cuenta todos los ítems reportados y se le adiciona el valor de la renta de la tierra, asumido igual al que ha sido reportado para los otros cultivos cerealeros y que corresponde a \$232 dólares por hectárea, para un costo total de \$701 dólares por hectárea de cebada. Este valor se divide por el rendimiento reportado en la sección 1.22 de este informe para obtener el precio de producción por tonelada de cebada cosechada.

#### A. 8.1.4 Arroz

Se recibió la estructura de costos en chacra para el cultivo de arroz para el año agrícola 2014/2015. Estos costos son estimados por la OPYPA con base en la Mesa Sectorial del Arroz y la DIEA del MGAP y son actualizados al año 2017 siguiendo el procedimiento que se explica en la sección A. 8.2 de este Anexo.

Estructura de costos en chacra, en USD/ha, para el cultivo de arroz en el año agrícola 2014/2015

Item		Costo [USD/ha]
1	Labores previas	95

Item		Costo [USD/ha]
2	Preparación suelos, fertilización, siembra, nivelación, herbicidas	539
3	Riego	
3.1	Riego contratado	143
3.2	Riego propio	
3.2.1	Gravedad	
3.2.1.1	Represa propia	3
3.2.1.2	Represa en campo ajeno	19
3.2.2	Bombeo eléctrico	30
3.2.3	Bombeo gasoil	91
4	Cosecha y secado	351
5	Reparación y mantenimiento	80
6	Imprevistos (5%)	68
	<b>Total, sin amortización, renta y costo financiero</b>	<b>1,419</b>
7	Amortización	115
8	Renta de la tierra	118
9	Costo financiero	43
	<b>Total</b>	<b>1,695</b>

Para estimar el avalúo del cultivo se tienen en cuenta los ítems reportados, donde se asume un riego contratado entre las opciones presentadas, y se excluyen los imprevistos, la amortización y el costo financiero. Adicionalmente se incluye el valor de la renta de la tierra. Este valor, calculado en dólares por hectárea, se divide por el rendimiento reportado en la sección 1.22 de este informe para obtener el precio de producción por tonelada de arroz cosechado.

#### A. 8.1.5 Maíz

Se recibió la estructura de costos en chacra únicamente para el cultivo de maíz de primera siembra para el año agrícola 2016/2017. Estos costos son estimados por la Cooperativa Agraria Nacional (COPAGRAN) y la DIEA del MGAP.

Estructura de costos en chacra, en USD/ha, para el cultivo de maíz de primera siembra en el año agrícola 2016/2017

Item	Costo [USD/ha]
	Primera siembra
Semillas y agroquímicos	396
Labores y operaciones	195
Imprevistos 5%	30
Seguros	22
Intereses S/Insumos	35
<b>Total (sin renta tierra)</b>	<b>677</b>
Renta de la tierra	232
<b>Total (con renta tierra)</b>	<b>909</b>

El costo de producción del maíz de segunda siembra usado es el reportado por la cooperativa Unión Rural de Flores, quienes hacen una estimación de los costos asociados a la producción de cultivos cerealeros entre los cuales está el maíz de segunda

siembra y que incluyen los precios de labores que reporta la Cámara Uruguaya de Servicios Agropecuarios, actualizado a junio de 2017.

Estructura de costos en chacra, en USD/ha, para el cultivo de maíz de segunda siembra actualizado a junio de 2017

Item	Costo [USD/ha]
	Segunda siembra
Herbicida	17
Semilla	221
Fertilizantes	56
Urea	59
Coadyuvantes	6
Insecticida	6
Labores	186
Seguro	17
<b>Total (sin renta tierra)</b>	<b>469</b>

Para estimar el avalúo del cultivo se tienen en cuenta los ítems reportados a excepción de los imprevistos y los intereses sobre los insumos en el caso del maíz de primera siembra, y adicionalmente se incluye el valor de la renta de la tierra, que en el caso del maíz de segunda siembra se asume igual al que ha sido reportado para el maíz de primera y que corresponde a \$232 dólares por hectárea, para un costo total de \$801 dólares por hectárea de maíz de segunda siembra. Este valor, se divide por el rendimiento reportado en la sección 1.22 de este informe para obtener el precio de producción por tonelada de maíz cosechado.

#### A. 8.1.6 Sorgo

Se recibió la estructura de costos en chacra para el cultivo de sorgo tanto de primera como de segunda siembra para el año agrícola 2016/2017. Estos costos son estimados por la Cooperativa Agraria Nacional (COPAGRAN) y la DIEA del MGAP.

Estructura de costos en chacra, en USD/ha, para el cultivo de sorgo en el año agrícola 2016/2017

Item	Costo [USD/ha]	
	Primera siembra	Segunda siembra
Semillas y agroquímicos	278	239
Labores y operaciones	173	98
Imprevistos 5%	23	17
Seguros	18	18
Intereses S/Insumos	25	20
<b>Total (sin renta tierra)</b>	<b>517</b>	<b>393</b>
Renta de la tierra	232	232
<b>Total (con renta tierra)</b>	<b>749</b>	<b>625</b>

Para estimar el avalúo del cultivo se tienen en cuenta los ítems reportados a excepción de los imprevistos e intereses sobre insumos y se incluye el valor de la renta de la tierra. Este valor, calculado en dólares por hectárea, se divide por el rendimiento reportado en la sección 1.22 de este informe para obtener el precio de producción por tonelada de sorgo cosechado.

#### **A. 8.1.7 Cítricos**

El costo de producción de los cítricos fue obtenido del documento “La genética de los cítricos en el Uruguay: presente y futuro” (Codina, 2017) en donde se reportan costos de producción estimados para naranjas, limones y mandarinas. Se asume el valor máximo reportado, que corresponde a \$8,500 dólares por hectárea.

Para estimar el avalúo del cultivo se incluye el valor de la renta de la tierra, que se asume como \$232 dólares por hectárea. Este valor, calculado en dólares por hectárea, se divide por el rendimiento reportado en la sección 1.22 de este informe para obtener el precio de producción por tonelada de cítricos cosechados.

#### **A. 8.1.8 Viñedos**

Debido a la ausencia de datos oficiales del país en las fuentes consultadas, se examinó la base de datos estadísticos de la FAO (FAOSTAT, 2018) donde se reportan los precios al productor de diferentes productos para varios países del mundo. Estos son los precios que reciben los agricultores por los cultivos primarios, los animales vivos y los productos primarios ganaderos que se recolectan en el punto de venta inicial (precios pagados en la puerta de la granja) y cumplen con los requerimientos establecidos en la metodología al no considerar precios adicionales como transporte o procesamiento, por lo cual fueron considerados.

Se encontró que para Uruguay el precio al productor de viñedos estimado para el año 2017 es de \$1,503 dólares por tonelada.

#### **A. 8.2 Actualización del avalúo al año de análisis**

En el caso del cultivo de arroz, el valor del avalúo estaba reportado para el año agrícola 2014/2015 que es anterior al año de referencia. Para incluir la variación del valor del dinero con el tiempo y para efectos de calcular en forma homogénea los flujos que ocurren en distintos momentos en el tiempo se estableció llevar todos los valores de los avalúos al valor en el año 2017. Para esto se consultó la inflación, representada por el

Índice de Precios al Consumo, que considera los cambios de los precios de un conjunto representativo de bienes y servicios consumidos por la mayoría de la población.

La siguiente tabla presenta los valores usados en este cálculo, obtenidos a partir de la información reportada por el Instituto Nacional de Estadísticas de Uruguay.

Índice de Precios al Consumo. Fuente: (INE, 2018)

Año	IPC [%]
2016	8.1
2017	6.55

Para actualizar los valores del costo de producción del arroz se aplicó la siguiente ecuación:

$$V_r = V_a(1 + i)^n \quad (\text{Ec. A. 0-32})$$

donde

$V_r$  es el valor del avalúo para el año de referencia (2017)

$V_a$  es el valor del avalúo para el año  $a$

$i$  es el IPC durante el período

$n$  el número de períodos entre el año  $a$  y el año de referencia

## A. 9 Concentración media anual de dióxido de carbono en la atmósfera

---

### A. 9.1 Concentraciones de CO<sub>2</sub> [ppm] medidas entre 1980 y 2017 (Dlugokencky & Tans, 2018)

Año	Media Global
1980	338.7
1981	340.11
1982	341.22
1983	342.84
1984	344.4
1985	345.87
1986	347.19
1987	348.98
1988	351.45
1989	352.89
1990	354.16
1991	355.48
1992	356.27
1993	356.95
1994	358.63
1995	360.62
1996	362.37
1997	363.47
1998	366.5
1999	368.14
2000	369.41
2001	371.13
2002	373.22
2003	375.77



2004	377.49
2005	379.8
2006	381.9
2007	383.77
2008	385.59
2009	387.37
2010	389.85
2011	391.63
2012	393.82
2013	396.48
2014	398.55
2015	399.41
2016	402.83
2017	404.99

**A. 9.2 Proyección de concentraciones de CO<sub>2</sub> [ppm] según escenario de cambio climático del IPCC**

<b>Año</b>	<b>IPCC - RCP2.6</b>	<b>IPCC - RCP4.5</b>	<b>IPCC - RCP6</b>	<b>IPCC - RCP8.5</b>
2018	408	407	405	410
2020	412	411	409	416
2025	423	423	419	431
2030	431	435	429	449
2035	437	448	439	468
2040	440	461	451	489
2045	442	474	463	513
2050	443	487	478	541
2055	443	498	493	571
2060	442	509	511	604

2065	440	518	529	639
2070	437	524	550	677
2075	435	529	572	717
2080	432	531	594	758
2085	429	532	617	801
2090	426	534	636	845
2095	423	536	653	890
2100	421	538	670	936

## A. 10 Parámetros de cultivos para módulo de vulnerabilidad

### A. 10.1 Parámetros que definen el modelo de AquaCrop

Variable	Descripción	Herbáceos	Frutos y leguminosas	Tubérculos y raíces
Tipo del cultivo	1: Vegetales de hoja 2: Frutales/Granos 3: Tubérculos y raíces	1	2	3
Determinación del ciclo de crecimiento	0: Grados crecimiento 1: Días calendario	1	1	1
Método de siembra	0: Trasplante 1: Siembra directa	1	1	0
Respuesta de la expansión de la cobertura Respuesta de la expansión máxima de la cobertura Respuesta de la productividad hídrica Respuesta del declive de la cobertura Respuesta del cierre de estomas	Aplica para modelación de la fertilidad del suelo	25	25	25

<p>Conductividad eléctrica del suelo en la que el cultivo empieza a afectarse</p> <p>Conductividad eléctrica del suelo en la que el cultivo detiene su desarrollo</p>	<p>Aplica para modelación de la salinidad del suelo</p>	-9	-9	-9
---	---	----	----	----

#### A. 10.2 Parámetros conservativos de cultivos considerados en este estudio

Variable	Descripción	Transitorios	Perennes
Disminución de factores de agua en suelo se ajusta por ETo	1: Ajuste por ETo	1	1
Acumulado de ETo durante periodo de estrés a ser excedido antes que se dispare la senescencia	0: No se considera	0	0
Estrés por fertilidad del suelo considerado para la calibración	Porcentaje [0,100]	50	50
Máxima extracción de agua en el cuarto superior de la zona radicular	m3/m3/día	0.048	0.024
Máxima extracción de agua en el cuarto inferior de la zona radicular	m3/m3/día	0.012	0.006
Máxima disminución de CGC entre estaciones	-9: No aplica	-9	-9
Número de estaciones en el que se alcanza la máxima disminución de CGC	-9: No aplica	-9	-9
Factor de forma para la disminución del CGC	-9: No aplica	-9	-9

Productividad hídrica normalizada por ETo y CO2 durante formación de cosecha	Porcentaje [0,100]	100	100
Desempeño del cultivo bajo concentraciones elevadas de CO2	Porcentaje [0,100]	50	50
Distorsión de la cobertura por estrés debido a salinidad del suelo	Rango: 0: ninguno a 100: muy fuerte	25	25
Respuesta calibrada del estrés de estomas por salinidad del suelo	Rango: 0: ninguno a 200: extremo	100	100

### A. 10.3 Parámetros específicos según tipo de cultivo

#### A. 10.3.1 Arroz

Variable	Descripción	Arroz
Producción del cultivo asociada a floración	0: No asociado 1: Asociado	1
Temperatura base, por debajo no crece el cultivo (estrés frío)	en °C	8
Temperatura máxima, por encima no crece el cultivo (estrés calor)	en °C	35
Mínimos grados de crecimiento para transpiración completa	en GDD (grado crecimiento)	10
Plantas por hectárea	# plantas/ha	1000000
Superficie de suelo cubierta por una planta a 90% de germinación	cm²/ha	6
Cobertura verde máxima	fracción [0,1]	0.95
Duración del ciclo de crecimiento completo	en GDD (grado crecimiento)	-9
Tiempo desde siembra hasta germinación		3
Tiempo desde siembra hasta floración		80
Duración de etapa de floración	En # días	19
Tiempo desde siembra hasta inicio de senescencia	calendario o GDD	100
Tiempo desde siembra hasta madurez	(grado crecimiento)	125
Tiempo desde siembra hasta máxima profundidad radicular		21
Profundidad de raíces mínima efectiva	en metros	0.3
Profundidad de raíces máxima efectiva	en metros	0.5
Factor de forma para el crecimiento radicular	[-]	25
Coeficiente del cultivo	Sin unidades	1.1

Variable	Descripción	Arroz
Factor de disminución de coeficiente del cultivo, como resultado de edad, deficiencia de nitrógeno, etc.	# %/día 0.15 o 0.3	0.15
Coeficiente de crecimiento de la cobertura	En # días calendario o GDD (grado crecimiento)	0.12257
Coeficiente de decrecimiento de la cobertura	En # días calendario o GDD (grado crecimiento)	0.0933
Índice de Cosecha de referencia	Porcentaje [0,100]	40
Aumento potencial del Índice de cosecha	Porcentaje [0,100] -9: No aplica	0
Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1]	0
Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura	Umbral inferior fracción [0,1]	0.4
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por expansión de la cobertura	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	3
Factor de disminución de agua en suelo para control de estomas	Umbral superior fracción [0,1]	0.5
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por control de estomas	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	3
Factor de disminución de agua en suelo para senescencia de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1]	0.55



Variable	Descripción	Arroz
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por senescencia de cobertura	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	3
Factor de disminución de agua en suelo por polinización	Umbral superior fracción [0,1]	0.75
Punto anaerobio en el cual ocurre aireación deficiente	%Vol	0
Efecto de la cobertura en la reducción de evaporación del suelo en la etapa final	Porcentaje [0,100]	50
Exceso de frutas potenciales	Porcentaje [0,100]	100
Tiempo desde floración hasta alcanzar el índice de cosecha	# días	36
Productividad hídrica normalizada por ETo y CO2	g/m2	19
Coeficiente que describe el impacto positivo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha	[-] -9: No aplica	10
Coeficiente que describe el impacto negativo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha	[-] -9: No aplica	7
Incremento máximo permitido de in HI especificado	Porcentaje [0,100] -9: No aplica	15

#### A. 10.3.2 Cebada

Variable	Descripción	Cebada
Producción del cultivo asociada a floración	0: No asociado 1: Asociado	1
Temperatura base, por debajo no crece el cultivo (estrés frío)	en °C	0
Temperatura máxima, por encima no crece el cultivo (estrés calor)	en °C	20

Variable	Descripción	Cebada
Mínimos grados de crecimiento para transpiración completa	en GDD (grado crecimiento)	14
Plantas por hectárea	# plantas/ha	1500000
Superficie de suelo cubierta por una planta a 90% de germinación	cm <sup>2</sup> /ha	1.5
Cobertura verde máxima	fracción [0,1]	0.8
Duración del ciclo de crecimiento completo	en GDD (grado crecimiento)	-9
Tiempo desde siembra hasta germinación		7
Tiempo desde siembra hasta floración		65
Duración de etapa de floración	En # días	12
Tiempo desde siembra hasta inicio de senescencia	calendario o GDD	65
Tiempo desde siembra hasta madurez	(grado crecimiento)	95
Tiempo desde siembra hasta máxima profundidad radicular		55
Profundidad de raíces mínima efectiva	en metros	0.3
Profundidad de raíces máxima efectiva	en metros	1.3
Factor de forma para el crecimiento radicular	[-]	15
Coeficiente del cultivo	Sin unidades	1.1
Factor de disminución de coeficiente del cultivo, como resultado de edad, deficiencia de nitrógeno, etc.	# %/día 0.15 o 0.3	0.15
Coeficiente de crecimiento de la cobertura	En # días calendario o GDD (grado crecimiento)	0.1241
Coeficiente de decrecimiento de la cobertura	En # días calendario o GDD (grado crecimiento)	0.07697

