

Incluir el cambio climático en el análisis hidrológico para el trazado y diseño de infraestructura de transporte

Guía metodológica e implementación en 33 puentes vehiculares en Haití

Juan Camilo Olaya González
Raphael Dewez
Pablo Guerrero
Benoit Lefevre
Mauro Nalesso
Daniela Zuloaga

División de Cambio Climático
División de Transporte

NOTA TÉCNICA N°
IDB-TN-01860

Incluir el cambio climático en el análisis hidrológico para el trazado y diseño de infraestructura de transporte

Guía metodológica e implementación en 33 puentes vehiculares en Haití

Juan Camilo Olaya González
Raphael Dewez
Pablo Guerrero
Benoit Lefevre
Mauro Nalesso
Daniela Zuloaga

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

Incluir el cambio climático en el análisis hidrológico para el trazado y diseño de infraestructura de transporte: guía metodológica e implementación en 33 puentes vehiculares en Haití / Juan Camilo Olaya González, Raphael Dewez, Pablo Guerrero, Benoit Lefevre, Mauro Nalesso, Daniela Zuloaga. p. cm. — (Nota técnica del BID; 1860)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Bridges-Design and construction-Environmental aspects-Haiti. 2. Watershed hydrology-Haiti. 3. Flood damage prevention-Haiti. 4. Climatic changes-Haiti. I. Olaya González, Juan Camilo. II. Dewez, Raphael. III. Guerrero, Pablo. IV. Lefevre, Benoit. V. Nalesso, Mauro. VI. Zuloaga, Daniela. VII. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Transporte. VIII. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático. IX. Serie. IDB-TN-1860

Códigos JEL: R42

Palabras clave: transporte, cambio climático, desastres naturales, riesgo, puente, resiliencia, adaptación, infraestructura, hidrología, hidrodinámica, ingeniería, Haití

<http://www.iadb.org>

Copyright © [2020] 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.



INCLUIR EL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ANÁLISIS HIDROLÓGICO PARA EL TRAZADO Y DISEÑO DE INFRAESTRUCTURA DE TRANSPORTE

GUÍA METODOLÓGICA E IMPLEMENTACIÓN EN 33 PUENTES VEHICULARES EN HAITÍ



Contrato PEC (Product and External Services)

Informe de resultados: Información hidrológica como insumo para análisis hidrodinámico con modelo HydroBID, considerando la influencia de precipitación histórica (1950-2005) y de cambio climático (2006-2100) para 33 cuencas tributarias a puntos de localización de puentes vehiculares proyectados en Haití.

Juan Camilo Olaya González

I. Civil – I. Ambiental – M. Sc.

Recursos hídricos y Evaluación del riesgo de desastres

Documento supervisado por:

Raphael Dewez, Sector Specialist, INE/TSP

Pablo Guerrero, Transport Senior Specialist, INE/TSP

Benoit Lefevre, PhD, Sector Senior Specialist, CSD/CCS

Mauro Nalesso, Water and Sanitation Lead Specialist, INE/WSA

Daniela Zuloaga, Consultant, CSD/CCS

TABLA DE CONTENIDOS

ABREVIATURAS	12
GLOSARIO	13
RESUMEN EJECUTIVO	16
1. INTRODUCCIÓN	
2. OBJETIVOS Y ALCANCE	20
2.1 OBJETIVOS	20
2.2 ALCANCE	20
3. METODOLOGÍA	21
3.1 CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS	21
3.1.1 Supuestos y consideraciones	24
3.2 METODOLOGÍA DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA	26
4. DATOS DE ENTRADA	34
4.1 GENERALES	34
4.1.1 Localización de puentes vehiculares	38
4.1.2 Topografía	40
4.1.3 Estaciones pluviométricas	42
4.1.4 Precipitación a partir de GCM	45
4.1.5 Cobertura vegetal	65
4.1.6 Tipo de suelo	69
5. RESULTADOS	75
5.1 CONDICIÓN HISTÓRICA	77
5.2 CONDICIÓN CON CAMBIO CLIMÁTICO	100
5.3 ANÁLISIS COMPARATIVO	113
6. CONCLUSIONES	118
7. REFERENCIAS	122
8. ANEXOS	124
8.1 Anexo A: Delimitación de cuencas y propiedades morfométricas por cuenca	124
8.2 Anexo B: Tabla de localización e información base de estaciones pluviométricas en campo	140
8.3 Anexo C: Estaciones pluviométricas y Nodos GCM seleccionados por cada cuenca.	144
8.4 Anexo D: Hidrogramas calculados por cuenca, para 100 años de período de retorno	146
8.5 Anexo E: Curvas de periodo de retorno vs. Caudal pico por cuenca	162
8.6 Anexo F: Resultados de hidrogramas para 4 cuencas con cambios en las condiciones de cobertura vegetal	165

PRÓLOGO

La hidrología es un elemento clave de cualquier diseño de infraestructura vial y de aquella ubicada en zonas inundables. La estimación de los caudales de creciente, que sirven para simulaciones hidrodinámicas, influye en la localización y dimensionamiento de la infraestructura. El presente estudio, que contempla la estimación de hidrogramas de creciente en 33 cuencas hidrográficas en Haití, integró conceptos de hidrología con los efectos del cambio climático en los regímenes de precipitación futuros. El análisis definió dos escenarios, histórico y futuro, para los cuales se generaron series temporales para 15 períodos de retorno, tomando en cuenta tormentas de diseño desde 5 hasta 500 años. El análisis fue complementado con información de sensores remotos. El resultado se convierte en una referencia hidrológica para Haití dadas las dificultades de información y series de tiempo disponibles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema metodológico general de EPR por inundación. Fuente: (Merz & Thielen, 2004)	19
Figura 2 Diagrama de metodología de análisis hidrológico considerado en el proyecto	24
Figura 3 Diagrama de flujo para selección de datos de entrada de precipitación a partir de modelos climáticos del CMIP5	26
Figura 4 Diagrama de flujo para extracción y análisis de datos de modelo CSIRO-Mk-3-6-0.	27
Figura 5 Representación típica de modelo de precipitación-esco-rrentía en HEC-HMS. Fuente: (USACE, 2000)	29
Figura 6 Diagrama de flujo de obtención de Números de Curva por pixel @250 metros para Haití.	30
Figura 7 Localización de 33 puentes vehiculares seleccionados para el proyecto.	35
Figura 8 Capas generadas para el proceso de delimitación de cuencas. Ejemplo para cuenca de drenaje del puente 120.	36
Figura 9 Localización y delimitación de cuencas de drenaje que tributan a los 33 puentes seleccionados para el análisis en el proyecto.	37
Figura 10 Histograma de frecuencias de altitud topográfica	38
Figura 11 Mosaico topográfico construido para Haití a partir de datos de modelo digital de terreno del ALOS PALSAR.	39
Figura 12 Localización de estaciones pluviométricas en campo.	41
Figura 13 Cantidad de años con información de precipitación diaria en el rango 1950 a 2005, para cada estación pluviométrica	42
Figura 14 Histograma de frecuencias de estaciones pluviométricas con porcentaje de completitud de datos en el rango 1950 - 2005.	42
Figura 15 Climatología de precipitación en El Caribe (1980-2005) para 13 modelos pertenecientes al proyecto CMIP5, identificados por (Ryu & Hayho, 2013), citado en (Taylor et al., 2018)	45
Figura 16 Precipitación media y extrema [mm/día] en Haití entre 1900-2100 para RCP 4.5 (Azul) y 8.5 (Rojo), considerando proyecciones de la totalidad de modelos del proyecto CMIP5.	48
Figura 17 Resultados de índice R20mm (Annual count days when PRCP≥20mm) para Haití entre 2006 y 2100, de acuerdo con los modelos del proyecto CMIP5.	50
Figura 18 Resultados de índice Rx1Day (Monthly maximum 1-day precipitation) para Haití entre 2006 y 2100, de acuerdo con los modelos del proyecto CMIP5.	52

Figura 19 Resultados de índice Rx5Day (Monthly maximum consecutive 5-day precipitation) para Haití entre 2006 y 2100, de acuerdo con los modelos del proyecto CMIP5.	53
Figura 20 Resultados de índice PRCPTOT (Annual total precipitation in wet days) para Haití entre 2006 y 2100, de acuerdo con los modelos del proyecto CMIP5.	55
Figura 21 Resultados de índice R95pTOT (Annual total PRCP when RR>95p) para Haití entre 2006 y 2100, de acuerdo con los modelos del proyecto CMIP5.	56
Figura 22 Resultados de índice R99pTOT (Annual total PRCP when RR>99p) para Haití entre 2006 y 2100, de acuerdo con los modelos del proyecto CMIP5.	58
Figura 23 Resultados de índice SDII (Simple precipitation intensity index) para Haití entre 2006 y 2100, de acuerdo con los modelos del proyecto CMIP5.	59
Figura 24 Localización de nodos de modelo CSIRO-Mk-3-6-0, escalado a partir de escalamiento de precipitación (Global Daily Downscaled Projections NEX-GDDP). Downscaling estadístico BCSD.	62
Figura 25 Cobertura vegetal en Haití @ 500 metros.	66
Figura 26 Tipos de suelo en Haití @ 250 metros.	69
Figura 27 Grupos de suelo para Número de Curva (CN) a partir de modelos de escorrentía @ 250metros.	71
Figura 28 Mapa de número de curva (CN) para Haití @ 250metros.	72
Figura 29 Cuenca de drenaje para puente 120, sobre el río Estimé. Parámetros morfométricos.	76
Figura 30 Curva hipsométrica para cuenca de drenaje del puente 120, sobre el río Estimé.	77
Figura 31 Perfil longitudinal del río Estimé. Cuenca de drenaje para puente 120.	78
Figura 32 Estaciones pluviométricas y nodos GCM seleccionados para cuenca de drenaje puente 120	80
Figura 33 Ajuste regresión polinómica de grado 2 (Pluviómetros vs. Datos simulados CSIRO-Mk-3-6-0)	82
Figura 34 Factor de corrección de precipitación por año para nodos GCM CSIRO-Mk-3-6-0 seleccionados en la cuenca de drenaje del puente 120	83

Figura 35 Número de años de medición por rango de factor de corrección de precipitación por año para nodos GCM CSIRO-Mk-3-6-0 seleccionados en la cuenca de drenaje del puente 120	83
Figura 36 Histograma de frecuencias normalizado con Función de Densidad de Probabilidad con mejor bondad de ajuste (en rojo: Gumbel) para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 411543	87
Figura 37 Histograma de frecuencias normalizado con Función de Densidad de Probabilidad con mejor bondad de ajuste (en rojo: Gumbel) para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 411544	88
Figura 38 Histograma de frecuencias normalizado con Función de Densidad de Probabilidad con mejor bondad de ajuste (en rojo: Gumbel) para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 412983	89
Figura 39 Histograma de frecuencias normalizado con Función de Densidad de Probabilidad con mejor bondad de ajuste (en rojo: Log-Normal) para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 412984	90
Figura 40 Curvas IDF para la cuenca de drenaje del puente 120, para los períodos de retorno de interés.	91
Figura 41 Hietogramas (tormentas de diseño) construidos a partir de curvas IDF para la cuenca del puente 120, para períodos de retorno seleccionados	93
Figura 42 Izq.: Modelo geométrico de cuenca de drenaje del puente 120. Der.: Distribución de número de curva (CN) para la cuenca del puente 120.	94
Figura 43 Hidrogramas de creciente estimados para condición de precipitación histórica en la cuenca de drenaje del puente 120	97
Figura 44 Ajuste regresión polinómica de grado 2 (Pluviómetros vs. Datos simulados CSIRO-Mk-3-6-0)	99
Figura 45 Precipitación máxima diaria multianual proyectada por GCM CSIRO-Mk-3-6-0 (azul) vs. Corregida a partir de regresión polinómica con datos históricos de pluviómetros (rojo)	100
Figura 46 Histograma de frecuencias normalizado con Función de Densidad de Probabilidad con mejor bondad de ajuste (en rojo: Gumbel) para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 411543	103
Figura 47 Histograma de frecuencias normalizado con Función de Densidad de Probabilidad con mejor bondad de ajuste (en rojo: Gumbel) para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 411544	104
Figura 48 Histograma de frecuencias normalizado con Función de Densidad de Probabilidad con mejor bondad de ajuste (en rojo: Gumbel) para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 412983	

Figura 49 Histograma de frecuencias normalizado con Función de Densidad de Probabilidad con mejor bondad de ajuste (en rojo: Log-Normal) para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 412984	106
Figura 50 Hietogramas (tormentas de diseño) construidos a partir de curvas IDF para la cuenca del puente 120, para períodos de retorno seleccionados	107
Figura 51 Hidrogramas de creciente estimados para condición de precipitación con cambio climático en la cuenca de drenaje del puente 120	109
Figura 52 Comparativo de curvas de período de retorno [Años] vs. Caudal pico [m ³ /s] para puentes seleccionados para condición histórica y con cambio climático	111

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Fuentes de incertidumbre en el análisis hidrológico para modelación de amenaza por inundación.	23
Tabla 2 Localización de 33 puentes vehiculares seleccionados para el proyecto.	35
Tabla 3 Características principales información topográfica de entrada.	40
Tabla 4 Modelos CMIP5 considerados. (Taylor et al., 2018)	46
Tabla 5 Comparación de modelos con datos de GPCP a partir de climatología de precipitación en El Caribe (1980-2005) para 13 modelos pertenecientes al proyecto CMIP5	48
Tabla 6 Índices de valores extremos de precipitación analizados.	51
Tabla 7 Prueba ANOVA para R20mm RCP4.5 vs. RCP8.5	52
Tabla 8 Estadísticas descriptivas R20mm RCP 4.5 vs. RCP 8.5	53
Tabla 9 Prueba ANOVA para Rx1Day RCP4.5 vs. RCP8.5	53
Tabla 10 Estadísticas descriptivas Rx1Day RCP 4.5 vs. RCP 8.5	54
Tabla 11 Prueba ANOVA para Rx5Day RCP4.5 vs. RCP8.5	55
Tabla 12 Estadísticas descriptivas Rx5Day RCP 4.5 vs. RCP 8.5	56
Tabla 13 Prueba ANOVA para PRCPTOT RCP4.5 vs. RCP8.5	56
Tabla 14 Estadísticas descriptivas PRCPTOT RCP 4.5 vs. RCP 8.5	57
Tabla 15 Prueba ANOVA para R95pTOT RCP4.5 vs. RCP8.5	58
Tabla 16 Estadísticas descriptivas R95pTOT RCP 4.5 vs. RCP 8.5	59
Tabla 17 Prueba ANOVA para R99pTOT RCP4.5 vs. RCP8.5	59
Tabla 18 Estadísticas descriptivas R99pTOT RCP 4.5 vs. RCP 8.5	60
Tabla 19 Prueba ANOVA para SDII RCP4.5 vs. RCP8.5	61
Tabla 20 Estadísticas descriptivas SDII RCP 4.5 vs. RCP 8.5	62
Tabla 21 Clases de cobertura vegetal. Sistema IGBP.	65
Tabla 22 Participación de clases de cobertura vegetal en el territorio haitiano, por superficie.	67
Tabla 23 Participación de tipos de suelo en el territorio haitiano, por superficie. Sistema de clasificación WRB	69
Tabla 24 Descripción de potencial de escorrentía de acuerdo a composición del suelo. HYSOGs250m. Participación (%) de grupos hidrológicos de suelo en Haití.	72
Tabla 25 Resumen de procedimiento de modelación hidrológica y resultados parciales y finales asociados.	75
Tabla 26 Estaciones pluviométricas y nodos GCM seleccionados para análisis de cuenca de drenaje puente 120.	81
Tabla 27 Años de medición seleccionados para estaciones seleccionadas de la cuenca del puente 120.	83
Tabla 28 Estadísticas precipitación máxima diaria 1950-2005 corregida para nodos GCM CSIRO-Mk-3-6-0	87
Tabla 29 Pruebas de bondad de ajuste para FDP conocidas. Ajuste para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 411543	88
Tabla 30 Pruebas de bondad de ajuste para FDP conocidas. Ajuste para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 411544	89

Tabla 31 Pruebas de bondad de ajuste para FDP conocidas. Ajuste para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 412983	90
Tabla 32 Pruebas de bondad de ajuste para FDP conocidas. Ajuste para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 412984	91
Tabla 33 Distribución de área por nodo GCM para la cuenca del puente 120	93
Tabla 34 Características de tormentas de diseño para la cuenca del puente 120, para períodos de retorno seleccionados - Escenario histórico.	94
Tabla 35 Número de curva promedio por subcuenca del modelo propuesto para la cuenca de drenaje del puente 120.	96
Tabla 36 Parámetros del modelo de transformación (hidrograma unitario SCS) para cuenca de drenaje del puente 120.	97
Tabla 37 Parámetros del modelo de tránsito (Muskingum-Cunge) para cuenca de drenaje del puente 120.	98
Tabla 38 Caudales pico calculados para condición de precipitación histórica, por periodo de retorno, para cuenca de drenaje del puente 120.	99
Tabla 39 Estadísticas precipitación máxima diaria 2006-2100 corregida para nodos GCM CSIRO-Mk-3-6-0	104
Tabla 40 Pruebas de bondad de ajuste para FDP conocidas. Ajuste para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 411543	105
Tabla 41 Pruebas de bondad de ajuste para FDP conocidas. Ajuste para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 411544	106
Tabla 42 Pruebas de bondad de ajuste para FDP conocidas. Ajuste para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 412983	107
Tabla 43 Pruebas de bondad de ajuste para FDP conocidas. Ajuste para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 412984	108
Tabla 44 Características de tormentas de diseño para la cuenca del puente 120, para períodos de retorno seleccionados - Escenario con Cambio Climático	110
Tabla 45 Caudales pico calculados para condición de precipitación con cambio climático, por periodo de retorno, para cuenca de drenaje del puente 120, en comparación con caudales pico históricos.	112
Tabla 46 Caudales pico calculados para condición de precipitación histórica y con cambio climático para 33 cuencas de drenaje en Haití.	114
Tabla 47 Cambio porcentual de caudales pico calculados para condición de precipitación histórica y con cambio climático para 33 cuencas de drenaje en Haití.	116
Tabla 48 Tipologías de resultados obtenidas a partir de comparación de condiciones de precipitación histórica y con cambio climático para 33 cuencas de drenaje en Haití.	116

ABREVIATURAS

Sigla	Explicación
BCSD	Bias-Correction Spatial Dissagregation
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CEP	Curva de Excedencia de Pérdidas
CMIP5	Proyecto de Intercomparación del Modelo Acoplado
ER	Evaluación de Riesgo
ETCCDI	Expert Team (ET) on Climate Change Detection and Indices
FAO	Food and Agriculture Organization
FDP	Función de Distribución de Probabilidad
GCM	General Circulation Models
GPCP	Global Precipitation Climatology Project
GRD	Gestión del Riesgo de Desastre
HEC-HMS	Hydrologic Engineer Center - Hydrologic Modeling System
IPCC	Intergovernmental Panel for Climate Change
MDE	Modelo Digital de Elevación (Digital Earth Model)
NEX-GDDP	Nasa Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections
PRECIS	Providing Regional Climates for Impact Studies
RCM	Regional Circulation Models
RCP	Representative Concentration Pathways (Trayectorias de concentración representativas)
SIG	Sistema de Información Geográfico
SREX	(IPCC) Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaption
Tr	Período de Retorno

GLOSARIO

Concepto	Definición
Amenaza	Peligro latente de que un evento físico de origen natural, causado o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdida en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.
Amenazas hidrometeorológicas	Proceso o fenómeno de origen atmosférico, hidrológico u oceanográfico que puede 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.
Análisis hidrológico	Estudio asociado a la modelación hidrológica para la estimación de avenidas de creciente, mediante el cual se realiza una representación simplificada de los procesos del ciclo del agua que se presentan en una cuenca hidrográfica. Los análisis hidrológicos se realizan con el objetivo de hacer gestión de inundaciones, de sequía, o para brindar datos que soporten la toma de decisiones frente a la gestión integral de una cuenca hidrográfica.
Análisis y evaluación de riesgo	Implica la consideración de las causas y fuentes del riesgo, sus consecuencias y la probabilidad de que dichas consecuencias puedan ocurrir. Es el modelo mediante el cual se relaciona la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar los posibles efectos sociales, económicos y ambientales y sus probabilidades. Se estima el valor de los daños y las pérdidas potenciales, y se compara con criterios de seguridad establecidos, con el propósito de definir tipos de intervención y alcance de la reducción del riesgo y preparación para la respuesta y recuperación.
Cuenca hidrográfica	Área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar.
Curva de Excedencia de Pérdidas (CEP)	Curva que especifica las frecuencias, usualmente anuales, con que ocurrirán eventos en el futuro que excedan un valor determinado de pérdidas para un portafolio de elementos expuestos analizado.
Desastre	Es el resultado que se desencadena de la manifestación de uno o varios eventos naturales o antropogénicos no intencionales que al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en las personas, los bienes, la infraestructura, los medios de subsistencia, la prestación de servicios o los recursos ambientales, causa daños o pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales, generando una alteración intensa, grave y extendida en las condiciones normales de funcionamiento de la sociedad, que exige del estado y del sistema nacional ejecutar de respuesta a la emergencia, rehabilitación y reconstrucción.

Concepto	Definición
Espacio muestral	Corresponde a los elementos que conforman el conjunto de todos los posibles resultados conocidos de un experimento aleatorio.
Estacionariedad	En el análisis de series temporales (por ejemplo, la serie de precipitaciones máximas anuales multianuales en un período entre 1950 y 2005), corresponde a un proceso estocástico cuya distribución de probabilidad en un instante de tiempo fijo o una posición fija es la misma para todos los instantes de tiempo. En consecuencia, parámetros tales como la media y la varianza, no varían a lo largo del tiempo.
Experimento aleatorio	Todo experimento cuyo resultado está condicionado por el azar y la incertidumbre. Se rige bajo las siguientes consideraciones y supuestos: <ul style="list-style-type: none"> • Es posible repetirlo un número ilimitado de veces bajo las mismas condiciones. • Es posible conocer por adelantado todos los posibles resultados a que pueden dar origen. • No puede predecirse con exactitud un resultado específico en una realización particular del experimento.
Evento	Formalmente se conoce como un subconjunto del espacio muestral. Específicamente, corresponde a cualquier subconjunto que contenga varios puntos de muestreo, los cuales hacen referencia a cada posible resultado presente en el espacio muestral.
Exposición (Elementos expuestos)	Se refiere a la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales y recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura que por su localización pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza.
Forzamiento	Fuerzas externas actuantes sobre un sistema simulado. A gran escala es posible hacer referencia al forzamiento climatológico y meteorológico. A escalas regionales y locales es posible hacer referencia a forzamientos hidrológicos como la precipitación o los caudales máximos para un lapso dado.
Frecuencia anual de excedencia	Medida de probabilidad temporal obtenida a partir de calcular el inverso del período de retorno. Indica la probabilidad con la que una determinada intensidad de magnitud de inundación será igualada, o excedida, en un lapso dado.
Frecuencia anual de ocurrencia	Medida del número de veces por año en las que ocurre un evento determinado.
Función de Distribución de Probabilidad (FDP)	Función y expresión matemática que determina la probabilidad para cada uno de los valores que una determinada variable aleatoria puede tomar en un espacio muestral particular.

Concepto	Definición
Gestión del riesgo	Es el proceso social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo y promoción de una mayor conciencia del mismo, impedir o evitar que se genere, reducirlo y promoción de una mayor conciencia del mismo, impedir o evitar que se genere, reducirlo o controlarlo cuando ya existe y para prepararse y manejar las situaciones de desastre, así como la posterior recuperación (rehabilitación y reconstrucción). Estas acciones tienen el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar y la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible.
Hidrograma de creciente	De manera general, un hidrograma corresponde a la expresión gráfica de la variación del caudal de un cauce de agua superficial en función del tiempo. De manera específica, un hidrograma de creciente corresponde a la representación de la variación del caudal, en función del tiempo, que se produce como consecuencia de la ocurrencia de un evento de precipitación particular.
Iso-frecuencia	Concepto comúnmente usado en modelación hidrológica/hidráulica para la estimación de zonas de inundación asociadas a un período de retorno único asumido como el mismo del forzamiento detonante del evento de inundación.
Modelo hidrodinámico	Procedimiento técnico que busca reproducir el movimiento o dinámica del agua superficial de una cuenca hidrográfica, utilizando modelos (simplificación) físicos y/o matemáticos (analíticos). Uno de los objetivos principales de los modelos hidrodinámicos es el de estimar la extensión y magnitud de eventos de inundación asociados a hidrogramas de creciente estimados por el análisis hidrológico.
Pérdida	Cantidad asociada a una gran incertidumbre, proveniente de diversas fuentes y de los componentes de análisis de amenaza y vulnerabilidad. Por tanto, es una cantidad de la cual no se puede conocer su valor con exactitud o certeza y, por ende, es tratada como una variable aleatoria descrita por una distribución de probabilidad, condicionada a la ocurrencia de un evento.
Período de retorno (Tr)	También conocido como el período o intervalo de recurrencia. Puede ser definido como la probabilidad temporal que se mide en años. Específicamente mide el tiempo medio que transcurre entre eventos independientes.
Probabilidad	Área del conocimiento que trata de cuantificar todos los posibles resultados de un experimento en el cual está presente e intrínseca la incertidumbre o aleatoriedad.
Variable aleatoria	Corresponde a una variable que puede asumir valores numéricos asociados a los posibles resultados de un experimento aleatorio.
Vulnerabilidad	Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos.

RESUMEN EJECUTIVO

El objetivo principal del componente de análisis hidrológico consiste en estimar los hidrogramas de crecienta que se pueden presentar en 33 puentes vehiculares localizados en Haití, para condiciones de precipitación histórica y para condiciones de precipitación considerando cambio climático. Para el análisis se emplean 33 modelos hidrológicos de precipitación-escurrentía para cada cuenca de drenaje a los puentes vehiculares, considerando el análisis de frecuencia de precipitación diaria máxima para 15 períodos de retorno (2.33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 y 500 años).

La selección de los períodos de retorno que exceden los valores típicos de 100 años se

debe a que el interés del estudio es proveer resultados que puedan ser utilizados posteriormente para la evaluación probabilista de riesgo por inundación en cada una de las 33 cuencas. Por tanto, además de generar resultados de caudales para la seguridad y diseño de los puentes vehiculares, también se desea verificar las consecuencias y/o pérdidas que se pueden generar por la ocurrencia de eventos con muy baja frecuencia (altos períodos de retorno), pero con magnitudes considerables.

Los datos de entrada, fuentes de datos y sus características principales se presentan a continuación.

Datos de entrada

Componente de análisis	Fuente	Descripción
Localización de puentes vehiculares	MTPTC (Ministère des Travaux Publics, Transports et Communications)	33 puentes localizados en 8 de los 10 departamentos de Haití. Nord-Est y Sud-Est son los departamentos con mayor número de puentes, con 8 y 7, respectivamente.
Topografía	©JAXA/METI ALOS PALSAR [DEM]	Resolución espacial de 12.5 metros. La altitud media de todo el país es de 381 m.s.n.m, mientras que la altitud máxima es de 2.651 m.s.n.m.
Estaciones pluviométricas	CNIGS, CHEMONICS, CNSA	185 estaciones de precipitación diaria. 19 estaciones de precipitación mensual. De las estaciones de precipitación diaria, únicamente el 4.68% supera los 30 años con datos medidos de precipitación diaria en el rango comprendido entre los años 1950 y 2005.
Nodos de precipitación GCM - RCM	GCM: CSIRO-Mk3-6-0 RCM: NEX-GDDP (BCSD)	RCP de análisis: RCP4.5 Resolución espacial: 0.25 grados (~ 25 km x 25 km)
Cobertura vegetal	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Land Cover Type (MCD12Q1)	Resolución espacial de 500 metros con clasificación de coberturas vegetales según la propuesta del International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP)
Tipo de suelo	SoilGrids250m: global gridded soil information based on Machine Learning	Resolución espacial de 250 metros con clasificación de tipo de suelo según el World Reference Base (WRB)
Grupo de suelo CN	Global Hydrologic Soil Groups (HYSGs250m) for Curve Number-Based Runoff Modeling	Resolución espacial de 250 metros. Cerca del 80% del suelo en Haití presenta potencial de escurrentía moderadamente alto a alto, con composiciones de suelo <50% de arena y 20-40% de arcilla.

La metodología de análisis hidrológico empleada para la obtención de los hidrogramas de crecienta corresponde a un modelo tradicional de precipitación-escurrentía, que contiene los siguientes componentes de análisis:

i. Modelo geométrico de la cuenca

En este paso se plantea la geometría de la cuenca de drenaje a partir de herramientas SIG, haciendo uso de los resultados del proceso de delimitación y de cálculo de parámetros morfométricos.

ii. Modelo meteorológico

Se estiman las tormentas de diseño asociadas a períodos de retorno que mejor describen la manera en la que un evento de precipitación puede igualar o exceder una magnitud de lluvia en la cuenca de drenaje, asociada a una frecuencia particular.

iii. Modelo de pérdidas

En este punto se selecciona el modelo a partir del cual se estima el proceso de infiltración que se presenta en función del tipo de suelo, las características de la cobertura vegetal y de uso del suelo. Para el caso del proyecto en Haití se hace uso del modelo de Número de Curva del Soil Conservation Service (SCS) de los Estados Unidos. La Figura 6 presenta el procedimiento seguido para la obtención de números de curva por pixel cada 250 metros a partir de las fuentes de información mencionadas.

iv. Modelo de transformación

Para este caso particular, el modelo de transformación seleccionado corresponde al de hidrograma unitario sintético propuesto por el SCS. Se selecciona este modelo por su simplicidad de aplicación para cuencas con superficies pequeñas (menores a 500 km²), como es el caso de las cuencas de drenaje del proyecto, dado que es posible asumir una distribución espacial uniforme de la precipitación en las áreas de análisis.

v. Modelo de tránsito

Para estimar el tiempo de viaje del excedente de precipitación desde cada punto de concentración de las subcuencas hacia el punto de descarga se hace uso del método de Muskingum-Cunge. La selección de este método de tránsito se da debido a que exige información deducible del MDE con un grado de incertidumbre asociado a la resolución espacial (para este caso es de 12.5 metros). Dentro de los datos que exige el método se encuentran; longitud y pendiente del tramo de cauce, coeficiente de rugosidad de Manning, índice de celeridad y geometría básica de la sección transversal del tramo del cauce. Adicionalmente, se selecciona el método debido a que

en la mayoría de los cauces analizados las condiciones de pendiente no superan el 10%. En caso de superarlo se recomienda el uso de ecuaciones de tránsito de St. Venant.

Resultados comparativos: escenario histórico vs. escenario con cambio climático

Como resultado de la aplicación de la metodología mencionada, en total se genera un grupo de 15 hidrogramas de creciente para cada una de las cuencas de análisis para el caso de precipitación histórica entre 1950 - 2005. Esto genera un total de 495 hidrogramas de creciente. Para el caso de análisis con cambio climático se genera una cantidad idéntica de hidrogramas. Por tanto, en total se generan 990 hidrogramas de creciente para las 33 cuencas de análisis.

A partir del análisis comparativo de los resultados entre el escenario histórico y el escenario con cambio climático, se infieren tres tipologías de resultados en términos de comparación de caudales pico. Estas tres tipologías se clasifican en; incremento, decrecimiento y sin cambio. Del total de 33 puentes, en términos del cambio de caudal pico en condiciones de precipitación con cambio climático en relación con la condición histórica, 15 (45%) puentes incrementan su caudal, 2 (6%) puentes permanecen sin cambios y 16 (48%) puentes disminuyen su caudal. De estos grupos de puentes, se evidencia que:

i. Para el grupo que incrementa su caudal pico; el cambio mínimo (o máxima disminución) es de -66% y el promedio es -29%. Mientras que el cambio máximo es de 193% y el promedio es del 22%. Adicionalmente, 10 de 15 puentes presentan un aumento para todo el rango de períodos de retorno analizados. Para los 5 puentes restantes, únicamente se presentan disminuciones mínimas en períodos de retorno altos (>100 años). La disminución máxima se da en el período de retorno de 500 años, alrededor de 13%

ii. Para el grupo de puentes que permanecen sin cambio de caudal; la disminución mínima es de -8%, el incremento máximo del 17% y el promedio es 1%. Adicionalmente, en todos los casos para períodos de retorno bajos (<50 años) hay incremento de caudal.

iii. Para el grupo de puentes que disminuyen su caudal; 9 de 16 puentes (69, 70, 71, 40, 38, 41, 39, 48, 47) presentan un aumento, de hasta 77%, para frecuencias altas (períodos de retorno hasta 10 años).

1. INTRODUCCIÓN

La división de Transporte (INE/TSP) del Banco Interamericano de Desarrollo (en adelante BID) tiene entre sus objetivos principales promover el desarrollo económico, sostenibilidad ambiental, inclusión social y calidad de vida de los habitantes de América Latina y El Caribe, a través de actividades de transporte e infraestructura de manera eficiente, accesible, sostenible y segura.

El Banco tiene un amplio portafolio de apoyo a la reconstrucción y modernización de la infraestructura de transporte de Haití. En el marco de esas acciones se planea la aprobación de una nueva donación que incluiría un programa de rehabilitación y construcción de 33 puentes distribuidos en diferentes regiones del país.

Haití es uno de los países con mayor índice de riesgo de desastres naturales en el mundo y uno de las más altos indicadores de falta de resiliencia en América Latina y El Caribe (BID, 2011). Algunos de los factores que influyen en esta clasificación del riesgo son las complejas dinámicas generadas por la interacción del clima con factores como ubicación, desarrollo económico y los patrones de urbanización.

Haití se encuentra a lo largo de la franja de huracanes de la cuenca del Caribe, el 80% del país está cubierto de montañas, y contiene más de 30 cuencas hidrográficas, caracterizadas por pendientes inestables y erosión severa del suelo. La temporada de lluvias se presenta entre abril a junio y entre octubre a noviembre (régimen de precipitación bimodal), la cual se combina con una temporada de huracanes que se extiende desde junio hasta noviembre. Durante las dos temporadas de lluvia y durante la temporada de huracanes, Haití es susceptible a las perturbaciones tropicales,

influenciada por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), y vientos alisios de Este a Oeste. Estas perturbaciones de baja presión potencialmente pueden generar ciclones tropicales que usualmente presentan fuertes lluvias y vientos intensos. Asimismo, el país también puede verse afectado por sistemas de convección a escala local que pueden también generar inundaciones y movimientos en masa asociados a fuertes precipitaciones. Por último, el país está influenciado por la ocurrencia del fenómeno El Niño- ENOS (BID, 2011).

Considerando las amenazas hidrometeorológicas a las cuales se encuentra expuesto el país y su infraestructura vial, la división de Transporte (INE/TSP), la división de Cambio Climático (CCS) y la división de Agua y Saneamiento (INE/WSA) del BID plantean un programa de cooperación técnica para la elaboración de estudios hidrológicos e hidráulicos de 33 puentes vehiculares en Haití, considerando la influencia del Cambio Climático en las cuencas hidrográficas que los contienen. Para la elaboración de dichos estudios, se hace uso de información en campo para la recopilación de datos topográficos, de sección geométrica, de características de diseño estructural, entre otros, que posibilitan la elaboración de modelos hidrodinámicos de las secciones de ríos aferente a la localización de los puentes.