Variable	Descripción	Cebada
Índice de Cosecha de referencia	Porcentaje [0,100]	49
Aumento potencial del Índice de cosecha	Porcentaje [0,100] -9: No aplica	5
Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1]	0.2
Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura	Umbral inferior fracción [0,1]	0.65
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por expansión de la cobertura	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	3
Factor de disminución de agua en suelo para control de estomas	Umbral superior fracción [0,1]	0.6
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por control de estomas	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	3
Factor de disminución de agua en suelo para senescencia de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1]	0.55
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por senescencia de cobertura	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	3
Factor de disminución de agua en suelo por polinización	Umbral superior fracción [0,1]	0.85
Punto anaerobio en el cual ocurre aireación deficiente	%Vol	15
Efecto de la cobertura en la reducción de evaporación del suelo en la etapa final	Porcentaje [0,100]	50
Exceso de frutas potenciales	Porcentaje [0,100]	100
Tiempo desde floración hasta alcanzar el índice de cosecha	# días	17
Productividad hídrica normalizada por ETo y CO2	g/m2	15

Variable	Descripción	Cebada
Coeficiente que describe el impacto positivo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha	[-] -9: No aplica	10
Coeficiente que describe el impacto negativo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha	[-] -9: No aplica	5
Incremento máximo permitido de in HI especificado	Porcentaje [0,100] -9: No aplica	15

### A. 10.3.3 Cítricos

Variable	Descripción	Cítricos
Producción del cultivo asociada a floración	0: No asociado 1: Asociado	1
Temperatura base, por debajo no crece el cultivo (estrés frío)	en °C	12
Temperatura máxima, por encima no crece el cultivo (estrés calor)	en °C	38
Mínimos grados de crecimiento para transpiración completa	en GDD (grado crecimiento)	-9
Plantas por hectárea	# plantas/ha	800
Superficie de suelo cubierta por una planta a 90% de germinación	cm²/ha	50
Cobertura verde máxima	fracción [0,1]	0.9
Duración del ciclo de crecimiento completo	en GDD (grado crecimiento)	-9
Tiempo desde siembra hasta germinación	En # días calendario o GDD	0 30 días
Tiempo desde siembra hasta floración	(grado crecimiento)	después de lluvia

Variable	Descripción	Cítricos
Duración de etapa de floración		150
Tiempo desde siembra hasta inicio de senescencia		180
Tiempo desde siembra hasta madurez		270
Tiempo desde siembra hasta máxima profundidad radicular		146
Profundidad de raíces mínima efectiva	en metros	2
Profundidad de raíces máxima efectiva	en metros	2
Factor de forma para el crecimiento radicular	[-]	15
Coeficiente del cultivo	Sin unidades	0.7
Factor de disminución de coeficiente del cultivo, como resultado de edad, deficiencia de nitrógeno, etc.	# %/día 0.15 o 0.3 En # días	0.15
Coeficiente de crecimiento de la cobertura	calendario o GDD (grado crecimiento) En # días	0.10417
Coeficiente de decrecimiento de la cobertura	calendario o GDD (grado crecimiento)	0.08
Índice de Cosecha de referencia	Porcentaje [0,100]	30
Aumento potencial del Índice de cosecha	Porcentaje [0,100] -9: No aplica	10
Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1]	0.5
Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura	Umbral inferior fracción [0,1]	0.55
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por expansión de la cobertura	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	3

Variable	Descripción	Cítricos
Factor de disminución de agua en suelo para control de estomas	Umbral superior fracción [0,1]	0.5
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por control de estomas	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	3
Factor de disminución de agua en suelo para senescencia de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1]	0.85
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por senescencia de cobertura	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	3
Factor de disminución de agua en suelo por polinización	Umbral superior fracción [0,1]	0.9
Punto anaerobio en el cual ocurre aireación deficiente	%Vol	5
Efecto de la cobertura en la reducción de evaporación del suelo en la etapa final	Porcentaje [0,100]	60
Exceso de frutas potenciales	Porcentaje [0,100]	50
Tiempo desde floración hasta alcanzar el índice de cosecha	# días	57
Productividad hídrica normalizada por ETo y CO2	g/m2	17
Coeficiente que describe el impacto positivo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha	[-] -9: No aplica	10
Coeficiente que describe el impacto negativo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha	[-] -9: No aplica	8
Incremento máximo permitido de in HI especificado	Porcentaje [0,100] -9: No aplica	15

#### A. 10.3.4 Maíz

Variable	Descripción	Maíz
Producción del cultivo asociada a floración	0: No asociado 1: Asociado	1
Temperatura base, por debajo no crece el cultivo (estrés frío)	en °C	13
Temperatura máxima, por encima no crece el cultivo (estrés calor)	en °C	35
Mínimos grados de crecimiento para transpiración completa	en GDD (grado crecimiento)	12
Plantas por hectárea	# plantas/ha	70000
Superficie de suelo cubierta por una planta a 90% de germinación	cm <sup>2</sup> /ha	6.5
Cobertura verde máxima	fracción [0,1]	0.96
Duración del ciclo de crecimiento completo	en GDD (grado crecimiento)	-9
Tiempo desde siembra hasta germinación		8
Tiempo desde siembra hasta floración		64
Duración de etapa de floración	En # días	12
Tiempo desde siembra hasta inicio de senescencia	calendario o GDD	110
Tiempo desde siembra hasta madurez	(grado crecimiento)	138
Tiempo desde siembra hasta máxima profundidad radicular		110
Profundidad de raíces mínima efectiva	en metros	0.3
Profundidad de raíces máxima efectiva	en metros	2.3
Factor de forma para el crecimiento radicular	[-]	13
Coeficiente del cultivo	Sin unidades	1.05
Factor de disminución de coeficiente del cultivo, como resultado de edad, deficiencia de nitrógeno, etc.	# %/día 0.15 o 0.3	0.3

Variable	Descripción	Maíz
Coeficiente de crecimiento de la cobertura	En # días calendario o GDD (grado crecimiento)	0.16312
Coeficiente de decrecimiento de la cobertura	En # días calendario o GDD (grado crecimiento)	0.11691
Índice de Cosecha de referencia	Porcentaje [0,100]	45
Aumento potencial del Índice de cosecha	Porcentaje [0,100] -9: No aplica	0
Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1]	0.14
Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura	Umbral inferior fracción [0,1]	0.72
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por expansión de la cobertura	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	2.9
Factor de disminución de agua en suelo para control de estomas	Umbral superior fracción [0,1]	0.69
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por control de estomas	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	6
Factor de disminución de agua en suelo para senescencia de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1]	0.69
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por senescencia de cobertura	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	2.7



Variable	Descripción	Maíz
Factor de disminución de agua en suelo por polinización	Umbral superior fracción [0,1]	0.8
Punto anaerobio en el cual ocurre aireación deficiente	%Vol	5
Efecto de la cobertura en la reducción de evaporación del suelo en la etapa final	Porcentaje [0,100]	50
Exceso de frutas potenciales	Porcentaje [0,100]	50
Tiempo desde floración hasta alcanzar el índice de cosecha	# días	54
Productividad hídrica normalizada por ETo y CO2	g/m2	33
Coeficiente que describe el impacto positivo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha	[-] -9: No aplica	7
Coeficiente que describe el impacto negativo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha	[-] -9: No aplica	3
Incremento máximo permitido de in HI especificado	Porcentaje [0,100] -9: No aplica	15

#### A. 10.3.5 Pastos

Variable	Descripción	Pastos
Producción del cultivo asociada a floración	0: No asociado 1: Asociado	0
Temperatura base, por debajo no crece el cultivo (estrés frío)	en °C	5
Temperatura máxima, por encima no crece el cultivo (estrés calor)	en °C	30
Mínimos grados de crecimiento para transpiración completa	en GDD (grado crecimiento)	-9

Variable	Descripción	Pastos
Plantas por hectárea	# plantas/ha	2000000
Superficie de suelo cubierta por una planta a 90% de germinación	cm <sup>2</sup> /ha	1.5
Cobertura verde máxima	fracción [0,1]	0.75
Duración del ciclo de crecimiento completo	en GDD (grado crecimiento)	-9
Tiempo desde siembra hasta germinación		14
Tiempo desde siembra hasta floración		0
Duración de etapa de floración	En # días	0
Tiempo desde siembra hasta inicio de senescencia	calendario o GDD	99
Tiempo desde siembra hasta madurez	(grado crecimiento)	99
Tiempo desde siembra hasta máxima profundidad radicular		55
Profundidad de raíces mínima efectiva	en metros	0.5
Profundidad de raíces máxima efectiva	en metros	0.5
Factor de forma para el crecimiento radicular	[-]	15
Coeficiente del cultivo	Sin unidades	1.05
Factor de disminución de coeficiente del cultivo, como resultado de edad, deficiencia de nitrógeno, etc.	# %/día 0.15 o 0.3	0.15
Coeficiente de crecimiento de la cobertura	En # días calendario o GDD (grado crecimiento)	0.13002
Coeficiente de decrecimiento de la cobertura	En # días calendario o GDD (grado crecimiento)	0.17000
Índice de Cosecha de referencia	Porcentaje [0,100]	90

Variable	Descripción	Pastos
Aumento potencial del Índice de cosecha	Porcentaje [0,100] -9: No aplica	6
Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1]	0
Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura	Umbral inferior fracción [0,1]	0.35
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por expansión de la cobertura	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	2.5
Factor de disminución de agua en suelo para control de estomas	Umbral superior fracción [0,1]	0.25
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por control de estomas	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	2
Factor de disminución de agua en suelo para senescencia de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1]	0.45
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por senescencia de cobertura	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	2
Factor de disminución de agua en suelo por polinización	Umbral superior fracción [0,1]	0.8
Punto anaerobio en el cual ocurre aireación deficiente	%Vol	5
Efecto de la cobertura en la reducción de evaporación del suelo en la etapa final	Porcentaje [0,100]	95
Exceso de frutas potenciales	Porcentaje [0,100]	0
Tiempo desde floración hasta alcanzar el índice de cosecha	# días	40
Productividad hídrica normalizada por ETo y CO2	g/m2	14

Variable	Descripción	Pastos
Coeficiente que describe el impacto positivo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha	[-] -9: No aplica	-9
Coeficiente que describe el impacto negativo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha	[-] -9: No aplica	-9
Incremento máximo permitido de in HI especificado	Porcentaje [0,100] -9: No aplica	6

#### A. 10.3.6 Soja

Variable	Descripción	Soja
Producción del cultivo asociada a floración	0: No asociado 1: Asociado	1
Temperatura base, por debajo no crece el cultivo (estrés frío)	en °C	8
Temperatura máxima, por encima no crece el cultivo (estrés calor)	en °C	35
Mínimos grados de crecimiento para transpiración completa	en GDD (grado crecimiento)	10
Plantas por hectárea	# plantas/ha	250000
Superficie de suelo cubierta por una planta a 90% de germinación	cm <sup>2</sup> /ha	5
Cobertura verde máxima	fracción [0,1]	0.98
Duración del ciclo de crecimiento completo	en GDD (grado crecimiento)	-9
Tiempo desde siembra hasta germinación	En # días	11
Tiempo desde siembra hasta floración	calendario o GDD	73
Duración de etapa de floración	(grado	29
Tiempo desde siembra hasta inicio de senescencia	crecimiento)	104

Variable	Descripción	Soja
Tiempo desde siembra hasta madurez		158
Tiempo desde siembra hasta máxima profundidad radicular		92
Profundidad de raíces mínima efectiva	en metros	0.3
Profundidad de raíces máxima efectiva	en metros	2
Factor de forma para el crecimiento radicular	[-]	15
Coeficiente del cultivo	Sin unidades	1.1
Factor de disminución de coeficiente del cultivo, como resultado de edad, deficiencia de nitrógeno, etc.	# %/día 0.15 o 0.3	0.3
Coeficiente de crecimiento de la cobertura	En # días calendario o GDD (grado crecimiento)	0.10569
Coeficiente de decrecimiento de la cobertura	En # días calendario o GDD (grado crecimiento)	0.02885
Índice de Cosecha de referencia	Porcentaje [0,100]	42
Aumento potencial del Índice de cosecha	Porcentaje [0,100] -9: No aplica	3
Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1]	0.15
Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura	Umbral inferior fracción [0,1]	0.65
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por expansión de la cobertura	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	3
Factor de disminución de agua en suelo para control de estomas	Umbral superior fracción [0,1]	0.6

Variable	Descripción	Soja
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por control de estomas	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	3
Factor de disminución de agua en suelo para senescencia de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1]	0.7
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por senescencia de cobertura	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	3
Factor de disminución de agua en suelo por polinización	Umbral superior fracción [0,1]	0.85
Punto anaerobio en el cual ocurre aireación deficiente	%Vol	5
Efecto de la cobertura en la reducción de evaporación del suelo en la etapa final	Porcentaje [0,100]	25
Exceso de frutas potenciales	Porcentaje [0,100]	50
Tiempo desde floración hasta alcanzar el índice de cosecha	# días	85
Productividad hídrica normalizada por ETo y CO2	g/m2	15
Coeficiente que describe el impacto positivo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha	[-] -9: No aplica	-9
Coeficiente que describe el impacto negativo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha	[-] -9: No aplica	3
Incremento máximo permitido de in HI especificado	Porcentaje [0,100] -9: No aplica	10

### A. 10.3.7 Sorgo

Variable	Descripción	Sorgo
Producción del cultivo asociada a floración	0: No asociado 1: Asociado	1
Temperatura base, por debajo no crece el cultivo (estrés frío)	en °C	10
Temperatura máxima, por encima no crece el cultivo (estrés calor)	en °C	40
Mínimos grados de crecimiento para transpiración completa	en GDD (grado crecimiento)	12
Plantas por hectárea	# plantas/ha	150-250 mil: granífero 350-600 mil: forrajero
Superficie de suelo cubierta por una planta a 90% de germinación	cm <sup>2</sup> /ha	3
Cobertura verde máxima	fracción [0,1]	0.9
Duración del ciclo de crecimiento completo	en GDD (grado crecimiento)	-9
Tiempo desde siembra hasta germinación		6
Tiempo desde siembra hasta floración		68
Duración de etapa de floración	En # días	13
Tiempo desde siembra hasta inicio de senescencia	calendario o GDD	101
Tiempo desde siembra hasta madurez	(grado crecimiento)	125
Tiempo desde siembra hasta máxima profundidad radicular		101
Profundidad de raíces mínima efectiva	en metros	0.3
Profundidad de raíces máxima efectiva	en metros	1.3
Factor de forma para el crecimiento radicular	[-]	13

Variable	Descripción	Sorgo
Coeficiente del cultivo	Sin unidades	1.07
Factor de disminución de coeficiente del cultivo, como resultado de edad, deficiencia de nitrógeno, etc.	# %/día 0.15 o 0.3	0.3
Coeficiente de crecimiento de la cobertura	En # días calendario o GDD (grado crecimiento)	0.1815
Coeficiente de decrecimiento de la cobertura	En # días calendario o GDD (grado crecimiento)	0.117
Índice de Cosecha de referencia	Porcentaje [0,100]	40/90 forrajero
Aumento potencial del Índice de cosecha	Porcentaje [0,100] -9: No aplica	4
Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1]	0.15
Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura	Umbral inferior fracción [0,1]	0.7
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por expansión de la cobertura	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	3
Factor de disminución de agua en suelo para control de estomas	Umbral superior fracción [0,1]	0.75
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por control de estomas	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	3
Factor de disminución de agua en suelo para senescencia de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1]	0.7



Variable	Descripción	Sorgo
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por senescencia de cobertura	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	3
Factor de disminución de agua en suelo por polinización	Umbral superior fracción [0,1]	0.8
Punto anaerobio en el cual ocurre aireación deficiente	%Vol	5
Efecto de la cobertura en la reducción de evaporación del suelo en la etapa final	Porcentaje [0,100]	50
Exceso de frutas potenciales	Porcentaje [0,100]	50
Tiempo desde floración hasta alcanzar el índice de cosecha	# días	33
Productividad hídrica normalizada por ETo y CO2	g/m2	33
Coeficiente que describe el impacto positivo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha	[-] -9: No aplica	1
Coeficiente que describe el impacto negativo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha	[-] -9: No aplica	3
Incremento máximo permitido de in HI especificado	Porcentaje [0,100] -9: No aplica	25

#### A. 10.3.8 Trigo

Variable	Descripción	Trigo
Producción del cultivo asociada a floración	0: No asociado 1: Asociado	1
Temperatura base, por debajo no crece el cultivo (estrés frío)	en °C	0
Temperatura máxima, por encima no crece el cultivo (estrés calor)	en °C	35

Variable	Descripción	Trigo
Mínimos grados de crecimiento para transpiración completa	en GDD (grado crecimiento)	14
Plantas por hectárea	# plantas/ha	2000000
Superficie de suelo cubierta por una planta a 90% de germinación	cm <sup>2</sup> /ha	1.5
Cobertura verde máxima	fracción [0,1]	0.96
Duración del ciclo de crecimiento completo	en GDD (grado crecimiento)	-9
Tiempo desde siembra hasta germinación		12
Tiempo desde siembra hasta floración		111
Duración de etapa de floración	En # días	46
Tiempo desde siembra hasta inicio de senescencia	calendario o GDD	144
Tiempo desde siembra hasta madurez	(grado crecimiento)	156
Tiempo desde siembra hasta máxima profundidad radicular		93
Profundidad de raíces mínima efectiva	en metros	0.3
Profundidad de raíces máxima efectiva	en metros	1.5
Factor de forma para el crecimiento radicular	[-]	15
Coeficiente del cultivo	Sin unidades	1.1
Factor de disminución de coeficiente del cultivo, como resultado de edad, deficiencia de nitrógeno, etc.	# %/día 0.15 o 0.3	0.15
Coeficiente de crecimiento de la cobertura	En # días calendario o GDD (grado crecimiento)	0.04901
Coeficiente de decrecimiento de la cobertura	En # días calendario o GDD (grado crecimiento)	0.07179

Variable	Descripción	Trigo
Índice de Cosecha de referencia	Porcentaje [0,100]	39
Aumento potencial del Índice de cosecha	Porcentaje [0,100] -9: No aplica	5
Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1]	0.2
Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura	Umbral inferior fracción [0,1]	0.65
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por expansión de la cobertura	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	5
Factor de disminución de agua en suelo para control de estomas	Umbral superior fracción [0,1]	0.65
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por control de estomas	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	2.5
Factor de disminución de agua en suelo para senescencia de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1]	0.7
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por senescencia de cobertura	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	2.5
Factor de disminución de agua en suelo por polinización	Umbral superior fracción [0,1]	0.85
Punto anaerobio en el cual ocurre aireación deficiente	%Vol	5
Efecto de la cobertura en la reducción de evaporación del suelo en la etapa final	Porcentaje [0,100]	50
Exceso de frutas potenciales	Porcentaje [0,100]	100
Tiempo desde floración hasta alcanzar el índice de cosecha	# días	33
Productividad hídrica normalizada por ETo y CO2	g/m2	15

Variable	Descripción	Trigo
Coeficiente que describe el impacto positivo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha	[-] -9: No aplica	10
Coeficiente que describe el impacto negativo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha	[-] -9: No aplica	7
Incremento máximo permitido de in HI especificado	Porcentaje [0,100] -9: No aplica	15

#### A. 10.3.9 Viñedos

Variable	Descripción	Viñedo
Producción del cultivo asociada a floración	0: No asociado 1: Asociado	1
Temperatura base, por debajo no crece el cultivo (estrés frío)	en °C	8
Temperatura máxima, por encima no crece el cultivo (estrés calor)	en °C	38
Mínimos grados de crecimiento para transpiración completa	en GDD (grado crecimiento)	-9
Plantas por hectárea	# plantas/ha	2500
Superficie de suelo cubierta por una planta a 90% de germinación	cm <sup>2</sup> /ha	40
Cobertura verde máxima	fracción [0,1]	0.9
Duración del ciclo de crecimiento completo	en GDD (grado crecimiento)	-9
Tiempo desde siembra hasta germinación	En # días	0
Tiempo desde siembra hasta floración	calendario o GDD	60
Duración de etapa de floración		40

Variable	Descripción	Viñedo
Tiempo desde siembra hasta inicio de senescencia	(grado crecimiento)	180
Tiempo desde siembra hasta madurez		240
Tiempo desde siembra hasta máxima profundidad radicular		700 GDD
Profundidad de raíces mínima efectiva	en metros	2
Profundidad de raíces máxima efectiva	en metros	2
Factor de forma para el crecimiento radicular	[-]	15
Coeficiente del cultivo	Sin unidades	0.7
Factor de disminución de coeficiente del cultivo, como resultado de edad, deficiencia de nitrógeno, etc.	# %/día 0.15 o 0.3	0.15
Coeficiente de crecimiento de la cobertura	En # días calendario o GDD (grado crecimiento)	0.200
Coeficiente de decrecimiento de la cobertura	En # días calendario o GDD (grado crecimiento)	0.08
Índice de Cosecha de referencia	Porcentaje [0,100]	30
Aumento potencial del Índice de cosecha	Porcentaje [0,100] -9: No aplica	0
Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1]	0.25
Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura	Umbral inferior fracción [0,1]	0.5
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por expansión de la cobertura	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	3

Variable	Descripción	Viñedo
Factor de disminución de agua en suelo para control de estomas	Umbral superior fracción [0,1]	0.5
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por control de estomas	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	3
Factor de disminución de agua en suelo para senescencia de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1]	0.85
Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por senescencia de cobertura	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	3
Factor de disminución de agua en suelo por polinización	Umbral superior fracción [0,1]	0.9
Punto anaerobio en el cual ocurre aireación deficiente	%Vol	5
Efecto de la cobertura en la reducción de evaporación del suelo en la etapa final	Porcentaje [0,100]	50
Exceso de frutas potenciales	Porcentaje [0,100]	-9
Tiempo desde floración hasta alcanzar el índice de cosecha	# días	60
Productividad hídrica normalizada por ETo y CO2	g/m2	20
Coeficiente que describe el impacto positivo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha	[-] -9: No aplica	10
Coeficiente que describe el impacto negativo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha	[-] -9: No aplica	8
Incremento máximo permitido de in HI especificado	Porcentaje [0,100] -9: No aplica	5

#### **A. 11 Estimación holística del riesgo por sequía**

---

Desde la perspectiva de los desastres naturales, el riesgo se ha intentado dimensionar, para efectos de su gestión, como las posibles consecuencias económicas, sociales y ambientales que pueden ocurrir en un lugar y en un tiempo determinado. Sin embargo, son pocos los análisis del riesgo de forma integral. Para evaluar el riesgo de acuerdo con su definición es necesario tener en cuenta, desde un punto de vista multidisciplinar, no solamente el daño físico esperado, las víctimas o pérdidas económicas equivalentes, sino también factores sociales, organizacionales e institucionales, relacionados con el desarrollo de las comunidades. La deficiente información, comunicación y conocimiento entre los actores sociales, la ausencia de organización institucional y comunitaria, las debilidades en la preparación para la atención de emergencias, la inestabilidad política y la falta de bienestar económico en un área geográfica contribuyen a tener un mayor riesgo. Por lo tanto, las consecuencias potenciales no sólo están relacionadas con el impacto directo del suceso, sino también con la capacidad para soportar el impacto y las implicaciones del mismo en el área geográfica considerada.

Es necesario tener en cuenta la ausencia de desarrollo económico y social, debilidades sociales para absorber el impacto, deficiencias en la gestión institucional y falta de capacidad para la respuesta en caso de desastre. En términos relativos, un área que experimenta un alto deterioro social es más vulnerable y por lo tanto se encuentra en mayor riesgo. La falta de resiliencia, definida como el inverso de la capacidad económica, social e institucional para absorber el impacto de una crisis, representa la incapacidad de la comunidad para responder eficientemente en caso de emergencia y sus deficiencias en su gestión institucional y gobernabilidad (falta de capacidad para anticiparse, responder y recuperarse con efectividad).

Si bien es cierto que algunas circunstancias sociales pueden considerarse como aspectos asociados con la vulnerabilidad desde la perspectiva de los desastres, no siempre dichos aspectos pueden considerarse como la vulnerabilidad misma. Un ejemplo es el caso de la pobreza, la cual puede considerarse como un factor o como una causa de la vulnerabilidad ante cierto tipo de sucesos. Sin embargo, la pobreza en sí misma no es sinónimo de vulnerabilidad. Por esta razón, es necesario estudiar detenidamente los

factores que hacen que las poblaciones sean vulnerables a los fenómenos que caracterizan a las amenazas. Sin duda, muchos desastres actualmente son el producto de factores económicos y políticos, muchas veces exacerbados por presiones que concentran población en áreas de peligro. En la mayoría de los casos, la reducción de la vulnerabilidad está ligada de manera indisoluble a intervención de las necesidades básicas de desarrollo prevalecientes, razón por la cual se puede afirmar que existe una relación entre las condiciones de marginalidad económica y la vulnerabilidad vista desde la perspectiva de los desastres. La vulnerabilidad de los asentamientos humanos está ligada a los procesos sociales que allí se desarrollan y está relacionada con la fragilidad, la susceptibilidad o la falta de resiliencia de los elementos expuestos ante amenazas de diferente índole. Por otra parte, la vulnerabilidad está ligada a la degradación ambiental del entorno natural intervenido o en proceso de transformación.

El riesgo depende de aspectos físicos, pero también de un impacto intangible de carácter social, económico, ambiental. Dicho impacto, a su vez depende de una serie de factores que agravan la situación –a veces llamados efectos indirectos– que dependen de situaciones sociales del contexto y de su resiliencia; aspectos de la vulnerabilidad que no siempre son dependientes de la amenaza. Por lo tanto, las características intrínsecas actuales de la sociedad definen mejores o peores condiciones que amplifican o reducen el impacto y la capacidad de las comunidades para recuperarse de eventos adversos.

Desde una perspectiva holística, es necesario considerar variables de diversa índole cuyo tratamiento no siempre se facilita utilizando funciones. Por esta razón, es necesario utilizar *proxies* o “representaciones”, que bien pueden ser índices o indicadores. Así, se puede afirmar que la vulnerabilidad tiene unos componentes que reflejan susceptibilidad y fragilidad física (exposición) –que tienen una dependencia de la acción o severidad del fenómeno– y otros que reflejan fragilidad social y falta de resiliencia –es decir, de capacidad de anticiparse, recuperarse y de absorber el impacto– que no son tan dependientes o no están tan condicionados a la acción del fenómeno.

Una buena organización institucional, una buena gobernabilidad, una buena cantidad de servicios de salud, una alta estabilidad económica, entre otros, que se pueden considerar factores de resiliencia. Su ausencia, o la falta de estas cualidades o capacidades se traduce en vulnerabilidad, pero en una vulnerabilidad “prevaleciente”, “característica”,



“inherente”, “intrínseca”, que es de especial interés desde la perspectiva de las ciencias sociales.

La evaluación holística del riesgo tiene como objetivo revelar el riesgo desde una perspectiva integral usando por un lado las pérdidas o el daño físico potencial como riesgo físico, que está vinculado directamente con la ocurrencia de eventos, y por otro, capturando cómo los factores subyacentes del riesgo o amplificadores del riesgo – sociales, económicos, o ambientales – pueden empeorar las condiciones del riesgo.

El indicador obtenido de la evaluación holística del riesgo es una forma útil de evaluar, comparar y comunicar el riesgo para promover acciones efectivas para intervención de las condiciones de vulnerabilidad medidas en sus diferentes dimensiones. Mediante este tipo de indicadores se logra comunicar aspectos complejos dado que describe un problema de un sistema complejo en términos simples. Es importante resaltar que los indicadores en general no identifican las medidas de gestión del riesgo, pues éstas se deben identificar usando modelos integrados y análisis completos. Los indicadores compuestos son imágenes que permiten una interpretación más fácil de los aspectos multidimensionales en lugar de tratar de encontrar una tendencia en muchos indicadores por separado. La fortaleza este enfoque está en la posibilidad de desagregar los resultados e identificar los factores hacia los cuales se deben orientar las acciones de reducción del riesgo, con el fin de valorar su efectividad.

#### **A. 11.1 Marco teórico el enfoque holístico**

Desde esta perspectiva, se puede decir que el riesgo es función de la vulnerabilidad física-o el potencial daño físico-y un conjunto de factores de vulnerabilidad  $\square_i$  que conforman las condiciones de vulnerabilidad del contexto. La vulnerabilidad física se obtiene de la susceptibilidad de los elementos expuestos a las amenazas, teniendo en cuenta intensidades potenciales,  $I$ , de los eventos peligrosos en un período de tiempo  $t$ , la vulnerabilidad del contexto depende de la fragilidad social y la falta de resiliencia de los sistemas sociotécnicos propensos a desastres o el contexto (Para reducir el riesgo, es necesario intervenir a través de acciones correctivas y prospectivas en los posibles factores de vulnerabilidad  $\square_i$ . La gestión del riesgo requiere un sistema de control

(estructura institucional) y un sistema de actuación (políticas públicas y acciones) para implementar los cambios necesarios para reducir el riesgo. A efectos de gestión, los estudios de riesgo tienen que mejorar las decisiones a fin de contribuir a la eficacia de la gestión del riesgo, invitando a la acción e identificando las debilidades de los elementos expuestos, así como su evolución en el tiempo (Cardona 2009; Carreño et al 2007).

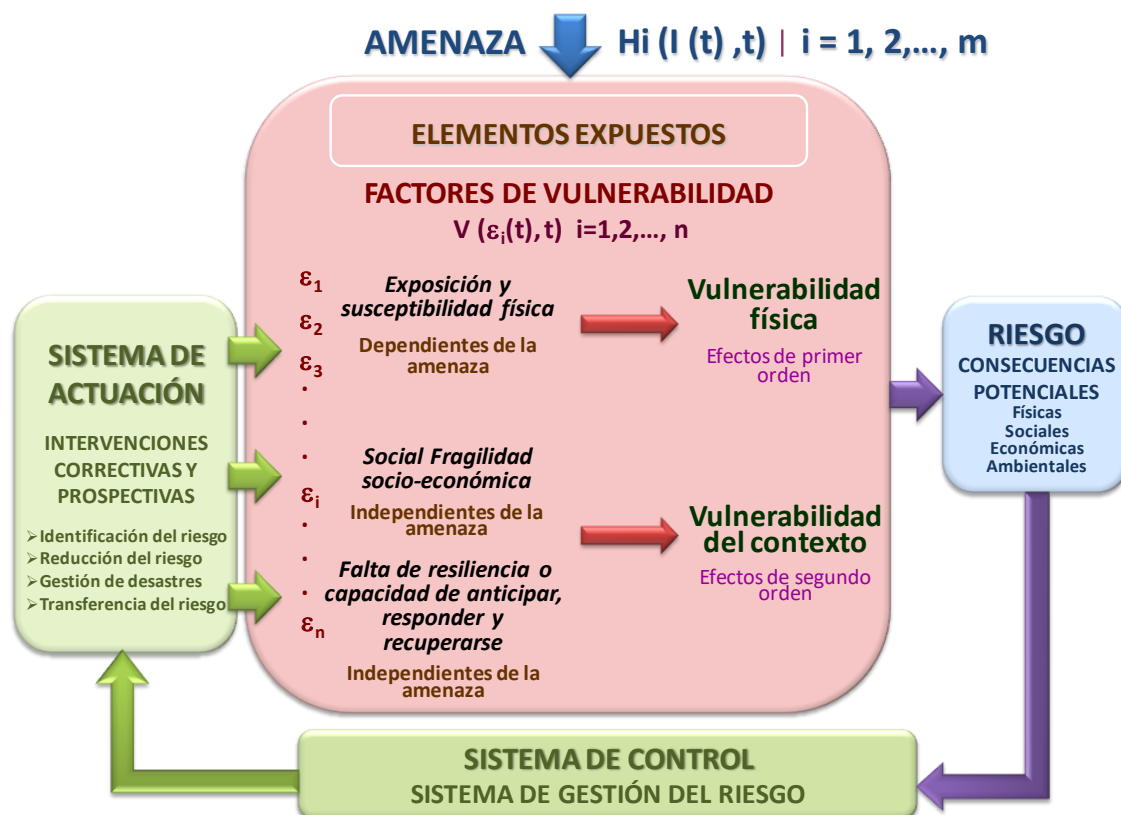


Figura A.6-1. Marco y modelo teórico para el enfoque holístico de la evaluación y gestión del riesgo de desastre, adaptación para este informe de Cardona y Barbat (2000)

La vulnerabilidad y, por lo tanto, el riesgo son el resultado del crecimiento económico inadecuado y de deficiencias que pueden corregirse a través de procesos apropiados de desarrollo. Indicadores o índices se pueden proponer para medir la vulnerabilidad desde una perspectiva integral y multidisciplinar. Estos indicadores se pueden definir con base en información disponible y conceptualmente deben reflejar, de la manera más directa posible, lo que se quiere valorar evitando el uso simultáneo de variables o indicadores que expresen aproximadamente el mismo aspecto. Su utilización intenta identificar las condiciones que favorecen los impactos físicos directos, como el grado de exposición y

susceptibilidad de los elementos expuestos, así como también los impactos indirectos, a veces intangibles de los eventos peligrosos a causa de la fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia de dichos elementos.