Dado que el programa tiene como objetivo construir, mejorar y rehabilitar puentes que requieren un análisis de riesgo por amenazas hidrometeorológicas, se realizará una evaluación exhaustiva de riesgo y vulnerabilidad al cambio climático para definir los criterios a integrar en los trazados y diseños. Estos estudios están basados en análisis hidrológicos, que serán usados como datos de entrada a modelos hidrodinámicos para las 33 cuencas

analizadas a partir del modelo de inundación HydroBID Flood.

El presente documento corresponde al análisis hidrológico de las 33 cuencas de drenaje que tributan a los puntos de localización de los puentes vehiculares existentes. Como resultado del análisis hidrológico se generan hidrogramas de creciento asociados a períodos de retorno y son usados como datos de entrada en los modelos hidrodinámicos de HydroBID Flood. El análisis hidrológico se divide en dos componentes principales; el primero considera las condiciones históricas de precipitación en las cuencas de drenaje para el período 1950 - 2005, a partir de información pluviométrica registrada en estaciones en campo, en combinación con datos de modelos de circulación climática escalados para El Caribe. El segundo componente corresponde a la modelación hidrológica con condiciones de precipitación para el período comprendido entre 2006 - 2100, a partir de datos de modelos climáticos escalados para El Caribe. La relevancia de considerar el escenario de precipitación histórica radica en que permite comparar los resultados obtenidos con la condición de precipitación con condiciones de cambio climático, y hace factible la selección de las condiciones más críticas para el diseño y evaluación de riesgo de cada puente.

El documento se divide en seis partes; i) introducción del documento, objetivos y alcance planteados en el proyecto, ii) se presenta la metodología de modelación elegida para el proyecto, así como las consideraciones y supuestos metodológicos, iii) se presentan los datos de entrada a los modelos hidrológicos, sus características y fuentes a partir de las cuales fueron obtenidos, iv) se presentan los resultados para cada com- ponente de análisis

(histórico y con cambio climático), para cada una de las 33 cuencas de drenaje, así como un análisis de resultados, v) se presentan conclusiones y recomendaciones obtenidas a partir del análisis de resultados. Por último, vi) se presenta en la sección de anexos, para cada una de las 33 cuencas de drenaje, los resultados del proceso de delimitación, tabla de localización e información base de estaciones pluviométricas en campo, estaciones pluviométricas y nodos de modelo de circulación climática seleccionados, hidrogramas calculados en condiciones de precipitación histórica y con cambio climático para los períodos de retorno seleccionados, curvas de período de retorno vs. Caudal pico y, finalmente, el proceso de cálculo y los resultados de hidrogramas para 4 cuencas seleccionadas en las que se realiza un análisis hidrológico con condiciones de cambio climático en combinación con cambios proyectados en la cobertura vegetal.



2. OBJETIVOS Y ALCANCE

2.1 Objetivos

El objetivo del componente de análisis hidrológico, en combinación con el componente de análisis hidrodinámico, es apoyar al Gobierno de Haití y al Banco para que los trazados y los diseños de los puentes se calculen teniendo en cuenta los impactos potenciales del cambio climático, en lo relativo a los posibles cambios en los regímenes de precipitación.

Específicos:

- ▶ Estimar hidrogramas y/o caudales pico asociados a diferentes períodos de retorno seleccionados para la condición de precipitación histórica en las 33 cuencas de drenaje a los puntos de localización de los puentes seleccionados.
- ▶ Estimar hidrogramas y/o caudales pico asociados a diferentes períodos de retorno seleccionados para la condición de precipitación con cambio climático en las 33 cuencas de drenaje a los puntos de localización de los puentes seleccionados.
- ▶ Realizar una comparación de resultados entre las condiciones de precipitación histórica vs. Cambio climático en las 33 cuencas de drenaje a los puntos de localización de los puentes seleccionados.

2.2 Alcance

El alcance propuesto para el componente de análisis hidrológico se plantea a continuación:

i. Análisis de precipitación histórica y condiciones espaciales de las cuencas de drenaje

Análisis de información disponible de precipitación histórica (procesar datos de la red de estaciones pluviométricas, y completar con información secundaria y datos satélites) para plantear insumos al modelo de inundación hydroBID Flood sobre el régimen de precipita-

ción histórica a nivel de la zona de influencia de los puentes vehiculares a analizar.

Producto 1: Insumos de estadística hidrológica para cálculo de hidrogramas de entrada de modelo de amenaza por inundación. Así como delimitación de cuencas de drenaje y parámetros morfométricos de la zona de influencia de los 33 puentes seleccionados en el proyecto.

ii. Statistical downscaling de modelos climáticos globales o regionales

Plantear un procedimiento de escalamiento estadístico para cada estación e interpolación espacial. O presentar el proceso de selección de datos escalados existentes para la región de El Caribe, aplicable a Haití, con el objetivo de estimar hidrogramas de creciente para condiciones con cambio climático.

Producto 2: Escalamiento de parámetros y variables climáticas en la zona de análisis para la derivación de variables de precipitación en un entorno de escenario futuro de cambio climático. Proceso de selección de resultados de proceso de escalamiento de parámetros climáticos existente, y su aplicabilidad en Haití.

iii. Cálculo de hidrogramas de entrada y/o caudales pico para el modelo de amenaza por inundación

Por medio de análisis estadístico y de frecuencia de la información de precipitación sobre el área de análisis para la duración de precipitación de interés generar un conjunto de hidrogramas de entrada para el modelo hidrodinámico de inundación HydroBID Flood, tanto para la condición histórica precedente del régimen de lluvias, como la estimada a partir del escenario de cambio climático.

Producto 3: Set de hidrogramas de entrada y/o caudales pico al modelo de inundación para la condición histórica precedente del régimen de lluvias y en un entorno de cambio climático.

3. METODOLOGÍA

3.1 Consideraciones Metodológicas

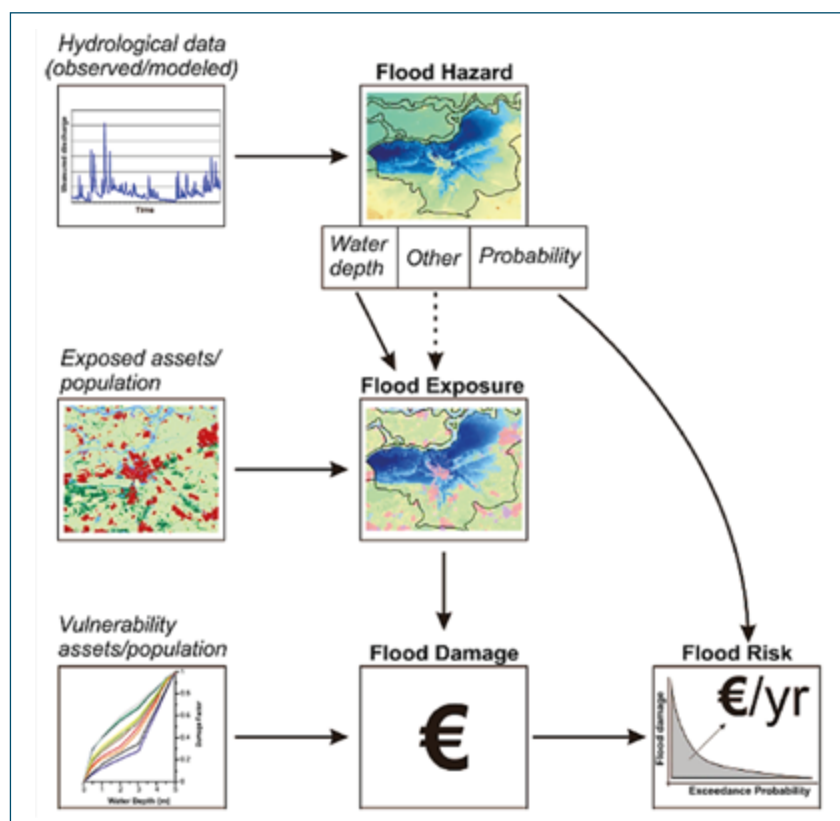
Para dar cumplimiento al objetivo general del proyecto de construir, mejorar y rehabilitar 33 puentes en Haití, se plantea la evaluación y análisis de riesgo por inundación, considerando condiciones de cambio climático. Los componentes principales del análisis de riesgo por inundación se plantean por Merz & Thieken (2004) (ver Figura 1) y son los siguientes;

- i. amenaza por inundación
- ii. modelo de exposición y
- iii. análisis de vulnerabilidad física.

A partir de la combinación matemática de los componentes de amenaza y vulnerabilidad para todos los elementos expuestos del análisis, se obtienen resultados de pérdida/daño por medio de la *curva de riesgo* o *Curva de excedencia de pérdidas (CEP)* en las dimensiones de interés (monetarias, sociales, ambientales, etc.).

FIGURA 1

Esquema metodológico general de EPR por inundación.



Fuente: (Merz & Thieken, 2004)

En este capítulo se presentan las consideraciones metodológicas y la metodología general de cálculo para el componente de amenaza por inundación, específicamente en lo relacionado con la modelación hidrológica. Así como también las fuentes de incertidumbre aleatoria, epistémica y ontológica que se deben considerar en el análisis hidrológico. Por último, se presenta una aproximación metodológica para la estimación de hidrogramas de creciente asociados a un grupo de períodos de retorno seleccionados con el objetivo de ser usados como insumo para la evaluación probabilista del riesgo por inundación en las cuencas de análisis. A partir de la Figura 1 se evidencia que, para el componente de amenaza, es necesario proporcionar datos hidrológicos modelados/observados que alimentan un modelo hidrodinámico. Dicho modelo hidrodinámico estima intensidades de profundidad de inundación, velocidad media de flujo, etc., asociados a una probabilidad temporal o frecuencia de ocurrencia de cada evento modelado.

De manera resumida, para llevar a cabo la modelación de amenaza por inundación como insumo para evaluación y análisis de riesgo se deben seguir los siguientes pasos:

Análisis hidrológico: cálculo de hidrogramas de creciente a partir de la aplicación de un modelo hidrológico de precipitación-escurrimiento, que hace uso de análisis de frecuencias para series de precipitación máxima diaria multianual. Se obtienen caudales máximos asociados a períodos de retorno y la Función de Distribución de Probabilidad (FDP) de mejor bondad de ajuste parametrizada por los

dos primeros momentos estadísticos. Para el cálculo de los caudales máximos se considera suficientemente todo el rango de períodos de retorno, esto es, desde los eventos más recurrentes con período de retorno menores, hasta los eventos menos recurrentes con períodos de retorno lo suficientemente grandes (Tr mayores a 100 años) como para garantizar la completitud del análisis.

Modelación hidráulica: tránsito de hidrogramas de creciente usando un modelo hidrodinámico físicamente basado, para el cual se recomienda la calibración de sus parámetros para la reproducción de magnitudes de intensidad (por ejemplo, profundidad de inundación, velocidad media de flujo, entre otros), asociados a eventos extremos poco frecuentes. Adicionalmente, se recomienda que sea validado en términos de extensión de la zona inundable para eventos históricos por medio del uso de imágenes satelitales y/o fotografías aéreas disponibles. Como resultado de cada hidrograma de creciente transitado se obtiene una malla de magnitudes de profundidad de inundación y velocidad media de flujo, asociadas a los mismos períodos de retorno del caudal que los genera.

Dado el grado y tipos de incertidumbre que se gestiona en este tipo de modelos, se considera preciso reportar un resumen de las fuentes de incertidumbre para el análisis hidrológico y las propuestas metodológicas para su consideración y tratamiento en el proceso de análisis. La Tabla 1 presenta dichas fuentes, categorizadas por los tipos de incertidumbre aleatoria, epistémica y ontológica.

TABLA 1

Fuentes de incertidumbre en el análisis hidrológico para modelación de amenaza por inundación

Fuentes de Incertidumbre	Propuesta Metodológica
<p>Aleatoria</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Incertidumbre asociada a la naturaleza del fenómeno de precipitación y a los procesos físicos de generación de escorrentía y crecientes de caudal en cuencas de drenaje. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se consideran y propagan las incertidumbres aleatorias presentes en la generación de eventos de precipitación a partir de análisis de frecuencia de eventos de precipitación máxima diaria multianual para cada cuenca de análisis.
<p>Epistémica</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Distribución de probabilidad de la precipitación máxima diaria multianual. 2. Parametrización en modelos hidrológicos: coeficientes de escorrentía, coberturas de la tierra, entradas meteorológicas, datos topográficos del Modelo Digital de Elevación (MDE). 3. Medición de datos de precipitación y caudales. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se aborda a partir de pruebas de bondad de ajuste para hallar la Función de Distribución de Probabilidad (FDP) que mejor describe el proceso de ocurrencia de precipitaciones máximas diarias multianuales en las cuencas de análisis, así como su magnitud. 2. Se aborda a partir del proceso de validación del modelo hidrológico considerando hidrogramas de crecientemente de eventos de inundación ocurridos en la zona de análisis. 3. Se busca reducir la incertidumbre epistémica entre modelos de coberturas de la tierra, topografía, etc. entre cuencas de drenaje a partir del uso de datos de entrada uniformes para todo el país, generados por estrategias y proyectos de estimación de datos de entrada para modelos hidrológicos que reportan las fuentes de incertidumbre específicas. (Ver fuentes de datos) 4. Se aborda con el análisis de consistencia de la información hidrométrica. Se evalúan datos dudosos, homogeneidades y tendencias en series de tiempo.
<p>Ontológica</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Incertidumbre en el efecto de los procesos de infiltración, evapotranspiración y escorrentía en la frecuencia en que se presentan eventos de inundación que igualan o exceden magnitudes definidas de análisis. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se aborda a partir del concepto de iso-frecuencia, en el cual se asume que la frecuencia con la que se generan precipitaciones máximas diarias multianuales en una cuenca de drenaje, son las mismas frecuencias en que se generan caudales de crecientemente y potenciales inundaciones.

3.1.1 Supuestos y consideraciones

En el marco de la evaluación probabilista de riesgo por inundación, se hace el uso del concepto de evento para hacer posible el cálculo de las distribuciones de probabilidad de la pérdida/daños. Desde el punto de vista del análisis hidrológico, dichos eventos se constituyen a partir de la ocurrencia de precipitaciones que, potencialmente, pueden generar inundaciones (de Risi et al., 2013). Para el caso del análisis hidrológico de las cuencas de drenaje de 33 puentes seleccionados en Haití, se tienen en cuenta las siguientes consideraciones y supuestos:

- i. Los resultados del modelo hidrológico, que posteriormente son usados como datos de entrada para el modelo hidrodinámico, corresponden a hidrogramas de creciente asociados a períodos de retorno definidos. Los hidrogramas de creciente se estiman a partir de la aplicación de un modelo hidrológico de precipitación-escorrentía definido para todas las cuencas de análisis. Lo anterior se plantea dada la ausencia de series históricas de caudal en las cuencas de análisis.
- ii. Como consecuencia de la ausencia de datos de series históricas de caudal en las cuencas analizadas, no es posible efectuar un procedimiento de validación y calibración de los modelos hidrológicos. Aunque se comparan los resultados obtenidos con valores de caudales medios de referencia para algunas cuencas.
- iii. Se asume que a cada valor de caudal y precipitación máxima diaria anual le corresponde un único hidrograma de creciente posible.
- iv. Previa verificación de tendencias y pruebas de estacionariedad en las series de datos de precipitación histórica y con cambio climático, se asume que la ocurrencia de eventos de precipitación es independiente, mutuamente excluyente o disjunta. Esto significa, que la ocurrencia de un evento no afecta positiva o negativamente la ocurrencia de otro en términos hidrológicos. Así mismo, también significa que no es posible que en la misma cuenca de análisis ocurran dos eventos simultáneamente.
- v. Dentro del modelo hidrológico planteado se fijan las condiciones de cobertura vegetal y de tipo de suelo para la estimación de hidrogramas de creciente asociados a períodos de retorno. Esto significa que, se asume que la cobertura vegetal no presenta cambios en la modelación para ninguno de los períodos de retorno de análisis, lo cual repercute en que la capacidad de infiltración en el modelo se mantiene constante para las cuencas analizadas .
- vi. Se hace uso de hidrogramas calculados para períodos de retorno mayores que los utilizados típicamente para los análisis hidrológicos e hidráulicos convencionalmente elaborados para el diseño y/o revisión de seguridad de obras de control de inundaciones. Es indispensable incluir estos eventos extremos poco frecuentes, debido a que no se está revisando la seguridad de una obra en particular, sino que se busca evaluar las pérdidas que se pueden presentar en un régimen hidrológico determinado (Ordaz, Torres, & Domínguez, 2013). Y, adicionalmente, se busca garantizar la completitud en el análisis al considerar eventos de muy baja frecuencia, pero que pueden ser potencialmente desastrosos dada su gran intensidad.
- vii. La incertidumbre para el modelo hidrológico se considera a partir de la variabilidad natural en la generación de eventos de precipitación en cada cuenca y subcuenca de drenaje analizada, con sus correspondientes momentos estadísticos.
- viii. Se hace uso del concepto de iso-frecuencia al considerar las frecuencias de excedencia de las zonas de inundación calculadas como las mismas provenientes de los forzamientos detonantes (Candela & Aronica, 2014).
- ix. Se plantea la selección de un modelo climático global (GCM, por sus siglas en inglés) único como fuente de datos de precipitación modelados con condición de cambio climático para el período 2006-2100. La selección se realiza a partir de un análisis de la capacidad de predicción del régimen de precipitación bimodal que se presenta en la cuenca de El Caribe. Se comparan 13 modelos que componen el “Coupled Model Intercomparison Project” (CMIP5).
- x. Se plantea el uso de las proyecciones de precipitación diaria de una única Trayectoria de Concentración Representativa (RCP, por sus siglas en inglés) del GCM seleccionado. La

elección del RCP se plantea a partir del análisis estadístico de la situación más crítica entre el RCP 4.5 y el RCP 8.5. Es decir, se selecciona el RCP que plantee las precipitaciones máximas diarias más extremas que, potencialmente, puedan generar eventos de inundación.

xi. Dado que la información que proviene de estaciones pluviométricas en Haití tiene deficiencias en cuanto a; la localización de las estaciones (menos del 20% del total de estaciones cuenca con coordenadas espaciales) y completitud de series históricas de precipitación máxima diaria de 30 años o más (menos del 5% de las estaciones que registran precipitación diaria tienen datos para más de 30 años), se plantea realizar el análisis hidrológico histórico a partir de datos de precipitación recuperados de un GCM escalado seleccionado para el período 1950-2005.



Puente Estimé, Jérémie (RN7)

¹En el (Anexo F: Resultados de hidrogramas para 4 cuencas con cambios en las condiciones de cobertura vegetal) se presentan resultados indicativos para 4 cuencas, en las que se evalúan hidrogramas de creciente considerando un escenario de cambio en las condiciones de uso del suelo a partir de supuestos y consideraciones técnicas obtenidas de estudios anteriores en Haití. Esto se realiza como un ejercicio adicional al alcance del documento y su objetivo es sensibilizar acerca de la importancia de la gestión de cuencas hidrográficas, para minimizar los efectos adversos del cambio climático.

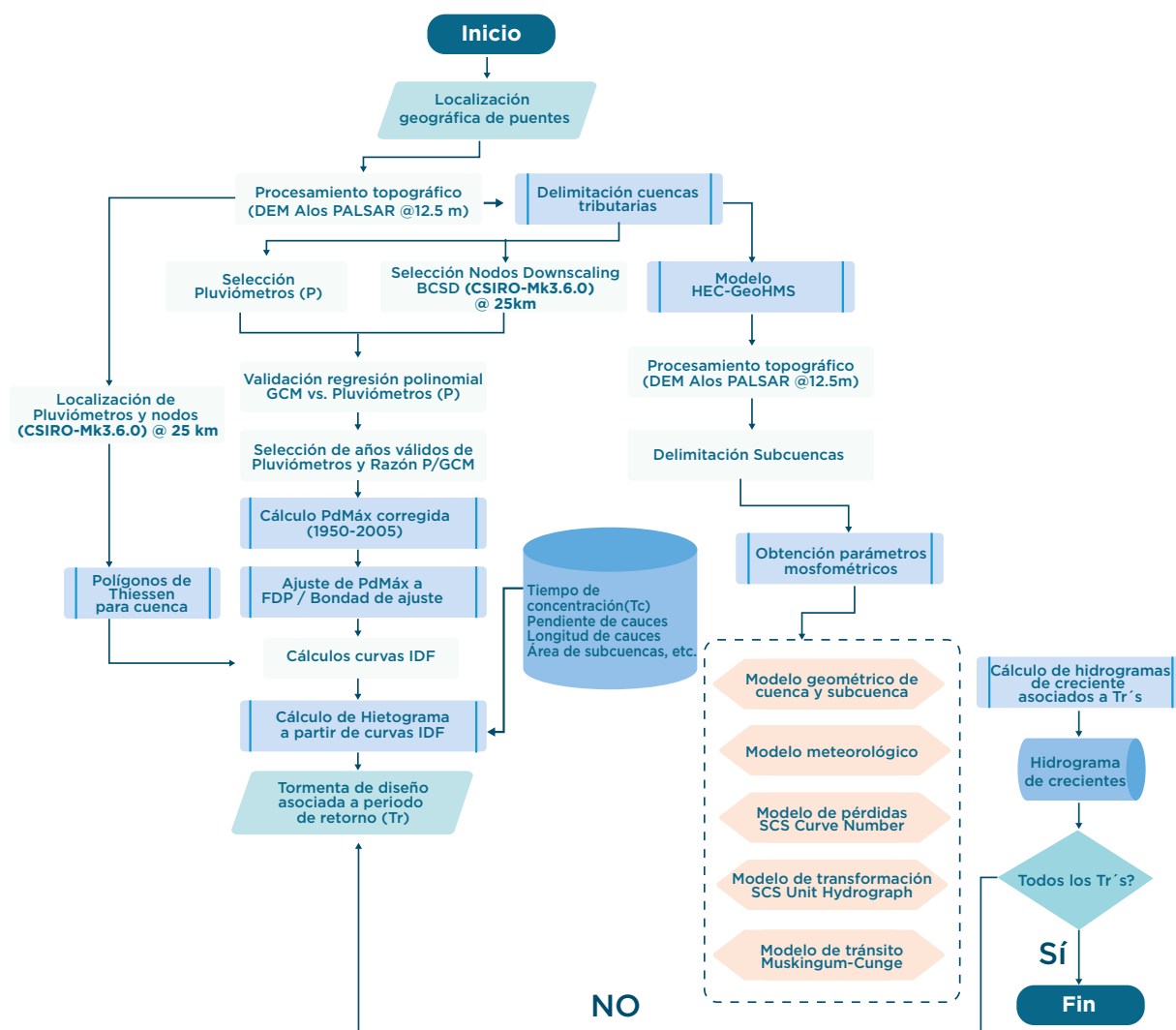
3.1 Metodología de modelación hidrológica

Retomando la aproximación metodológica resumida anteriormente, el análisis hidrológico adoptado para el proyecto se basa en el cálculo de hidrogramas de creciente (con su correspondiente caudal pico) a partir del análisis hidrológico de frecuencias para series de precipitación máxima diaria multianual. Se obtienen caudales máximos asociados a períodos de retorno y la FDP de mejor bondad de ajuste parametrizada por los dos primeros momen-

tos estadísticos. Para el cálculo de los caudales máximos se considera suficientemente todo el rango de períodos de retorno, esto es, desde los eventos más recurrentes con período de retorno menores, hasta los eventos menos recurrentes con períodos de retorno lo suficientemente grandes (mayores a 100 años) con el fin de garantizar la completitud del análisis. La Figura 2 presenta en detalle los pasos seguidos dentro de la metodología planteada para la estimación de hidrogramas de creciente para precipitación histórica y con cambio climático.

FIGURA 2

Diagrama de metodología de análisis hidrológico considerado en el proyecto.



De forma específica, el análisis hidrológico sigue los pasos que se describen a continuación:

Delimitación de cuencas de drenaje: Tomando como base de información la localización geográfica de los puentes vehiculares de análisis, se establecen como los puntos de drenaje de las cuencas a delimitar. Haciendo uso de un modelo digital de elevación (MDE) y de los puntos de drenaje se realiza un proceso de delimitación de cuenca haciendo uso de sistemas de información geográfico (SIG).

Cálculo de parámetros morfométricos de cuencas de drenaje: Tomando como base los límites geográficos de las cuencas de drenaje y el MDE, se estiman los parámetros físicos que permiten caracterizar las condiciones de drenaje de cada cuenca. Dentro de los parámetros que se estiman se encuentran; área superficial, perímetro de la cuenca, cotas (máxima, mínima, centroide), longitud y ancho de cuenca, altitud, pendiente, características de la red hídrica, tiempo de concentración, factor de forma, coeficiente de compacidad, densidad de drenaje, entre otros (Ver Anexo A: Delimitación de cuencas y propiedades morfométricas por cuenca).

Selección de datos meteorológicos de entrada

i. Selección de pluviómetros en campo: Se toma como base de información la delimitación de cuencas de drenaje, la localización geográfica de pluviómetros en campo a partir

de información suministrada por CNIGS (Centre National de l'Information Géo-Spatiale), CHEMONICS, CNSA (Coordination Nationale pour la Sécurité Alimentaire) e información topográfica del MDE. A partir de estos datos se seleccionan todas aquellas estaciones pluviométricas que contengan información homogénea, completa y que se encuentren en un área aferente a la cuenca de análisis que permita su uso para la modelación hidrológica de los patrones de precipitación.

ii. Selección de nodos con información de precipitación a partir del modelo climático global (GCM): Previo proceso de elección del GCM que contiene las proyecciones de precipitación máxima diaria entre 2006 y 2100, así como del RCP de análisis (el proceso de selección del GCM, downscaling y RCP se presenta en detalle en la sección 4.1.4), se obtienen los nodos de análisis del modelo cada 25 kilómetros para un área que comprende toda la superficie del país, más una distancia perpendicular de 10 kilómetros hacia mar adentro. Lo anterior con el objetivo de caracterizar las lluvias costeras que se pueden presentar en cuencas que desembocan en el mar Caribe.

Las Figura 3 y Figura 4 presentan el diagrama de flujo seguido para la selección de datos de entrada de precipitación a partir de modelos globales de circulación climática, y el procedimiento para la extracción y análisis de datos de precipitación una vez se ha escogido el modelo climático fuente de información.

FIGURA 3

Diagrama de flujo para selección de datos de entrada de precipitación a partir de modelos climáticos del CMIP5

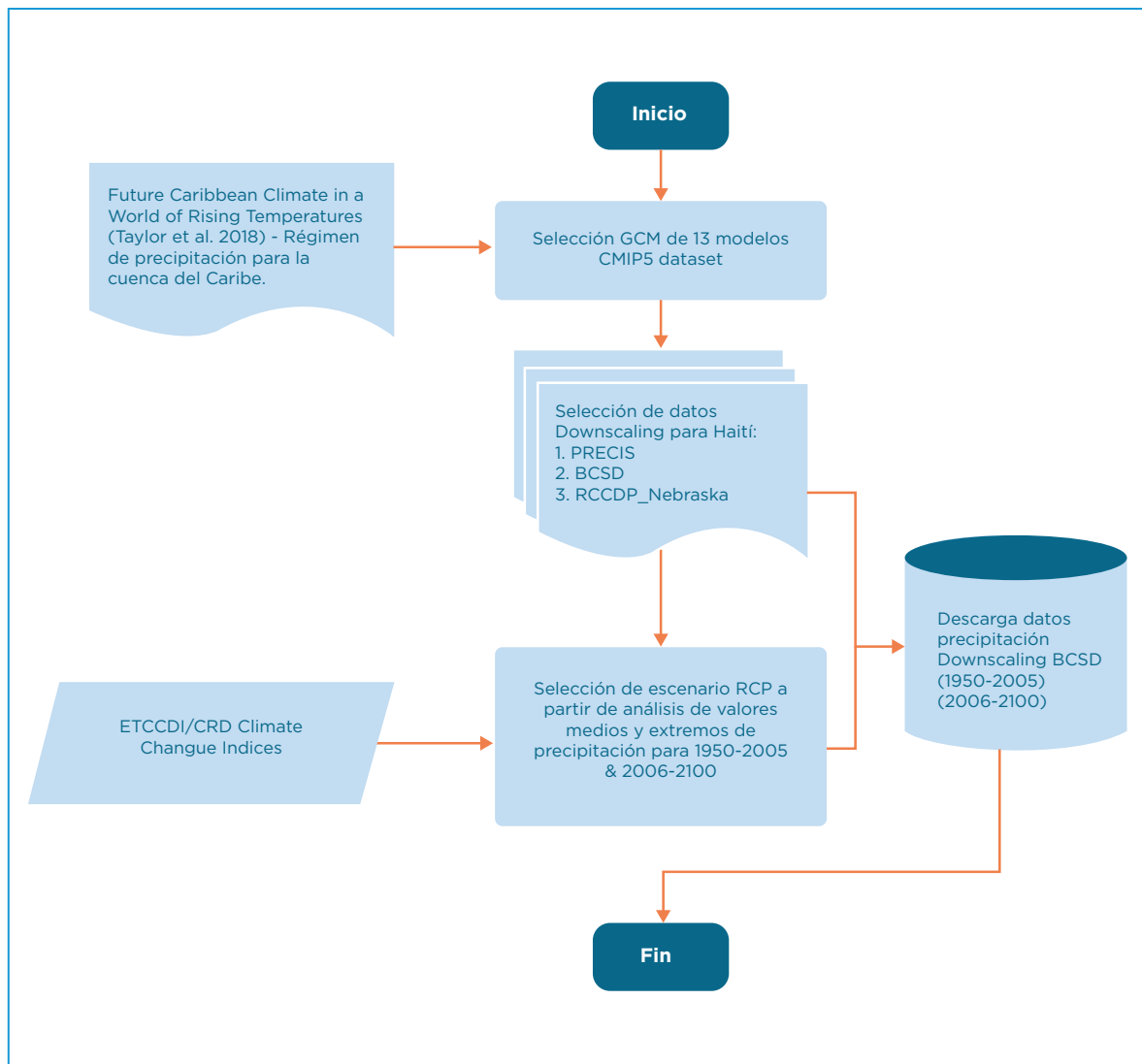
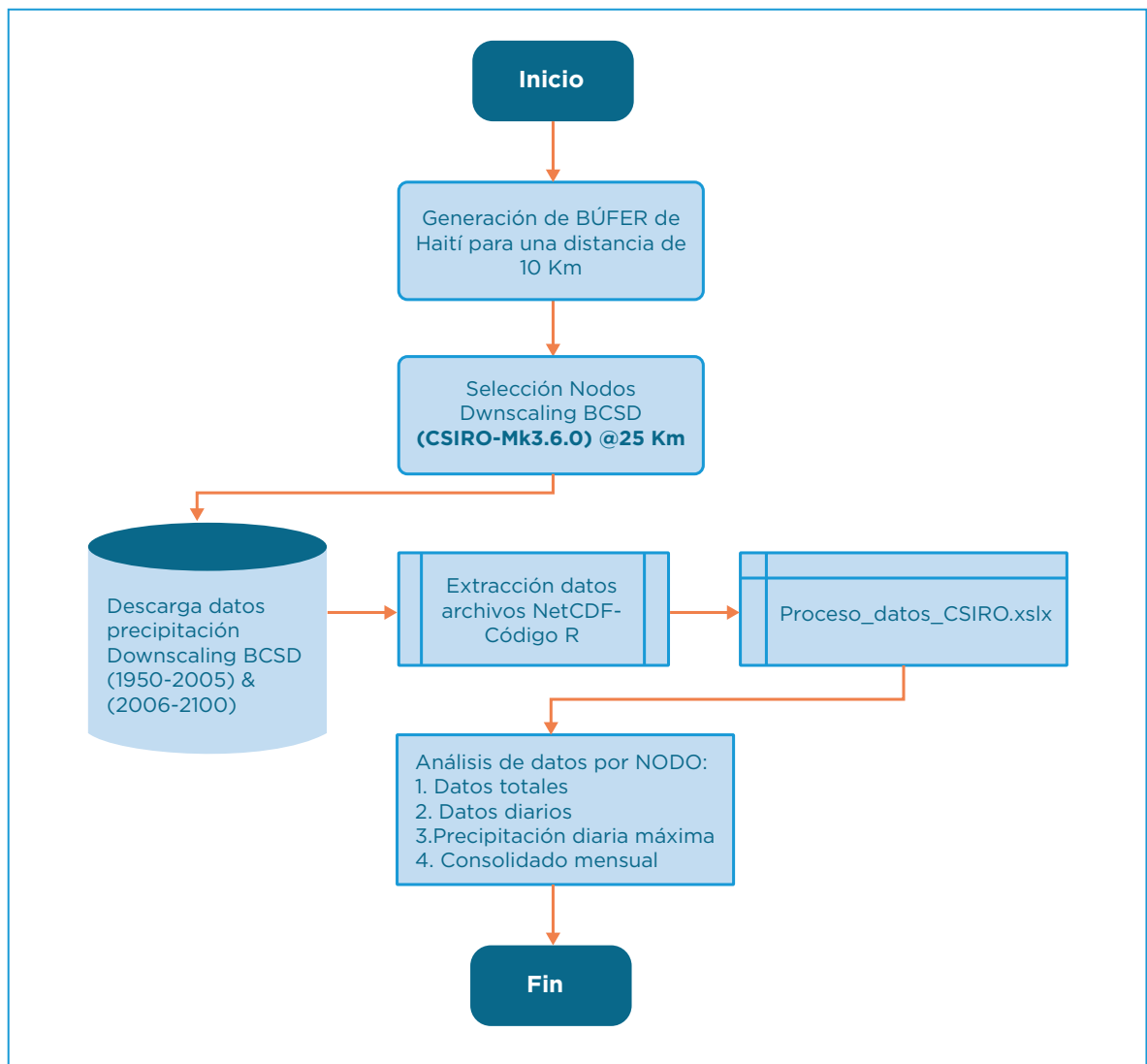


FIGURA 4

Figura 4 Diagrama de flujo para extracción y análisis de datos de modelo CSIRO-Mk-3-6-0.



Validación y comparación de datos de pluviómetros vs. Datos de GCM:

Una vez seleccionados los nodos del GCM escalado cada 25 km y los pluviómetros asociados a cada cuenca de drenaje, se realiza un proceso de comparación y validación de los datos de precipitación máxima diaria multianual para períodos de tiempo concurrentes entre las dos fuentes de información en el lapso comprendido entre 1950 y 2005. La selección de los datos de precipitación máxima diaria de pluviómetros se realiza considerando que la información se encuentre completa, homogénea y que no tenga vacíos en los períodos del régimen de precipitación bimodal en función de la zona de Haití que se esté analizando. A partir de la comparación de los datos se realiza un análisis de correlación estadística entre las dos fuentes de información y se validan para todos los casos en que el factor de correlación de Pearson se encuentre por encima del 0.9.

Cálculo de precipitación máxima diaria multianual (PdMáx) corregida (1950-2005):

Considerando los datos de precipitación para los años en los cuales se presenta una alta correlación entre la información de estaciones pluviométricas y la información del GCM escalado, se estima un factor de corrección de la lluvia máxima diaria para todos los años en el período comprendido entre 1950-2005 con el objetivo de obtener una serie histórica de precipitación que se ajuste a la realidad experimentada en campo. Y que, a su vez, cumpla con la condición de completitud que requiere el análisis en términos de número de datos mayor a 30 años.

Ajuste de PdMáx a una Función de Distribución de Probabilidad (FDP) conocida:

Hasta este punto se cuenta con una serie de precipitación máxima diaria multianual para el período 1950-2005 corregida a partir de datos de estaciones pluviométricas en campo. Con estos datos se realiza un análisis de frecuencia de magnitudes de precipitación para obtener la FDP conocida (Gumbel, Lognormal, Gamma, etc.) que ofrezca una mejor bondad de ajuste para la estimación de PdMáx para períodos de retorno seleccionados. En este caso, los períodos de retorno de análisis son; 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 y 500 años. En este punto, se reitera que se hace uso de hidrogramas calculados para períodos de retorno mayores que los utilizados típicamente para los análisis hidrológicos e hi-

dráulicos convencionalmente elaborados para el diseño y/o revisión de seguridad de obras de control de inundaciones. Lo anterior puesto que es indispensable incluir estos eventos extremos poco frecuentes, debido a que no se está revisando únicamente la seguridad de una obra en particular, sino que también se busca evaluar las pérdidas que se pueden presentar en un régimen hidrológico determinado (Ordaz et al., 2013). Y, adicionalmente, se busca garantizar la completitud en el análisis al considerar eventos de muy baja frecuencia, pero que pueden ser potencialmente desastrosos dada su gran intensidad.

Cálculo de curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para las cuencas y subcuencas de drenaje:

Considerando la distribución espacial de los nodos de precipitación del GCM escalado aferentes a cada cuenca de drenaje, se construyen polígonos de Thiessen que permiten estimar la proporción de superficie que le corresponde a cada nodo y, por tanto, la distribución de PdMáx que le corresponde a un área específica de la cuenca. Con esta información, en conjunto con las estimaciones de PdMáx asociadas a períodos de retorno considerando la FDP con mejor bondad de ajuste, se construyen las curvas IDF que caracterizan una cuenca y/o subcuenca particular.

Cálculo de hietogramas a partir de curvas IDF:

Tomando como información base las curvas IDF obtenidas para cada cuenca y/o subcuenca de análisis, en conjunto con parámetros morfométricos como; pendiente, longitud del cauce principal y el tiempo de concentración (en horas) de la cuenca, se estiman los valores de intensidad de precipitación según duración de la misma frecuencia. A partir de dichos valores de intensidad de precipitación se calculan los hietogramas sintéticos asociados a una duración específica del evento de lluvia y un período de retorno particular. Lo anterior a partir de la metodología de cálculo de hietogramas por el método de bloques alternados.

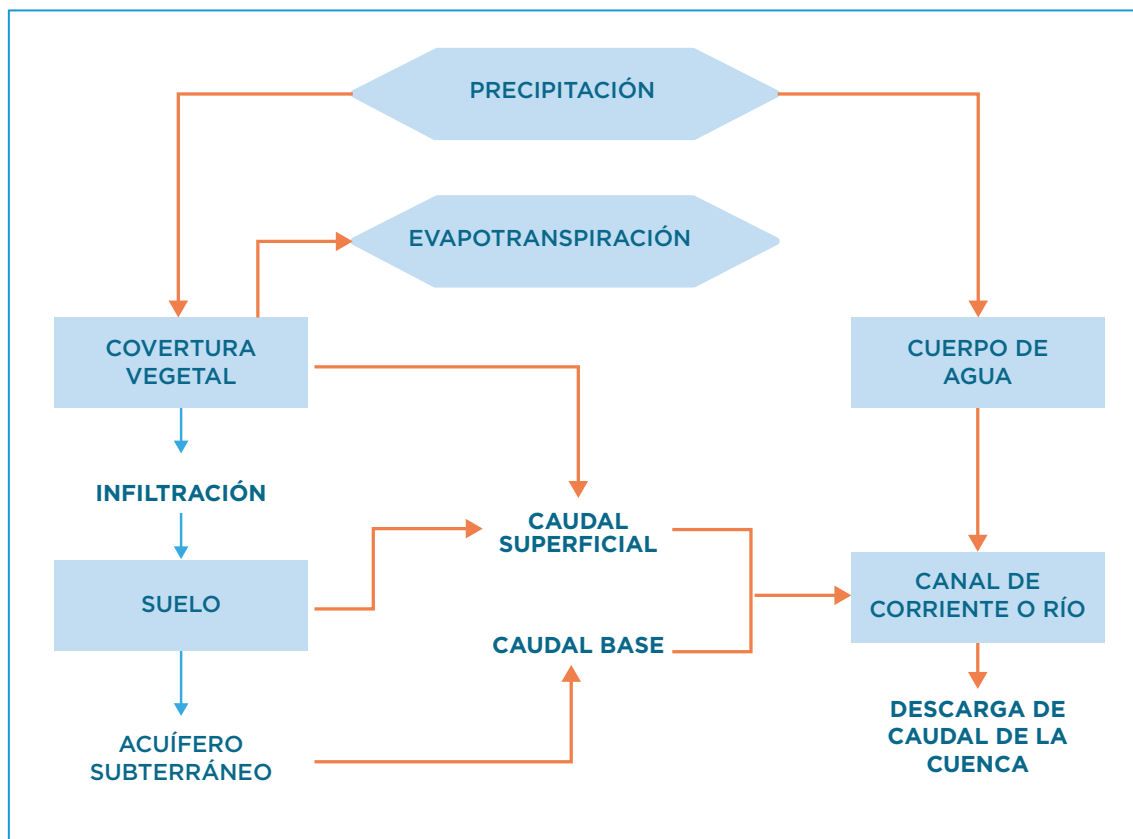
Los pasos anteriormente descritos constituyen el proceso de generación de información meteorológica para el modelo hidrológico. Típicamente, los componentes de un modelo hidrológico se pueden dividir en; ingresos, pérdidas, transformación y tránsito. Dentro del componente de ingresos/entradas al sistema

se encuentra, principalmente, la precipitación. Dentro del componente de pérdidas del sistema se encuentran procesos de; evapotranspiración e infiltración. La evapotranspiración es un proceso que se da a nivel superficial, en el que interviene principalmente la cobertura vegetal y el uso del suelo de una zona particular. Mientras que en el proceso de infiltración interviene la cobertura vegetal, el tipo de suelo y las características de permeabilidad del mismo. La combinación de los procesos de ingresos y pérdidas en el sistema da origen al componente de transformación, el cual se encarga de estimar el tiempo que toma el excedente de precipitación en alcanzar el drenaje más cercano de la subcuenca de análisis. Finalmente, el componente de tránsito estima el tiempo que toma el excedente de precipitación en llegar desde los diferentes drenajes de la cuenca hacia el punto de descarga de la misma, en función de la topografía, rugosidad y geometría del cauce.

En la Figura 5 se encuentra una representación típica del modelo de precipitación-escorrentía utilizado en la herramienta HEC-HMS (USACE, 2000). Considerando los componentes anteriormente descritos y que se presentan en la figura, a continuación, se describen los pasos para la obtención de los componentes de pérdidas, transformación y tránsito en el modelo aplicado.

FIGURA 5

Representación típica de modelo de precipitación-escorrentía en HEC-HMS. Fuente: (USACE, 2000)



Construcción del modelo hidrológico en HEC-GeoHMS: Para la construcción del modelo hidrológico de precipitación-escorrentía se hace uso de componentes que permiten describir los procesos de ingresos, pérdidas y transformaciones que se dan en una cuenca de drenaje cuando se presentan eventos extremos de precipitación. Dentro de estos componentes se encuentran;

i. Modelo geométrico de la cuenca: En este paso se plantea la geometría de la cuenca de drenaje a partir de herramientas SIG, haciendo uso de los resultados del proceso de delimitación y de cálculo de parámetros morfométricos.

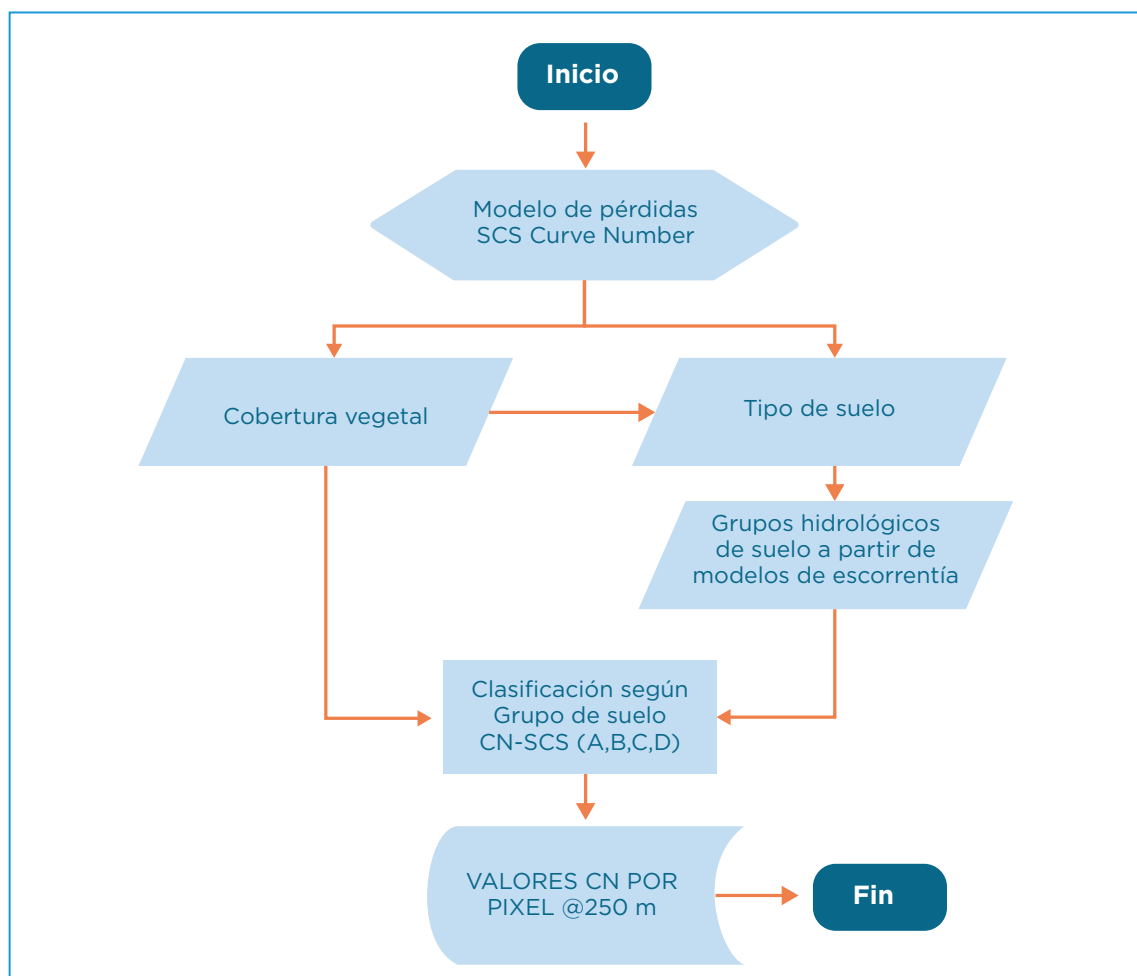
ii. Modelo meteorológico: Se estiman las tormentas de diseño asociadas a períodos de

retorno que mejor describen la manera en la que un evento de precipitación puede igualar o exceder una magnitud de lluvia en la cuenca de drenaje, asociada a una frecuencia particular.

iii. Modelo de pérdidas: En este punto se selecciona el modelo a partir del cual se estima el proceso de infiltración que se presenta en función del tipo de suelo, las características de la cobertura vegetal y de uso del suelo. Para el caso del proyecto en Haití se hace uso del modelo de Número de Curva del Soil Conservation Service (SCS) de los Estados Unidos. La Figura 6 presenta el procedimiento seguido para la obtención de números de curva por pixel cada 250 metros a partir de las fuentes de información mencionadas.

FIGURA 6

Diagrama de flujo de obtención de Números de Curva por pixel @250 metros para Haití.



iv. Modelo de transformación: Para este caso particular, el modelo de transformación seleccionado corresponde al de hidrograma unitario sintético propuesto por el SCS. Se selecciona este modelo por su simplicidad de aplicación para cuencas con superficies pequeñas (menores a 500 km²), como es el caso de las cuencas de drenaje del proyecto, dado que es posible asumir una distribución espacial uniforme de la precipitación en las áreas de análisis.

v. Modelo de tránsito: Para estimar el tiempo de viaje del excedente de precipitación desde cada punto de concentración de las subcuencas hacia el punto de descarga se hace uso del método de Muskingum-Cunge. La selección de este método de tránsito se da debido a que exige información deducible del MDE con un grado de incertidumbre asociado a la resolución espacial (para este caso es de 12.5 metros). Dentro de los datos que exige el método se encuentran; longitud y pendiente del tramo de cauce, coeficiente de rugosidad de Manning, índice de celeridad y geometría básica de la sección transversal del tramo del cauce. Adicionalmente, se selecciona el método debido a que en la mayoría de los cauces analizados las condiciones de pendiente no superan el 10%. En caso de superarlo se recomienda el uso de ecuaciones de tránsito de St. Venant.

Cálculo de hidrogramas de creciente asociados a períodos de retorno: Mediante la combinación de los componentes de ingresos, pérdidas, transformación y tránsito descritos anteriormente, para cada una de las cuencas de análisis se computan los hidrogramas de creciente asociados a los períodos de retorno asociados a las tormentas de diseño estimadas. La frecuencia para la cual se calculan los hidrogramas de creciente se considera igual a la considerada en el cálculo de las tormentas de diseño. Esto se asume gracias al concepto

de iso-frecuencia, debido al desconocimiento que existe respecto de la influencia que tienen los componentes de pérdidas, transformación y tránsito en la frecuencia del proceso de generación de caudales extremos.

Como resultado de la aplicación de la metodología explicada, en total se genera un grupo de 15 hidrogramas de creciente para cada una de las cuencas de análisis para el caso de precipitación histórica entre 1950 - 2005. Esto genera un total de 495 hidrogramas de creciente. Para el caso de análisis con cambio climático se genera una cantidad idéntica de hidrogramas. Por tanto, en total se generan 990 hidrogramas de creciente para las 33 cuencas de análisis.

En los capítulos siguientes se presentan en detalle las fuentes de información para cada componente de análisis del modelo hidrológico. Así como también las especificaciones metodológicas y los resultados obtenidos para cada caso de análisis; histórico y cambio climático.

Como comentario final sobre la metodología presentada, se establece que; se hace uso de métodos tradicionales para la determinación del período de retorno de eventos hidrológicos extremos. Estos métodos usualmente asumen lo siguiente: i) los eventos extremos surgen a partir de un comportamiento estacionario (en el tiempo) del fenómeno de precipitación, y ii) la ocurrencia de los eventos extremos son independientes entre sí, o débilmente dependientes (Leadbetter, 1983) en (Salas & Obeysekera, 2014). Por tanto, la formulación típica para la estimación de cantidades usuales en hidrología como el período de retorno de eventos extremos, son plenamente conocidos a partir de las propuestas de autores como Gumbel (1941), Chow (1988), (Bras, 1990), entre otros.

4. DATOS DE ENTRADA

De acuerdo con la metodología descrita en el capítulo anterior, en esta sección se presentan todas las fuentes de datos e información que alimentan el modelo hidrológico para el cálculo de hidrogramas de creciente en las 33 cuencas de drenaje del proyecto. En principio, se definen los datos de entrada generales del modelo de precipitación-escorrentía en el orden en que se mencionaron en el capítulo metodológico, es decir; localización de puentes vehiculares, topografía, delimitación de cuencas de drenaje, localización de estaciones pluviométricas, cobertura vegetal, tipo de suelo y grupo de suelo para número de curva (CN). Para cada una de las fuentes de datos de entrada del modelo se presenta una explicación y descripción de la aproximación metodológica seguida con el objetivo de tener condiciones de homogeneidad y completitud entre los análisis para la totalidad de las cuencas. Es decir, las condiciones a partir de las cuales se garantizó que todas las cuencas tengan la misma fuente, cantidad y calidad de información de entrada para cada uno de los componentes.

Adicionalmente, se presenta una sección aparte en la que se especifican las condiciones de información pluviométrica de entrada que se consideró en la modelación, tanto para las es-

taciones en campo como el procedimiento de selección del GCM, el escalamiento estadístico (“downscaling”), y el RCP para la modelación de condiciones con cambio climático.

4.1 Generales

4.1.1 Localización de puentes vehiculares

Como primera medida, para dar inicio al análisis hidrológico, es necesario conocer los puntos de drenaje para los cuales se delimitan las cuencas. Para este análisis particular, los puntos de drenaje del proyecto corresponden a la localización geográfica de los 33 puentes vehiculares. A continuación, se presenta una tabla que contiene información del identificador de cada puente, el Departamento, el río que atraviesa, las coordenadas geográficas, el tipo de red vial a la que pertenece, el rango de cobertura (en metros) y la ruta. Lo anterior, a partir de información suministrada al proyecto por parte del Ministerio de Trabajos Públicos, Transporte y Comunicaciones (MTPTC, por sus siglas en francés) de Haití.

TABLA 2

Localización de 33 puentes vehiculares seleccionados para el proyecto

PUENTE	DEPARTAMENTO	RÍO	Y	X	RED VIAL	COBERTURA [M]	ruta
P120	Grand Anse	Estimé	0	0	RN	130	RN7
P5	Grand Anse	Rivière Bonbon	18°39'49.238"	74°14'47.684"	RC	33	RC700B
P89	Grand Anse	Rivière des Abricots	18°38'56.213"	74°18'35.921"	Urbain	72	S.I.
P4	Sud	Rivière Gros Marin	18°21'52.199"	73°37'11.719"	Départemental	70	RD204
P121	Sud	L'Acul (Arniquet)	18°08'46.590"	73°52'02.470"	RC	120	RC2058
P102	Nippes	L'Asile (l'asile) riviere mahot	18°22'38.710"	73°24'36.249"	RC	158	RC200B
P101	Nippes	L'Asile (tournade) riviere pins	18°23'10.680"	73°24'59.021"	RC	270	RC201A
P90	Nippes	Rivières Brossard	18°29'49.943"	73°20'52.572"	Départemental	47	RD201
P11	Ouest	Rivière Grise	18°33'04.517"	72°13'45.294"	Urbain	135	S.I.
P12	Ouest	Rivière Grise	18°31'04.995"	72°12'33.878"	RA	430	S.I.
P97	Sud-Est	Source gros madanm* (galette millet)	18°31'05.903"	72°16'05.423"	Urbain	112	S.I.
P66	Sud-Est	Petite Rivière de Jacmel	18°13'52.783"	72°33'13.383"	RC	44	RC400B
P67	Sud-Est	Dlo Génée	18°11'44.744"	72°38'16.623"	RC	75	RC400B
P68	Sud-Est	Rivière Madame Louis	18°11'14.684"	72°40'05.823"	RC	380	RC400B
P69	Sud-Est	Rivière Trou Mahot	18°11'06.283"	72°42'00.423"	RC	106	RC400B
P70	Sud-Est	Rivière Jean Charles	18°10'47.203"	72°42'23.583"	RC	50	RC400B
P71	Sud-Est	Ravine Militon (Riviere penn)	18°11'04.493"	72°44'56.623"	Départemental	54	RD401
P72	Ouest	Riviere de Baintet	18°10'40.304"	72°45'52.863"	Départemental	119	RD401
P14	Artibonite	Rivière Torcelle *	18°45'52.194"	72°24'00.396"	RA	31	S.I.
P15	Artibonite	Rivière Bretelle *	18°44'14.630"	72°24'29.932"	National	31	RN1
P16	Nord-Ouest	Rivière Froide	19°32'38.052"	72°52'34.303"	Départemental	42	RD102
P40	Nord-Ouest	Rivière de Henne	19°40'38.900"	73°13'31.376"	-	231	RD102
P38	Nord-Ouest	Rivière de Jean Rabel	19°50'31.774"	73°12'34.448"	Départemental	234	S.I.

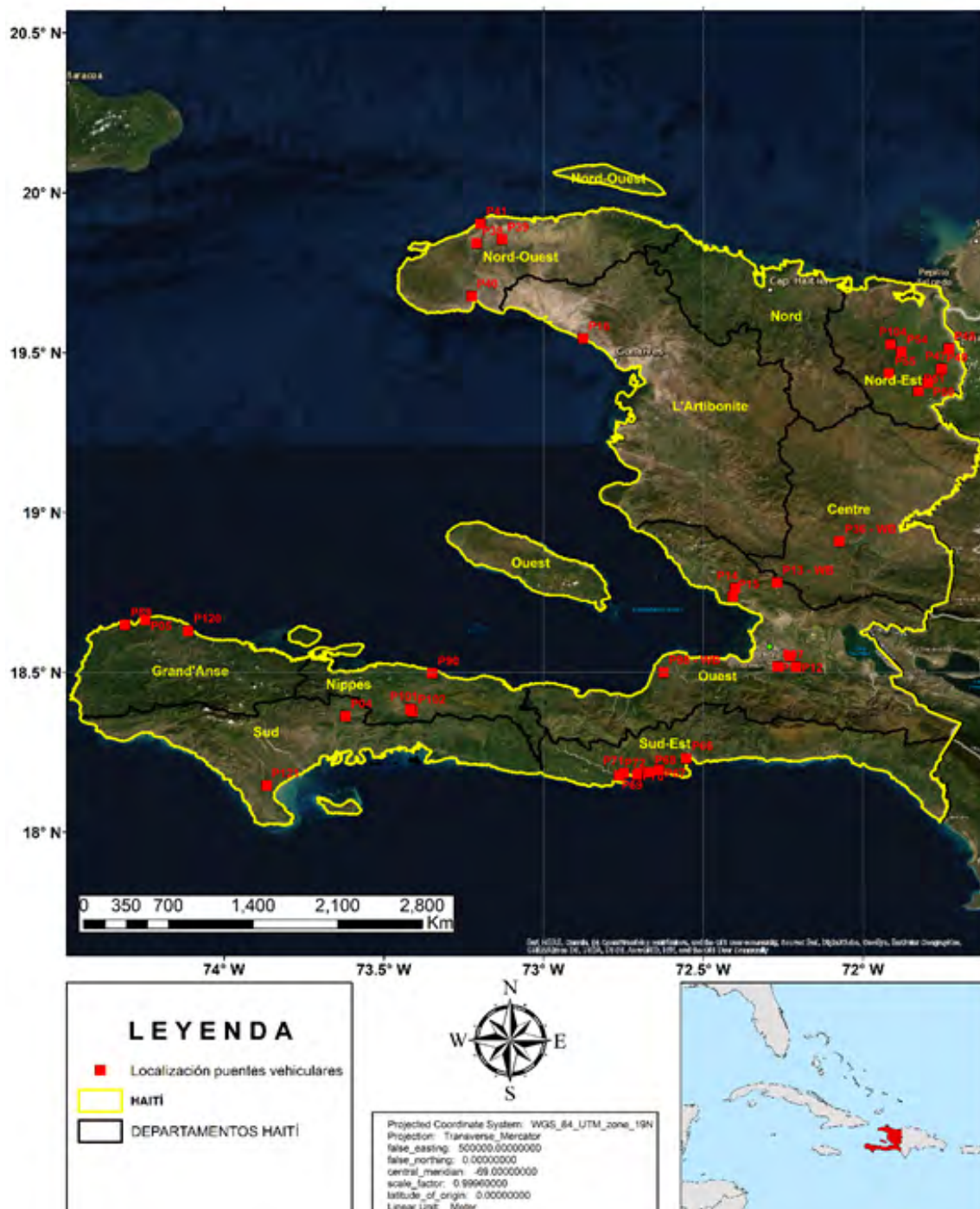
PUENTE	DEPARTAMENTO	RÍO	Y	X	RED VIAL	COBERTURA [M]	RUTA
P41	Nord-Ouest	Rivière de Jean Rabel	19°54'15.762"	73°11'49.864"	RA	110	S.I.
P39	Nord-Ouest	Rivière de Catinette	19°51'14.609"	73°07'46.777"	RA	40	S.I.
P104	Nord-Est	Perches (Haut des Perches) Rivière cochon gras	19°31'35.150"	71°54'51.350"	RC	33	RD600C
P54	Nord-Est	Rivière Boquette	19°30'12.062"	71°52'50.778"	RC	47	S.I.
P48	Nord-Est	Rivière Boudeau	19°30'50.103"	71°43'55.582"	Départemental	64	RD602
P47	Nord-Est	Rivière	19°27'03.317"	71°45'13.903"	Départemental	15	RD602
P49	Nord-Est	Rivière Gens de Nantes	19°26'47.876"	71°45'22.748"	Départemental	38	RD602
P50	Nord-Est	Rio Libon	19°24'24.552"	71°47'53.058"	Départemental	27	RD602
P51	Nord-Est	Rivière Terre Neuve	19°22'48.443"	71°49'38.782"	Départemental	64	RD602
P55	Nord-Est	Grande Rivière Du Nord	19°26'03.862"	71°55'07.736"	RC	18	S.I.

Fuente: MTPTC (Ministère des Travaux Publics, Transports et Communications)

Los puentes vehiculares se encuentran localizados en 8 de los 10 departamentos del país, siendo Nord-Est y Sud-Est los departamentos con mayor número de puentes con 8 y 7, respectivamente. Mientras que los departamentos de Sud y Artibonite son los departamentos con menor participación, con 2 puentes cada uno (Ver Figura 7). En términos del rango de cobertura de los puentes, se encuentra que 15 de ellos (45%) se encuentran en el rango entre 15 y 60 metros de longitud. Mientras que únicamente 6 de ellos sobrepasan el rango de longitud de los 140 metros.

FIGURA 7

Localización de 33 puentes vehiculares seleccionados para el proyecto.



Fuente: MPTPC (Ministère des Travaux Publics, Transports et Communications)

4.1.1.1 Localización y delimitación de cuencas de drenaje

Tomando como base la información de localización de los puntos de drenaje y la topografía del país, se realizó un procedimiento de delimitación de las cuencas que drenan a

cada uno de los 33 puentes vehiculares (Ver Anexo A: Delimitación de cuencas y propiedades morfométricas por cuenca). El proceso de delimitación de cuencas se realiza a partir de SIG, mediante la generación de las siguientes capas:

FIGURA 8

Capas generadas para el proceso de delimitación de cuencas. Ejemplo para cuenca de drenaje del puente.



a) TIN: Triangular Irregular Networks.



b) Direcciones de flujo



c) Acumulación de flujo

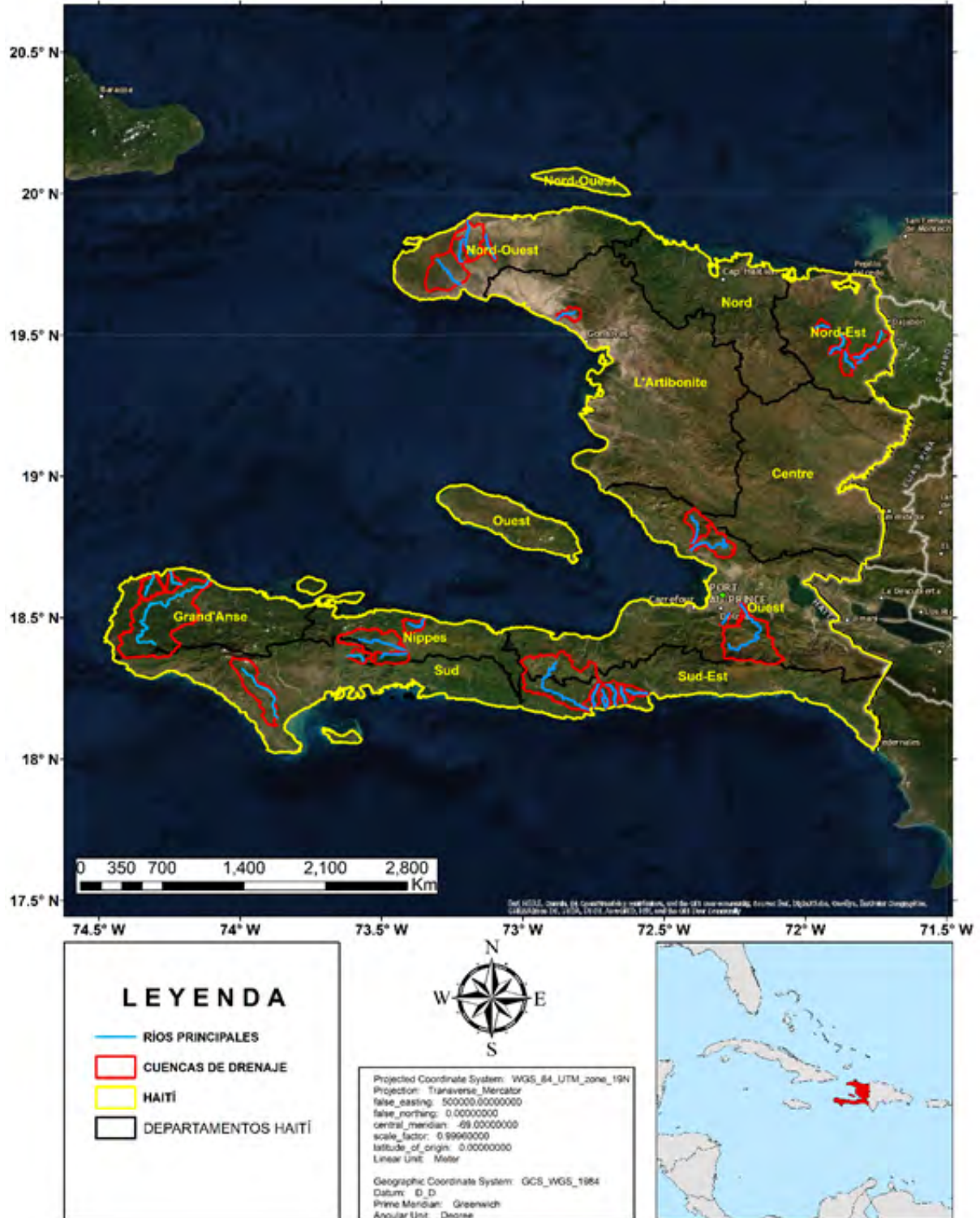


d) Delimitación de cuenca

En la Figura 9 se presenta el mapa de delimitación y ubicación de las 33 cuencas de drenaje de análisis sobre las cuales se plantea el modelo hidrológico de precipitación-es-correntía para condiciones históricas (1950-2005) y con cambio climático (2006-2100).

FIGURA 9

Localización y delimitación de cuencas de drenaje que tributan a los 33 puentes seleccionados para el análisis en el proyecto.



4.1.2 Topografía

La información topográfica utilizada para el proyecto proviene de ©JAXA/METI ALOS PALSAR [DEM], con las siguientes características:

TABLA 3

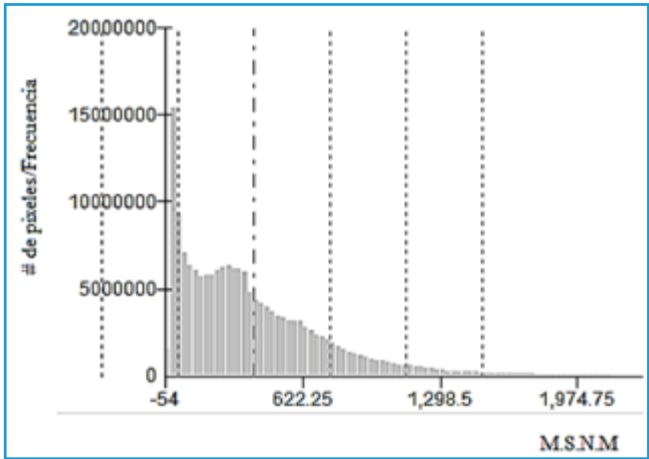
Tabla 3 Características principales información topográfica de entrada.

Fecha de adquisición	2018-12-12T19:58:59.000000Z
Tipo de imagen	terrain corrected image
Fuente (responsable)	Alaska Satellite Facility
Características	El producto corregido del terreno se deriva de una imagen SAR compleja de aspecto único. Se proporciona en coordenadas universales transversales de Mercator y se corrige para el terreno utilizando un DEM.
Resolución espacial	12.5 metros

Para la construcción del mosaico topográfico del país (Ver Figura 11), se realizó la descarga de 24 “tiles”. En términos de relieve, se evidencia que existen 3 formaciones montañosas en forma de cordilleras que se extienden de este a oeste, localizadas al sur, centro y norte del país. La altitud media de todo el país es de 381 m.s.n.m, mientras que la altitud máxima es de 2.651 m.s.n.m.

FIGURA 10

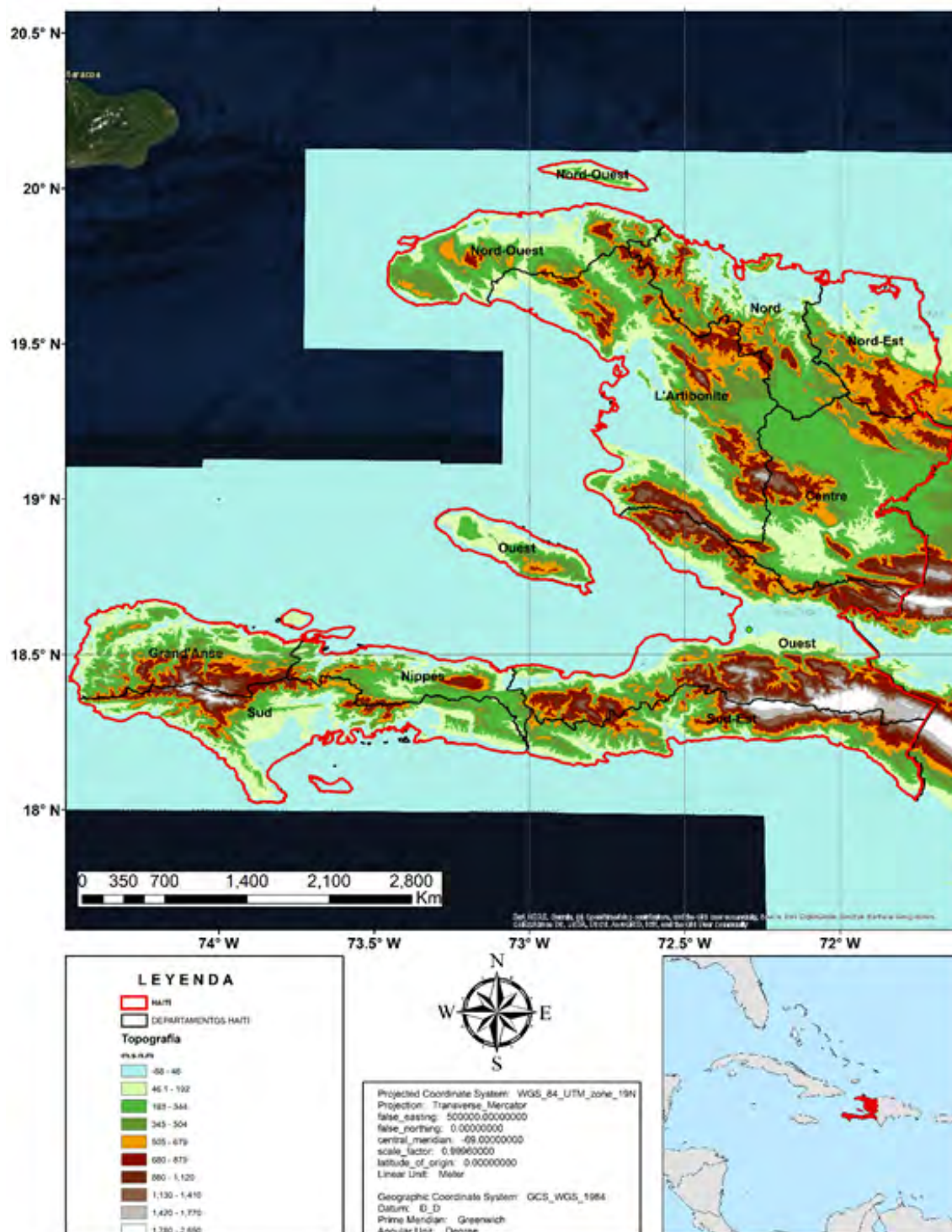
Histograma de frecuencias de altitud topográfica



Número de píxeles	1,727,833,986
Altitud mínima (m.s.n.m)	-54
Altitud máxima (m.s.n.m)	2651
Altitud media (m.s.n.m)	381
Desviación estándar (m.s.n.m)	372

FIGURA 11

Mosaico topográfico construido para Haití a partir de datos de modelo digital de terreno del ALOS PALSAR.