#### **A. 11.2 Procedimiento de cálculo**

La presente evaluación holística del riesgo de sequía utiliza la técnica desarrollada por Carreño (2006) que se realiza a partir de descriptores o variables de entrada que dan cuenta tanto del riesgo físico como del riesgo del contexto. Los valores de Riesgo Físico (RF) se obtuvieron a partir de la normalización de las PAE relativas calculadas y presentadas en la sección 4 del presente informe. Los valores de la PAE relativa (total sector agropecuario) han sido normalizados entre 0 y 1 utilizando el logaritmo de dicho valor y del valor máximo, ambos por cien ( $\log [PAE.100]/\log [PAEmax.100]$ ), considerando 15 % o superior como el máximo valor de PAE relativa, que corresponde a un RF de 1. Los descriptores del riesgo del contexto de información sobre la fragilidad socioeconómica y de la falta de resiliencia se obtuvieron a su vez, a partir de indicadores y datos existentes para cada uno de los departamentos de los países de estudio. Los descriptores del riesgo del contexto son factores que “agravan” el riesgo físico, o el impacto directo de un evento. Así el riesgo total puede expresarse utilizando indicadores compuestos o índices mediante la ecuación A.1-1 de la siguiente manera:

$$R_T = R_F(1 + F) \quad (\text{Ec. A. 0-33})$$

Esta expresión se conoce como la ecuación de Moncho<sup>27</sup>, donde  $R_T$  es el índice de riesgo total,  $R_F$  es el índice de riesgo físico y  $F$  es un coeficiente de agravamiento que depende de la fragilidad socioeconómica,  $FS$ , y de la falta de resiliencia del contexto,  $FR$ .

El coeficiente de agravamiento,  $F$ , se obtiene de la suma ponderada de los factores de agravamiento que representan la fragilidad social y la falta de resiliencia, como lo expresa la ecuación A.1-2,

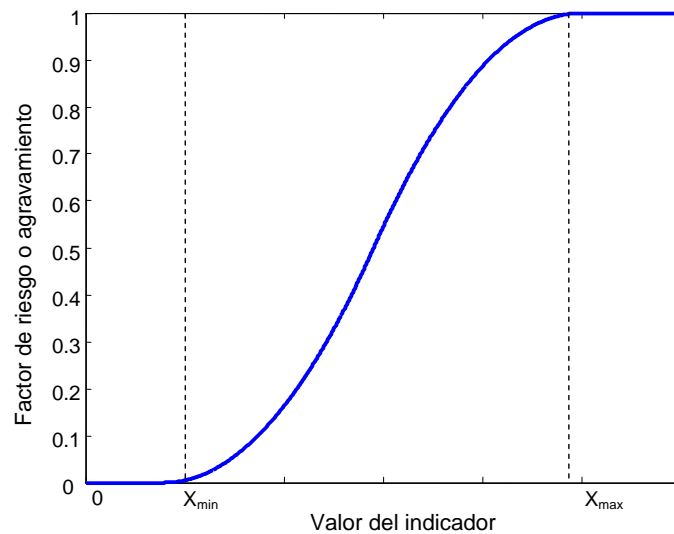
---

<sup>27</sup> Esta denominación se la dio un grupo de expertos en uno de los talleres de trabajo del proyecto BID-IDEA, sobre indicadores de riesgo, realizado en Barcelona en noviembre de 2003.

$$F = \sum_{i=1}^m F_{FSi} \cdot w_{FSi} + \sum_{j=1}^n F_{FRj} \cdot w_{FRj} \quad (\text{Ec. A. 0-34})$$

donde  $F_{FSi}$  son los factores de fragilidad social,  $F_{FRj}$  son los factores de falta de resiliencia,  $m$  y  $n$  son el número de factores en cada caso y  $w_{FSi}$  y  $w_{FRj}$  son los pesos o importancias relativas de cada factor de agravamiento. Estos pesos suman 1 y se pueden obtener utilizando el Procedimiento Analítico Jerárquico (PAJ) utilizando en forma participativa la opinión de los interesados. En este caso por sencillez se utilizó la asignación de puntajes, procurando que el peso fuese aproximadamente igual para cada uno de los factores de agravamiento.

Los factores de agravamiento se calculan normalizando el valor de cada descriptor respectivo utilizando una función de transformación como se ilustra posteriormente. Con el valor bruto de cada indicador o variable, que refleja la fragilidad social y la falta de resiliencia, se obtiene el valor de cada factor de agravamiento, el cual toma un valor entre 0 y 1. Esta función puede directa y ascendente en forma de sigmoide (s) o inversa y descendente (z), para arrojar resultados consistentes, dependiendo de lo que refleja cada variable o indicador, y dando cuenta de la no linealidad que puede haber entre los indicadores y el riesgo.



Modelo para las funciones de transformación utilizadas tipo S (directa ascendente)

Finalmente, aquí se asume que el impacto indirecto de un evento, representado por  $F$  en la ecuación A.1-1, puede llegar a ser del mismo orden que el impacto directo. Es decir, que como máximo, el impacto total –que aquí corresponde al índice de riesgo total  $R_T$ – corresponde al doble del impacto directo –que aquí se representa con el índice de riesgo físico  $R_F$ –. Esto se ve reflejado en la ecuación A.1-1 donde el coeficiente de agravamiento  $F$  toma un valor entre 0 y 1<sup>28</sup>, y por lo tanto se asume que  $R_T$  podría ser máximo 2 veces  $R_F$ . Esta asunción se hace con el objetivo de reflejar que las características socioeconómicas pueden influir sobre la magnitud de un evento.

### A. 11.3 Evaluación holística del riesgo para Uruguay

Para caracterizar las condiciones de fragilidad social y falta de resiliencia en Uruguay se utilizaron los indicadores presentados a continuación.

Indicadores de fragilidad social ( $X_{FSi}$ ) y falta de resiliencia ( $X_{LRj}$ ) utilizados para Uruguay

	Indicador	Año	Unidades
$X_{FS1}$	Coeficiente de Gini de ingresos	2013	Índice entre 0-1
$X_{FS2}$	Personas en hogares en situación de pobreza	2012	% de la población en condiciones de pobreza extrema
$X_{FS3}$	Mortalidad infantil	2016	Defunciones de un año por cada 1000 nacidos vivos
$X_{FS4}$	Informalidad (ECH)	2017	% de personas ocupadas no registrados a la seguridad social
$X_{FS5}$	Desempleo (ECH)	2017	%
$X_{FS6}$	Tasa de alfabetismo (Mayor o igual a 15)	2017	%
$X_{LR1}$	Índice de Desarrollo Humano	2011	Índice entre 0-1
$X_{LR2}$	Esperanza de vida al nacer	2017	años

<sup>28</sup> Es importante indicar que la relación entre impacto directo e indirecto al que se hace referencia se refiere a estimaciones gruesas de efectos económicos directos e indirectos. No existe un estudio que relacione empíricamente los coeficientes de agravamiento aquí propuestos con los efectos económicos indirectos; sin embargo, dichos indicadores son un proxy de los aspectos que agravan la situación en caso de presentarse el daño físico, contribuyendo al impacto socioeconómico indirecto que en este caso se valora con fines de evaluaciones relativas.

	<b>Indicador</b>	<b>Año</b>	<b>Unidades</b>
X <sub>LR3</sub>	Promedio de escolaridad (ECH)	2011	Promedio de años de educación de las personas de 25 años y más

En la tabla a continuación, se presentan los valores máximo y mínimo utilizados para constituir las funciones de transformación utilizadas para normalizar cada uno de los indicadores. En este caso, tanto el Índice de Desarrollo Humano como el Coeficiente de Gini se utilizaron de forma directa al ser ya índices con valores comprendidos entre 0 y 1.

Valores utilizados para las funciones de transformación

<b>Indicador</b>	<b>Xmin</b>	<b>Xmax</b>	<b>Tipo de función</b>
Coeficiente de Gini de ingresos	-	-	-
Personas en hogares en situación de pobreza	10	30	s
Mortalidad infantil	0	10	s
Informalidad (ECH)	10	30	s
Desempleo (ECH)	0	20	s
Tasa de alfabetismo (Mayor o igual a 15)	5	25	s
Índice de Desarrollo Humano (IDH)	-	-	-
Esperanza de vida al nacer (años)	60	80	z
Promedio de escolaridad (años)	5	10	z

En la tabla a continuación se presentan los valores originales de los factores de fragilidad social y falta de resiliencia.

Valores de los indicadores utilizados para las condiciones agravantes

Departamento	X <sub>FS1</sub>	X <sub>FS2</sub>	X <sub>FS3</sub>	X <sub>FS4</sub>	X <sub>FS5</sub>	X <sub>FS6</sub>	X <sub>LR1</sub>	X <sub>LR2</sub>	X <sub>LR3</sub>
Artigas	0,4	10,68	9,20	40,9	7,83	2,40	0,50	77,8	8,40
Canelones	0,3	4,99	7,50	27,2	8,11	1,30	0,60	77,3	8,86
Cerro Largo	0,3	9,17	9,90	42	5,99	2,30	0,40	77,5	7,82
Colonia	0,3	2,89	6,90	24,2	5,29	1,20	0,70	76,3	8,72
Durazno	0,4	7,89	8,80	31,9	12,35	1,20	0,60	78,3	8,18
Flores	0,3	2,67	7,80	27,8	6,24	1,00	0,60	77,5	8,18
Florida	0,4	6,40	7,10	27,7	6,10	1,50	0,60	78,2	8,24
Lavalleja	0,3	4,21	10,40	29,4	9,65	1,90	0,60	78,4	7,88
Maldonado	0,3	2,58	7,00	26,8	7,46	0,60	0,70	77,6	9,27
Paysandú	0,4	11,15	7,30	16,9	8,20	0,90	0,90	77,5	10,74
Río Negro	0,4	7,28	6,50	27,1	6,35	2,50	0,60	77,8	8,59
Rivera	0,4	4,34	7,50	27,6	7,72	2,40	0,60	77,9	8,46
Rocha	0,4	12,15	8,10	42,6	7,30	2,80	0,40	77,6	7,93
Salto	0,3	6,43	7,80	31,3	8,45	1,90	0,50	76,8	8,50
San José	0,4	8,49	7,70	36,1	9,92	2,30	0,60	76,1	8,75
Soriano	0,30	2,47	6,70	26,7	6,59	1,4	0,6	76,90	7,94

Departamento	X <sub>FS1</sub>	X <sub>FS2</sub>	X <sub>FS3</sub>	X <sub>FS4</sub>	X <sub>FS5</sub>	X <sub>FS6</sub>	X <sub>LR1</sub>	X <sub>LR2</sub>	X <sub>LR3</sub>
Tacuarembó	0,30	4,33	9,00	38,6	8,77	2,40	0,60	76,60	8,24
Treinta y tres	0,30	5,94	8,90	33,2	5,31	2,90	0,40	77,40	7,82

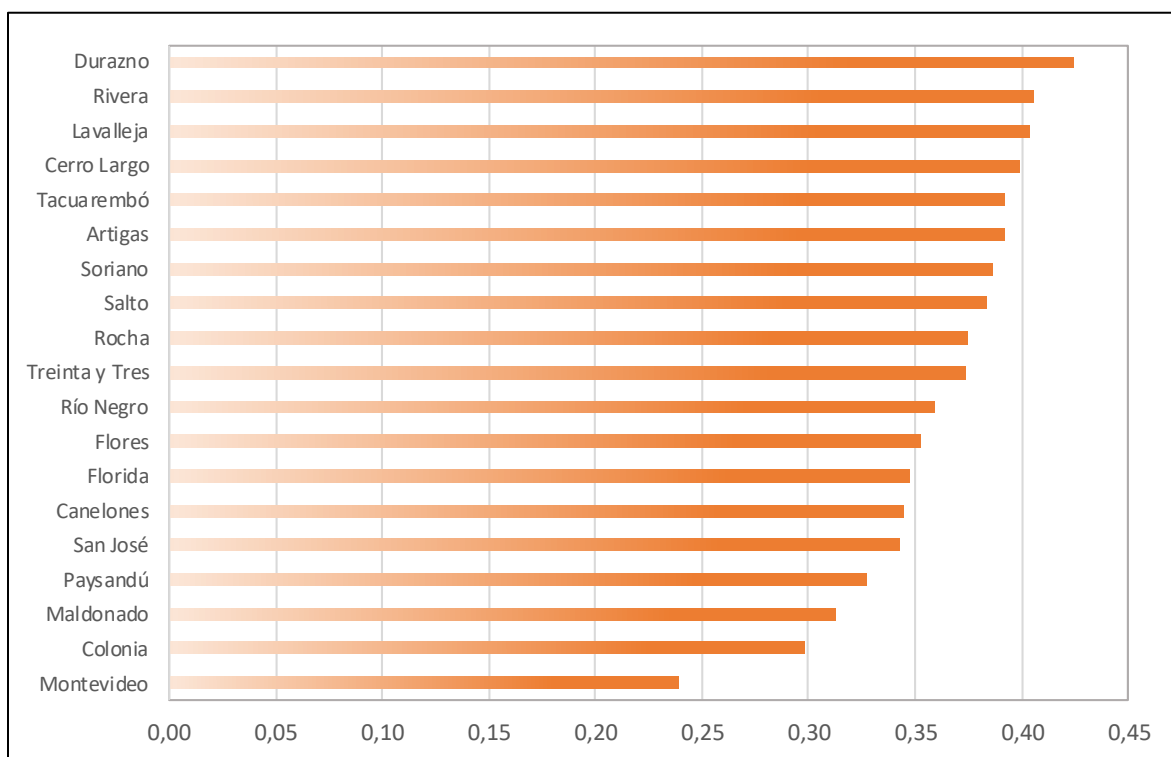
Los valores de los factores de agravamiento obtenidos mediante la aplicación de las funciones de transformación a los valores originales y el Coeficiente de Agravamiento resultante para cada uno de los departamentos de Uruguay.

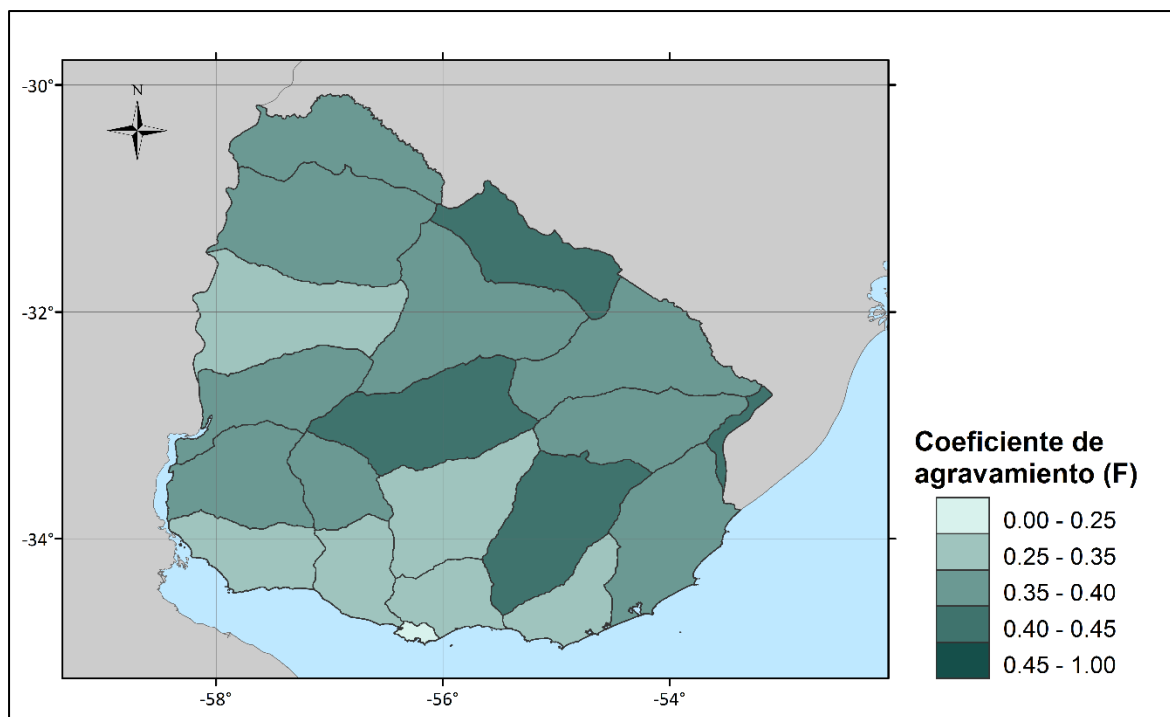
Factores de agravamiento y Coeficiente de Agravamiento por departamento en Uruguay

Departamento	Factores de Fragilidad Social						Factores de falta de resiliencia			F
	F <sub>FS1</sub>	F <sub>FS2</sub>	F <sub>FS3</sub>	F <sub>FS4</sub>	F <sub>FS5</sub>	F <sub>FS6</sub>	F <sub>LR1</sub>	F <sub>LR2</sub>	F <sub>LR3</sub>	
Artigas	0,40	0,00	0,99	1,00	0,31	0,00	0,50	0,02	0,20	0,39
Canelones	0,30	0,00	0,88	0,96	0,33	0,00	0,40	0,04	0,10	0,34
Cerro Largo	0,30	0,00	1,00	1,00	0,18	0,00	0,60	0,03	0,38	0,40
Colonia	0,30	0,00	0,81	0,83	0,14	0,00	0,30	0,07	0,13	0,30
Durazno	0,40	0,00	0,97	1,00	0,71	0,00	0,40	0,01	0,26	0,424
Flores	0,30	0,00	0,90	0,98	0,19	0,00	0,40	0,03	0,27	0,35
Florida	0,40	0,00	0,83	0,97	0,19	0,00	0,40	0,02	0,25	0,35
Lavalleja	0,30	0,00	1,00	1,00	0,47	0,00	0,40	0,01	0,36	0,40
Maldonado	0,30	0,00	0,82	0,95	0,28	0,00	0,30	0,03	0,04	0,31
Montevideo	0,40	0,01	0,85	0,24	0,34	0,00	0,10	0,03	0,00	0,24



Paysandú	0,40	0,00	0,76	0,96	0,20	0,00	0,40	0,02	0,16	0,33
Río Negro	0,40	0,00	0,88	0,97	0,30	0,00	0,40	0,02	0,19	0,36
Rivera	0,40	0,02	0,93	1,00	0,27	0,00	0,60	0,03	0,34	0,41
Rocha	0,30	0,00	0,90	1,00	0,36	0,00	0,50	0,05	0,18	0,37
Salto	0,40	0,00	0,89	1,00	0,49	0,00	0,40	0,08	0,13	0,38
San José	0,30	0,00	0,78	0,95	0,22	0,00	0,40	0,05	0,34	0,34
Soriano	0,30	0,00	0,98	1,00	0,38	0,00	0,40	0,06	0,25	0,39
Tacuarembó	0,30	0,00	0,98	1,00	0,14	0,00	0,60	0,03	0,38	0,39
Treinta y Tres	0,30	0,00	0,92	0,97	0,33	0,00	0,50	0,05	0,20	0,37





Coeficiente de Agravamiento,  $F$ , por departamento para Uruguay

El riesgo físico para esta evaluación tiene en cuenta la pérdida anual esperada en términos relativos para cinco escenarios posibles: Clima base, RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 y RCP 8.5, con los valores presentados a continuación.

Pérdida Anual Esperada por departamento y por escenario para Uruguay (total agricultura y ganadería)

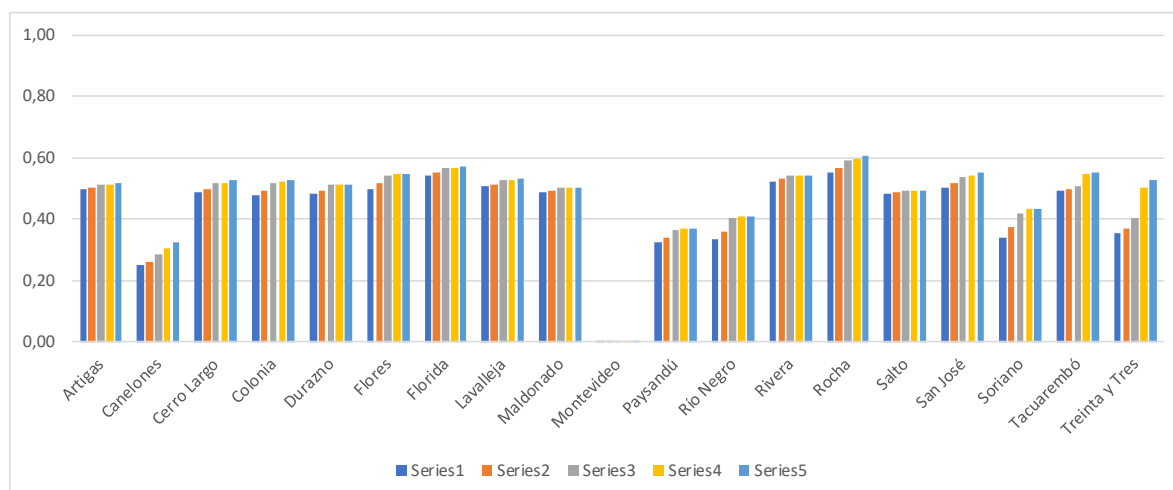
Departamento	Clima Base	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5
	PAE Relativo (%)	PAE Relativo (%)	PAE Relativo (%)	PAE Relativo (%)	PAE Relativo (%)
Artigas	3,83%	3,90%	4,01%	4,01%	4,04%
Canelones	1,98%	2,03%	2,16%	2,28%	2,41%
Cerro Largo	3,72%	3,82%	4,03%	4,05%	4,16%

Colonia	3,66%	3,81%	4,06%	4,13%	4,14%
Durazno	3,68%	3,79%	3,98%	4,00%	4,03%
Flores	3,85%	4,04%	4,33%	4,40%	4,41%
Florida	4,34%	4,45%	4,64%	4,66%	4,69%
Lavalleja	3,94%	4,01%	4,17%	4,17%	4,22%
Maldonado	3,75%	3,80%	3,89%	3,88%	3,88%
Montevideo	0,08%	0,10%	0,16%	0,21%	0,33%
Paysandú	2,42%	2,50%	2,69%	2,72%	2,70%
Río Negro	2,48%	2,64%	2,96%	3,03%	3,03%
Rivera	4,13%	4,20%	4,32%	4,31%	4,34%
Rocha	4,46%	4,63%	4,95%	5,00%	5,14%
Salto	3,68%	3,73%	3,80%	3,79%	3,79%
San José	3,90%	4,04%	4,28%	4,34%	4,43%
Soriano	2,52%	2,73%	3,12%	3,24%	3,24%
Tacuarembó	3,77%	3,84%	3,97%	4,37%	4,44%
Treinta y Tres	2,59%	2,70%	2,98%	3,90%	4,16%

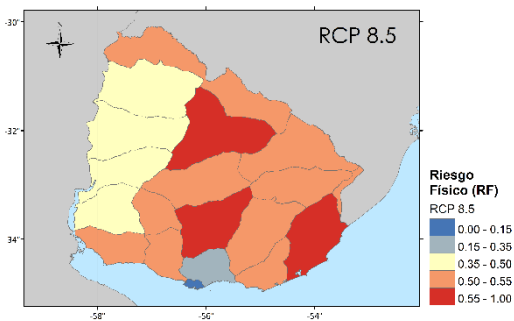
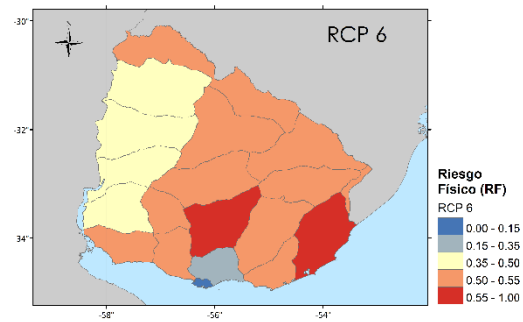
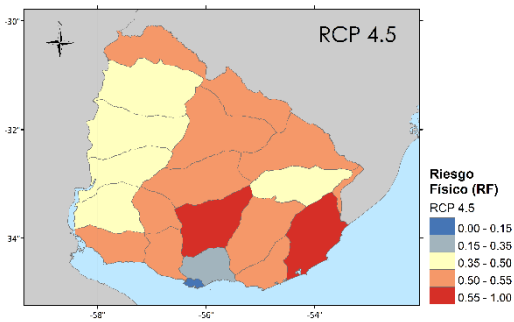
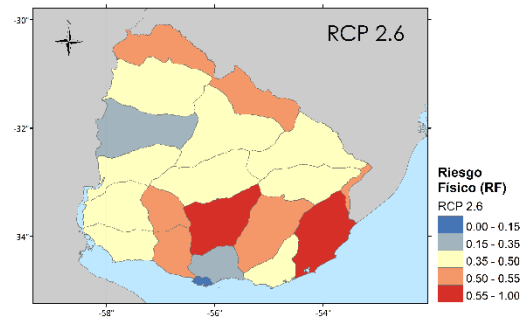
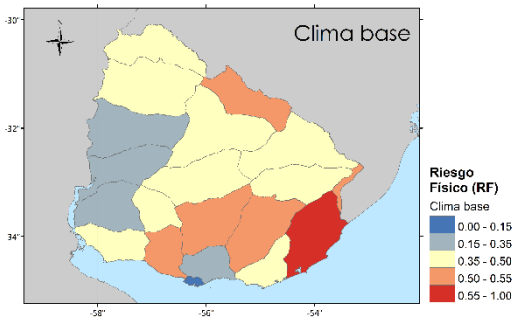
Las figuras a continuación presentan los resultados obtenidos para Riesgo físico,  $R_F$ , y Riesgo total,  $R_T$ , para los cinco escenarios considerados.

Valores de Riesgo Físico,  $R_F$ , por departamento y por escenario para Uruguay

Departamento	Riesgo Físico (RF)				
	Clima base	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5
Artigas	0,496	0,503	0,513	0,513	0,516
Canelones	0,253	0,262	0,284	0,304	0,325
Cerro Largo	0,485	0,495	0,515	0,517	0,526
Colonia	0,479	0,494	0,517	0,524	0,525
Durazno	0,481	0,492	0,510	0,512	0,514
Flores	0,498	0,516	0,542	0,547	0,548
Florida	0,542	0,552	0,567	0,568	0,570
Lavalleja	0,506	0,513	0,527	0,528	0,532
Maldonado	0,488	0,493	0,501	0,500	0,501
Montevideo	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003
Paysandú	0,326	0,338	0,366	0,369	0,367
Río Negro	0,335	0,358	0,401	0,409	0,410
Rivera	0,523	0,530	0,540	0,539	0,542
Rocha	0,552	0,566	0,591	0,594	0,604
Salto	0,481	0,486	0,493	0,492	0,492
San José	0,502	0,516	0,537	0,542	0,550
Soriano	0,341	0,371	0,420	0,434	0,434
Tacuarembó	0,490	0,497	0,509	0,545	0,550
Treinta y Tres	0,352	0,367	0,403	0,502	0,527



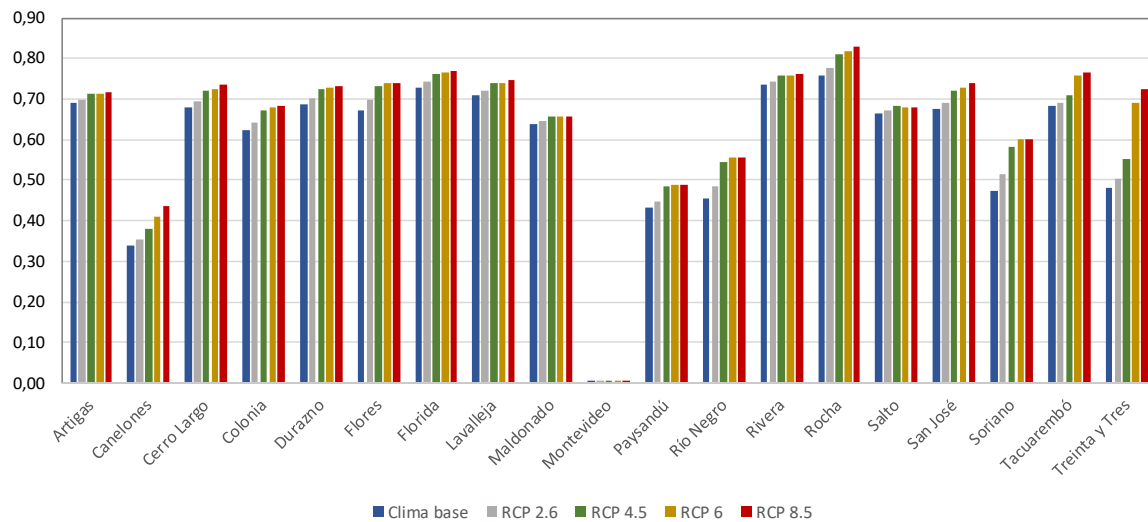
Riesgo Físico,  $R_F$ , por departamento, por escenario para Uruguay



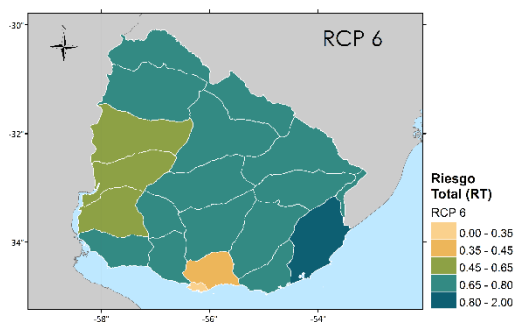
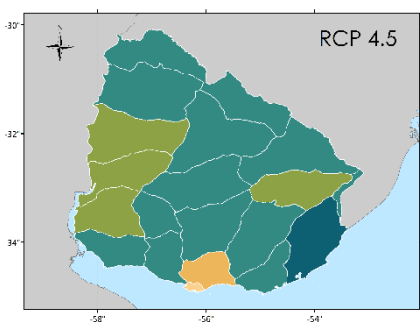
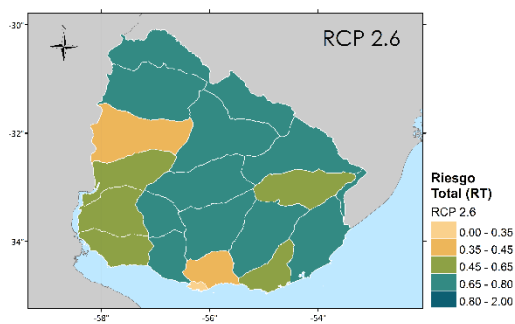
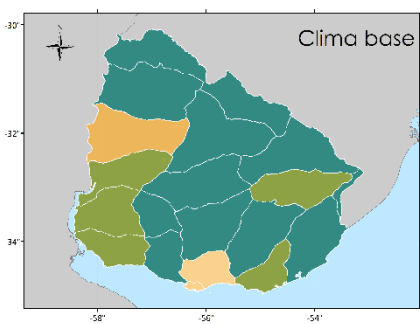
Riesgo Físico,  $R_F$ , en Uruguay por departamento, para los 5 escenarios considerados

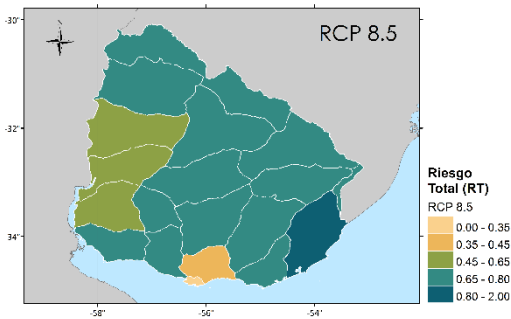
Valores de Riesgo Total,  $R_T$ , por departamento y por escenario para Uruguay