Fuente: ©JAXA/METI ALOS PALSAR [DEM] [2019. Accessed through ASF DAAC, [https://www.asf.alaska.edu] [02/02/2019]

4.1.3 Estaciones pluviométricas

Con el objetivo de plantear modelos hidrológicos de precipitación-escorrentía para estimar hidrogramas de creciente en cuencas de drenaje con tiempos de concentración entre 5 y 40 horas, es necesario contar con información de lluvia máxima diaria multianual localizada en el área aferente de las cuencas analizadas. Dentro de la información de estaciones de precipitación recibida se encuentran dos tipos de datos: el primero corresponde a precipitación total mensual (19 estaciones) y, el segundo corresponde a precipitación diaria (185 estaciones). Las fuentes de información a partir de las cuales se obtuvo la información de dichas estaciones son; CNIGS (Centre National de l'Information Géo-Spatiale - National Center for Geospatial Information), base de datos de CHEMONICS y la CNSA (Coordination Nationale pour la Sécurité Alimentaire - National Committee for Food Security).

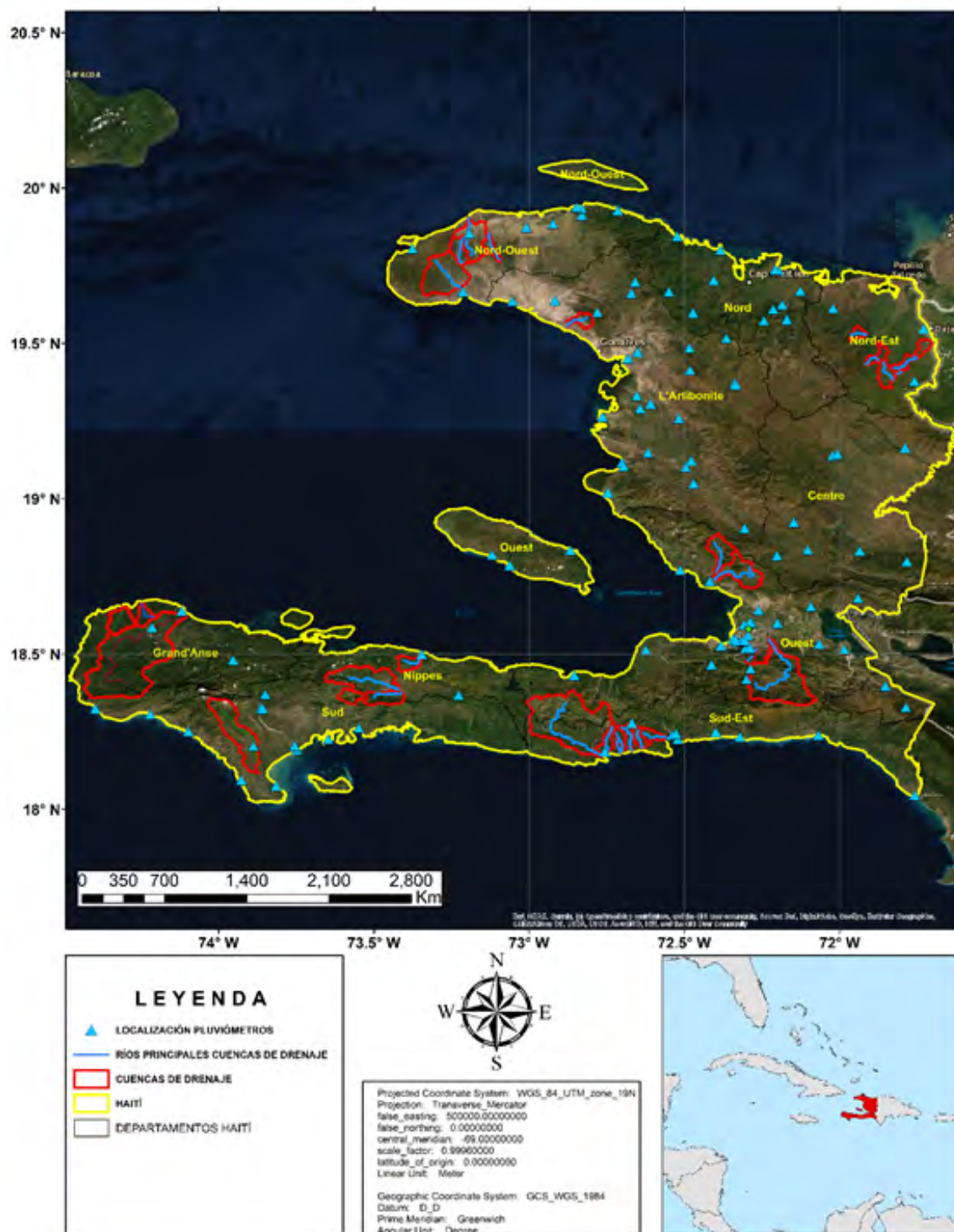
De las 19 estaciones de precipitación total mensual, la totalidad de estaciones cuenta con localización geográfica. Mientras que, de las 185 estaciones de precipitación diaria, únicamente el 15.6% cuenta con coordenadas geográficas. Por lo tanto, para la localización espacial de las estaciones de precipitación diaria restantes se recurrió, cuando fue posible, al nombre de la comuna en la que se encuentra según la base de datos suministrada y se localizó en el centroide de la comuna correspondiente (Ver

Anexo B: Tabla de localización e información base de estaciones pluviométricas en campo) De la totalidad de 204 estaciones de precipitación mensual y diaria se realizó un proceso de depuración, en el cual se redujo el número de estaciones a 147. Los criterios de depuración de la base de datos inicial obedecieron a la posibilidad de localización geográfica de las estaciones a partir de su nombre y la comuna en la que se encuentran. Para las estaciones en las que la información suministrada no permitió su ubicación, se descartaron. Como resultado de la depuración, las 19 estaciones de precipitación mensual permanecieron dentro de la base de datos considerada. Mientras que, de las estaciones con información de precipitación diaria, únicamente permanecieron 128. La Figura 12 presenta el mapa de localización de las 147 estaciones pluviométricas consideradas para el análisis hidrológico.

Cabe mencionar que en el análisis particular de cada una de las cuencas de drenaje se realizó un proceso adicional de depuración de la base de datos considerada, a partir de dos criterios básicos; i) se seleccionan las estaciones con información de precipitación diaria que se encuentran en el área de influencia de cada cuenca de drenaje y, ii) se seleccionan las estaciones con información de precipitación diaria que cuenten con datos completos y homogéneos en el lapso comprendido entre 1950 y 2005. Las estaciones pluviométricas con información mensual son utilizadas como referencia de caracterización del régimen de lluvia en diferentes zonas del país.

FIGURA 12

Localización de estaciones pluviométricas en campo.



Fuente: CNIGS (Centre National de l'Information Géo-Spatiale), CHEMONICS, CNSA (Coordination Nationale pour la Sécurité Alimentaire)

Por último, es necesario mencionar que, de las 128 estaciones con información de precipitación diaria, únicamente el 4.68% supera los 30 años con datos medidos de precipitación diaria en el rango comprendido entre los años 1950 y 2005. El 17.96% supera los 20 años de medición, 27.34% supera los 15 años y el 48.43% supera los 10 años con datos diarios (Ver Figura 13 y Figura 14).

FIGURA 13

Cantidad de años con información de precipitación diaria en el rango 1950 a 2005, para cada estación pluviométrica

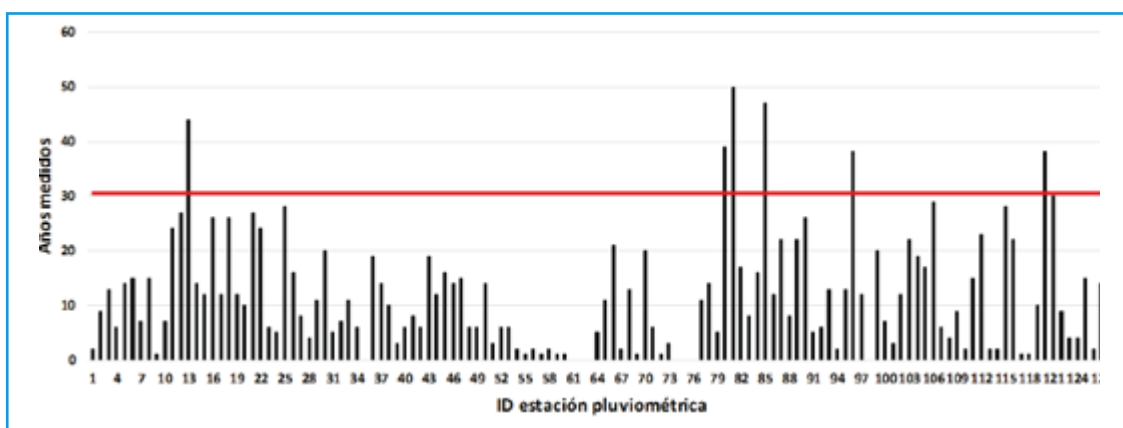
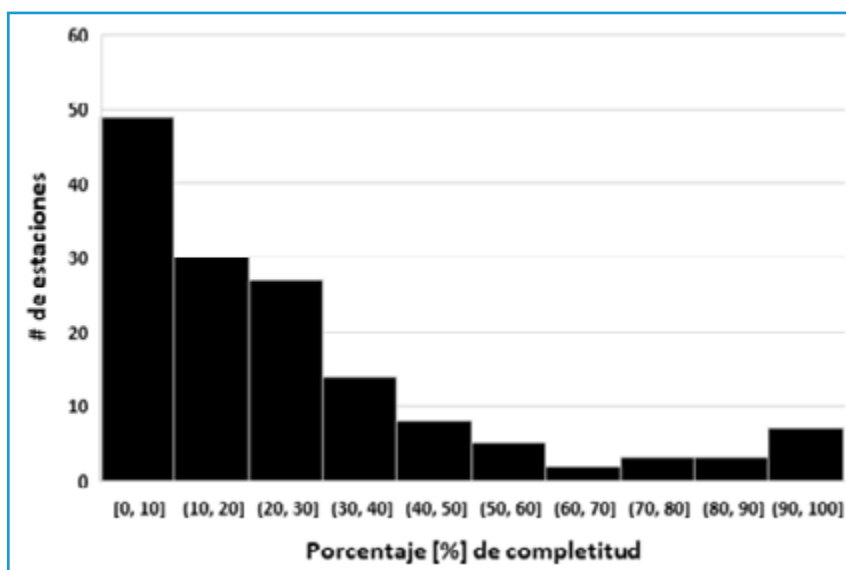


FIGURA 14

Histograma de frecuencias de estaciones pluviométricas con porcentaje de completitud de datos en el rango 1950 - 2005.



4.1.4 Precipitación a partir de GCM

Para efectuar un modelo hidrológico de precipitación-escorrentía considerando cambio climático es imprescindible contar con información de entrada de lluvia máxima diaria proyectada para una ventana de tiempo específica en el futuro. Ante la existencia de diferentes fuentes de información de;

- i. Modelos de Circulación General Atmósfera-Océano (GCM, por sus siglas en inglés),
- ii. Datos escalados (downscaling) a partir de GCM o Modelos Climáticos Regionales (RCM, por sus siglas en inglés),
- iii. Trayectorias de Concentración Representativas (RCP) para cada modelo climático,

es necesario realizar un procedimiento previo de selección de la mejor opción de fuente de datos que alimentan el componente meteorológico del análisis de precipitación-escorrentía

que se desea plantear en el proyecto. En esta sección se presenta el procedimiento seguido para la selección de la mejor fuente de información posible, y los argumentos que sustentan la elección de cada componente.

4.1.4.1 Selección de GCM

Los GCM considerados tienen como denominador común pertenecer a la quinta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5, por sus siglas en inglés), disponibles como parte del atlas de datos del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). En particular, de los 45 modelos disponibles con modelaciones y proyecciones entre 1861 a 2100 se consideró una pre-selección de 13 modelos (Ver Tabla 4). El criterio de la pre-selección de los 13 modelos obedece a que estos presentan un ajuste razonable en la proyección de precipitación con condiciones de régimen bimodal que se presenta en la cuenca de El Caribe (Ryu & Hahyo, 2013).



Puente sobre el río Bretelle, Cabaret (RN2)

TABLA 4 Modelos CMIP5 considerados.
(Taylor et al., 2018)

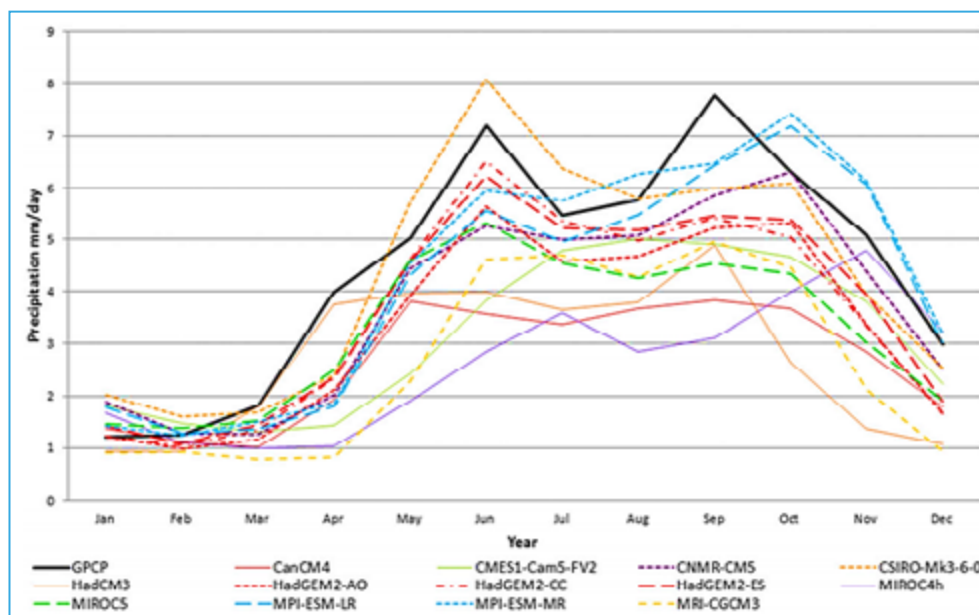
Modelos CMIP5		RCP AR5 subset				Precipitación Bimodal
		2.6	4.5	6.0	8.5	
1	ACCESS1.0		X		X	
2	ACCESS1.3		X		X	
3	BCC-CSM1.1	X	X	X	X	
4	BCC-CSM1.1-M	X	X	X		
5	BNU-ESM	X	X		X	
6	CanCM4					X
7	CanESM2	X	X		X	
8	CCSM4	X	X	X	X	
9	CESM1-BGC		X		X	
10	CESM1-CAM5	X	X	X	X	X
11	CMCC-CM		X		X	
12	CMCC-CMS		X		X	
12	CMCC-CMS		X		X	
13	CNRM-CM5	X	X		X	
14	CSIRO-Mk3.6.0	X	X	X	X	X
15	EC-EARTH	X	X		X	
16	FGOALS-g2	X	X		X	
17	FIO-ESM	X	X	X	X	
18	GFDL-CM3	X	X	X	X	
19	GFDL-ESM2G	X	X	X	X	
20	GFDL-ESM2M	X	X	X	X	
21	GISS-E2-H	X	X	X	X	
22	GISS-E2-H,r1p2	X	X	X	X	
23	GISS-E2-H,r1p3	X	X	X	X	
24	GISS-E2-H-CC		X			
25	GISS-E2-R	X	X	X	X	
26	GISS-E2-R,r1p2	X	X	X	X	
27	GISS-E2-R,r1p3	X	X	X	X	
28	GISS-E2-R-CC		X			
29	HadCM3					X
30	HadGEM2-AO	X	X	X	X	X
31	HadGEM2-CC		X		X	X
32	HadGEM2-ES,r2p1	X	X	X	X	X
33	INM-CM4		X		X	
34	IPSL-CM5A-LR	X	X	X	X	
35	IPSL-CM5A-MR	X	X	X	X	
36	IPSL-CM5B-LR		X		X	
37	MIROC4h					
38	MIROC5	X	X	X	X	X
39	MIROC-ESM	X	X	X	X	X
40	MIROC-ESM-CHEM	X	X	X	X	X
41	MPI-ESM-LR	X	X		X	
42	MPI-ESM-MR	X	X		X	X
43	MRI-CGCM3	X	X	X	X	X
44	NorESM1-M	X	X	X	X	
45	NorESM1-ME	X	X	X	X	
TOTAL		32	42	25	39	13

De acuerdo con la tabla anterior, de los 13 modelos pre-seleccionados, únicamente 10 presentan resultados para los RCP 4.5 y 8.5, considerados como escenarios de mitigación y escenario “business-as-usual”, respectivamente. Considerando estos 10 modelos, en conjunto con datos obtenidos a partir del Proyecto Climatológico Global de Precipitación (GPCP, por sus siglas en inglés), Ryu & Hayho (2013) construyen una gráfica de precipitación promedio diaria entre 1980 y 2005 para la cuenca del Caribe, entre enero y diciembre (Ver Figura 15).

²GPCP: contiene datos de precipitación mensual a partir de mediciones en campo y observaciones satelitales para todo el globo, estimados en una malla de 2.5°x2.5°, en el lapso comprendido entre 1979 y 2013.

FIGURA 15

Climatología de precipitación en El Caribe (1980-2005) para 13 modelos pertenecientes al proyecto CMIP5, identificados por (Ryu & Hayho, 2013), citado en (Taylor et al., 2018)



A partir de la figura anterior, se realiza un proceso de selección del GCM a utilizar como fuente de datos de precipitación en el proyecto. Para la selección se considera como criterio único el mejor ajuste general a los dos picos de precipitación del régimen bimodal que se presentan en la cuenca de El Caribe, es decir, en los meses de junio y septiembre.

En la Tabla 5 se presentan los resultados del proceso de comparación de los 3 modelos que mejor se ajustan a los datos de GPCP; CSIRO-Mk3-6-0, MPI-ESM-MR y MPI-ESM-LR. Se observa que, para el primer pico de precipitación en junio, el modelo CSIRO-Mk3-6-0 presenta una sobrestimación promedio de 0.9 mm/día con respecto al GPCP. Para la zona valle, es decir julio y agosto, el modelo presenta un ajuste perfecto con respecto al GPCP. Y, por último, para el segundo pico de precipitación en septiembre, presenta el menor ajuste de los 3 modelos. Pero en total, contabilizando los 3 valores de referencia, el modelo CSIRO-Mk3-6-0 es el que presenta un mejor ajuste en comparación con los datos de GPCP. Considerando lo anterior, el GCM seleccionado para el análisis en Haití es: CSIRO-Mk3.6.0

TABLA 5

Comparación de modelos con datos de GPCP a partir de climatología de precipitación en El Caribe (1980-2005) para 13 modelos pertenecientes al proyecto CMIP5

MODELO	JUNIO		JULIO-AGOSTO		SEPTIEMBRE		TOTAL DE REFERENCIA
				MID			
GPCP	7.2	-	5.8		7.8		-
CS IRO-Mk3-6-0	8.1	<div><div>0.9</div></div>	5.8	0	6	<div><div>-1.8</div></div>	-0.9
MPI-ESM-MR	5.9	<div><div>-1.3</div></div>	6.3	<div><div>0.5</div></div>	6.5	<div><div>-1.3</div></div>	-2.1
MPI-ESM-LR	5.5	<div><div>-1.7</div></div>	5.5	<div><div>-0.3</div></div>	6.5	<div><div>-1.3</div></div>	-3.3

4.1.4.2 Proyecciones escaladas (downscaling) a partir de GCM

Las dos principales fuentes de información de proyecciones escaladas a partir de GCM disponibles para la cuenca de El Caribe son; PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies)³ y Global Daily Downscaled Projections (Plataforma NEX-GDDP)⁴. A continuación, se presentan características principales de cada fuente de datos y la selección para el proyecto.

PRECIS:

Corresponde a un modelo climático regional (RCM) a partir de un proceso de escalamiento dinámico de GCM. Fue desarrollado por el centro Hadley (Reino Unido) para facilitar la generación de información de alta resolución sobre el cambio climático para la mayor cantidad posible de regiones del mundo. PRECIS es gratuito para países en vías de desarrollo con el objetivo de desarrollar escenarios de cambio climático en centros de investigación, al mismo tiempo que desarrollen capacidad y aprovechen la experiencia climatológica local. PRECIS es un modelo de punto de cuadrícula de ecuaciones primitivas hidrostáticas. Contiene 19 niveles en la vertical y tiene resoluciones horizontales de 0.44 ° x 0.44 ° (~ 50 km) y 0.22 ° x 0.22 ° (~ 25 km). El forzamiento de los límites inicial y lateral se toma de un nuevo análisis o de salidas de GCM (Taylor et al., 2015). Una descripción completa de la física del modelo se puede encontrar en Jones et al. (2004).

Para la fecha de ejecución del presente proyecto en Haití (primer semestre de 2019), los datos de precipitación diaria del modelo PRECIS no se encuentran disponibles. Únicamente es posible acceder a los datos de precipitación total mensual para 3 RCP (2.6, 4.5 y 8.5) en el período comprendido entre 1961 y 2100.

NEX-GDDP:

El conjunto de datos de las proyecciones a escala global diaria (NEX-GDDP) de la NASA Earth Exchange corresponde al resultado de la aplicación de un algoritmo de escalamiento estadístico para todo el globo, derivados del GCM realizado en el CMIP5 para los 4 RCP. El método de escalamiento se conoce como Bias-Correction Spatial Disaggregation (BCSD). El conjunto de datos NEX-GDDP incluye proyecciones a escala reducida para RCP 4.5 y RCP 8.5 de los 21 modelos y escenarios para los que se produjeron y distribuyeron escenarios diarios bajo CMIP5. Cada una de las proyecciones climáticas incluye la temperatura máxima diaria, la temperatura mínima y la precipitación para los períodos desde 1950 hasta 2100. La resolución espacial del conjunto de datos es de 0.25 grados (~ 25 km x 25 km) (Melton, 2015).

Cada una de las proyecciones climáticas incluye la temperatura máxima promedio mensual, la temperatura mínima y la precipitación para los períodos desde 1950 hasta 2005 ("corrida" retrospectiva) y desde 2006 hasta 2100 ("corrida" prospectiva).

Para la fecha de ejecución del presente proyecto en Haití (primer semestre de 2019), los datos de precipitación diaria del conjunto de datos NEX-GDDP se encuentran disponibles para el GCM seleccionado (CSIRO-Mk3-6-0). Por tanto, esta fuente de datos es seleccionada para el desarrollo del proyecto.

³ PRECIS - Datos disponibles en: http://clearinghouse.caribbeanclimate.bz/?db_type=Climat%20Model&country=&collection=V501&s=§or=&topic=

⁴ NEX-GDDP - Datos disponibles en: <https://cds.nccs.nasa.gov/nex-gddp/>

4.1.4.3 Selección de Trayectoria de Concentración Representativa (RCP)

A pesar de que para el estudio sería interesante realizar un análisis hidrológico considerando los 4 RCP disponibles para el GCM seleccionado, por motivos de optimización de recursos es necesario realizar una selección del RCP que sea de mayor interés para los objetivos planteados en el proyecto. En este sentido, dado que uno de los objetivos principales es realizar la evaluación de riesgo por inundación, considerando cambio climático, para influir en los diseños y alineamiento de 33 puentes vehiculares, para este estudio se considera que el mejor RCP es aquel que presente las condiciones más extremas de precipitación en Haití. Considerando esto, el procedimiento de selección del RCP que cumple con el criterio establecido obedece a un análisis estadístico comparativo entre los RCP 4.5 y 8.5, tanto para los valores medios como para los valores extremos de las proyecciones de precipitación entre 2006 y 2100.

La importancia del proceso de análisis de la serie de valores medios de precipitación históricos y de proyecciones de GCM radica en que; i) en dicha serie se puede establecer un rango de valores de tendencia central en el cual se sitúa la precipitación media diaria de un territorio específico y, ii) en que el análisis estadístico de estos valores de tendencia central permite establecer condiciones de estacionariedad y tendencia de los datos de precipitación.

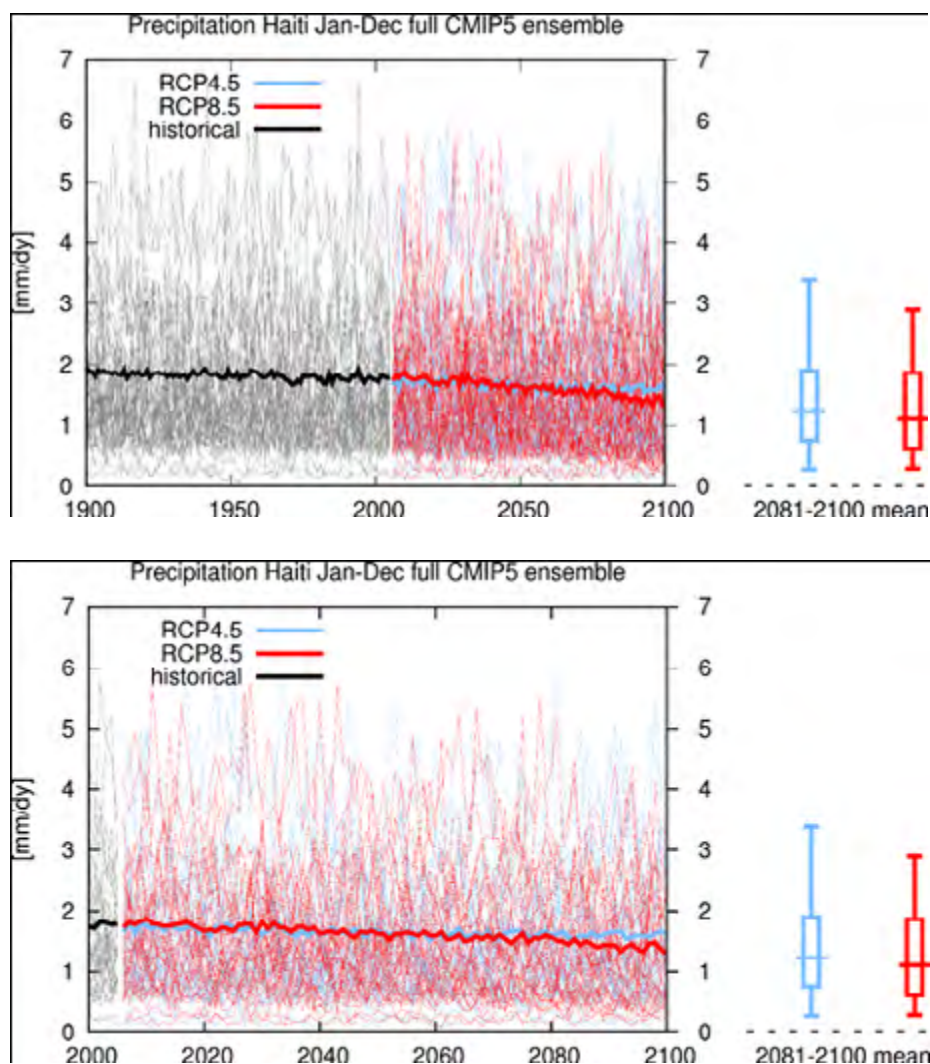
En primera instancia, considerando únicamente los valores medios de precipitación diaria entre 2006 y 2100 para el RCP 4.5 y 8.5 (Ver Figura 16), se evidencia que;

- i. El valor medio de precipitación diaria para el RCP 4.5 parece cumplir con la condición de estacionariedad. Por el contrario, para el RCP 8.5, esta condición se incumple a partir del año 2080 hasta 2100, dado que presenta un decrecimiento promedio total de 0.2 a 0.3 mm/día.
- ii. Para el período comprendido entre 2006 y 2079 se considera que el comportamiento del valor medio de precipitación diaria para los dos RCP es constante y tiende a estabilizarse entre 1.8 y 1.9 mm/día.
- iii. Considerando los aspectos mencionados en i) y ii), únicamente a partir de los valores medios de precipitación diaria proyectados, el RCP más crítico que se debe seleccionar para el proyecto sería el RCP4.5.
- iv. Como dato adicional, se observa que el valor medio de precipitación diaria entre el período “histórico” comprendido entre 1900 y 2005 se considera estable entre 1.8 y 1.95 mm/día, aproximadamente.

La Figura 16 se construye a partir de los resultados de precipitación diaria para todo el grupo de 45 modelos GCM pertenecientes al proyecto CMIP5, acotados para el territorio de Haití específicamente.

FIGURA 16

Precipitación media y extrema [mm/día] en Haití entre 1900-2100 para RCP 4.5 (Azul) y 8.5 (Rojo), considerando proyecciones de la totalidad de modelos del proyecto CMIP5.



Ahora bien, dado que el interés del proyecto se centra en las condiciones extremas de precipitación que, potencialmente, pueden generar eventos de inundación que afecten la operatividad de los puentes, el análisis estadístico comparativo entre los dos RCP se debe realizar considerando los valores extremos de precipitación proyectados entre 2006 y 2100.

Para realizar el análisis comparativo de valores extremos, se hace uso de los índices propuestos por el grupo de expertos CCI/CLIVAR/JCOMM en Índices de Detección de Cambio Climático (ETCCDI, por sus siglas en inglés)⁵.

⁵ETCCDI - web: <http://etccdi.pacificclimate.org/>

Del total de 27 índices de valores extremos definidos en ETCCDI, 11 están dedicados a la caracterización de valores extremos de precipitación. Los 16 índices restantes se encuentran enfocados en temperatura y velocidad del viento. Para el análisis comparativo entre RCPs se hace uso de 6 de los 11 índices extremos de precipitación.

TABLA 6

Índices de valores extremos de precipitación analizados.

Índice	Descripción	Expresión
R20mm	Recuento anual de días en que $PRCP \geq 20$ mm: Sea RR_{ij} la cantidad de precipitación diaria en el día i en el período j . Cuente el número de días donde:	$RR_{ij} \geq 20mm$
Rx1day	Precipitación máxima mensual de 1 día: Sea RR_{ij} la cantidad de precipitación diaria en el día i en el período j . El valor máximo de 1 día para el período j es:	$Rx1day_j = \max (RR_{ij})$
Rx5day	Máxima mensual consecutiva de 5 días de precipitación: Sea RR_{kj} la cantidad de precipitación para el intervalo de 5 días que termina en k , período j . Entonces los valores máximos de 5 días para el período j son:	$Rx5day_j = \max (RR_{kj})$
PRCPTOT	Precipitación total anual en días húmedos: Sea RR_{ij} la cantidad de precipitación diaria en el día i en el período j . Si l representa el número de días en j , entonces:	$PRCPTOT_j = \sum_{w=1}^W RR_{ij}$
R95pTOT	PRCP total anual cuando $RR > 95p$: Sea RR_{wj} la cantidad de precipitación diaria en un día húmedo w ($RR \geq 1,0$ mm) en el período j y sea RR_{wn95} el percentil 95 de precipitación en días húmedos en el período 1961-1990. Si W representa el número de días húmedos en el período, entonces:	$R95p_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \text{ donde } RR_{wj} > RR_{wn95}$
R99pTOT	PRCP total anual cuando $RR > 99p$: Sea RR_{wj} la cantidad de precipitación diaria en un día húmedo w ($RR \geq 1,0$ mm) en el período j y sea RR_{wn99} el percentil 99 de precipitación en días húmedos en el período 1961-1990. Si W representa el número de días húmedos en el período, entonces:	$R99p_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \text{ donde } RR_{wj} > RR_{wn99}$

Fuente: http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml

A continuación, se presenta el análisis estadístico comparativo entre los dos RCP en consideración, para cada uno de los índices de valores extremos presentados en la tabla anterior. El análisis se divide en 3 componentes; i) corresponde al análisis de varianza (ANOVA) para la comprobación de la hipótesis de que las medias de las dos poblaciones de datos son iguales, ii) corresponde a un análisis gráfico del índice entre 2006 y 2100 para cada RCP, en donde se evidencian valores extremos y tendencias lineales de cada conjunto de datos y, por último, iii) corresponde a las estadís-

ticas descriptivas de cada conjunto de datos de RCP, para cada índice analizado.

R20mm

La tabla de análisis ANOVA para este índice no rechaza la hipótesis de igualdad de medias de los dos conjuntos de datos de RCP, para un nivel de significancia alfa del 5%. Por tanto, se considera que con un nivel de confianza del 95%, las dos medias para R20mm se consideran iguales.

TABLA 7

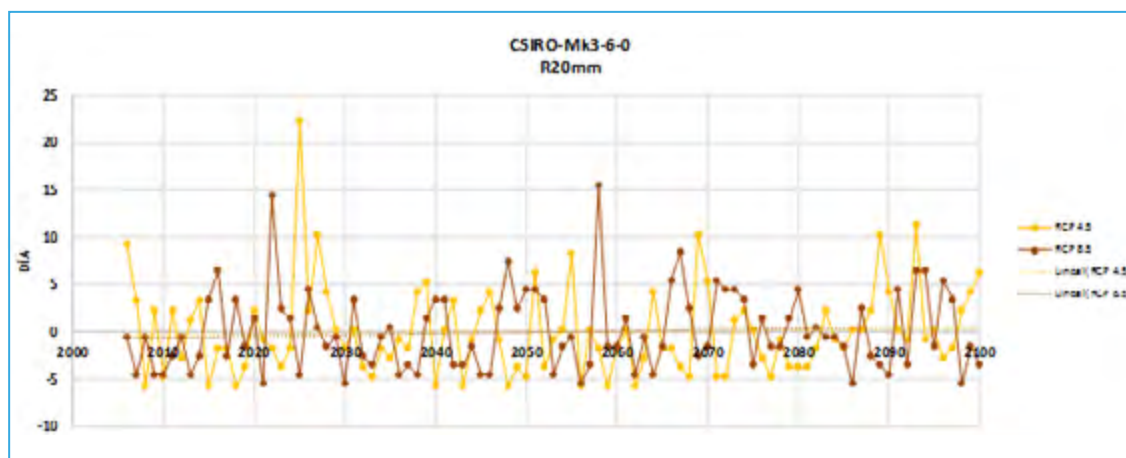
Prueba ANOVA para R20mm RCP4.5 vs. RCP8.5

Fuente de Var	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	F_max (alfa)
Tratamientos	1	4.86E-10	4.86E-10	2.43E-11	3.89
Error	188	3756.07	19.9791		
Total	189	3756.07			

La Figura 17 evidencia que la magnitud de la tendencia lineal (se asemeja a la media del conjunto de datos) es mayor entre 2006 y 2055 para el RCP4.5, mientras que entre 2055 y 2100 es mayor para el RCP8.5.

FIGURA 17

Figura 17 Resultados de índice R20mm (Annual count days when PRCP \geq 20mm) para Haití entre 2006 y 2100, de acuerdo con los modelos del proyecto CMIP5.



La Tabla 8 evidencia que la media aritmética del RCP4.5 es mayor, en magnitud. Los datos del RCP4.5 son más dispersos por un 10.2%, lo cual se refleja en la curtosis y el rango (28). Por último, el valor máximo alcanzado por los dos conjuntos de datos es de 22.231 días, correspondiente al RCP4.5.

TABLA 8

Estadísticas descriptivas R20mm RCP 4.5 vs. RCP 8.5

RCP 4.5		RCP 4.8	
Media	1.89E-06	Media	-1.30E-06
Error típico	0.482	Error típico	0.433
Mediana	-0.768	Mediana	-0.578
Moda	-1.768	Moda	-4.578
Desviación estándar	4.705	Desviación estándar	4.221
Varianza de la muestra	22.137	Varianza de la muestra	17.820
Curtosis	4.485	Curtosis	1.611
Coeficiente de asimetría	1.589	Coeficiente de asimetría	1.050
Rango	28.00	Rango	21.00
Mínimo	-5.768	Mínimo	-5.578
Máximo	22.231	Máximo	15.421
Suma	0.00018	Suma	-0.000124
Cuenta	95	Cuenta	95

Rx1Day

La tabla de análisis ANOVA para este índice no rechaza la hipótesis de igualdad de medias de los dos conjuntos de datos de RCP, para un nivel de significancia alfa del 5%. Por tanto, se considera que con un nivel de confianza del 95%, las dos medias para Rx1Day se consideran iguales.

TABLA 9

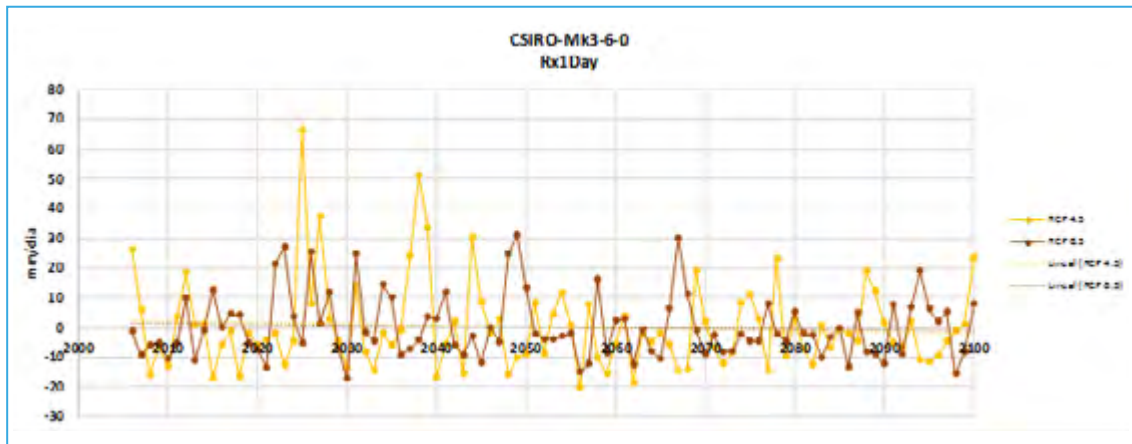
Prueba ANOVA para Rx1Day RCP4.5 vs. RCP8.5

Fuente de Var	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	F_max (alfa)
Tratamientos	1	1.46E-05	1.46E-05	8.73E-08	3.89
Error	188	31515.9	167.638		
Total	189	31515.9			

La Figura 18 evidencia que la magnitud de la tendencia lineal (se asemeja a la media del conjunto de datos) es mayor entre 2006 y 2055 para el RCP4.5, mientras que entre 2055 y 2100 es mayor para el RCP8.5.

FIGURA 18

Resultados de índice Rx1Day (Monthly maximum 1-day precipitation) para Haití entre 2006 y 2100, de acuerdo con los modelos del proyecto CMIP5.



La Tabla 10 evidencia que la media aritmética del RCP4.5 es mayor, en magnitud. Los datos del RCP4.5 son más dispersos por un 27.8%, lo cual se refleja en la curtosis y el rango (86.6). Por último, el valor máximo alcanzado por los dos conjuntos de datos es de 66.314 mm/día, correspondiente al RCP4.5.

TABLA 10

Estadísticas descriptivas Rx1Day RCP 4.5 vs. RCP 8.5

RCP 4.5		RCP 8.5	
Media	1.84E-05	Media	-8.55E-06
Error típico	1.523	Error típico	1.099
Mediana	-2.416	Mediana	-2.406
Moda	-2.215	Moda	-8.954
Desviación estándar	14.848	Desviación estándar	10.712
Varianza de la muestra	220.476	Varianza de la muestra	114.760
Curtosis	4.628	Curtosis	0.733
Coeficiente de asimetría	1.805	Coeficiente de asimetría	1.037
Rango	86.640	Rango	48.130
Mínimo	-20.325	Mínimo	-17.378
Máximo	66.314	Máximo	30.751
Suma	0.00175	Suma	-0.0008131
Cuenta	95	Cuenta	95

Rx5Day

La tabla de análisis ANOVA para este índice no rechaza la hipótesis de igualdad de medias de los dos conjuntos de datos de RCP, para un nivel de significancia alfa del 5%. Por tanto, se considera que con un nivel de confianza del 95%, las dos medias para Rx5Day se consideran iguales.

TABLA 11

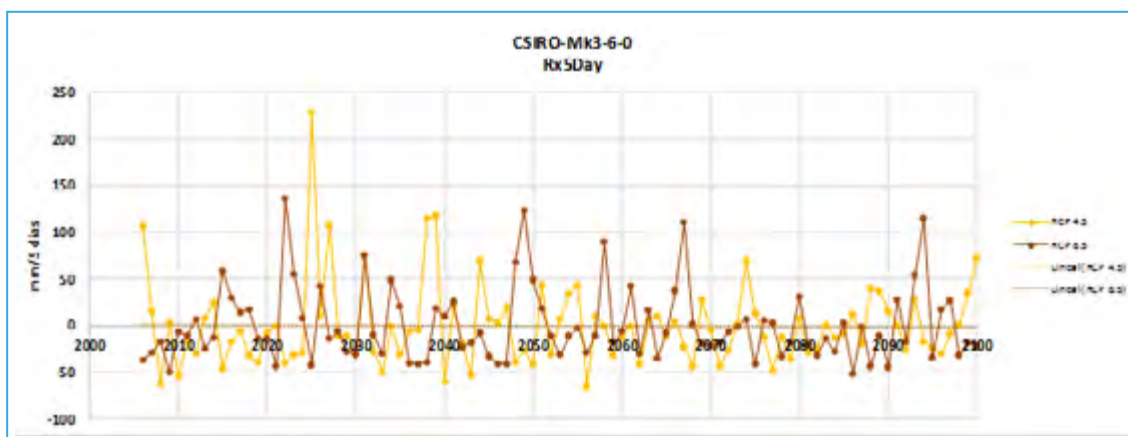
Tabla 11 Prueba ANOVA para Rx5Day
RCP4.5 vs. RCP8.5

Fuente de Var	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	F_max (alfa)
Tratamientos	1	1.46E-05	1.40E-05	7.79E-09	3.89
Error	188	338623	1801.19		
Total	189	338623			

La Figura 19 evidencia que la magnitud de la tendencia lineal (se asemeja a la media del conjunto de datos) para los dos conjuntos de datos no presenta variaciones visibles en todo el rango de años.

FIGURA 19

Resultados de índice Rx5Day (Monthly maximum consecutive 5-day precipitation) para Haití entre 2006 y 2100, de acuerdo con los modelos del proyecto CMIP5.



La Tabla 12 evidencia que la media aritmética del RCP4.5 es mayor, en magnitud. Los datos del RCP4.5 son más dispersos por un 11.9%, lo cual se refleja en la curtosis y el rango (293.9). Por último, el valor máximo alcanzado por los dos conjuntos de datos es de 228.59 mm/5 días, correspondiente al RCP4.5.

TABLA 12

Estadísticas descriptivas Rx5Day RCP 4.5 vs. RCP 8.5

RCP 4.5		RCP 8.5	
Media	1.94E-05	Media	-2.56E-05
Error típico	4.622	Error típico	4.068
Mediana	-7.163	Mediana	-10.868
Moda	#N/A	Moda	#N/A
Desviación estándar	45.052	Desviación estándar	39.656
Varianza de la muestra	2029.690	Varianza de la muestra	1572.630
Curtosis	6.811	Curtosis	2.104
Coeficiente de asimetría	2.043	Coeficiente de asimetría	1.446
Rango	293.964	Rango	186.990
Mínimo	-65.371	Mínimo	-51.232
Máximo	228.593	Máximo	135.758
Suma	0.0018446	Suma	-0.00244
Cuenta	95	Cuenta	95

PRCPTOT

La tabla de análisis ANOVA para este índice no rechaza la hipótesis de igualdad de medias de los dos conjuntos de datos de RCP, para un nivel de significancia alfa del 5%. Por tanto, se considera que con un nivel de confianza del 95%, las dos medias para PRCPTOT se consideran iguales.

TABLA 13

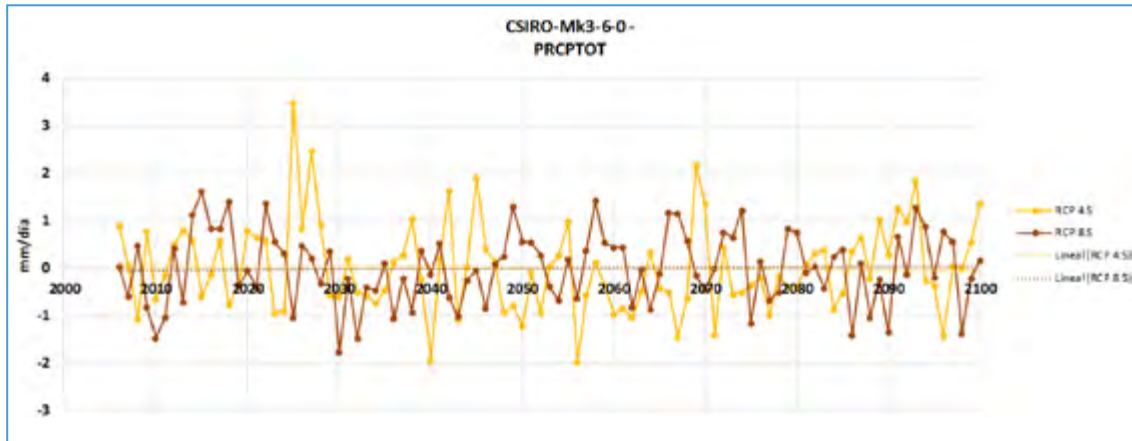
Prueba ANOVA para PRCPTOT RCP4.5 vs. RCP8.5

Fuente de Var	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	F_max (alfa)
Tratamientos	1	2.06E-10	2.06E-10	2.82E-10	3.89
Error	188	137.25	0.730054		
Total	189	137.25			

La Figura 20 evidencia que la magnitud de la tendencia lineal (se asemeja a la media del conjunto de datos) es mayor entre 2006 y 2055 para el RCP4.5, mientras que entre 2055 y 2100 es mayor para el RCP8.5.

FIGURA 20

Resultados de índice PRCPTOT (Annual total precipitation in wet days) para Haití entre 2006 y 2100, de acuerdo con los modelos del proyecto CMIP5.



La Tabla 14 evidencia que la media aritmética del RCP8.5 es mayor, en magnitud. Los datos del RCP4.5 son más dispersos por un 18.4%, lo cual se refleja en la curtosis y el rango (5.45). Por último, el valor máximo alcanzado por los dos conjuntos de datos es de 3.47 mm/día, correspondiente al RCP4.5.

TABLA 14

Tabla 14 Estadísticas descriptivas PRCPTOT RCP 4.5 vs. RCP 8.5

RCP 4.5		RCP 8.5	
Media	-2.13E-07	Media	-1.52E-07
Error típico	0.096	Error típico	0.078
Mediana	-0.142	Mediana	0.024
Moda	#N/A	Moda	#N/A
Desviación estándar	0.936	Desviación estándar	0.763
Varianza de la muestra	0.877	Varianza de la muestra	0.582
Curtosis	1.477	Curtosis	-0.521
Coeficiente de asimetría	0.797	Coeficiente de asimetría	-0.103
Rango	5.455	Rango	3.394
Mínimo	-1.981	Mínimo	-1.781
Máximo	3.474	Máximo	1.612
Suma	-2.025E-05	Suma	-1.45E-05
Cuenta	95	Cuenta	95

R95pTOT

La tabla de análisis ANOVA para este índice no rechaza la hipótesis de igualdad de medias de los dos conjuntos de datos de RCP, para un nivel de significancia alfa del 5%. Por tanto, se considera que con un nivel de confianza del 95%, las dos medias para R95pTOT se consideran iguales.

TABLA 15

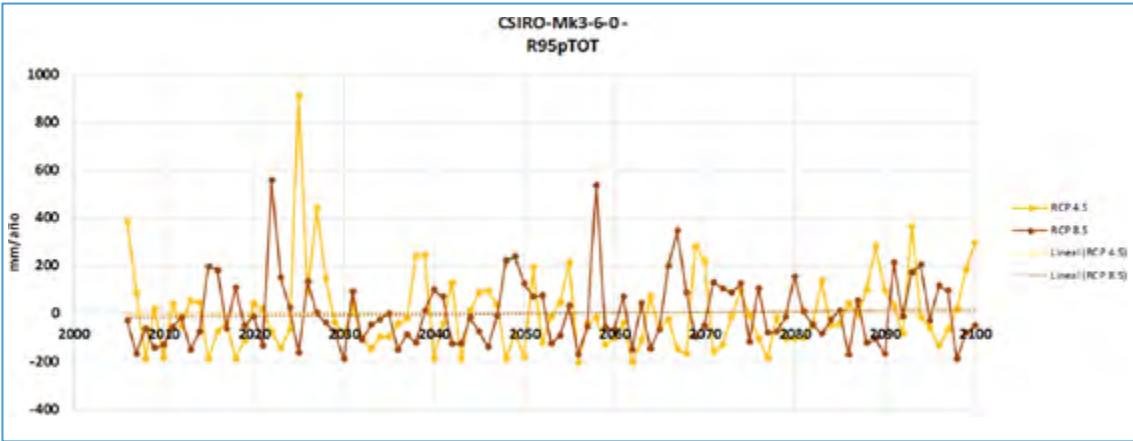
Prueba ANOVA para R95pTOT RCP4.5 vs. RCP8.5

Fuente de Var	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	F_max (alfa)
Tratamientos	1	0.000913	0.000913	3.71E-08	3.89
Error	188	4634790	24653.1		
Total	189	4634790			

La Figura 21 evidencia que la magnitud de la tendencia lineal (se asemeja a la media del conjunto de datos) es mayor entre 2006 y 2055 para el RCP4.5, mientras que entre 2055 y 2100 es mayor para el RCP8.5.

FIGURA 21

Resultados de índice R95pTOT (Annual total PRCP when RR>95p) para Haití entre 2006 y 2100, de acuerdo con los modelos del proyecto CMIP5.



La Tabla 16 evidencia que la media aritmética del RCP8.5 es mayor, por un orden de magnitud. Los datos del RCP4.5 son más dispersos por un 16.8%, lo cual se refleja en la curtosis y el rango (1117). Por último, el valor máximo alcanzado por los dos conjuntos de datos es de 908.43 mm/año, correspondiente al RCP4.5.

TABLA 16

Estadísticas descriptivas R95pTOT RCP 4.5 vs. RCP 8.5

RCP 4.5		RCP 8.5	
Media	-3.92E-05	Media	-6.52E-06
Error típico	17.522	Error típico	14.561
Mediana	-40.323	Mediana	-30.200
Moda	-209.218	Moda	-192.661
Desviación estándar	170.787	Desviación estándar	141.927
Varianza de la muestra	29168.518	Varianza de la muestra	20143.310
Curtosis	7.740	Curtosis	3.087
Coeficiente de asimetría	2.091	Coeficiente de asimetría	1.406
Rango	1117.648	Rango	747.093
Mínimo	-209.218	Mínimo	-192.661
Máximo	908.43	Máximo	554.432
Suma	-0.00373	Suma	-0.00062
Cuenta	95	Cuenta	95

R99pTOT

La tabla de análisis ANOVA para este índice no rechaza la hipótesis de igualdad de medias de los dos conjuntos de datos de RCP, para un nivel de significancia alfa del 5%. Por tanto, se considera que con un nivel de confianza del 95%, las dos medias para R99pTOT se consideran iguales.

TABLA 17

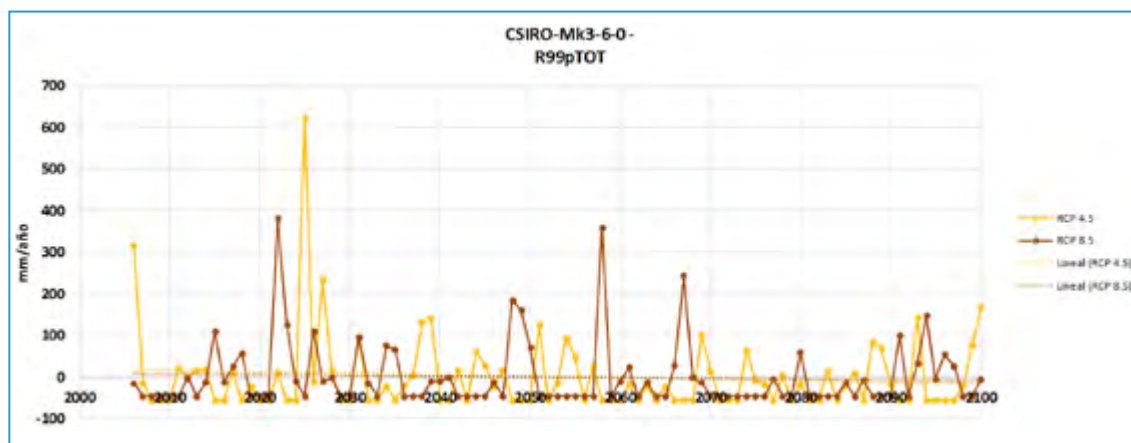
Prueba ANOVA para R99pTOT RCP4.5 vs. RCP8.5

Fuente de Var	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	F_max (alfa)
Tratamientos	1	4.67E-08	4.67E-08	6.03E-12	3.89
Error	188	1457060	7750.34		
Total	189	1457060			

La Figura 22 evidencia que la magnitud de la tendencia lineal (se asemeja a la media del conjunto de datos) es mayor entre 2006 y 2055 para el RCP4.5, mientras que entre 2055 y 2100 es mayor para el RCP8.5.

FIGURA 22

Figura 22 Resultados de índice R99pTOT (Annual total PRCP when RR>99p) para Haití entre 2006 y 2100, de acuerdo con los modelos del proyecto CMIP5.



La Tabla 18 evidencia que la media aritmética del RCP4.5 es mayor, en magnitud. Los datos del RCP4.5 son más dispersos por un 14.9%, lo cual se refleja en la curtosis y el rango (675.9). Por último, el valor máximo alcanzado por los dos conjuntos de datos es de 621.26 mm/año, correspondiente al RCP4.5.

TABLA 18

Estadísticas descriptivas R99pTOT RCP 4.5 vs. RCP 8.5

RCP 4.5		RCP 8.5	
Media	1.35E-05	Media	-1.77E-05
Error típico	9.729	Error típico	8.276
Mediana	-21.720	Mediana	-45.242
Moda	-54.678	Moda	-45.242
Desviación estándar	94.828	Desviación estándar	80.673
Varianza de la muestra	8992.478	Varianza de la muestra	6508.192
Curtosis	20.030	Curtosis	8.830
Coefficiente de asimetría	3.772	Coefficiente de asimetría	2.756
Rango	675.941	Rango	425.544
Mínimo	-54.678	Mínimo	-45.242
Máximo	621.263	Máximo	380.302
Suma	0.00129	Suma	-0.00169
Cuenta	95	Cuenta	95

SDII

La tabla de análisis ANOVA para este índice no rechaza la hipótesis de igualdad de medias de los dos conjuntos de datos de RCP, para un nivel de significancia alfa del 5%. Por tanto, se considera que con un nivel de confianza del 95%, las dos medias para SDII se consideran iguales.

TABLA 19

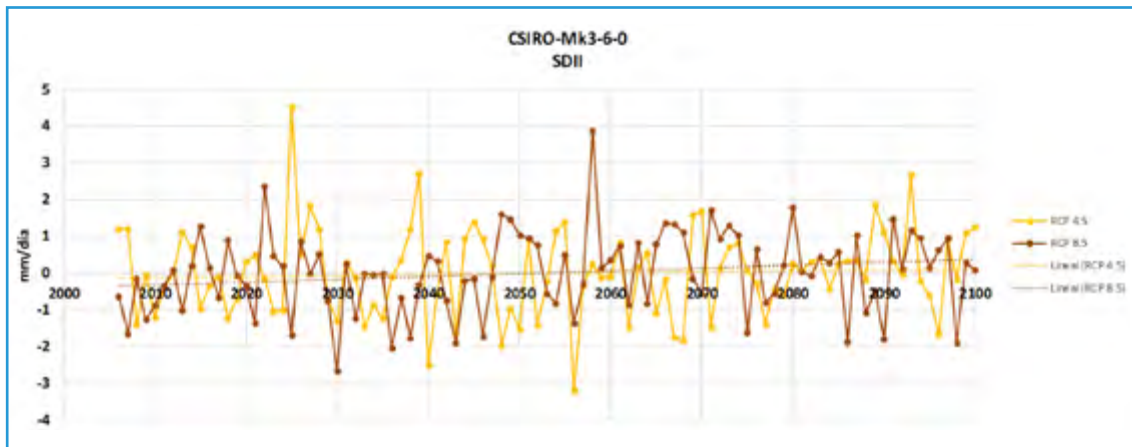
Prueba ANOVA para SDII RCP4.5 vs. RCP8.5

Fuente de Var	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	F_max (alfa)
Tratamientos	1	3.89E-11	3.89E-11	2.96E11	3.89
Error	188	247.148	1.31462		
Total	189	247.148			

La Figura 23 evidencia que la magnitud de la tendencia lineal (se asemeja a la media del conjunto de datos) es mayor entre 2006 y 2055 para el RCP4.5, mientras que entre 2055 y 2100 es mayor para el RCP8.5.

FIGURA 23

Resultados de índice SDII (Simple precipitation intensity index) para Haití entre 2006 y 2100, de acuerdo con los modelos del proyecto CMIP5.



La Tabla 20 evidencia que la media aritmética del RCP4.5 es mayor, en magnitud. Los datos del RCP4.5 son más dispersos por un 8.2%, lo cual se refleja en la curtosis y el rango (7.73). Por último, el valor máximo alcanzado por los dos conjuntos de datos es de 4.512 mm/día, correspondiente al RCP4.5.

TABLA 20

Estadísticas descriptivas SDII RCP 4.5 vs. RCP 8.5

RCP 4.5		RCP 8.5	
Media	2.92E-07	Media	-2.70E-07
Error típico	0.122	Error típico	0.112
Mediana	-0.041	Mediana	0.070
Moda	#N/A	Moda	#N/A
Desviación estándar	1.194	Desviación estándar	1.096
Varianza de la muestra	1.426	Varianza de la muestra	1.202
Curtosis	1.535	Curtosis	0.759
Coeficiente de asimetría	0.399	Coeficiente de asimetría	0.158
Rango	7.731	Rango	6.543
Mínimo	-3.218	Mínimo	-2.677
Máximo	4.512	Máximo	3.865
Suma	2.7799E-05	Suma	-2.57E-05
Cuenta	95	Cuenta	95

A partir del análisis para los indicadores de valores extremos presentados en la Tabla 6, es posible concluir lo siguiente:

i. Para ninguno de los índices de valores extremos, las pruebas anova permitieron descartar la hipótesis de que las medias de los dos conjuntos de datos son iguales. Por tanto, con un nivel de confianza del 95% se puede asegurar que las medias de valores extremos para los dos RCP, son iguales en todos los casos.

ii. Las tendencias lineales de los dos conjuntos de datos mostraron que, en la mayoría de los índices, para el rango entre 2006 y 2055 el RCP4.5 es ligeramente superior. Mientras que, para el rango entre 2055 y 2100 las condicio-

nes se invierten y el RCP8.5 es ligeramente superior.

iii. Como evidencia de las gráficas y de los valores de desviación estándar de la totalidad de índices, se concluye que el conjunto de datos del RCP4.5 es el que presenta una mayor dispersión con respecto a la media.

iv. Consecuencia de lo anterior, para todos los índices, el RCP4.5 presenta el rango más amplio.

v. Finalmente, para todos los índices analizados, el RCP4.5 presentó los valores extremos máximos.

Como consecuencia de los puntos antes mencionados, el RCP seleccionado para el proyecto corresponde al RCP4.5 por evidenciar ser la proyección que, específicamente para Haití, presenta las condiciones de precipitación diaria más extremas en la proyección arrojada por los modelos del CMIP5 entre 2006 y 2100.

4.1.4.4 Localización de nodos con datos de precipitación a partir de GCM

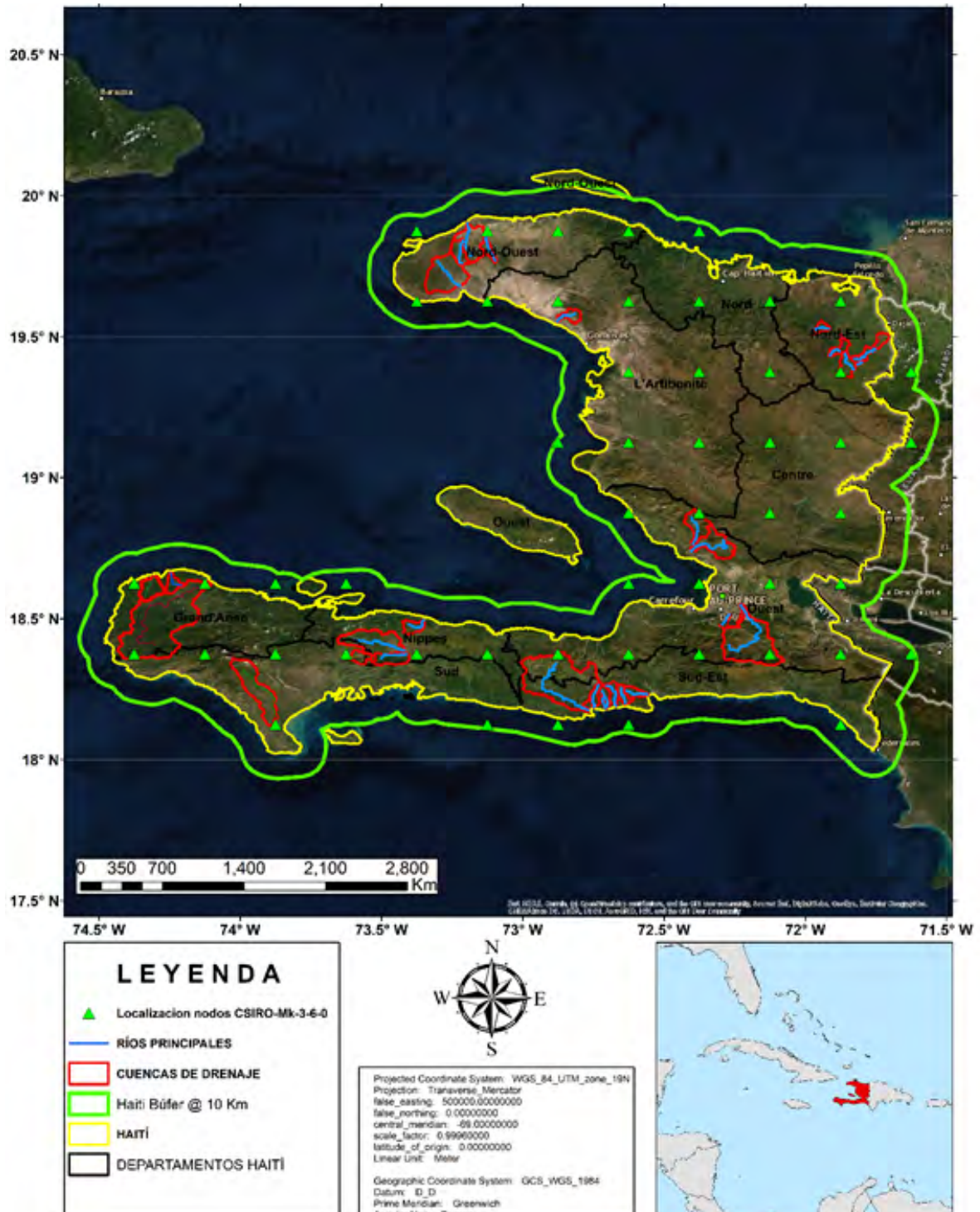
A partir del GCM CSIRO-Mk3-6-0, para el RCP4.5 y los datos del escalamiento estadístico BCSD, de la plataforma NEX-GDDP, se obtiene un total de 52 nodos distribuidos de forma equidistante cada 25 kilómetros que cubren el territorio haitiano. Los 52 nodos se encuentran en la región insular más una zona de búfer de 10 km a lo largo de la costa, con el objetivo de vincular al análisis nodos que se encuentren en el mar Caribe que permitan alimentar el análisis hidrológico para aquellas cuencas de drenaje que desembocan en él. La Figura 24 presenta la localización de los nodos que serán objeto de análisis en el modelo hidrológico propuesto.



Puente sobre el río Militon, Bainet

FIGURA 24

Localización de nodos de modelo CSIRO-Mk-3-6-0, escalado a partir de escalamiento de precipitación (Global Daily Down-scaled Projections NEX-GDDP). Downscaling estadístico BCSD.



4.1.5 Cobertura vegetal

La información de cobertura vegetal para Haití proviene del producto Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Land Cover Type (MCD12Q1). Este producto provee un mapa de cobertura vegetal con una resolución espacial de 500 metros para todo el globo. La información de tipos y clases de cobertura se obtienen a partir de la aplicación de un algoritmo de clasificación de características espectro-temporales.

El sistema de clasificación que define las clases de cobertura vegetal, entre las cuales se

realiza el proceso de interpretación de la reflectancia de cada pixel analizado, corresponde a la propuesta por el International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP). A partir de un proceso de reclasificación del tipo de clases del sistema IGBP en función de las clases de cobertura vegetal presentes en el método de número de curva (CN) del SCS, se obtiene la información presentada en la Tabla 21. En ella se especifican las clases de cobertura vegetal utilizadas para el modelo hidrológico de precipitación-escorrentía en las cuencas de análisis.

TABLA 21

Clases de cobertura vegetal. Sistema IGBP

Clase	Descripción	Clasificación SCS (CN)
1	Tierras dominadas por vegetación arbolada acorde, con un porcentaje de cobertura > 60% y altura superior a 2 m. Casi todos los árboles permanecen verdes todo el año. El dosel nunca está sin follaje verde.	Bosque de hoja perenne
2	Terrenos dominados por vegetación boscosa de hoja ancha con un porcentaje de cobertura > 60% y altura superior a 2 m. Casi todos los árboles y arbustos permanecen verdes durante todo el año. El dosel nunca está sin follaje verde.	Bosque siempreverde de hoja ancha
3	Terrenos dominados por vegetación boscosa con un porcentaje de cobertura > 60% y altura superior a 2 m. Consiste en comunidades de árboles de hoja de aguja estacional con un ciclo anual de períodos de entrada y salida de hojas.	Bosque caducifolio
4	Terrenos dominados por vegetación boscosa con un porcentaje de cobertura > 60% y altura superior a 2 m. Consiste en comunidades arbóreas de hoja ancha con un ciclo anual de períodos de entrada y salida de hojas.	Bosque de hoja ancha de hoja caduca
5	Terrenos dominados por árboles con una cobertura porcentual > 60% y altura superior a 2 m. Consiste en comunidades de árboles con mezclas intercaladas o mosaicos de los otros cuatro tipos de bosques. Ninguno de los tipos de bosque excede el 60% del paisaje.	Bosque mixto
6	Terrenos con vegetación leñosa de menos de 2 m de altura y con cobertura de dosel de arbustos > 60%. El follaje de los arbustos puede ser de hoja perenne o de hoja caduca.	Arbustos cerrados
7	Terrenos con vegetación leñosa de menos de 2 m de altura y con cobertura de dosel de arbustos entre el 10% y el 60%. El follaje de los arbustos puede ser de hoja perenne o de hoja caduca.	Arbustos abiertos
8	Terrenos con sistemas herbáceos y otros sotobosques, y con cobertura de dosel forestal entre 30% y 60%. La altura de la cubierta forestal supera los 2 m.	Sabanas leñosas
9	Terrenos con sistemas herbáceos y otros sotobosques, y con cobertura de dosel forestal entre 10% y 30%. La altura de la cubierta forestal supera los 2 m.	Sabanas

Clase	Descripción	Clasificación SCS (CN)
10	Terrenos con coberturas herbáceas. La cobertura de árboles y arbustos es inferior al 10%.	Pastizales
11	Terrenos con una mezcla permanente de agua y vegetación herbácea o leñosa. La vegetación puede estar presente en agua salada, salobre o dulce.	Humedales permanentes
12	Tierras cubiertas con cultivos temporales seguidos de cosecha y un período de suelo desnudo (por ejemplo, sistemas de cultivo simples y múltiples). Tenga en cuenta que los cultivos leñosos perennes se clasificarán como el tipo de cobertura de bosque o arbusto apropiado.	Tierras de cultivo
13	Terreno cubierto por edificios y otras estructuras hechas por el hombre.	Terrenos urbanos y urbanizados.
14	Tierras con un mosaico de tierras de cultivo, bosques, matorrales y pastizales en los que ningún componente comprende más del 60% del paisaje.	Tierras de cultivo / mosaicos de vegetación natural
15	Tierras cubiertas de nieve / hielo durante todo el año.	Nieve permanente y hielo
16	Tierras con tierra, arena, rocas o nieve expuestas, y nunca tienen más del 10% de cobertura vegetal durante cualquier época del año.	Árido
17	Océanos, mares, lagos, embalses y ríos. Pueden ser cuerpos de agua dulce o salada.	Cuerpos de agua
255	N/A	Cuerpos de agua Sin clasificar

Considerando las clases de cobertura vegetal presentes en el territorio haitiano según la fuente de información utilizada (Ver Figura 25), se concluye que, del total de la superficie del país, el 25% corresponde a sabanas. El 20% del territorio corresponde a tierras de cultivo y mosaicos de vegetación natural. Otro 20% corresponde a pastizales. El 11% corresponde a tierras dedicadas completamente a cultivo. Y sólo el 1.4% corresponde a terrenos urbanos y urbanizados.