Departamento	Riesgo Total (RT)				
	Clima base	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5
Artigas	0,690	0,699	0,714	0,714	0,718
Canelones	0,340	0,353	0,382	0,408	0,437
Cerro Largo	0,678	0,693	0,721	0,723	0,736
Colonia	0,622	0,641	0,671	0,680	0,682
Durazno	0,686	0,701	0,726	0,729	0,732
Flores	0,674	0,698	0,732	0,739	0,741
Florida	0,730	0,743	0,763	0,766	0,769
Lavalleja	0,710	0,720	0,739	0,740	0,746
Maldonado	0,640	0,647	0,658	0,657	0,657
Montevideo	0,001	0,001	0,002	0,003	0,004
Paysandú	0,433	0,449	0,486	0,490	0,487
Río Negro	0,456	0,487	0,545	0,556	0,557
Rivera	0,736	0,744	0,759	0,758	0,762
Rocha	0,759	0,778	0,812	0,816	0,831
Salto	0,665	0,672	0,682	0,681	0,680
San José	0,674	0,692	0,721	0,728	0,738
Soriano	0,473	0,515	0,582	0,602	0,601
Tacuarembó	0,682	0,692	0,708	0,758	0,766
Treinta y Tres	0,483	0,504	0,554	0,690	0,723

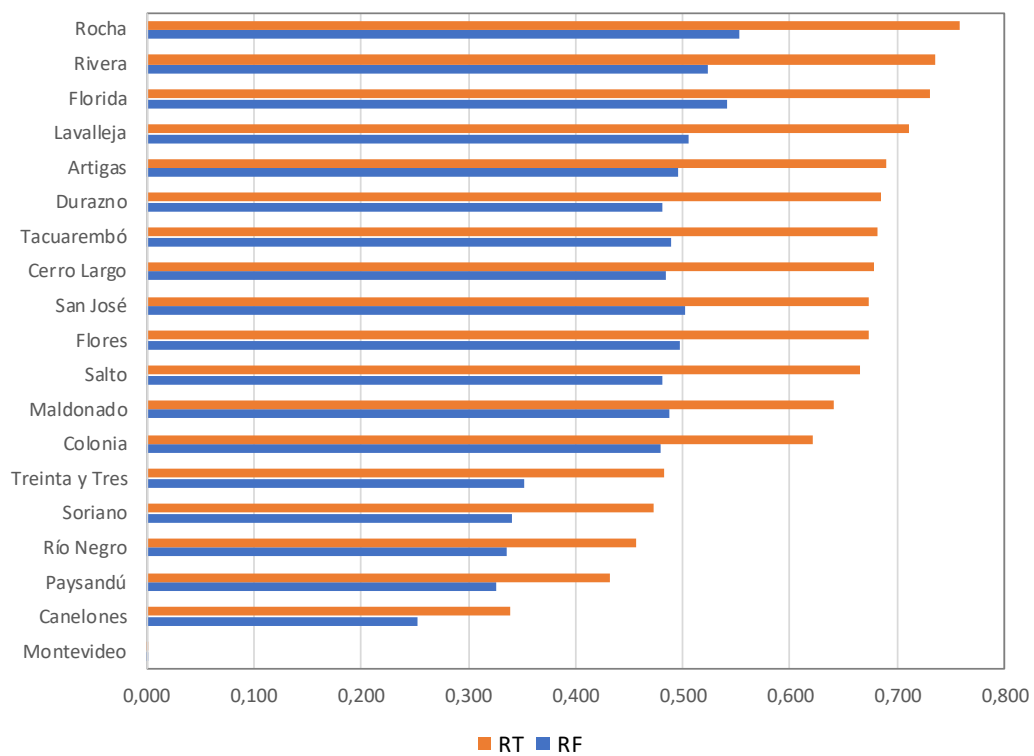


Riesgo Total,  $R_T$ , por departamento, por escenario para Uruguay



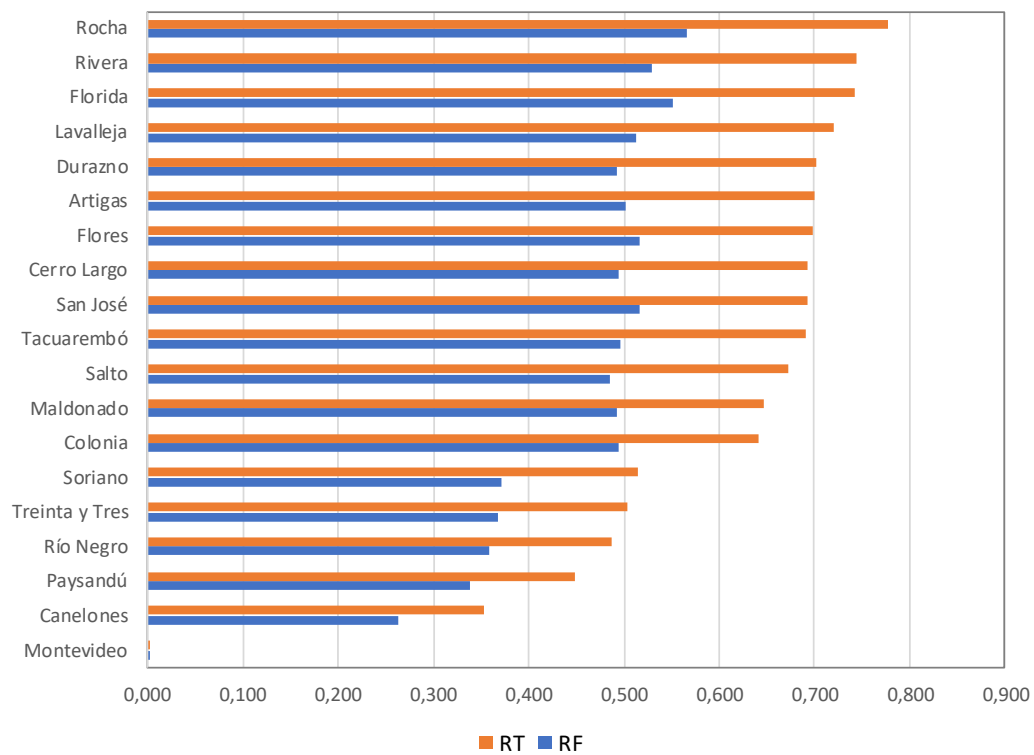


Riesgo Total,  $R_T$ , en Uruguay por departamento, para los 5 escenarios considerados

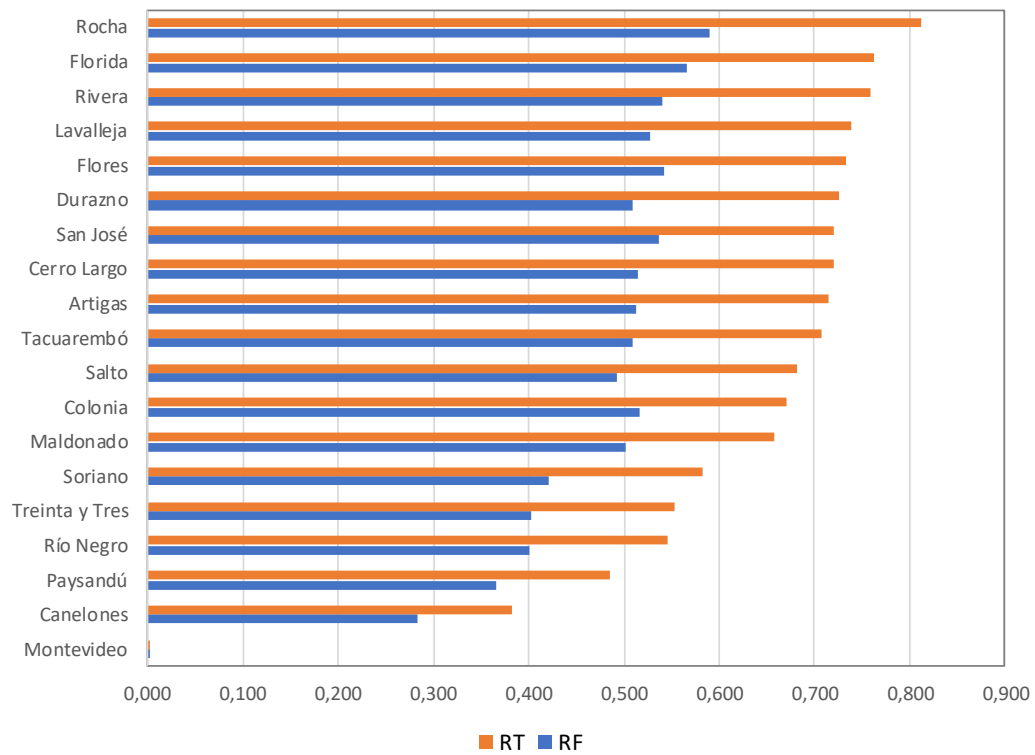


Riesgo físico,  $R_F$ , y Riesgo Total,  $R_T$ , por departamento en Uruguay para el escenario de clima base

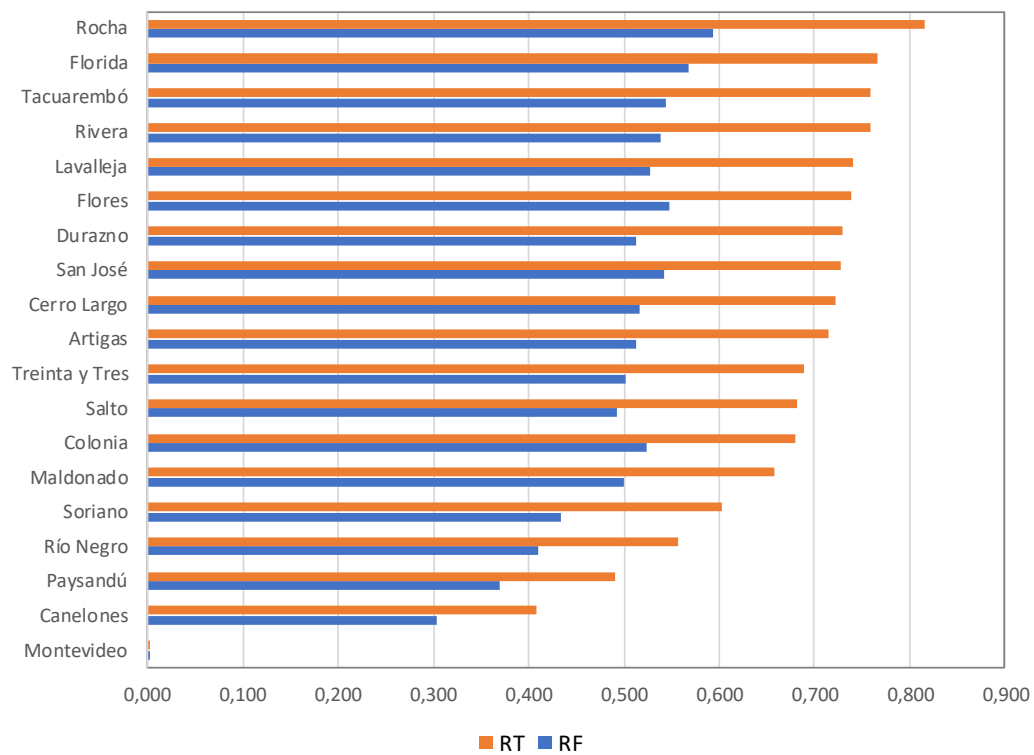




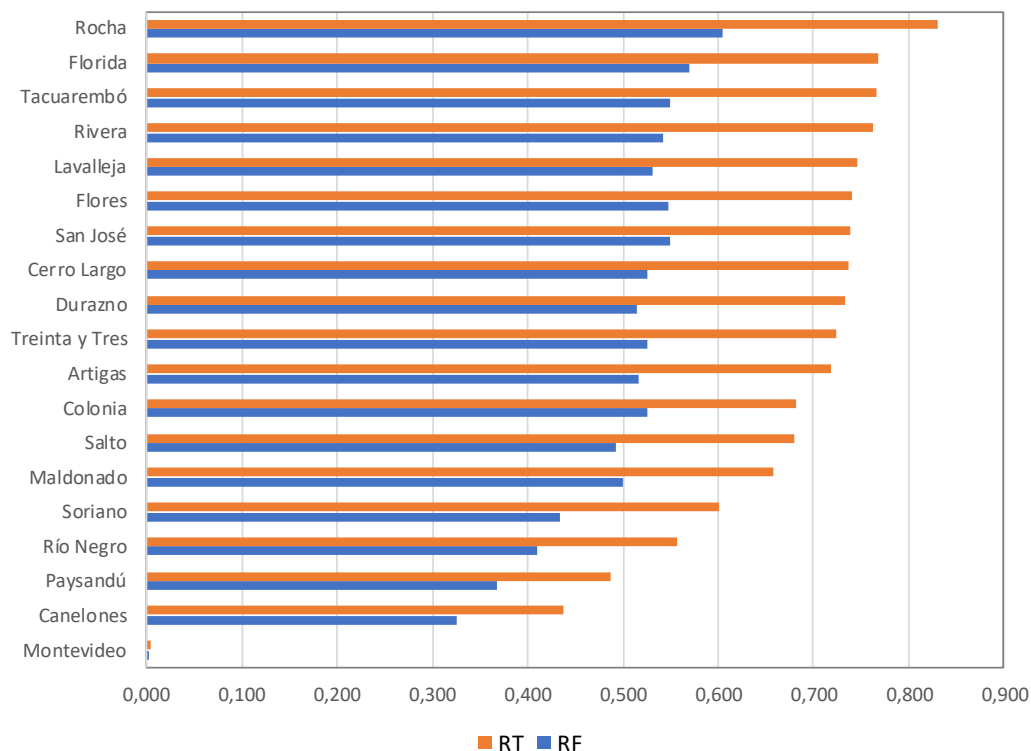
Riesgo físico,  $R_F$ , y Riesgo Total,  $R_T$ , por departamento en Uruguay para el escenario RCP 2.6



Riesgo físico,  $R_F$ , y Riesgo Total,  $R_T$ , por departamento en Uruguay para el escenario RCP 4.5



Riesgo físico,  $R_F$ , y Riesgo Total,  $R_T$ , por departamento en Uruguay para el escenario RCP 6



Riesgo físico,  $R_F$ , y Riesgo Total,  $R_T$ , por departamento en Uruguay para el escenario RCP 8.5

### Recomendaciones sobre la evaluación integral (*Contribución de Raquel Lejtregger*)

La evaluación holística del riesgo para Uruguay que presenta este informe es una aproximación muy interesante y pertinente a la complejidad del tema. Se ha utilizado un conjunto de indicadores clave para caracterizar la fragilidad social y la falta de resiliencia, tomando como unidades territoriales las unidades administrativas correspondientes a los departamentos. A partir de esta evaluación se abre un campo de trabajo que habilitaría la consideración de otras variables, indicadores, temas, con el fin de dar cuenta de los “factores sociales, organizacionales e institucionales” que se plantean en la introducción. Por un lado, existen factores sociales, económicos y culturales además de los geográficos que han impregnado las trayectorias de los territorios desde los inicios del poblamiento del país. A modo de ejemplo, las formas de habitar y producir aún hoy, no son las mismas en los territorios del centro–este o centro–norte del país, en los que se conformaron tempranamente latifundios de ganadería extensiva en los que los

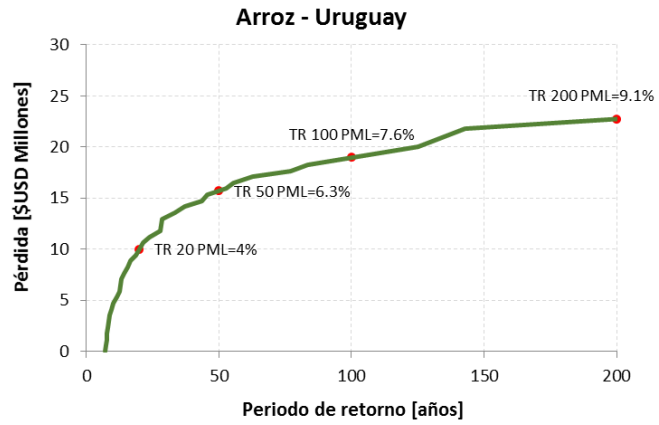
propietarios viven en general en Montevideo o en las capitales de los departamentos, que en el sur – oeste, conformado por unidades productivas más pequeñas, con poblaciones de los aluviones más tardíos que arribaron al país expulsados por las guerras en Europa y conformaron comunidades más cohesivas, incluyendo regiones que por sus características socio culturales fueron las más propensas a la introducción de la tecnología en la producción agropecuaria. Esto genera capacidades individuales y colectivas diferenciadas en las potencialidades de recuperación frente a impactos causados por los desastres y la construcción de resiliencia.