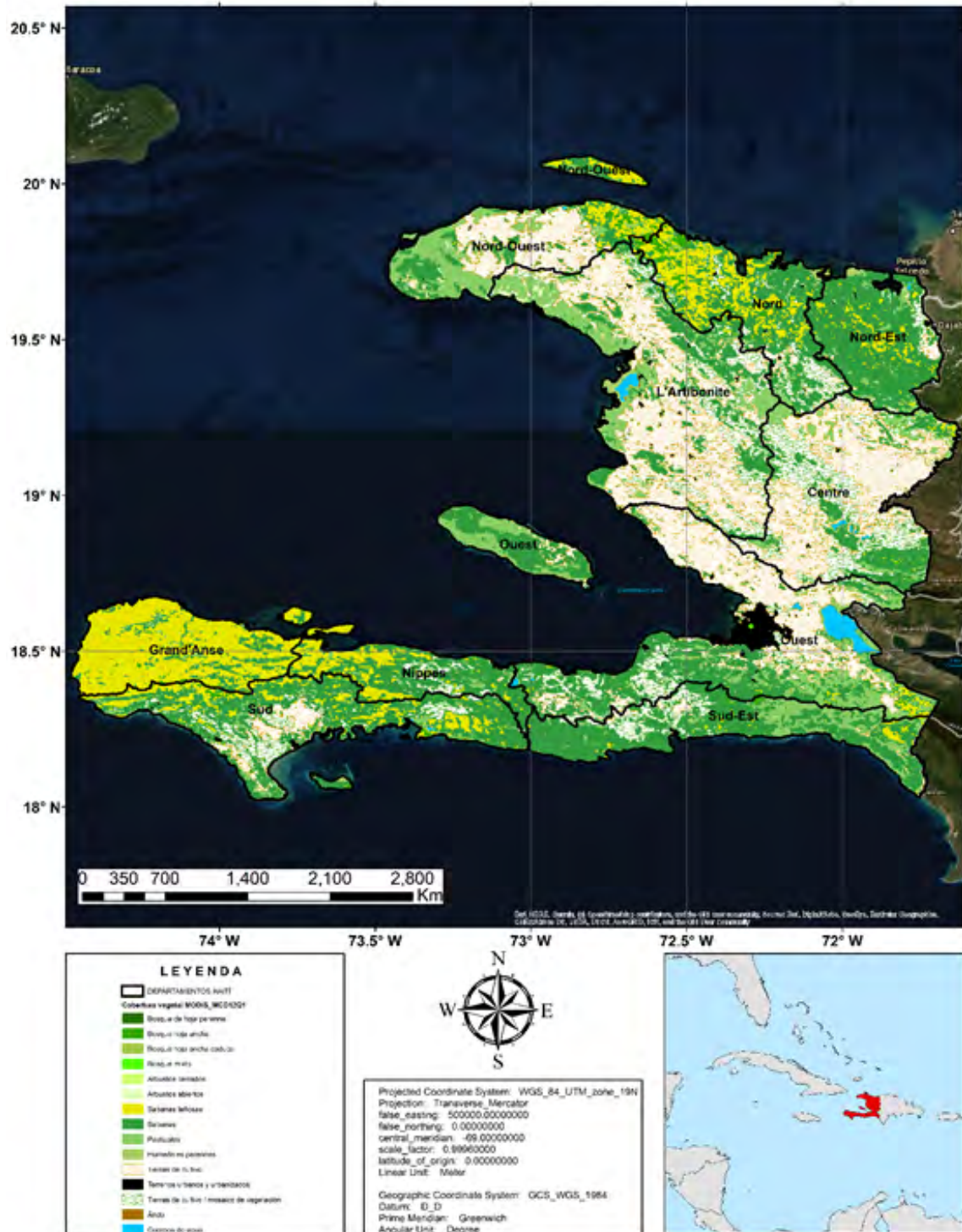
TABLA 22

Participación de clases de cobertura vegetal en el territorio haitiano, por superficie.

	Descripción	Clasificación SCS (CN)
Bosque de hoja ancha de hoja caduca	1	0.01
Bosque mixto	1	0.01
Bosque de hoja perenne	6	0.07
Arbustos cerrados	7	0.08
Áridos	22	0.26
Arbustos abiertos	43	0.51
Terrenos urbanos y urbanizados	123	1.47
Bosque siempre verde de hoja ancha	207	2.47
Cuerpos de agua	221	2.64
Humedales permanentes	335	4.01
Sabanas leñosas	821	9.82
Tierras de cultivo	980	11.72
Pastizales	1719	20.55
Tierras de cultivo / mosaico de vegetación natural	1735	20.74
Sabanas	2143	25.62
TOTAL	8364	100

FIGURA 25

Cobertura vegetal en Haití @ 500 metros.



Fuente: Friedl, M., Sulla-Menashe, D. (2015). MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi: 10.5067/MODIS/MCD12Q1.006

4.1.6 Tipo de suelo

La fuente de información del tipo de suelo utilizada para caracterizar el componente de pérdidas del modelo hidrológico de precipitación-escorrentía a partir del método de número de curva del SCS, corresponde a “SoilGrids250m: global gridded soil information based on Machine Learning” (Hengl, T. et al., 2007). El sistema SoilGrids contempla el mapeo automático de tipos de suelo basados en métodos de predicción espacial actualizados con el estado del arte, haciendo uso de algoritmos de aprendizaje automático (machine learning).

Los datos que se utilizan para realizar la predicción de los tipos de suelo corresponden a; i) información disponible de perfiles de suelo a nivel global y, ii) datos ambientales covariados. La resolución espacial para la cual se obtiene el mapa en el caso de Haití es de 250 metros.

El sistema de clasificación de tipos de suelo usado por SoilGrids250m corresponde al World Reference Base (WRB) (FAO, 2015). De acuerdo con este sistema de clasificación y la información suministrada por SoilGrids250m, la participación de los tipos de suelo en el territorio haitiano se presenta en la siguiente tabla.

TABLA 23

Participación de tipos de suelo en el territorio haitiano, por superficie. Sistema de clasificación WRB

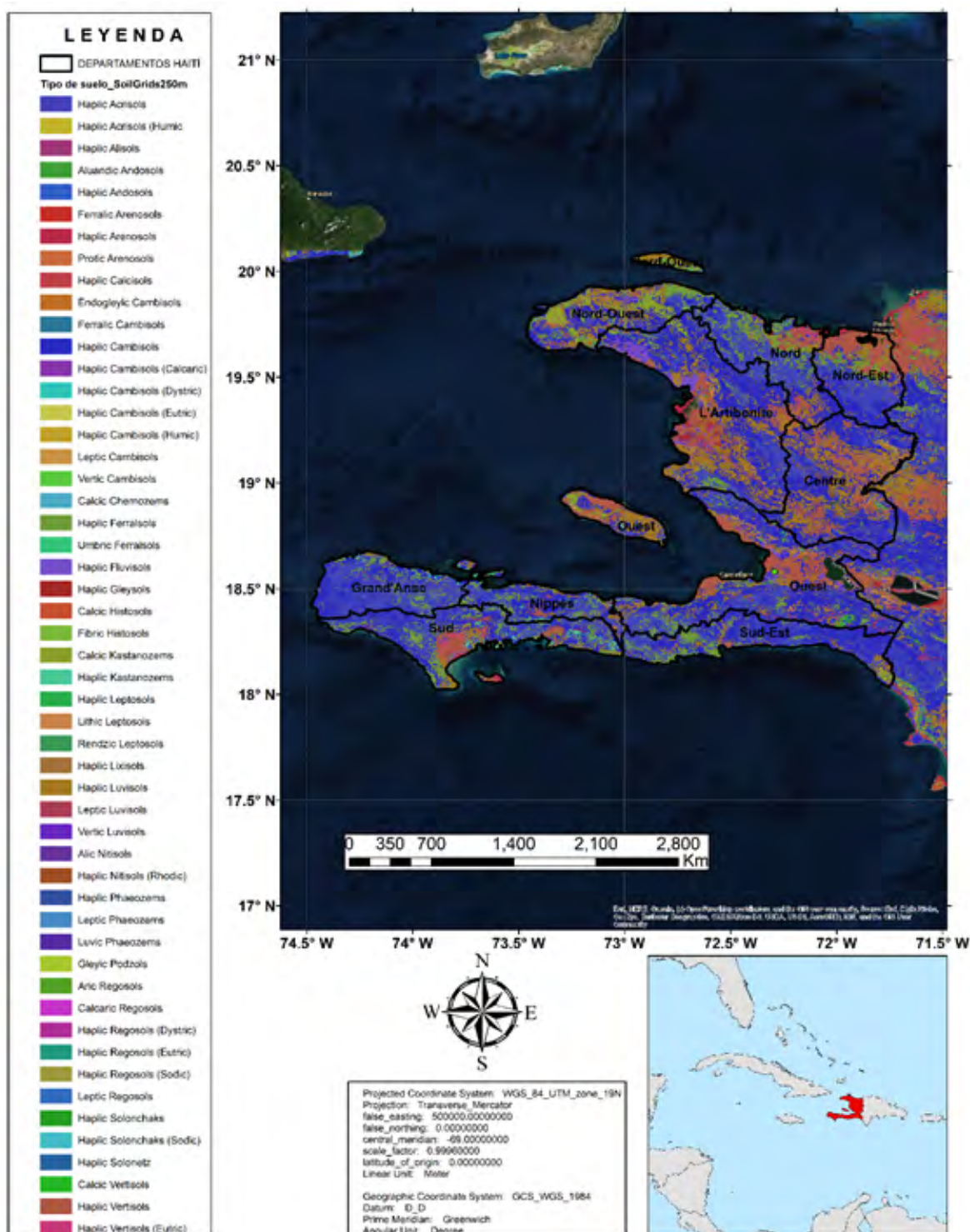
Clases suelo	Tipo de suelo	Frecuencia	Participación (%)
11	Haplic Alisols	1835	1.27
48	Haplic Fluvisols	1921	1.33
72	Rendzic Leptosols	2001	1.39
17	Haplic Arenosols	2176	1.51
73	Haplic Lixisols	2253	1.56
66	Calcic Kastanozems	2319	1.61
117	Haplic Vertisols (Eutric)	2488	1.73
70	Lithic Leptosols	2582	1.79
67	Haplic Kastanozems	2668	1.85
87	Haplic Phaeozems	2794	1.94
116	Haplic Vertisols	11682	8.11
44	Haplic Ferralsols	20429	14.18
1	Haplic Acrisols	23016	15.98
79	Haplic Livisols	24602	17.08
27	Haplic Cambisols	32972	22.89
	TOTAL	144037	100

De acuerdo con la tabla anterior, en Haití se presentan, en un 14% suelos con presencia ferrosa y de aluminio (Ferralsols). Con un 15% se presentan suelos de tipo ácido (Acrisols), con elevados niveles de arcillas alteradas. Con un 17% se presentan suelos con características de acumulación de arcillas en zonas profundas (Luvisols). Y, por último, con un 23% se presentan suelos que se desarrollan sobre materiales de alteración de rocas, usualmente depósitos de carácter eólico, aluvial o coluvial.

En la Figura 26 se presenta el mapa de tipos de suelo presentes en Haití, de acuerdo con la información proporcionada por SoilGrids250m (Hengl, T. et al., 2007) considerando el sistema de clasificación WRB.

FIGURA 26

Tipos de suelo en Haití @ 250 metros.



Fuente: Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B.M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M. et al. (2017) SoilGrids250m: global gridded soil information based on Machine Learning. PLoS ONE 12(2): e0169748. doi:10.1371/journal.pone.0169748

4.1.6.1 Grupo de suelo para número de curva (CN)

A partir del tipo de suelo presente en el territorio, es posible obtener un potencial de escorrentía, el cual se puede traducir en un grupo hidrológico de suelo. Este grupo, posteriormente se debe combinar con la información de cobertura vegetal para obtener el valor final de número de curva en cada punto del territorio (Ver Figura 6).

La fuente de información a partir de la cual se obtiene el grupo hidrológico de suelo corresponde a “Global Hydrologic Soil Groups

(HYSOGs250m) for Curve Number-Based Runoff Modeling” (Ross, C.W. et al. 2018). La base de datos HYSOGs250m agrupa los tipos de suelo de todo el globo en grupos de suelos hidrológicos homogéneos con una resolución espacial de 250 metros. A partir de esta agrupación, se generan 8 grupos (Ver Tabla 24) para los cuales se establece el potencial de escorrentía asociado según la composición del suelo entre arena, limo y/o arcilla. La clasificación de los grupos homogéneos de suelos hidrológicos se deriva de las clases de textura y profundidad del suelo hasta el nivel en roca, proporcionado por el sistema del suelo soil-Grids250m de la FAO.

TABLA 24

Descripción de potencial de escorrentía de acuerdo a composición del suelo. HYSOGs250m. Participación (%) de grupos hidrológicos de suelo en Haití.

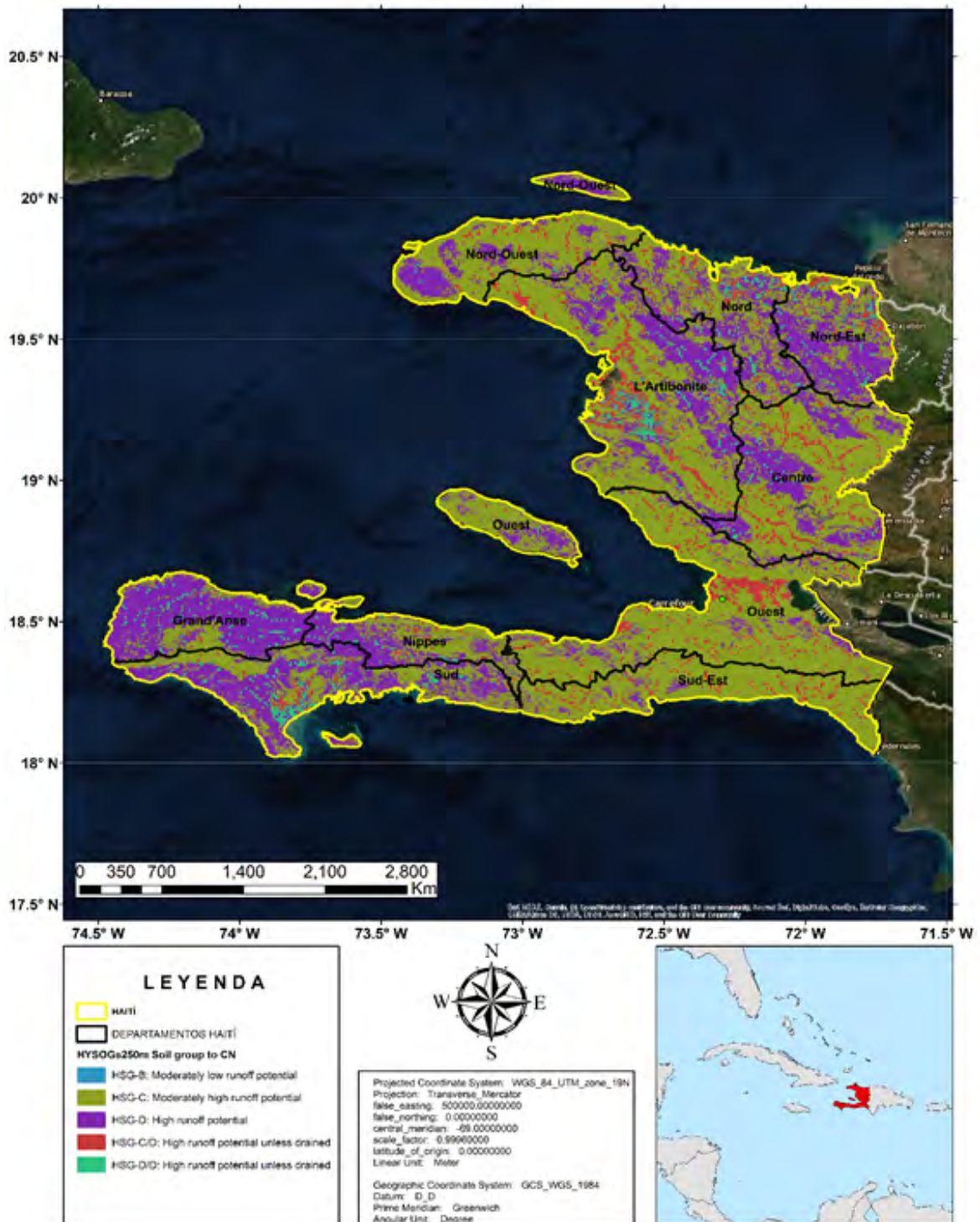
Valores de pixel	Descripción	Frecuencia	Participación (%)
1	HSG-A: bajo potencial de es correntía (>90% arena y <10% arcilla)	0	0.00
2	HSG-B: moderadamente bajo potencial de es correntía (50%-90% arena y 10-20% arcilla)	2	0.00
3	HSG-C: moderadamente alto potencial de escorrentía (<50% arena y 20-40% arcilla)	15780	38.56
4	HSG-D: alto potencial de es correntía (<50% arena y > 40% arcilla)	16219	39.64
11	HSG-A/D: alto potencial de es correntía a menos que esté drenado (>90% arena y <10% arcilla)	0	0.00
12	HSG-B/D: alto potencial de es correntía a menos que esté drenado (50%-90% arena y 10-20% arcilla)	0	0.00
13	HSG-C/D: alto potencial de es correntía a menos que esté drenado (<50% arena Y 20-40% arcilla)	5138	12.56
14	HSG-D/D: alto potencial de es correntía a menos que esté drenado (<50% arena Y >40% arcilla)	3781	9.24
TOTAL		40920	100

De acuerdo con la clasificación de grupos hidrológicos de suelo definidos para Haití, se concluye que cerca del 80% presenta potencial de escorrentía moderadamente alto a alto, con composiciones de suelo <50% de arena y 20-40% de arcilla.

La Figura 27 presenta el mapa de distribución espacial de grupos hidrológicos de suelo presentes en Haití.

FIGURA 27

Grupos de suelo para Número de Curva (CN) a partir de modelos de escorrentía @ 250metros.



Fuente: Ross, C.W. et al. 2018. Global Hydrologic Soil Groups (HYSOGs250m) for Curve Number-Based Runoff Modeling. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1566>

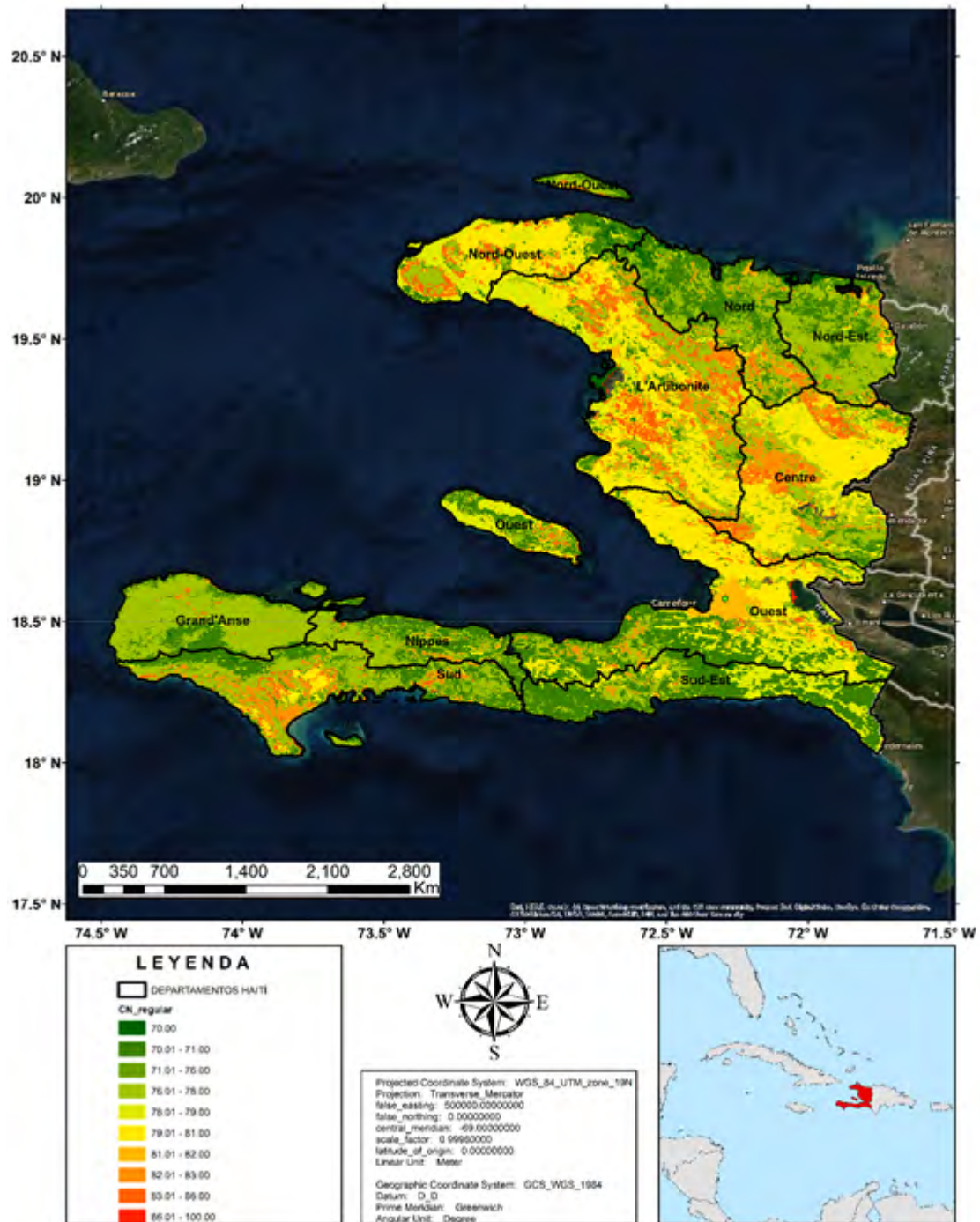
4.1.6.2 Número de curva para Haití @ 250 metros

Como resultado de la combinación de los insumos de datos de grupos hidrológicos de suelo, tipo de suelo y cobertura vegetal presentados

anteriormente, se construye el mapa de número de curva para Haití con datos de CN, con resolución espacial de 250 metros (Ver Figura 6). La Figura 28 presenta el mapa de CN para Haití.

FIGURA 28

Mapa de número de curva (CN) para Haití @ 250metros.



5. RESULTADOS

Aplicando la metodología de modelación hidrológica para 33 modelos de precipitación-escurrimiento en las cuencas de drenaje delimitadas, se obtienen resultados de hidrogramas de creciente asociados a 15 periodos de retorno seleccionados (2.33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 y 500 años) para cada caso de análisis: precipitación histórica (1950-2005) y precipitación con cambio climático (2006-2100).

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en términos de: resultados intermedios en procesos de datos de entrada, resultados de procesos intermedios de cálculo y, por último, resultados finales. Considerando la metodología propuesta (Ver Figura 2), los resultados que se obtienen en cada una de las 33 cuencas son, en resumen:

TABLA 25

Resumen de procedimiento de modelación hidrológica y resultados parciales y finales asociados.

Paso	Descripción proceso	Objetivo	Resultado
1	Delimitación de cuencas de drenaje y cálculo de propiedades morfométricas.	Obtener características geométricas de cuencas de drenaje.	Mapas de delimitación de cuenca y parámetros morfométricos tabulados. Ver Anexo A: Delimitación de cuencas y propiedades morfométricas por cuenca.
2	Selección de pluviómetros y nodos de GCM (Modelos de circulación general) para cada cuenca de drenaje.	Obtener fuente de datos de precipitación para el modelo hidrológico.	Tabla con información de estaciones y nodos de GCM (Modelos de circulación general) seleccionados para cada cuenca.
3	Análisis de completitud, concordancia y homogeneidad de estaciones pluviométricas y comparación con nodos de GCM (Modelos de circulación general), para validación de datos de precipitación máxima diaria.	Evaluar calidad y cantidad de fuente de datos de precipitación para el modelo hidrológico.	Gráficos de regresión polinómica para establecer validación de datos de pluviómetros vs. Nodos de GCM (Modelos de circulación general).
4	Serie de precipitación máxima diaria corregida para 1950-2005 y para 2006-2100	Obtener serie de datos de precipitación máxima diaria para análisis de frecuencias	Tabla de datos de PdMáx para periodos de análisis.
5	Análisis de frecuencia de magnitudes de precipitación y ajuste a FDP (Función de Distribución de Probabilidad)	Estimar la distribución de probabilidad de la serie de precipitación máxima diaria y sus parámetros	Tablas y gráficos de bondad de ajuste a FDP (Función de Distribución de Probabilidad) conocida.

Paso	Descripción proceso	Objetivo	Resultado
6	Obtención de curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) para cada cuenca/subcuenca de análisis.	Caracterizar la precipitación de la cuenca de drenaje en función de frecuencia e intensidad.	Gráficos de curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) (tiempo de duración [min] vs. Intensidad de precipitación [mm/h])
7	Obtención de hietogramas a partir de curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) para cada cuenca/subcuenca de análisis.	Generar tormentas de diseño asociadas a periodos de retorno.	Gráficos de hietogramas (tiempo de duración [min] vs. Precipitación [mm])
8	Modelo de pérdidas: Número de curva para cuencas/subcuenas de análisis.	Caracterizar procesos de infiltración y escorrentía en la cuenca de drenaje.	Números de curva tabulados para las subcuencas de análisis.
9	Modelo de transformación: hidrograma unitario SCS (Soil Conservation Service)	Caracterizar el proceso de transporte de volumen de escorrentía de cada subcuenca a los cauces principales de la cuenca de drenaje.	Parámetros tabulados de hidrograma unitario para subcuencas de análisis.
10	Modelo de tránsito: método Muskingum-Cunge.	Estimar el tiempo de viaje del excedente de precipitación en cada tramo de cauce de la cuenca de drenaje hasta el punto de salida.	Parámetros tabulados de modelo Muskingum-Cunge para subcuencas de análisis.
11	Hidrogramas de creciente asociados a periodos de retorno seleccionados, para todas las cuencas de análisis, para las condiciones de análisis de precipitación histórica y con cambio climático.	Estimar la variación del caudal en función del tiempo, asociado a tormentas de diseño.	Gráficos de hidrogramas de creciente (tiempo [horas] vs. caudal [m ³ /s]). Ver Anexo D: Hidrogramas calculados por cuenca, para 100 años de periodo de retorno.

De la tabla anterior se infiere que los pasos 1 y 2 corresponden a procesos asociados a datos de entrada. Los pasos 3 a 10 corresponden a procesos de cálculo intermedios. Y el paso 11 es el resultado final de todo el modelo.

Dada la gran cantidad de datos generados en cada paso del modelo debido al número de cuencas modeladas (33), para hacer el documento más ágil y sencillo de leer se presentan los resultados de los 11 pasos únicamente para una cuenca específica. Los resultados finales para la totalidad de las cuencas se presentan

en medios digitales y en los anexos de este documento.

A continuación, se presentan los resultados de procesos intermedios y finales (hidrogramas de creciente) para la cuenca del Puente 120, localizado en el río Estimé, para las condiciones de modelación histórica y con cambio climático. Posteriormente se encuentra una sección de análisis y discusión comparativa de los resultados obtenidos para la totalidad de las cuencas.

5.1 Condición Histórica

Tal como se evidencia en la Figura 2 y en la Tabla 25, el procedimiento de modelación hidrológica inicia a partir de la delimitación de la cuenca de drenaje para un punto de drenaje específico y el cálculo de las propiedades morfométricas de la cuenca. En este caso, el punto de drenaje corresponde a la localización geográfica en la que se encuentran construidos los puentes vehiculares. Es en estos puntos en donde se va a concentrar y reportar el caudal asociado a un período de retorno, en función del tiempo, para la modelación hidro-

dinámica y la estimación de zonas inundables que puedan afectar la operación del puente y/o su estabilidad.

Paso 1

Delimitación de cuenca de drenaje y cálculo de parámetros morfométricos.

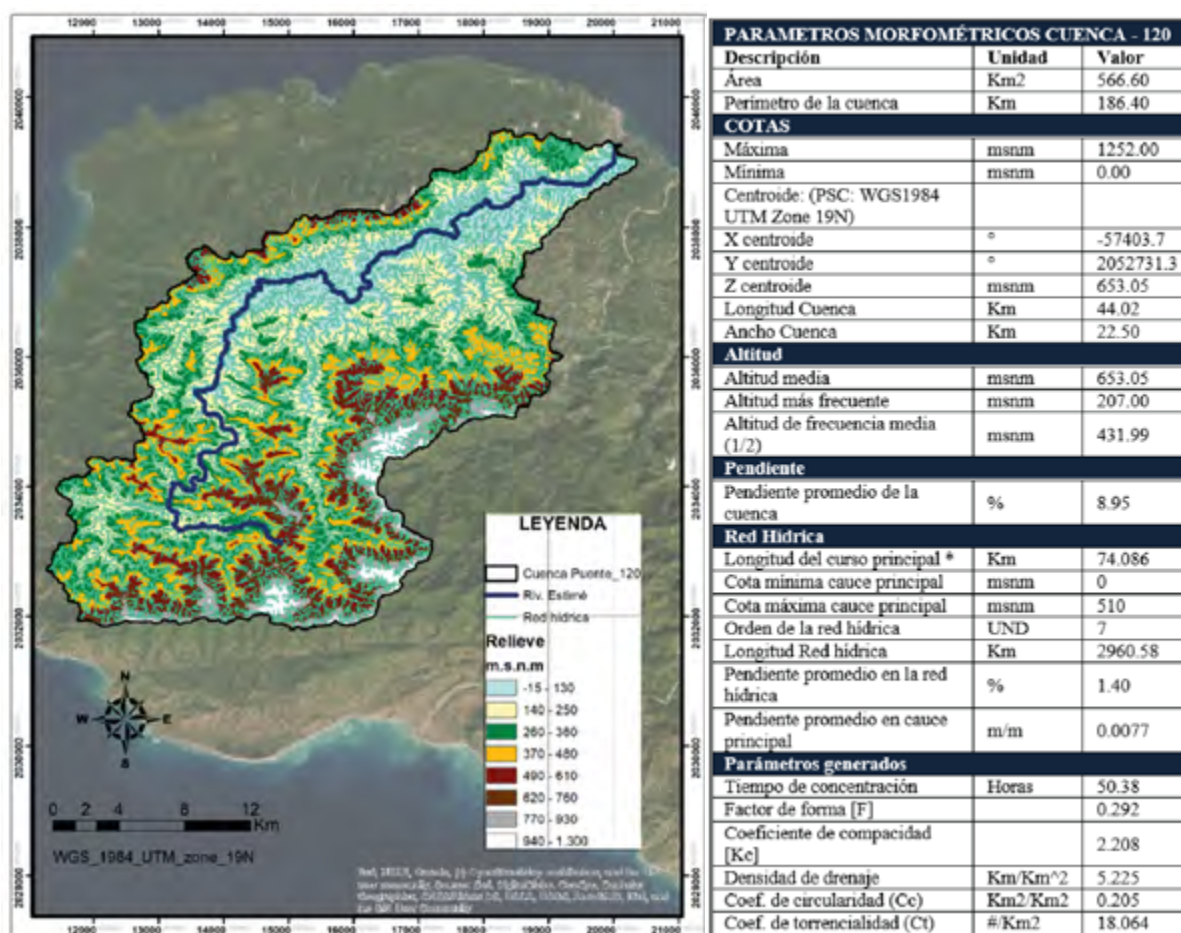
Utilizando el procedimiento mencionado en la sección 4.1.1.1 de este documento, se obtiene la cuenca de drenaje delimitada para el puente 120, sobre el río Estimé (Ver Figura 29).

La cuenca del puente 120 se localiza al occidente del departamento Grand'Anse, con un área total de 566 Km², aproximadamente. Corresponde a la cuenca de drenaje de mayor área de las 33 analizadas. En términos de altitud, la media se encuentra en 653 m.s.n.m, con una cota máxima en 1252 m.s.n.m y la mínima en 0. La pendiente promedio de toda la cuenca es de 8.95%. Respecto a la red hídrica y sus características, el cauce principal (río Estimé) tiene una longitud aproximada de 74 km, con una pendiente aproximada de 0.0077 [m/m]. El tiempo de concentración estimado es de 42 horas y se obtiene a partir de la ponderación media entre los métodos de cálculo de: Bureau of Reclamation, Californiana U.S.B.R, Clark (1945), Guaire, Valencia y Zuluaga (1991), Kirpich (SCS), Témez y Ruiz (1988).

El factor de forma para este caso indica que la cuenca es alargada y tiene menos tendencia a concentrar las intensidades de lluvia. El coeficiente de compacidad, por su parte, indica que la cuenca tiene mayores posibilidades de producir crecientes con picos de caudal pronunciados. Por tanto, se ratifica la poca tendencia a concentrar agua en su superficie, por su forma. En términos de densidad de drenaje, se presenta un valor alto, lo cual refleja características de una cuenca bifurcada que responde rápidamente a una tormenta y que puede estar caracterizada por suelos erosionables o relativamente impermeables, de pendientes altas y/o cobertura vegetal escasa. Por último, el coeficiente de torrencialidad indica la relación entre el número de cauces de orden de Strahler 1 y el área total de la cuenca. Para este caso, al ser una cuenca con un alto número de cauces de dicho orden, pero con un área superficial considerable, no se considera una cuenca con características torrenciales.

FIGURA 29

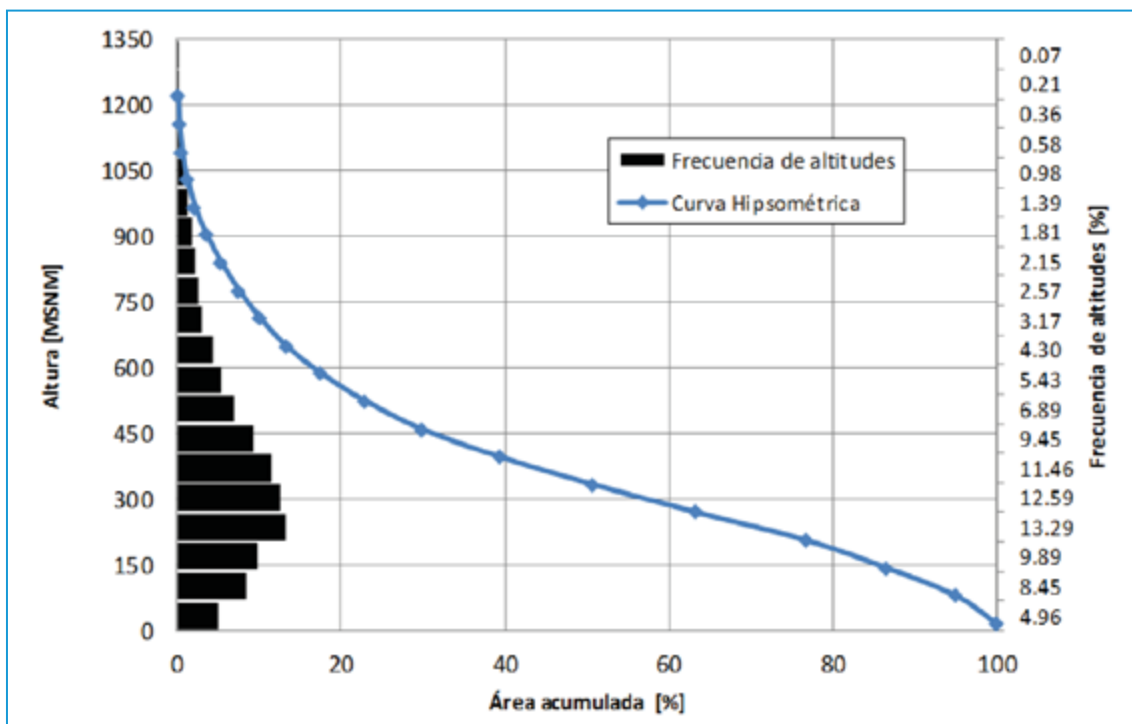
Cuenca de drenaje para puente 120, sobre el río Estimé.
Parámetros morfométricos.



La Figura 30 presenta la curva hipsométrica calculada para la cuenca, a partir de la relación de superficie que existe a diferentes niveles de cotas. Para este caso, la forma de la curva obtenida es característica de ríos antiguos debido a que la red hídrica, en combinación con otros factores, ha erosionado el suelo y ha disminuido considerablemente la proporción de área de la cuenca que se encuentra en cotas altas. Para este caso, la altura más frecuente de la cuenca es de 207 m.s.n.m, con un 13.29% de participación.

FIGURA 30

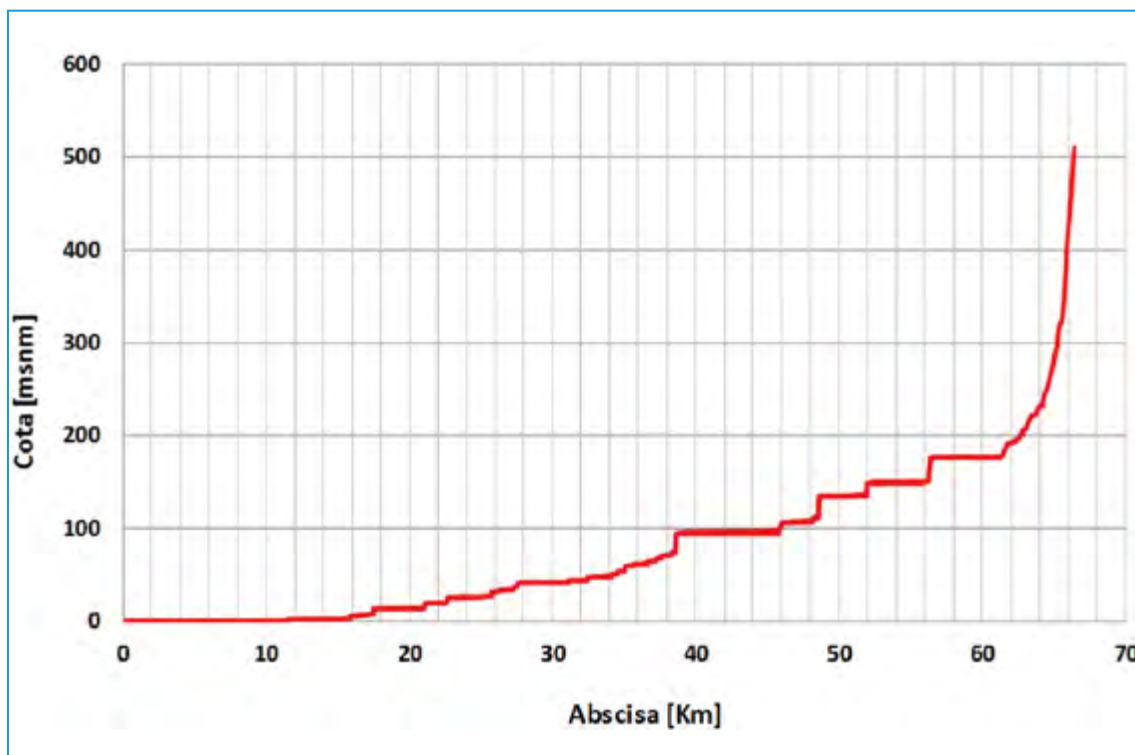
Curva hipsométrica para cuenca de drenaje del puente 120, sobre el río Estimé.



De manera complementaria, la Figura 31 presenta el perfil longitudinal del río Estimé calculado a partir de los datos topográficos disponibles. El nacimiento del río Estimé se encuentra localizado a una cota aproximada de 500 m.s.n.m. El curso superior del río se encuentra entre las cotas 500-190 m.s.n.m, con una pendiente media de 7.75%. Esta zona es la generadora de flujos torrenciales y presenta un alto grado de erosión del lecho. El curso medio o de transición, se localiza entre las cotas 190-50 m.s.n.m. En esta sección el río adquiere mayor ancho y se disminuye considerablemente la pendiente (0.53%), lo cual genera que se inicien procesos de sedimentación en el lecho. El curso inferior o de entrega de caudal se localiza entre las cotas 50-0 m.s.n.m, con una pendiente promedio de 0.16%. En esta zona la velocidad del agua es baja debido a la pendiente del tramo y el flujo no está controlado por fuerzas gravitacionales, sino por fuerzas inerciales. La pendiente media total del río Estimé se calcula en 0.76%.

FIGURA 31

Perfil longitudinal del río Estimé. Cuenca de drenaje para puente 120



Paso 2

Selección de pluviómetros y nodos de GCM para cada cuenca de drenaje

Para la selección de las estaciones pluviométricas y los nodos de GCM se hace uso de los pluviómetros previamente depurados en la sección 4.1.3 y que se presentan en el Anexo B: Tabla de localización e información base de estaciones pluviométricas en campo. Para el caso de los nodos de GCM, se hace uso de las localizaciones obtenidas en la sección 4.1.4.4.

En total, para las estaciones pluviométricas diarias se tiene una base de datos de 128 localizaciones. Mientras que para el caso de nodos de GCM se cuenta con un total de 52. Para todos los casos, la selección de datos de precipitación se realiza a partir de dos criterios principales;

i. Localización: cercanía o ubicación dentro del área de aferencia de la cuenca de drenaje analizada

ii. Período de medición [años]: para el caso de estaciones pluviométricas, se analizan los años para los cuales los datos de precipitación se encuentran completos para los modos 1 (abr-may-jun) y 2 (oct-nov-dic) del régimen bimodal de precipitación en Haití.

Para el caso particular de la cuenca de drenaje del puente 120, las estaciones pluviométricas y nodos GCM seleccionados para el análisis de frecuencias de precipitación máxima diaria son:

TABLA 26

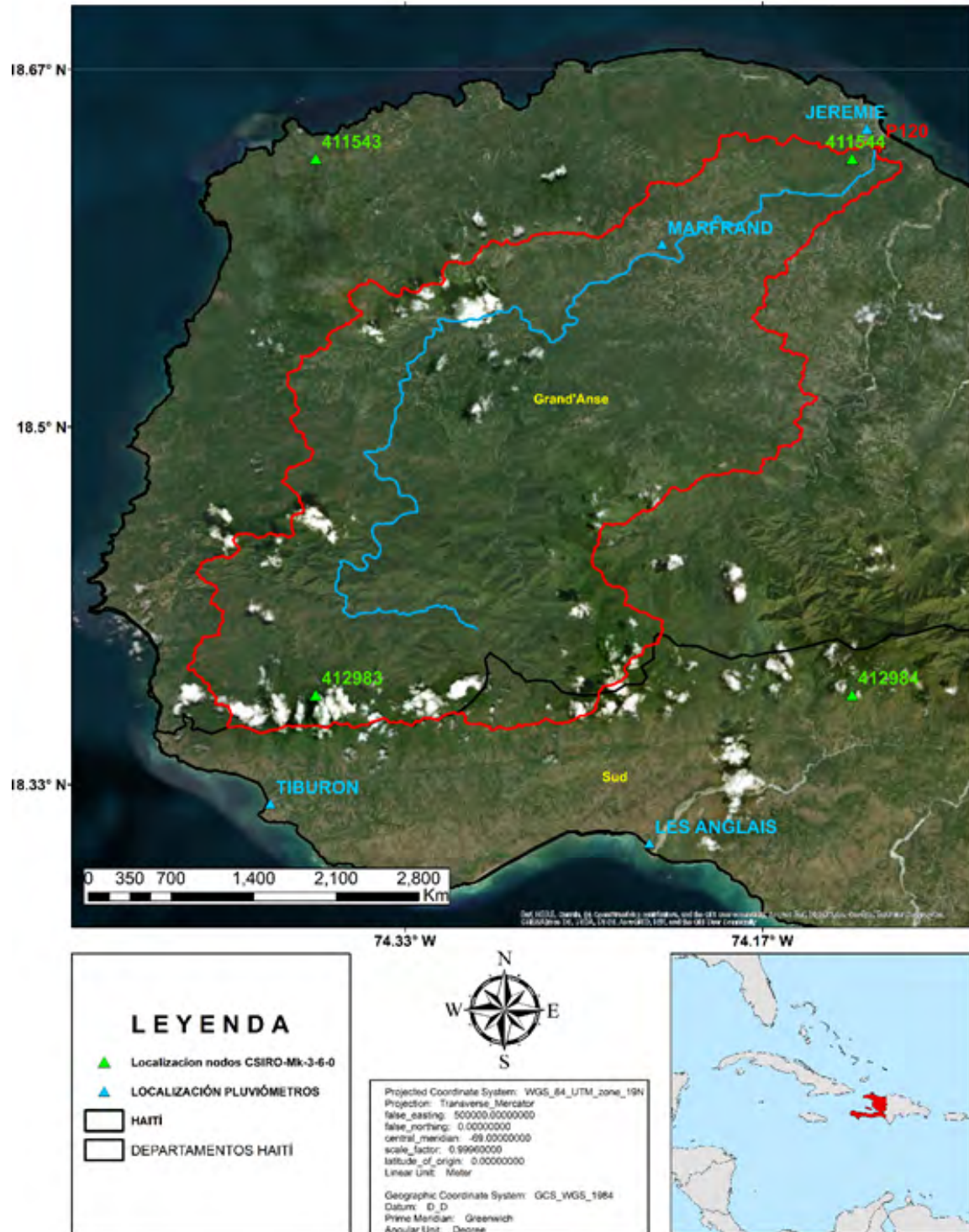
Estaciones pluviométricas y nodos GCM seleccionados
para análisis de cuenca de drenaje puente 120

Fuente datos	FiD	Depto.	Comuna	Estación	Lat. (N)	Lon. (W)	Período de medición [Años]
Estación pluviométrica	62	GRAND ANSE	Sin dato	MARFRAND	18.59	-74.21	51;53-58;62-66;77-79
	83	SUD	LES ANGLAIS	LES ANGLAIS	18.31	-74.22	39-41;49-58;91-93;98
	121	GRAND ANSE	Sin dato	JEREMIE	18.64	-74.12	45-46;55-58;60-79
Nodos GCM CSIRO-Mk-3-6-0	144	SUD	Sin dato	TIBURON	18.32	-74.40	77-79
	411544	GRAND ANSE	N/A	411544	18.625	-74.125	1950-2005
	411543	GRAND ANSE	N/A	411543	18.625	-73.375	1950-2005
	412983	GRAND ANSE	N/A	412983	18.375	-74.375	1950-2005
	412984	SUD	N/A	412984	18.375	-74.125	1950-2005

En la Figura 32 se presenta la localización geográfica de cada una de las estaciones y nodos seleccionados para la cuenca de drenaje del puente 120.

FIGURA 32

Estaciones pluviométricas y nodos GCM seleccionados para cuenca de drenaje puente 120



Paso 3

Análisis de completitud, concordancia y homogeneidad de estaciones pluviométricas y comparación con nodos de GCM, para validación de datos de precipitación máxima diaria

Para las estaciones pluviométricas seleccionadas en el paso anterior (Ver Tabla 26) se realiza un análisis que contiene los siguientes puntos;

i. Completitud: para los años en los que existe información, se revisa la completitud de datos diarios en los dos modos del régimen de precipitación. Para los años en los que se tiene un porcentaje de datos diarios incompletos menor al 20%, se procede a estimar el dato faltante a partir de técnicas estadísticas considerando estaciones cercanas.

ii. Concordancia: para las estaciones seleccionadas, se revisa que el período de medición se encuentre dentro del rango 1950 y 2005, para posibilitar la comparación y validación de datos de precipitación con el GCM CSIRO-Mk-3-6-0.

iii. Homogeneidad: para las estaciones seleccionadas, se revisa que los datos de precipi-

tación diaria se encuentren dentro de parámetros estadísticos normales de acuerdo con datos históricos en la zona de análisis proporcionados por la misma estación y/o por estaciones aledañas. Se eliminan y reemplazan datos aislados.

Dada la poca cantidad y calidad de datos de precipitación diaria (Ver sección 4.1.3) registrados en las estaciones pluviométricas seleccionadas, existe la necesidad de hacer el análisis de frecuencia de precipitación máxima a partir de datos provistos por los nodos de GCM CSIRO-Mk-3-6-0 en combinación y validación con los datos de estaciones pluviométricas que fue posible rescatar para cada cuenca. Lo anterior a partir de la revisión de completitud, concordancia y homogeneidad de datos para los modos 1 (abr-may-jun) y 2 (oct-nov-dic) del régimen de precipitación existente en Haití.

Para el caso particular de la cuenca del puente 120, posterior al análisis de completitud, concordancia y homogeneidad de las estaciones pluviométricas seleccionadas en el paso 2, se tienen en cuenta los siguientes años de medición para cada uno de los modos del régimen de precipitación.

TABLA 27

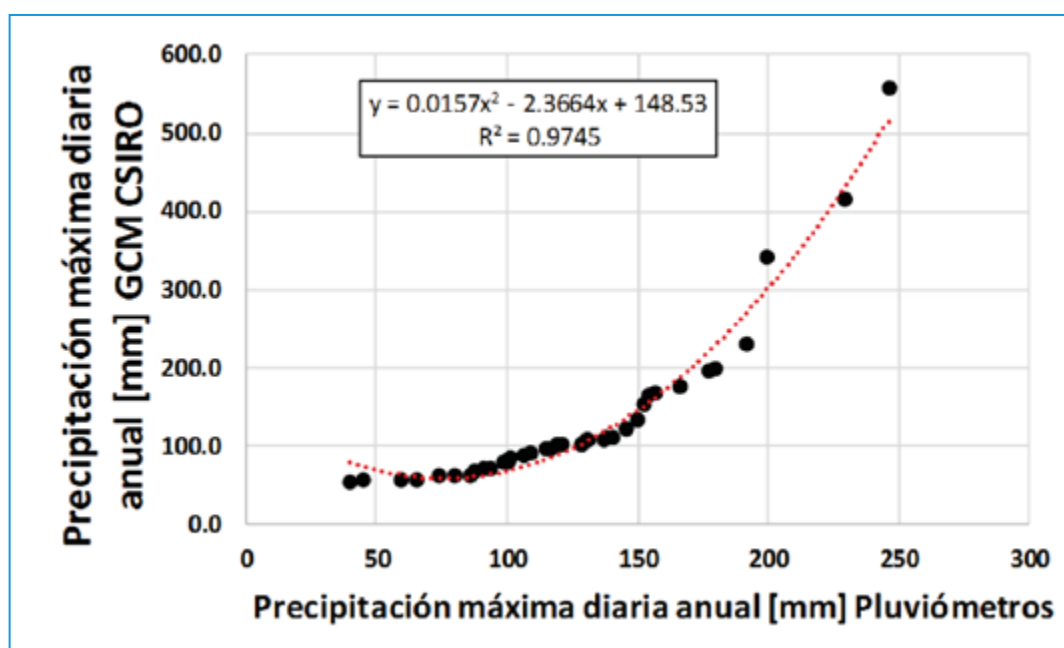
Años de medición seleccionados para estaciones seleccionadas de la cuenca del puente 120

Pluviómetros	Modo 1	Modo 2
	abr-may-jun	oct-nov-dic
62_Marfrand	1951, 1953, 1955, 1958, 1963 - 66, 1978, 1979	1951, 1955, 1958, 1962 - 66, 1978, 1979
83_Les anglais	1950 - 53, 1955, 1956, 1992	1950 - 53, 1955 - 57
121_Jeremie	1960-67, 69-77, 79, 96-00	1960-67, 69-77, 96-00
144_Tiburón	1978, 1979	1977, 1978, 1979

FIGURA 33

Ajuste regresión polinómica de grado 2 (Pluviómetros vs. Datos simulados CSIRO-Mk-3-6-0)

Año	Pluviómetros Máximo [mm]	GCM Máximo [mm]	Año	Pluviómetros Máximo [mm]	GCM Máximo [mm]
1	40	54.5	20	128.6	103.7
2	45	57.0	21	130.7	107.8
3	60.2	57.4	22	131.8	108.5
4	65.8	57.9	23	137.4	108.9
5	74.2	62.5	24	138	110.6
6	80	62.7	25	141	111.9
7	86.4	62.9	26	146.5	124.4
8	87.9	70.1	27	150	133.3
9	91.6	72.0	28	153	155.2
10	94.1	72.1	29	154.8	166.9
11	99.4	79.3	30	157	167.4
12	101	81.5	31	166.2	178.6
13	101.9	85.0	32	177.8	196.3
14	107	88.4	33	180.5	199.3
15	109.2	90.8	34	192	231.0
16	115	96.5	35	200	341.1
17	117.4	96.8	36	229.7	417.2
18	119.6	102.3	37	247.2	559.4
19	121.7	102.9			



A partir del proceso de comparación y validación de datos de precipitación entre estaciones pluviométricas con años completos (o completados) y los nodos GCM, se obtienen factores (P/GCM) con el objetivo de corregir los excesos o defectos de precipitación que se pueden presentar en la información de entrada de los nodos GCM para el período de análisis 1950-2005. La Figura 34 presenta los valores del factor calculado para el período de medición (1950-2005) y la Figura 35 presenta el histograma de frecuencias por número de años de medición, en donde se evidencia que para la mayoría de los años (28) el rango del factor de corrección se encuentra entre 0.87 y 1.19. Lo anterior indica la alta correlación entre los datos de precipitación máxima anual para las dos fuentes de datos consideradas.

FIGURA 34

Factor de corrección de precipitación por año para nodos GCM CSIRO-Mk-3-6-0 seleccionados en la cuenca de drenaje del puente 120

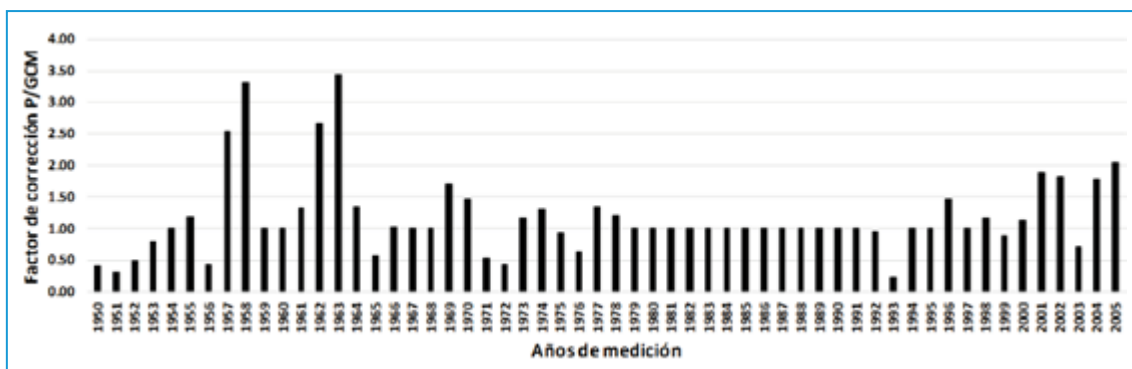
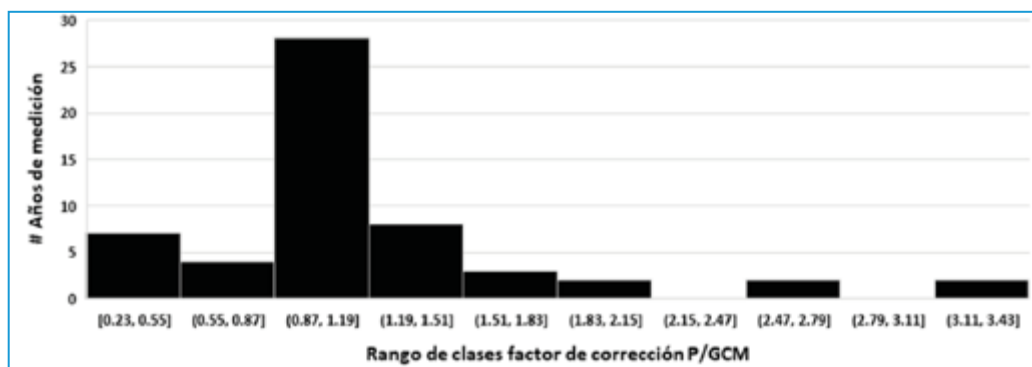


FIGURA 35

Número de años de medición por rango de factor de corrección de precipitación por año para nodos GCM CSIRO-Mk-3-6-0 seleccionados en la cuenca de drenaje del puente 120



Paso 4

Serie de precipitación máxima diaria corregida para 1950–2005

Una vez aplicados los factores de corrección (P/GCM) para los nodos GCM seleccionados para el análisis de frecuencia de magnitudes de precipitación máxima anual en todas las cuencas, se obtienen series de datos en el rango de años de medición comprendido entre 1950 y 2005.

Para el caso particular de la cuenca de drenaje del puente 120, para la cual fueron seleccionados 4 nodos GCM, se obtienen 4 series de datos de precipitación máxima diaria anual. La Tabla 28 presenta estadísticas de precipitación máxima diaria corregida para los nodos GCM CSI-RO-Mk-3-6-0; 411543, 411544, 412983 y 412984.

De esta tabla se identifica que, los meses con precipitación máxima que más se repiten en el rango de datos son mayo (19.6%), junio y octubre (14.3%), agosto y diciembre (10.7%). Lo anterior confirma el comportamiento del régimen bimodal de precipitación que se presenta en el país, y en esta cuenca particular. Para el caso de los nodos 411543 y 411544, la media de precipitación máxima se encuentra entre 102 y 107 mm/día, con un rango que se encuentra entre 35 y 230 mm/día. Para el caso de los nodos 412983 y 412984, la media de precipitación máxima se encuentra entre 120 y 123 mm/día, con un rango que se encuentra entre 34 y 233 mm/día. Lo anterior significa que en el extremo sur de la cuenca se presenta una precipitación máxima diaria que, en promedio, es mayor en un 13%.

TABLA 28

Estadísticas precipitación máxima diaria 1950-2005
corregida para nodos GCM CSIRO-Mk-3-6-0

Nº	Año	411543					411544					412983					412984				
		Mes Max.	Precipitación (mm)				Mes Max.	Precipitación (mm)				Mes Max.	Precipitación (mm)				Mes Max.	Precipitación (mm)			
		Precip.	x_i	$(x_i - \bar{x})^2$	$\log(x_i)$		Precip.	x_i	$(x_i - \bar{x})^2 \log(x_i)$			Precip.	x_i	$(x_i - \bar{x})^2 \log(x_i)$			Precip.	x_i	$(x_i - \bar{x})^2 \log(x_i)$		
1	1950	10	71.9	1214.84	1.86		10	70.18	1073.47	1.85		10	86.37	1128.76	1.94		10	91.56	961.88	1.96	
2	1951	5	137.88	2614.26	2.2		5	137.22	2946.07	2.2		5	193.62	3426.06	2.29		5	202.47	6384.17	2.31	
3	1952	6	55.57	2619.27	1.74		5	50.8	2719.39	1.71		6	65.7	2944.19	1.82		5	68.73	2899.02	1.84	
4	1953	4	89.64	292.81	1.95		4	79.43	553.01	1.9		7	90.85	847.79	1.96		7	91.69	953.87	1.96	
5	1954	4	116.06	86.57	2.06		4	117.93	224.5	2.07		4	153.55	1128.48	2.19		4	150.79	796.56	2.18	
6	1955	9	91.82	223.04	1.96		9	87.89	226.72	1.94		9	114.29	32.13	2.06		9	113.6	80.45	2.06	
7	1956	5	86.8	398.08	1.94		5	95.81	50.93	1.98		5	103.28	278.15	2.01		5	118.11	19.92	2.07	
8	1957	5	54.23	2758.4	1.73		5	51.17	2680.6	1.71		7	52.72	4521.17	1.72		7	61.88	3683.88	1.79	
9	1958	1	102.15	21.16	2.01		11	100.87	4.3	2		11	124.81	23.53	2.1		11	134.56	143.86	2.13	
10	1959	12	63.68	1855.04	1.8		12	52.06	2589.12	1.72		12	83.27	1346.14	1.92		12	69.88	2776.78	1.84	
...	
50	1999	7	143.78	1371.2	2.16		7	132.51	874.08	2.12		7	166.17	2135.25	2.22		7	157.54	1222.7	2.2	
51	2000	7	188.23	6638.53	2.27		7	230.08	16164.26	2.36		7	172.69	2780.15	2.24		7	209	7469.69	2.32	
52	2001	7	168.23	3779.35	2.23		7	144.38	1717.08	2.16		7	188.91	4753.22	2.28		7	163.28	1657.53	2.21	
53	2002	10	125.69	358.82	2.1		10	136.47	1124.15	2.14		5	129.35	88.17	2.11		10	131.28	75.86	2.12	
54	2003	6	129.44	514.86	2.11		6	104.68	3.02	2.02		6	120.18	0.05	2.08		6	115.3	52.93	2.06	
55	2004	12	138.24	991.24	2.14		12	119.21	264.69	2.08		12	143.86	571.05	2.16		10	162.69	1609.66	2.21	
56	2005	8	229.14	14978.22	2.36		8	224.84	14859.02	2.35		8	233.34	12855.6	2.37		8	231.48	11860.25	2.36	
56		Suma	5978.1	110052.8	111.4		Suma	5764.9	108228.3	110.4		Suma	6717.9	120408.9	114.4		Suma	6863.9	120842.1	114.9	
		Promedio	106.8		2		Promedio	102.9		2		Promedio	120		2		Promedio	122.6		2.1	
		Desvest.	44.7		0.2		Desvest.	44.4		0.2		Desvest.	46.8		0.2		Desvest.	46.9		0.2	

Paso 5

Análisis de frecuencia de magnitudes de precipitación y ajuste a FDP

A partir de las series de precipitación máxima diaria multianual (Tabla 28) generadas para cada nodo GCM en el rango 1950 a 2005, el siguiente paso es el análisis de frecuencia de magnitudes de dichas precipitaciones con el objetivo de determinar la manera en la que se distribuyen los datos dentro del rango de análisis. Determinar esta distribución y, posteriormente, asociarla a una función de distribución de probabilidad (FDP) conocida permite estimar las precipitaciones máximas diarias que se pueden igualar o exceder con una tasa de excedencia (inverso del período de retorno) específica. Para hacer posible el análisis de frecuencia de magnitudes de precipitación se debe cumplir con los siguientes supuestos de análisis; i) los eventos extremos surgen a partir de un comportamiento estacionario (en el tiempo) del fenómeno de precipitación, y ii) la

ocurrencia de los eventos extremos son independientes entre sí, o débilmente dependientes (Leadbetter, 1983) en (Salas & Obeysekera, 2014). La verificación de las condiciones de estacionariedad se realiza a partir del análisis de los índices de detección de cambio climático (ETCCDI) presentado en la sección 4.1.4.3. En dicha sección se identifica que, tanto para el período modelado entre 1950 a 2005, como para el período proyectado entre 2006 y 2100 existe un comportamiento débilmente no estacionario para los índices R20mm, Rx1Day, Rx5Day, PRCPTOT, R95Ptot y R99pTOT. Lo anterior se evidencia a partir de la muy leve variación de los valores medios de cada uno de dichos índices a lo largo de los períodos de análisis y de la constancia en la amplitud y frecuencia de las series de valores de índices extremos de precipitación.

Dentro de las FDP consideradas para el ajuste de los datos, se tienen en cuenta las distribuciones típicas en el análisis de valores extre-

mos, estas son; Gumbel, Log-Normal, Gamma, log-Weibull, Pearson tipo III, entre otras. La metodología para la determinación de la FDP con que se distribuyen los datos en las 33 cuencas analizadas se realiza a partir de las pruebas de bondad de ajuste a las mencionadas distribuciones para cada nodo GCM seleccionado y, posteriormente, la FDP que se repita el mayor número de veces en los datos analizados, será la escogida para estimar las precipitaciones máximas diarias asociadas a un período de retorno específico.

A continuación, se presentan las pruebas de bondad de ajuste y los histogramas de frecuencias normalizado para los nodos GCM seleccionados para la cuenca de drenaje del puente 120.

TABLA 29

Pruebas de bondad de ajuste para FDP conocidas.
Ajuste para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 411543

FDP	Params	K-S+	K-S-	K-S	A-D	CVM	WG	WU
Gumbel	beta=36.76646, delta=85.84883	0.04954	0.05237	0.05237	0.17209	0.02449	0.4125	0.02274
Weibull	alfa=2.58537, lambda=0.00830, delta=0.00000	0.06469	0.0417	0.06469	0.19835	0.02579	0.41924	0.02158
Log Normal	media=107.34694, desv. std.=49.63310	0.04295	0.07135	0.07135	0.29991	0.04553	0.40691	0.03822
Normal	mu=106.75232, sigma=44.33072	0.07686	0.05409	0.07686	0.41174	0.05802	0.45514	0.04361
Logistic	alfa=106.75232, lambda=0.04092	0.08445	0.05148	0.08445	0.51849	0.07938	0.49314	0.0601
Uniforme	min=35.54000, max=229.14000	0.25616	0.01786	0.25616	7.59702	1.38083	0.92788	0.40261
Pareto	alfa=0.99153, beta=35.54000	0.15757	0.27257	0.27257	8.04442	1.53332	1.8803	1.04169
Exponencial	Lambda=0.00937	0.13387	0.30902	0.30902	8.80338	1.71625	1.76332	1.13636
Chi Cuadrada	Grados Lib.=102.00000	0.63216	0.14953	0.63216	30.14083	6.67077	2.861	3.1751

FIGURA 36

Histograma de frecuencias normalizado con Función de Densidad de Probabilidad con mejor bondad de ajuste (en rojo: Gumbel) para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 411543



TABLA 30

Pruebas de bondad de ajuste para FDP conocidas. Ajuste para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 411544

Distribución	Params	K-S+	K-S-	K-S	A-D	CVM	WG	WU
Gumbel	beta=36.07705, delta=82.42986	0.04678	0.06311	0.06311	0.20181	0.02933	0.38611	0.02803
Weibull	alfa=2.49662, lambda=0.00860, delta=0.00000	0.07513	0.04751	0.07513	0.27309	0.03529	0.50241	0.03171
Log Normal	media=103.59083, desv. std.=49.28028	0.05375	0.07636	0.07636	0.34262	0.05064	0.49106	0.04274
Normal	mu=102.94482, sigma=43.96145	0.10018	0.05096	0.10018	0.49682	0.07157	0.62223	0.05533
Logistic	alfa=102.94482, lambda=0.04126	0.11013	0.04895	0.11013	0.56989	0.09847	0.67841	0.07723
Uniforme	min=31.04000, max=230.08000	0.29463	0.02785	0.29463	8.58212	1.61165	1.16655	0.53369
Exponencial	Lambda=0.00971	0.14571	0.31807	0.31807	8.62881	1.68289	1.84216	1.11772
Pareto	alfa=0.90648, beta=31.04000	0.16391	0.30656	0.30656	9.07168	1.75073	1.96195	1.21001
Chi Cuadrada	Grados Lib.=98.00000	0.63257	0.13985	0.63257	30.78032	6.80371	2.82959	3.17787

FIGURA 37

Histograma de frecuencias normalizado con Función de Densidad de Probabilidad con mejor bondad de ajuste (en rojo: Gumbel) para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 411544



TABLA 31

Pruebas de bondad de ajuste para FDP conocidas.
Ajuste para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 411543

Distribución	Params	K-S+	K-S-	K-S	A-D	CVM	WG	WU
Gumbel	media=128.34983, desv. std.=76.05944	0.12897	0.05127	0.12897	0.79515	0.13091	0.82697	0.11182
Gamma	alfa=2.02527, lambda=0.01536	0.13975	0.14831	0.14831	2.60201	0.42113	1.03123	0.42092
Weibull	alfa=1.52743, lambda=0.00675, delta=0.00000	0.16652	0.14634	0.16652	3.04187	0.50221	1.1056	0.48245
Log Normal	beta=50.71306, delta=96.70422	0.23058	0.10489	0.23058	4.01752	0.80608	1.19446	0.52406
Logistic	alfa=131.85036, lambda=0.01789	0.23447	0.15715	0.23447	4.84096	0.90923	1.33123	0.72998
Normal	mu=131.85036, sigma=101.36525	0.22992	0.17927	0.22992	5.54633	0.97959	1.36	0.84957
Exponencial	Lambda=0.00758	0.13085	0.28942	0.28942	6.48682	1.23543	1.47232	0.99222
Pareto	alfa=0.84896, beta=34.00000	0.1371	0.30542	0.30542	8.47798	1.61299	1.73406	1.11162
Chi Cuadrada	Grados Lib.=127.00000	0.57102	0.14836	0.57102	26.35938	5.78585	2.544	2.79586
Uniforme	min=34.00000, max=609.14000	0.61922	0.01786	0.61922	44.3149	8.29483	2.16531	2.20135

FIGURA 38

Histograma de frecuencias normalizado con Función de Densidad de Probabilidad con mejor bondad de ajuste (en rojo: Gumbel) para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 412983

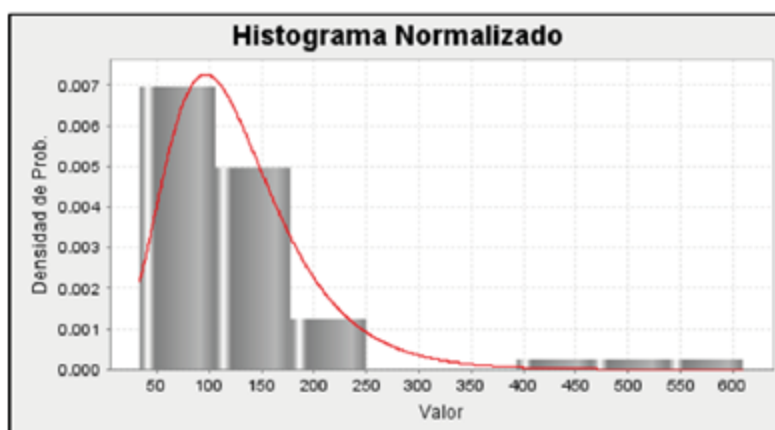


TABLA 32

Pruebas de bondad de ajuste para FDP conocidas. Ajuste para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 412984

Distribución	Params	K-S+	K-S-	K-S	A-D	CVM	WG	WU
Log Normal	media=130.79289, desv. std.=76.44032	0.11358	0.06328	0.11358	0.60975	0.08614	0.72745	0.07112
Gamma	alfa=2.12928, lambda=0.01590	0.13718	0.15843	0.15843	2.21943	0.33945	1.01561	0.33933
Weibull	alfa=1.55996, lambda=0.00663, delta=0.00000	0.16393	0.15966	0.16393	2.66029	0.4213	1.09961	0.40513
Gumbel	beta=51.23723, delta=98.91621	0.22181	0.1165	0.22181	3.4325	0.67071	1.15718	0.418
Logistic	alfa=133.89482, lambda=0.01815	0.23003	0.16914	0.23003	4.21329	0.77561	1.32132	0.61556
Normal	mu=133.89482, sigma=99.91188	0.22601	0.19104	0.22601	4.89427	0.85291	1.35008	0.73648
Exponencial	Lambda=0.00747	0.12512	0.30872	0.30872	6.46703	1.22599	1.45286	0.95918
Pareto	alfa=0.77744, beta=31.20000	0.14405	0.33625	0.33625	9.72245	1.86614	1.83377	1.2949
Chi Cuadrada	Grados Lib.=129.00000	0.56406	0.16412	0.56406	25.97668	5.70943	2.51161	2.78725
Uniforme	min=31.20000, max=636.98000	0.62169	0.01803	0.62169	43.99884	8.32191	2.17922	2.20594

FIGURA 39

Histograma de frecuencias normalizado con Función de Densidad de Probabilidad con mejor bondad de ajuste (en rojo: Log-Normal) para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 412984



A partir de las pruebas de bondad de ajuste en los nodos analizados (411543, 411544, 412983 y 412984) para la cuenca de drenaje del puente 120, se identifica que la FDP que más se repite en los datos analizados es de tipo Gumbel. Por tanto, esta distribución es seleccionada para estimar las precipitaciones máximas diarias asociadas a los períodos de retorno de interés.