Complementariamente, se podría estudiar la pertinencia de otros indicadores como se ha expresado, atendiendo a la caracterización política e institucional en términos de resiliencia. Asimismo, se menciona que, en Uruguay desde hace muchos años, para comprender las fragilidades desde una perspectiva holística y generar políticas públicas para actuar con relación a ellas, se comenzó a trabajar con un concepto de exclusión (social, económica, ambiental y territorial, política términos de participación y ejercicio de ciudadanía) que se anticipó al concepto de pobreza multidimensional desarrollado por la CEPAL. En ese sentido la exclusión ha tomado como eje estructurador *el trabajo* y el país ha desarrollado datos e indicadores referidos al trabajo, entre otros, que permitirían múltiples análisis con relación al riesgo. Por otro lado, sería interesante considerar series históricas extensas para caracterizar las trayectorias sociales en los departamentos, para generar escenarios. La evaluación holística del riesgo para Uruguay es una firme base para estos desafíos.

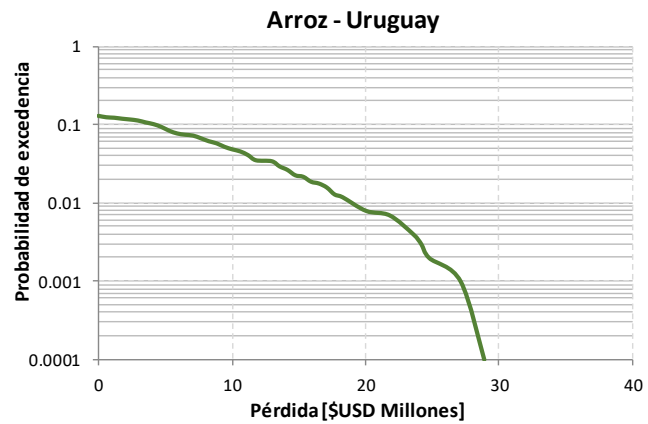
## A. 12 Resultados de riesgo por cultivo

### A. 12.1 Arroz

Resultados		
Valor Expuesto	USD Millones	\$251.7
Pérdida anual esperada	USD Millones	\$1.3
	%	0.50%
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	USD Millones	%
20	\$10.0	4.0
50	\$15.7	6.3
100	\$19.0	7.6
200	\$22.7	9.1



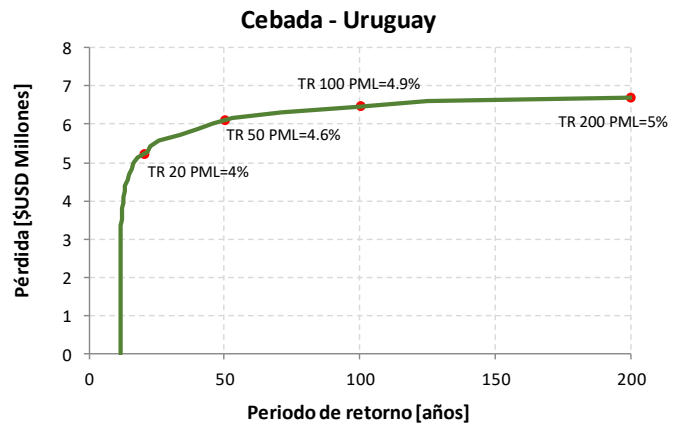
*Curva de pérdidas PML*



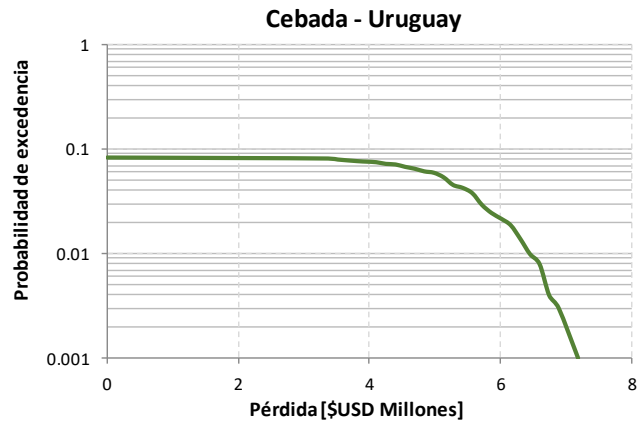
*Probabilidad de que se supere la pérdida en el próximo año*

## A. 12.2 Cebada

Resultados		
Valor Expuesto	USD Millones	\$134.1
Pérdida anual esperada	USD Millones	\$0.5
	%	0.35%
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	USD Millones	%
20	\$5.2	4.0
50	\$6.1	4.6
100	\$6.5	4.9
200	\$6.7	5.0



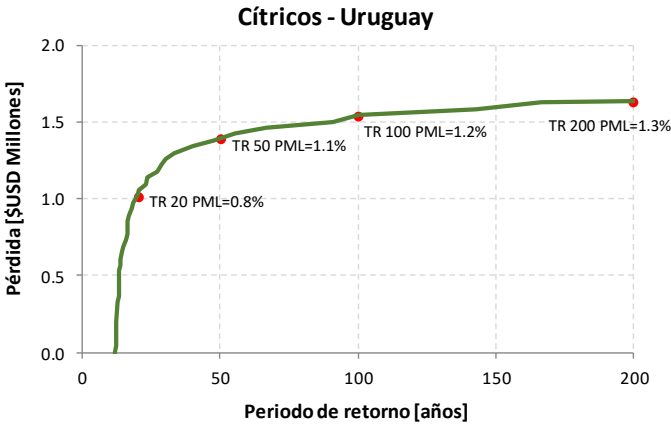
*Curva de pérdidas PML*



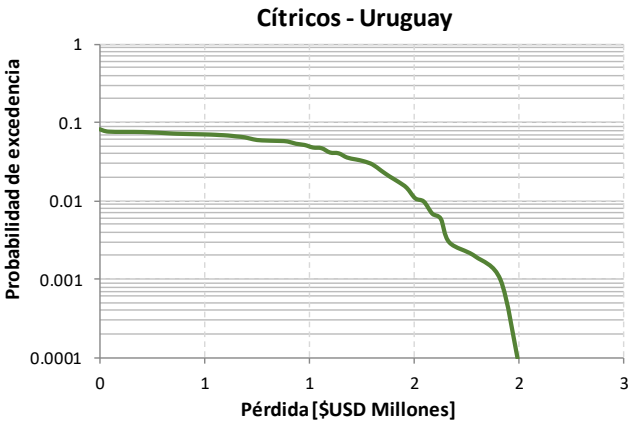
*Probabilidad de que se supere la pérdida en el próximo año*

A. 12.3 Cítricos

Resultados		
Valor Expuesto	USD Millones	\$129.9
Pérdida anual esperada	USD Millones	\$0.1
	%	0.07%
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	USD Millones	%
20	\$1.0	0.8
50	\$1.4	1.1
100	\$1.5	1.2
200	\$1.6	1.3



Curva de pérdidas PML



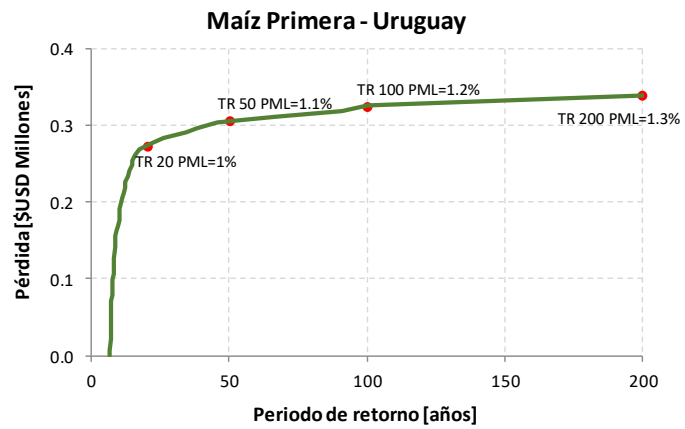
Probabilidad de que se supere la pérdida en el próximo año



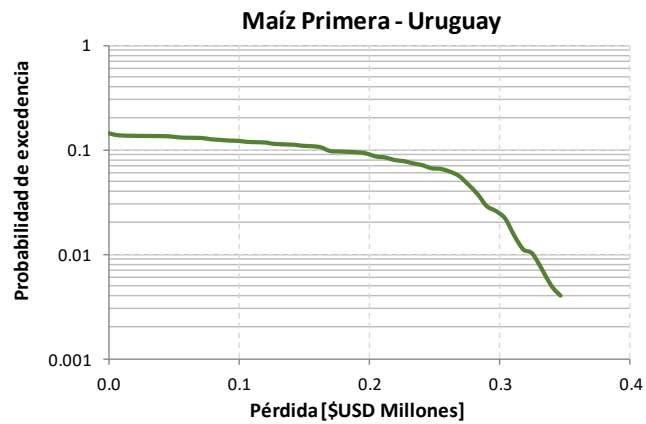
## A. 12.4 Maíz

### Maíz Primera

Resultados		
Valor Expuesto	USD Millones	\$28.1
Pérdida anual esperada	USD Millones	\$0.0
	%	0.12%
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	USD Millones	%
20	\$0.3	1.0
50	\$0.3	1.1
100	\$0.3	1.2
200	\$0.3	1.3



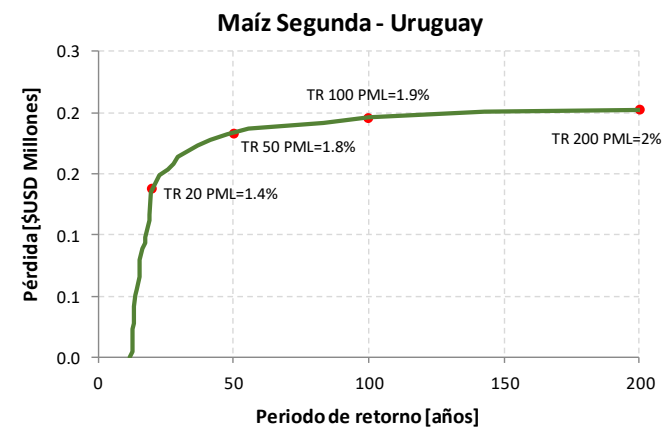
*Curva de pérdidas PML*



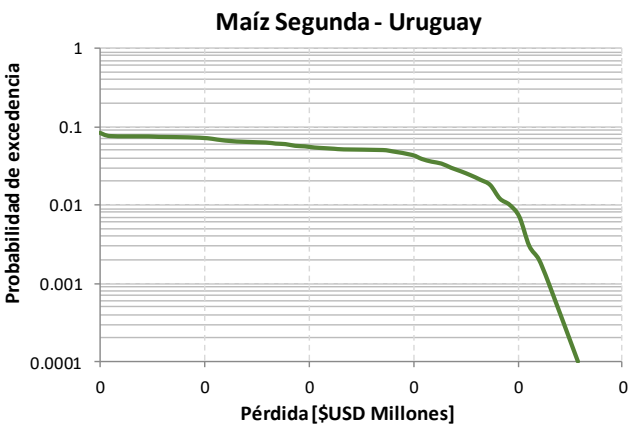
*Probabilidad de que se supere la pérdida en el próximo año*

Maíz Segunda

Resultados		
Valor Expuesto	USD Millones	\$10.4
Pérdida anual esperada	USD Millones	\$0.0
	%	0.11%
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	USD Millones	%
20	\$0.1	1.4
50	\$0.2	1.8
100	\$0.2	1.9
200	\$0.2	2.0



Curva de pérdidas PML

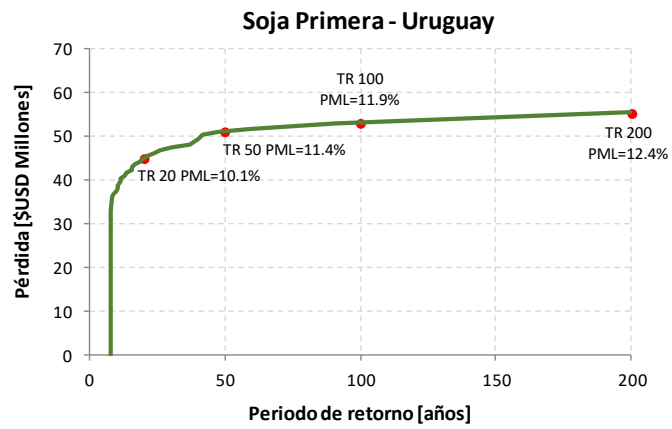


Probabilidad de que se supere la pérdida en el próximo año

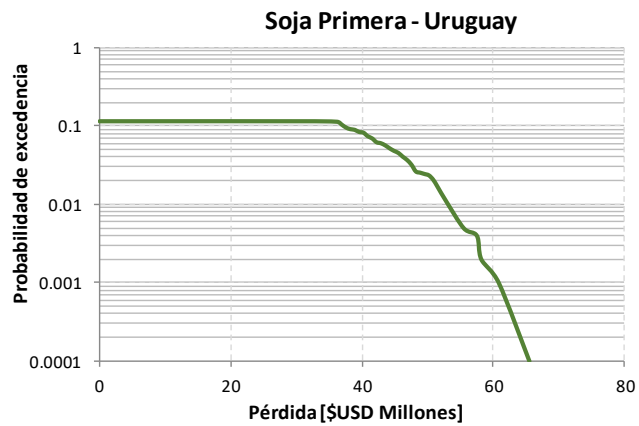
## A. 12.5 Soja

### Soja Primera

Resultados		
Valor Expuesto	USD Millones	\$447.6
Pérdida anual esperada	USD Millones	\$5.5
	%	1.23%
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	USD Millones	%
20	\$44.8	10.1
50	\$51.0	11.4
100	\$53.0	11.9
200	\$55.5	12.4



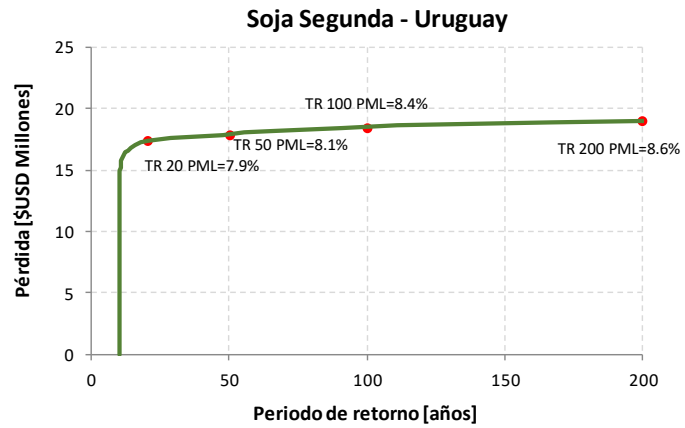
*Curva de pérdidas PML*



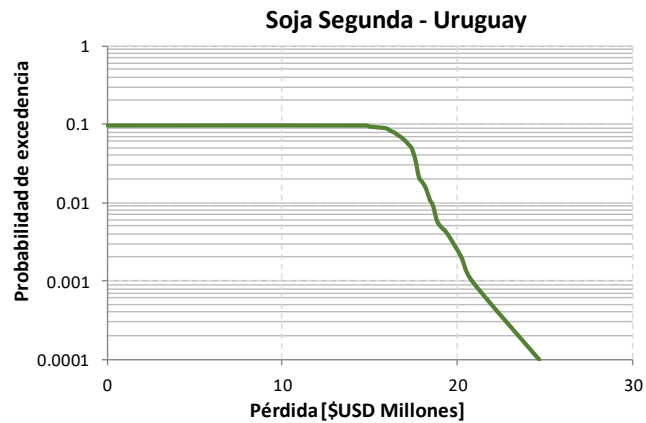
*Probabilidad de que se supere la pérdida en el próximo año*

## Soja Segunda

Resultados		
Valor Expuesto	USD Millones	\$221.7
Pérdida anual esperada	USD Millones	\$1.7
	%	0.78%
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	USD Millones	%
20	\$17.4	7.9
50	\$17.9	8.1
100	\$18.5	8.4
200	\$19.0	8.6



### Curva de pérdidas PML

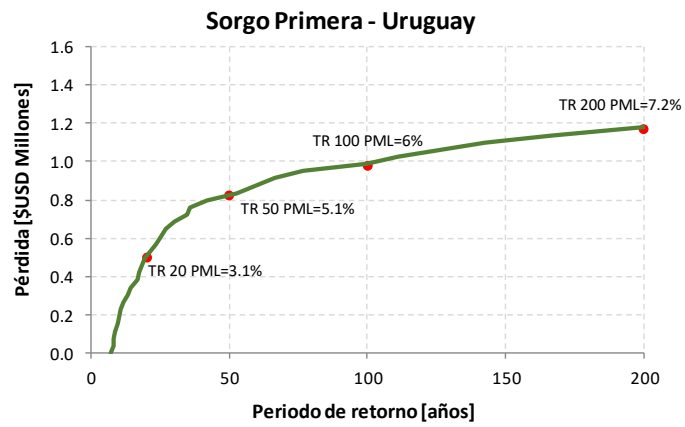


*Probabilidad de que se supere la pérdida en el próximo año*

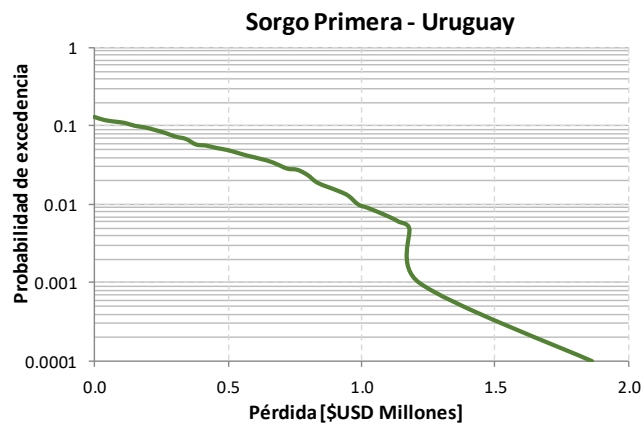
## A. 12.6 Sorgo

### Sorgo Primera

Resultados		
Valor Expuesto	USD Millones	\$16.5
Pérdida anual esperada	USD Millones	\$0.1
	%	0.37%
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	USD Millones	%
20	\$0.5	3.1
50	\$0.8	5.1
100	\$1.0	6.0
200	\$1.2	7.2



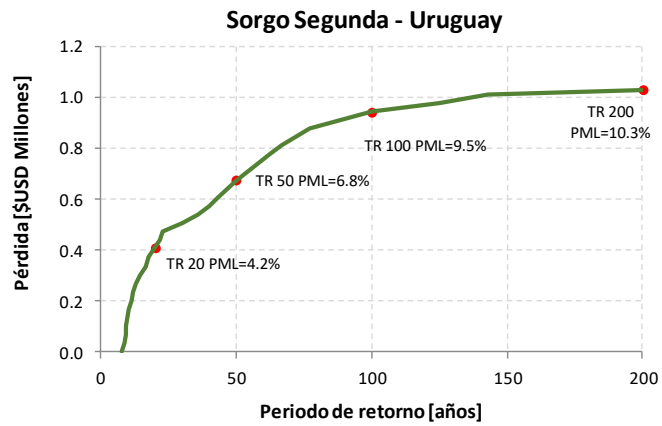
*Curva de pérdidas PML*



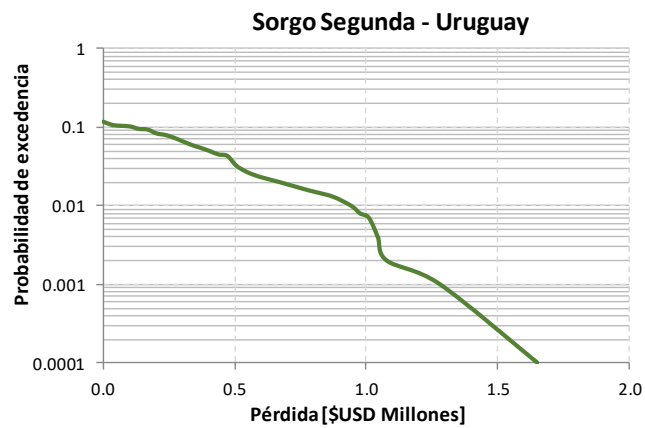
*Probabilidad de que se supere la pérdida en el próximo año*

## Sorgo Segunda

Resultados		
Valor Expuesto	USD Millones	\$10.0
Pérdida anual esperada	USD Millones	\$0.1
	%	0.50%
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	USD Millones	%
20	\$0.410	4.2
50	\$0.674	6.8
100	\$0.943	9.5
200	\$1.028	10.3



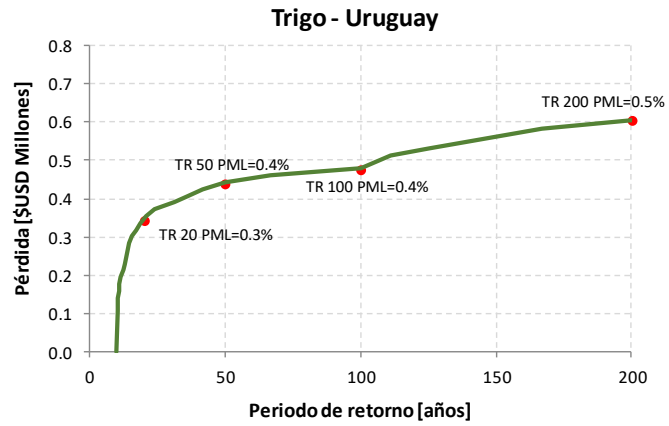
### Curva de pérdidas PML



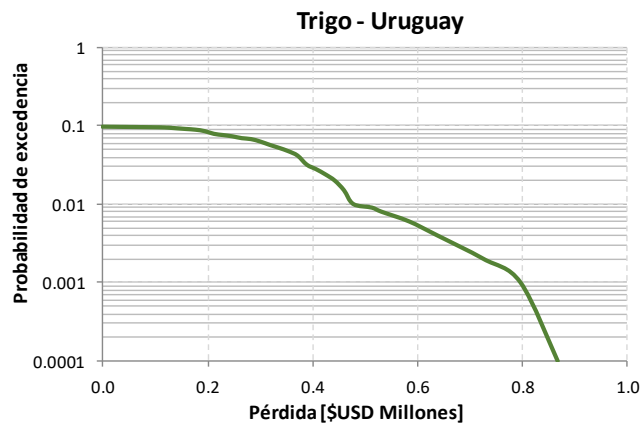
*Probabilidad de que se supere la pérdida en el próximo año*

## A. 12.7 Trigo

Resultados		
Valor Expuesto	USD Millones	\$146.7
Pérdida anual esperada	USD Millones	\$0.0
	%	0.02%
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	USD Millones	%
20	\$0.3	0.3
50	\$0.4	0.4
100	\$0.5	0.4
200	\$0.6	0.5



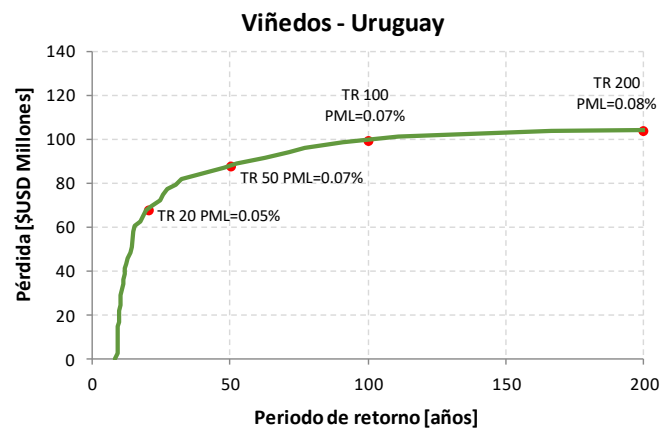
*Curva de pérdidas PML*



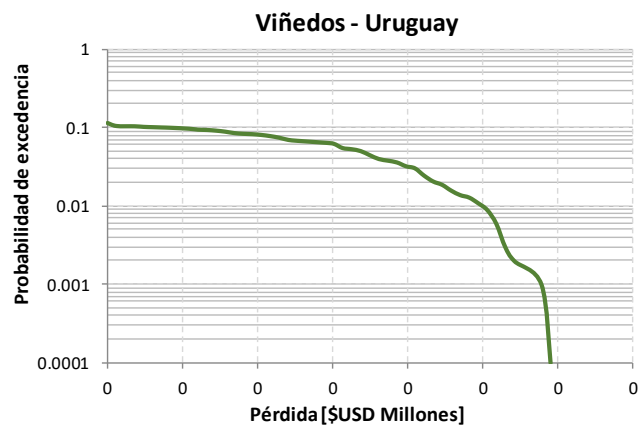
*Probabilidad de que se supere la pérdida en el próximo año*

A. 12.8 Viñedos

Resultados		
Valor Expuesto	USD Miles	\$144,017.2
Pérdida anual esperada	USD Miles	\$7.0
	%	0.005%
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	USD Miles	%
20	\$68.2	0.05
50	\$87.8	0.07
100	\$99.8	0.07
200	\$104.0	0.08



Curva de pérdidas PML



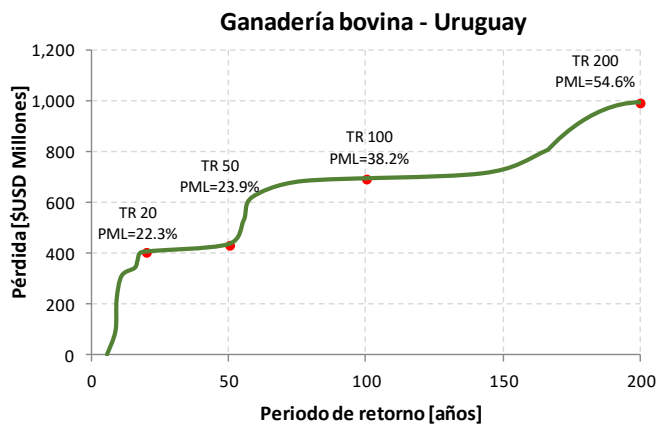
Probabilidad de que se supere la pérdida en el próximo año



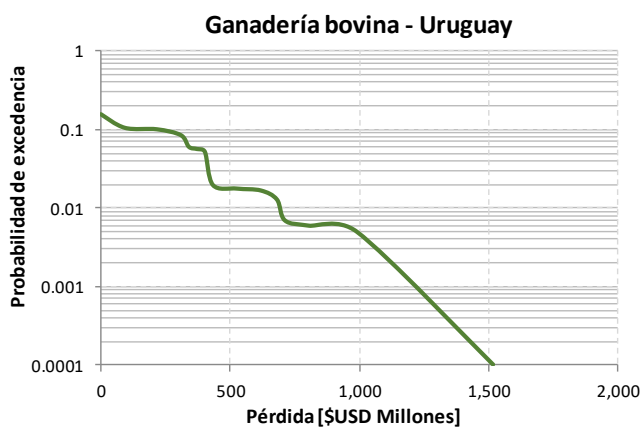
## A. 13 Resultados de riesgo por sistema de ganadería

### A. 13.1 Ganadería bovina

Resultados		
Valor Expuesto	USD Millones	\$1,814.0
Pérdida anual esperada	USD Millones	\$47.4
	%	2.61%
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	USD Millones	%
20	\$403.7	22.3
50	\$433.2	23.9
100	\$691.5	38.2
200	\$990.1	54.6



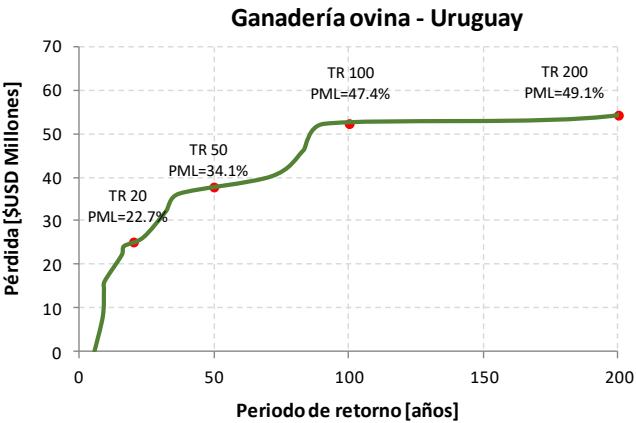
*Curva de pérdidas PML*



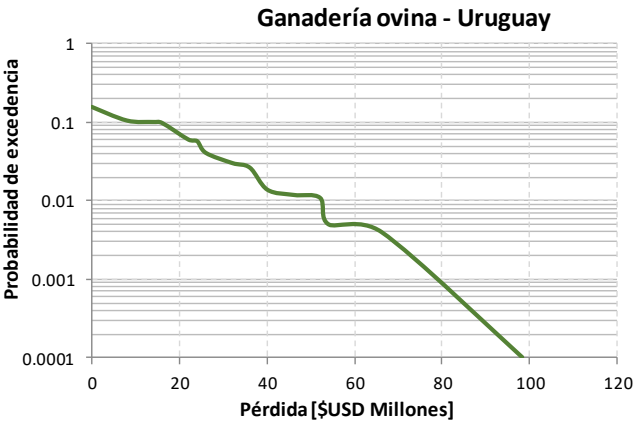
*Probabilidad de que se supere la pérdida en el próximo año*

A. 13.2 Ganadería ovina

Resultados		
Valor Expuesto	USD Millones	\$110.5
Pérdida anual esperada	USD Millones	\$3.1
	%	2.84%
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	USD Millones	%
20	\$25.0	22.7
50	\$37.6	34.1
100	\$52.3	47.4
200	\$54.2	49.1



Curva de pérdidas PML



Probabilidad de que se supere la pérdida en el próximo año

#### A. 14 Archivos digitales de soporte de sequía

Como complemento a los resultados de riesgo por sequía presentados en este informe se incluyen los archivos digitales empleados como insumos por el software Drought Pro para la modelación del riesgo en el sector agrícola del país.

Carpeta	Insumo		Descripción
Insumos para riesgo	Clima	Cambio climático	Proyecciones de cambio en precipitación y temperatura media del modelo de circulación global CCSM4 para los escenarios de forcings antropogénicos RCP2.6, RCP4.5, RCP6 y RPC8.5 (Representative Concentration Pathways) definidos en el informe AR5 del IPCC
		Clima base	Registros históricos (1981-2010) de las variables climáticas (acumulación diaria de precipitación, temperatura máxima, mínima y media, humedad del aire, radiación solar, presión atmosférica y la velocidad del viento) que fueron utilizadas para la evaluación probabilista de la amenaza por sequía
	Exp		Mapas con la localización georreferencia y área sembrada en formato tipo shape (.shp) para todos los cultivos seleccionados en el país
	Vul		Archivo de texto (.txt) con la definición de parámetros conservativos y no conservativos de cada cultivo

			Archivo de tipo .CSV con la definición de parámetros conservativos y no conservativos del tipo de suelo
<b>Proyecto Drought Pro</b>	Climate Model	ClimateInput	Archivos de entrada de temperatura máxima, mínima y media, precipitación y localización de las estaciones meteorológicas
		EToBase	Variables climáticas requeridas para el cálculo de la evapotranspiración (humedad del aire, radiación solar, presión atmosférica y la velocidad del viento)
		Indices	Índice RDI con una escala de 12 meses calculado por el software para la identificación de condiciones de sequía del clima base y bajo condiciones de cambio climático
		Simulations	Series modeladas de valores diarios de precipitación, temperatura (media, máxima y mínima) y evapotranspiración para 1,000 años equivalentes calculadas por el programa.
	RiskResults		Archivos de salida con la información de producción en Toneladas, pérdida económica en USD, producción potencial en toneladas, valor expuesto, para todos los escenarios de clima

<b>Resultados Riesgo</b>	Hojas de cálculo de Excel con los datos usados para construir las curvas de PML y pérdidas presentadas en este informe
--------------------------	--

#### A. 15 Archivos digitales de soporte de inundación

Como complemento a los resultados de riesgo por inundación presentados en este informe se incluyen los archivos digitales empleados como insumos por el software CAPRA para la modelación del riesgo en las edificaciones de Río Branco.

<b>Carpeta</b>	<b>Descripción</b>
<b>Amenaza</b>	Archivo AME de inundación usado por el programa CAPRA en el cálculo de riesgo
<b>Exposición</b>	Archivo tipo shape (.shp) de exposición de las edificaciones de Río Branco
<b>Vulnerabilidad</b>	Funciones de vulnerabilidad empleadas en el cálculo de riesgo en formato *.fvu
<b>Riesgo</b>	Archivo de resultados de riesgo