Paso 6

Obtención de curvas IDF para cada cuenca/subcuenca de análisis

Existen diversas metodologías para determinar las curvas de Intensidad - Duración - Frecuencia (IDF) de precipitaciones máximas en una cuenca particular. Usualmente se realiza a partir de datos de precipitación máxima diaria proporcionados por estaciones pluviométricas con un rango de medición superior a 30 años. Para el análisis de las 33 cuencas de drenaje en Haití se planteó la construcción de las curvas IDF a partir de los datos de precipitación máxima diaria corregida de los nodos GCM para el rango 1950-2005, empleando la metodología analítica propuesta por Aparicio (1989). En esta propuesta metodológica se plantea la obtención de una ecuación generadora de curvas IDF a partir de un modelo de regresión exponencial. El modelo de regresión

múltiple utilizado se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 1

$$I = \frac{k * T^m}{t^n}$$

Donde;

I = intensidad de precipitación [mm/hr]

T = período de retorno [Años]

t = tiempo de duración de precipitación [min]

Previo a la aplicación de la metodología analítica mencionada previamente, es necesario construir polígonos de Thiessen haciendo uso de la localización geográfica de los nodos GCM, con el objetivo de conocer la contribución que tiene cada nodo al régimen de precipitación en las cuencas de drenaje. Para el caso específico de la cuenca de drenaje del puente 120, se obtiene lo siguiente:

TABLA 33

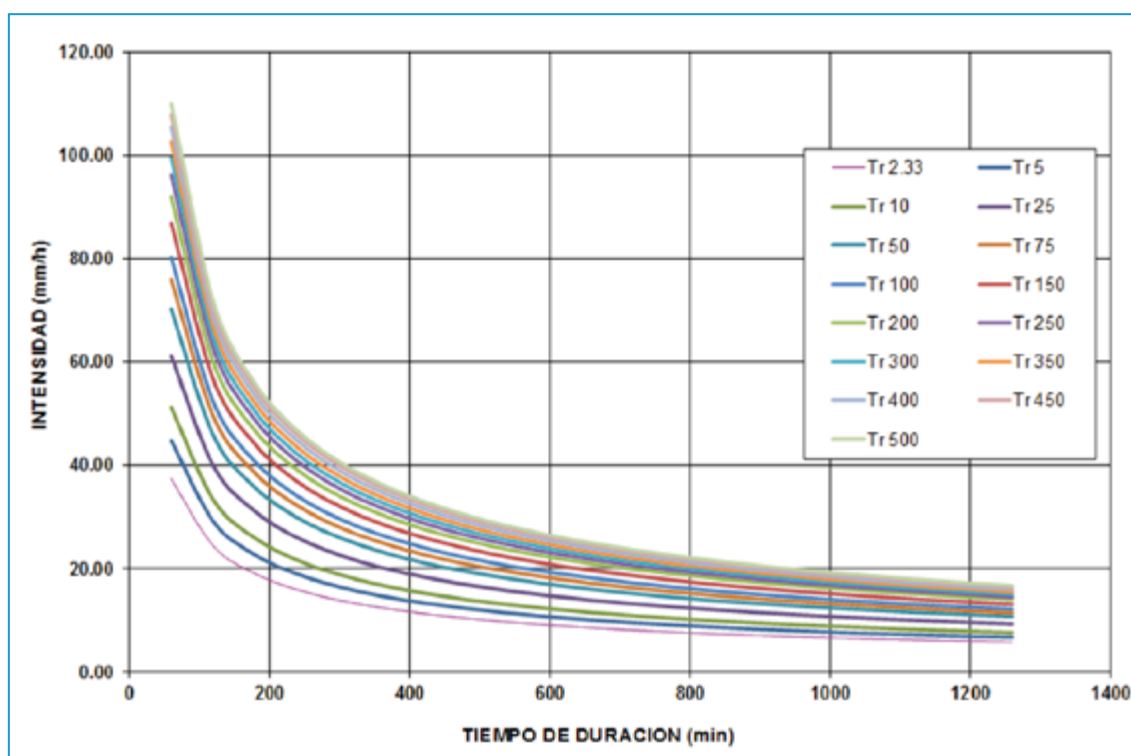
Distribución de área por nodo GCM para la cuenca del puente 120

DISTRIBUCIÓN DE ÁREA POR NODOS GCM				Área Total cuenca (km ²)
411543	412983	411544	412984	
110.42	258.34	146.61	51.22	566.60

Producto de la metodología de Aparicio (1989), se obtiene la relación entre duración, intensidad y frecuencia de excedencia para cada cuenca de análisis. Para el caso específico de la cuenca del puente 120, se obtienen las curvas que se presentan en la Figura 40.

FIGURA 40

Curvas IDF para la cuenca de drenaje del puente 120, para los períodos de retorno de interés



La ecuación generatriz de las curvas IDF para la cuenca del puente 120 es como se muestra a continuación.

Ecuación 2

$$I \left[\frac{mm}{hr} \right] = \frac{409.94 * T^{0.195343}}{t^{0.61754}}$$

Paso 7

Obtención de hietogramas a partir de curvas IDF para cada cuenca/subcuenca de análisis

Para la construcción de los hietogramas (o tormentas de diseño) como insumos del modelo meteorológico del análisis hidrológico planteado en el proyecto, se consideran los siguientes datos de entrada; i) la relación IDF estimada para la cuenca de análisis y, ii) el tiempo de concentración de la cuenca en minutos. El primer dato de entrada permite

convertir las intensidades [mm/h] en precipitaciones [mm] por cada instante de tiempo. El segundo, permite determinar la duración de la tormenta asociada a un período de retorno.

Para el caso particular de la cuenca del puente 120, se estiman las siguientes características de tormentas de diseño. Cabe mencionar que en la Tabla 34 se presentan resultados para 6 de los 15 períodos de retorno analizados por simplicidad de lectura.

TABLA 34

Características de tormentas de diseño para la cuenca del puente 120, para períodos de retorno seleccionados – Escenario histórico

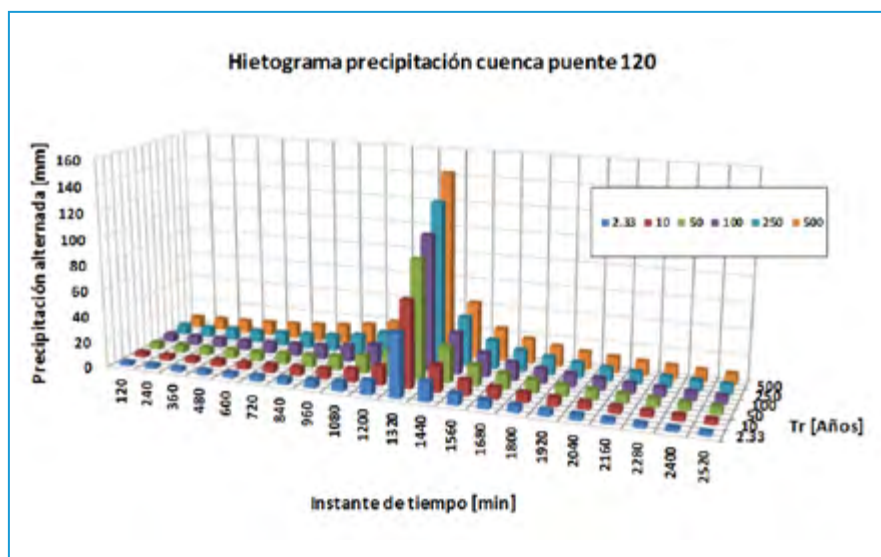
	Tr 2.33 años	Tr 10 años	Tr 50 años	Tr 100 años	Tr 250 años	Tr 500 años
Duración de la tormenta (h)	42	42	42	42	42	42
Intensidad de lluvia (mm/h)	3.72	5.10	6.98	8.00	9.56	10.95
Precipitación en 24 horas (mm)	156.42	214.20	293.33	335.87	401.70	459.95
Intervalos de tiempo (min)	120	120	120	120	120	120

En la tabla anterior, se evidencia que la duración de los hietogramas calculados es de 42 horas (2520 minutos) para todos los períodos de retorno considerados. El intervalo de tiempo para los que se calculan los bloques de precipitación es de 120 minutos, para un total de 21 datos de precipitación, con el valor máximo estimado en el minuto 1320 del rango. La metodología por medio de la cual se construyen los hietogramas corresponde a bloques alternados a partir de intensidades de precipitación provistos por curvas IDF.

En la Figura 41 se presentan los hietogramas construidos para la cuenca del puente 120, para períodos de retorno seleccionados.

FIGURA 41

Hietogramas (tormentas de diseño) construidos a partir de curvas IDF para la cuenca del puente 120, para periodos de retorno seleccionados



Paso 8

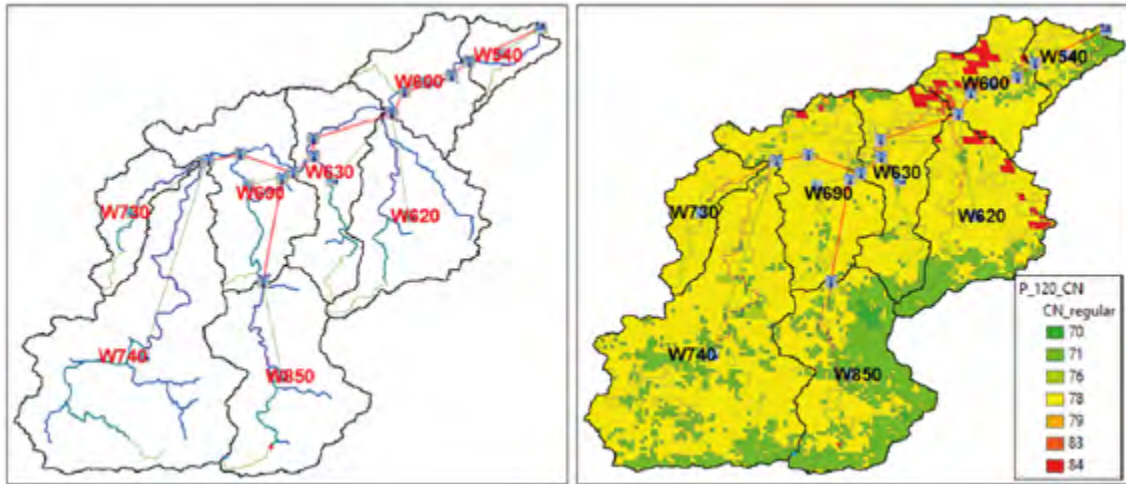
Modelo de pérdidas: Número de curva para cuencas/subcuencas de análisis

Haciendo uso de la metodología de construcción y cálculo de números de curva para Haití (Ver Sección 4.1.5 y 4.1.6) se obtiene la distribución de valores CN para cada cuenca. A partir de este punto es necesario estimar el valor único de CN para cada subcuenca, considerando; i) modelo geométrico de distribución de subcuencas de drenaje, ii) distribución de valores de CN para cada cuenca y, iii) área superficial de cada subcuenca de análisis.

Para el caso específico de la cuenca de drenaje del puente 120, la Figura 42 presenta la configuración geométrica a partir de la cual se obtiene un total de 8 subcuencas de análisis y la distribución espacial de valores de CN ellas. Se evidencia que el valor de CN más frecuente en la cuenca es 78, el cual es característico de pastos, bosques y/o cultivos con presencia de grupos de suelo hidrológico con media a baja permeabilidad. Hay baja presencia de zonas con CN de 84, las cuales son características de zonas áridas y/o de zonas impermeabilizadas artificialmente.

FIGURA 42

Figura 42 Izq.: Modelo geométrico de cuenca de drenaje del puente 120. Der.: Distribución de número de curva (CN) para la cuenca del puente 120.



Por último, el valor de CN único por subcuenca obtenido para cada cuenca de drenaje se obtiene a partir de la ponderación de la totalidad de valores de CN en cada pixel (con resolución espacial de 250 metros) por el área superficial de cada subcuenca. A continuación, se presentan los valores de CN estimados para la cuenca de drenaje del puente 120, en donde se evidencia que el valor predominante de CN para toda la cuenca varía entre 74 y 78.

TABLA 35

Número de curva promedio por subcuenca del modelo propuesto para la cuenca de drenaje del puente 120

ID_Subcuenca	Area subcuenca [Km2]	Longitud subcuenca [Km]	Pendiente [m/m]	CN_cuenca_regular
W600	43.94	12.20	0.050981	78.37
W540	19.24	8.77	0.03011	75.95
W730	28.65	14.95	0.034906	77.95
W690	76.80	15.39	0.039064	77.68
W630	56.13	22.53	0.053667	77.46
W620	75.48	21.48	0.05601	76.82
W740	175.99	40.20	0.022141	76.63
W850	91.27	21.13	0.051295	74.35

Paso 9

Modelo de transformación: hidrograma unitario SCS

El modelo de transformación seleccionado para el modelo hidrológico de precipitación-escorrentía propuesto es el de Hidrograma Unitario (SCS). La expresión que permite el cálculo del tiempo de retraso en el hidrograma de creciente, es función del tiempo de concentración de la cuenca/subcuencas de análisis.

Ecuación 3

$$T_{lag} = 0.6 * 60 * T_c$$

Donde;

T_{lag} = Tiempo de retraso [min]

T_c = Tiempo de concentración [hr]

Dicho tiempo de retraso se calcula para todas las subcuencas analizadas, partiendo del tiempo de concentración de cada una de ellas. A continuación, se presentan los parámetros del modelo de transformación para la cuenca de drenaje del puente 120.

TABLA 36

Parámetros del modelo de transformación (hidrograma unitario SCS) para cuenca de drenaje del puente 120

ID_Subcuenca	Area subcuenca [Km2]	Longitud subcuenca [Km]	Pendiente [m/m]	Tc [Hr]	Redondeo	Tlag [Hr]	Tlag [Min]
W600	43.94	12.20	0.050981	3.53	4	2.12	127.25
W540	19.24	8.77	0.03011	3.04	3	1.82	109.41
W730	28.65	14.95	0.034906	4.43	4	2.66	159.63
W690	76.80	15.39	0.039064	4.43	4	2.66	159.65
W630	56.13	22.53	0.053667	5.58	6	3.35	200.84
W620	75.48	21.48	0.05601	5.34	5	3.20	192.12
W740	175.99	40.20	0.022141	10.25	10	6.15	369.00
W850	91.27	21.13	0.051295	5.36	5	3.22	192.96
TOTALES	567.50	156.64		41.97	41	25.18	1510.86

Paso 10

Modelo de tránsito: método Muskingum-Cunge

El modelo de tránsito seleccionado para el modelo hidrológico de precipitación-escorrentía planteado es el Muskingum-Cunge, el cual combina el método simple de tránsito de hidrogramas de Muskingum, con métodos hidráulicos para estimar la velocidad con la que se propaga un caudal específico en un cauce dividido por tramos geométricamente homogéneos. Las expresiones utilizadas para estimar la velocidad de onda y el coeficiente de celeridad del método, se presentan a continuación.

Ecuación 4

$$V_{onda} = \frac{Long. \ tramo \ [Km]}{T_c \ [Hr] * 3600}$$

Donde;

V_{onda} : velocidad de onda [Km/s]

Ecuación 5

$$C_k = \frac{5}{3} * V_{onda}$$

Donde;

C_k = Coeficiente de celeridad [m/s]

Para cada tramo de cauce característico de la cuenca y/o subcuencas analizadas, se estiman los siguientes parámetros: pendiente [m/m], longitud del tramo [Km], coeficiente de rugosidad de Manning, pendiente lateral del lecho, tiempo de concentración, velocidad de onda y, coeficiente de celeridad.

La Tabla 37 presenta los parámetros del modelo de tránsito Muskingum-Cunge estimados para la cuenca de drenaje del puente 120.

TABLA 37

Número de curva promedio por subcuenca del modelo
propuesto para la cuenca de drenaje del puente 120

Tramo	S [m/m]	Long. [km]	Manning	Ancho [m]	Pendiente lateral [xH:1V]	Tc [Hr]	Vonda [km/hr]	Vonda [m/s]	Ck [m/s]
r20	0.001535	6.51	0.05	70	3.5	4.269	1.526	0.424	0.706
r30	0.001999	1.96	0.05	65	3	1.629	1.203	0.334	0.557
r60	0.00073	4.22	0.05	65	3	3.536	1.194	0.332	0.553
r70	0.001	2.33	0.05	60	3	2.118	1.099	0.305	0.509
r80	0.00261	6.51	0.05	60	3	3.859	1.688	0.469	0.781
r110	0.003531	1.70	0.05	55	3	1.312	1.295	0.360	0.600
r130	0.002	0.20	0.05	55	2.5	0.283	0.692	0.192	0.320
r140	0.001992	3.01	0.05	55	2.5	2.260	1.332	0.370	0.617
r150	0.002948	5.09	0.05	60	3.5	3.125	1.628	0.452	0.754
r160	0.000462	2.17	0.05	55	3	2.322	0.933	0.259	0.432
r170	0.010275	1.17	0.05	50	2	0.806	1.450	0.403	0.671
r300	0.007762	12.88	0.05	50	2	5.267	2.445	0.679	1.132

Paso 11:

Hidrogramas de creciente asociados a períodos de retorno seleccionados, para todas las cuencas de análisis, para las condiciones de análisis de precipitación histórica

Como se evidencia en el diagrama de flujo presentado en la Figura 2, habiendo reunido los modelos; geométrico, meteorológico, de pérdidas, de transformación y de tránsito de caudales en las cuencas analizadas, el resultado del modelo hidrológico de precipitación-escurrimiento planteado corresponde a hidrogramas de creciente asociados a períodos

de retorno de interés. Dichos hidrogramas de creciente relacionan los caudales instantáneos [m³/s] esperados para cada instante de tiempo en un punto de análisis particular. Para este proyecto, los puntos en los que se concentra el análisis corresponden a las 33 localizaciones geográficas de los puentes vehiculares objetivo.

Para el caso específico de la cuenca de drenaje del puente 120, la Tabla 38 presenta los valores de caudal pico para condición de precipitación histórica, para los 15 períodos de retorno analizados.

TABLA 38

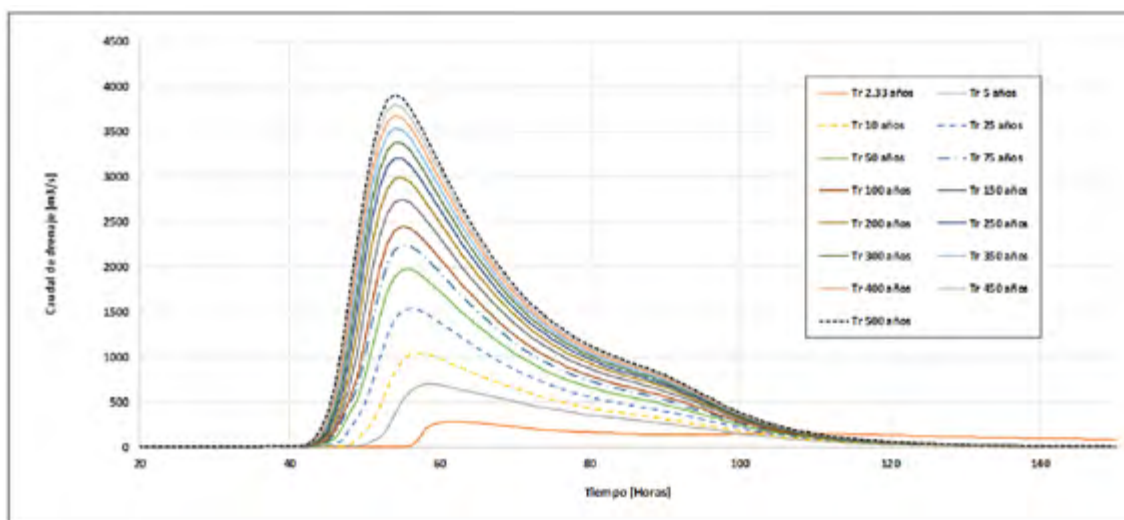
Caudales pico calculados para condición de precipitación histórica, por periodo de retorno, para cuenca de drenaje del puente 120

Tr [Años]	Caudal pico histórico [m ³ /s]	% Participación
2.33	284.1	7.26
5	699.5	17.89
10	1045.3	26.73
25	1541.9	39.43
50	1971.8	50.42
75	2244.2	57.38
100	2448.8	62.62
150	2751.8	70.36
200	2992.4	76.52
250	3202	81.88
300	3378.3	86.38
350	3537.1	90.44
400	3674.5	93.96
450	3800.9	97.19
500	3910.8	100.00

Por otro lado, la Figura 43 presenta el gráfico de 15 hidrogramas de creciente calculados para la cuenca del puente 120. En la forma de los hidrogramas calculados se corroboran las condiciones morfométricas de la cuenca, previstas por el factor de forma, coeficiente de compacidad y coeficiente de circularidad.

FIGURA 43

Hidrogramas de creciente estimados para condición de precipitación histórica en la cuenca de drenaje del puente 120



5.2 Condición con Cambio Climático

El análisis hidrológico con condiciones de cambio climático consiste en el mismo procedimiento metodológico evidenciado en el diagrama de flujo de la Figura 2 y el resumen de pasos presentado en la Tabla 25. La única diferencia entre los dos escenarios de análisis consiste en los datos de entrada de precipitación y el rango de análisis. En términos de los datos de entrada de precipitación, la diferencia radica en que se hace uso de valores de lluvia máxima diaria de nodos GCM CSIRO-Mk-3-6-0 corregidos a partir de las regresiones polinómicas estimadas en el proceso de comparación entre estaciones pluviométricas y nodos GCM realizados para el escenario histórico. Segundo, en términos del rango de análisis, para el escenario con condición de cambio climático el rango de años analizados cambia de 1950 a 2005, a ser entre 2006 y 2100.

En el análisis hidrológico con condición de cambio climático, los pasos del procedimiento

de análisis (Tabla 25) que cambian con respecto al análisis hidrológico histórico son:

- **Paso 3:** Análisis de completitud, concordancia y homogeneidad de estaciones pluviométricas y comparación con nodos de GCM, para validación de datos de precipitación máxima diaria.
- **Paso 4:** Serie de precipitación máxima diaria corregida para 2006-2100.
- **Paso 5:** Análisis de frecuencia de magnitudes de precipitación y ajuste a FDP
- **Paso 6:** Obtención de curvas IDF para cada cuenca/subcuenca de análisis
- **Paso 7:** Obtención de hietograma a partir de curvas IDF para cada cuenca/subcuenca de análisis
- **Paso 11:** Hidrogramas de creciente asociados a períodos de retorno seleccionados, para todas las cuencas de análisis, para las condiciones de análisis de cambio climático.

La razón por la cual los pasos mencionados cambian con respecto al escenario de análisis de precipitación histórica corresponde a que los datos de entrada de precipitación máxima diaria multianual cambian de ventana de observación. Es decir, mientras que en la condición histórica se tiene en cuenta datos entre 1950 a 2005, en la condición con cambio climático se analizan datos entre 2006 y 2100. Lo anterior implica que es necesario repetir todos los pasos del procedimiento de análisis que tienen que ver directamente con los datos de entrada de precipitación.

Por lo anterior, en esta sección se presentan los resultados obtenidos para los pasos 3, 4, 5, 6, 7 y 11 (Tabla 25) para la cuenca de drenaje del puente 120.

Paso 3

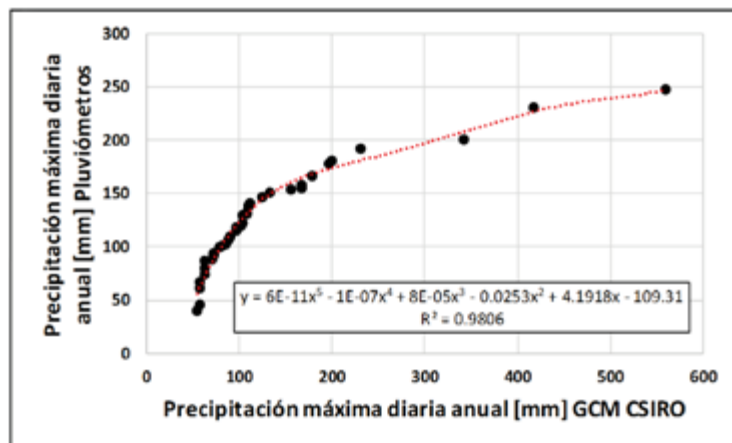
Análisis de completitud, concordancia y homogeneidad de estaciones pluviométricas y comparación con nodos de GCM, para validación de datos de precipitación máxima diaria

Para el escenario de modelación con condiciones de cambio climático se hizo uso del método de regresión polinómica entre los datos de precipitación máxima diaria multianual provistos por las estaciones pluviométricas en comparación con los datos modelados por el GCM seleccionado. Con un alto grado de correlación (R^2 de 0.98), se construyó la ecuación de regresión polinómica de grado 5 que se presenta en la Figura 44.

FIGURA 44

Ajuste regresión polinómica de grado 2 (Pluviómetros vs. Datos simulados CSIRO-Mk-3-6-0)

Año	Pluviómetros	GCM	Año	Pluviómetros	GCM
	Máximo [mm]	Máximo [mm]		Máximo [mm]	Máximo [mm]
1	40	754.5	20	128.6	103.7
2	45	57.0	21	130.7	107.8
3	60.2	57.4	22	131.8	108.5
4	65.8	57.9	23	137.4	108.9
5	74.2	62.5	24	138	110.6
6	80	62.7	25	141	111.9
7	86.4	62.9	26	146.5	124.4
8	87.9	70.1	27	150	133.3
9	91.6	72.0	28	153	155.2
10	94.1	72.1	29	154.8	166.9
11	99.4	79.3	30	157	167.4
12	101	81.5	31	166.2	178.6
13	101.9	85.0	32	177.8	196.3
14	107	88.4	33	180.5	199.3
15	109.2	90.8	34	192	231.0
16	115	96.5	35	200	341.1
17	117.4	96.8	36	229.7	417.2
18	119.6	102.3	37	247.2	559.4
19	121.7	102.9			

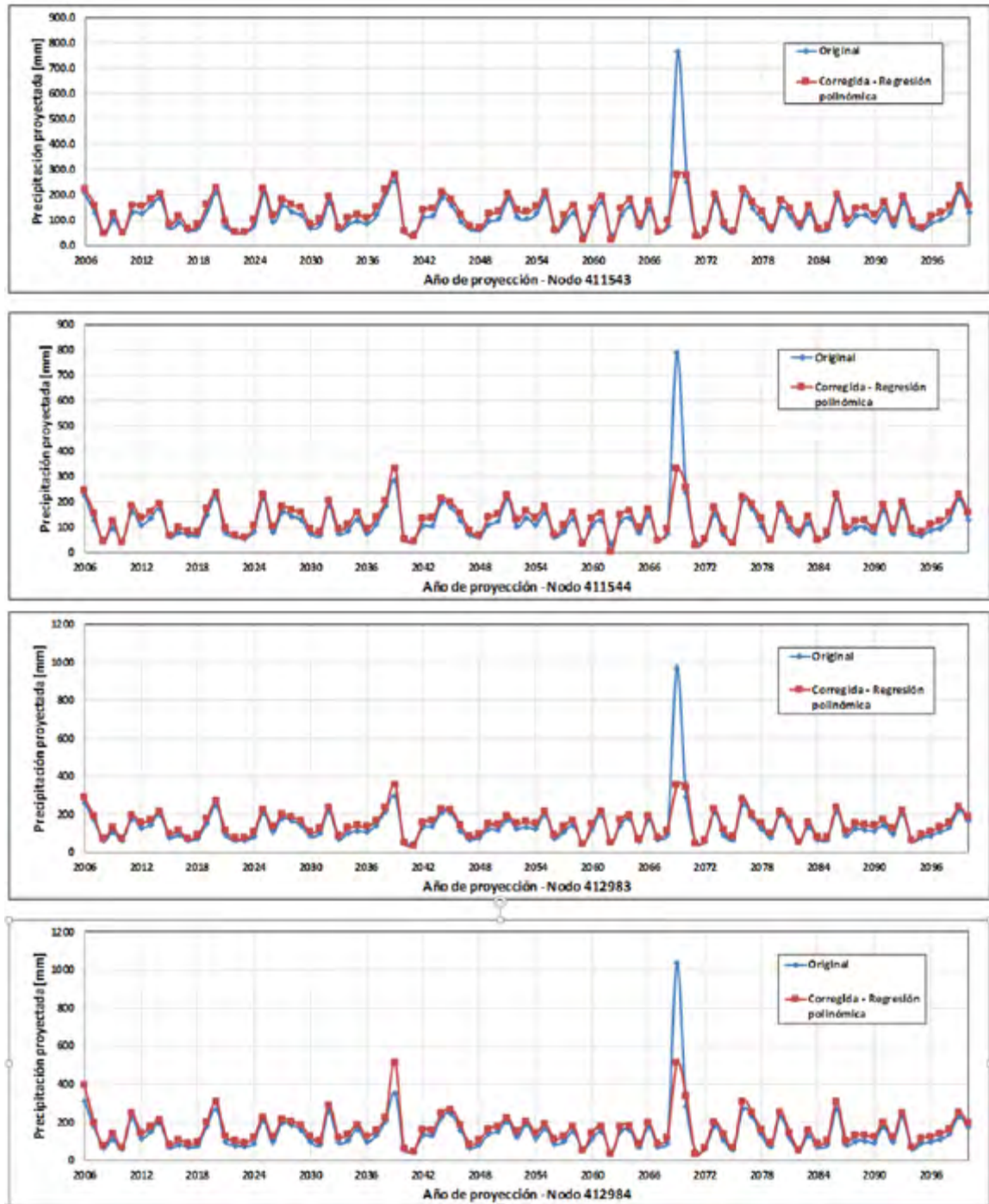


Tomando en consideración la ecuación de regresión construida, se obtienen los valores de precipitación máxima diaria multianual corregidos para cada uno de los nodos GCM seleccionados en cada cuenca. Para el caso particular de la cuenca de drenaje del puente 120, la Figura 45 presenta las precipitaciones máximas diarias proyectadas entre 2006 y 2100 por el modelo GCM escalado en cada nodo de análisis. Adicionalmente, se presentan los valores corregidos a partir de la ecuación de regresión polinómica presentada en la figura anterior.

Con respecto a los datos originales vs. Corregidos se evidencia que, en promedio, para los datos corregidos se presenta un incremento porcentual del 11% en la media de precipitación. Se observa que, para todos los nodos GCM analizados, en el año 2069 existe un dato fuera del rango normal de proyección, el cual oscila entre 35 y 300 mm/día. En este caso particular, se presenta una notoria reducción en el valor para dicho año. Pero en el resto de la serie de datos se presenta un incremento porcentual del 3% de forma consistente para todo el rango.

FIGURA 45

Precipitación máxima diaria multianual proyectada por GCM
CSIRO-Mk-3-6-0 (azul) vs. Corregida a partir de regresión poli-
nómica con datos históricos de pluviómetros (rojo)



Paso 4

Serie de precipitación máxima diaria corregida para 2006-2100

Una vez aplicada la corrección a la serie de datos proyectados original, se obtienen series de datos en el rango de años de medición comprendido entre 2006 y 2100.

Para el caso particular de la cuenca de drenaje del puente 120, se obtienen 4 series de datos de precipitación máxima diaria anual. La Tabla 39 presenta estadísticas de precipitación máxima diaria corregida para los nodos GCM CSIRO-Mk-3-6-0; 411543, 411544, 412983 y 412984.

De esta tabla se identifica que, los meses con precipitación máxima que más se repiten en

el rango de datos son Junio (30.5%) y Mayo (23.2%). Lo anterior proporciona una mayor importancia al primer modo del régimen de precipitación bimodal que se presenta en el país, y en esta cuenca particular. Para el caso de los nodos 411543 y 411544, la media de precipitación máxima se encuentra en 132 mm/día, con un rango que se encuentra entre 20 y 277 mm/día. Para el caso de los nodos 412983 y 412984, la media de precipitación máxima se encuentra entre 150 y 162 mm/día, con un rango que se encuentra entre 34 y 355 mm/día. Lo anterior significa que en el extremo sur de la cuenca se presenta una precipitación máxima diaria que, en promedio, es mayor en un 15%.

Por otro lado, en comparación con los valores medios generados para las condiciones de precipitación histórica, se observa que los valores diarios máximos que se proyectan con condición de cambio climático presentan un incremento porcentual del 20.9% para el norte de la cuenca y del 22.4% para la zona sur.

TABLA 39

Estadísticas precipitación máxima diaria
2006-2100 corregida para nodos GCM CSI-
RO-Mk-3-6-0

Nº	Año	411543				411544				412983				412984			
		Mes Max.	Precipitación (mm)			Mes Max.	Precipitación (mm)			Mes Max.	Precipitación (mm)			Mes Max.	Precipitación (mm)		
		Precip.	x_i	$(x_i - \bar{x})^2$	$\log(x_i)$	Precip.	x_i	$(x_i - \bar{x})^2$	$\log(x_i)$	Precip.	x_i	$(x_i - \bar{x})^2$	$\log(x_i)$	Precip.	x_i	$(x_i - \bar{x})^2$	$\log(x_i)$
1	2006	10	218.30	7553.13	2.34	10	244.34	12448.19	2.39	10	287.18	18777.70	2.46	10	393.38	53253.6	2.59
2	2007	5	157.06	659.04	2.20	5	154.66	479.36	2.19	5	187.92	1426.57	2.27	5	195.44	1077.5	2.29
3	2008	10	45.54	7369.83	1.66	10	43.41	7984.16	1.64	9	72.14	6085.39	1.86	9	78.42	7088.4	1.89
4	2009	3	123.87	56.49	2.09	3	123.69	82.47	2.09	3	129.38	431.57	2.11	3	138.61	576.10	2.14
5	2010	1	49.07	6777.21	1.69	1	39.08	8776.94	1.59	1	72.24	6069.82	1.86	1	66.39	9258.68	1.82
6	2011	6	157.58	685.99	2.20	6	181.97	2420.58	2.26	6	193.13	1847.60	2.29	6	244.16	6648.93	2.39
7	2012	12	154.09	515.48	2.19	12	136.87	16.86	2.14	12	157.05	47.64	2.20	12	145.05	308.75	2.16
8	2013	6	180.32	2394.22	2.26	6	161.97	852.82	2.21	6	170.60	418.18	2.23	6	174.10	131.90	2.24
9	2014	5	202.05	4992.76	2.31	5	191.56	3455.99	2.28	5	213.74	4043.49	2.33	5	209.95	2240.77	2.32
10	2015	8	83.30	2312.17	1.92	9	69.01	4064.89	1.84	8	98.11	2708.26	1.99	8	81.52	6577.16	1.91
...	
89	2094	5	96.14	1242.63	1.98	5	92.92	1588.08	1.97	5	63.18	7564.30	1.80	7	10	69.41	8687.92
90	2095	9	68.23	3988.77	1.83	9	79.15	2875.16	1.90	9	96.31	2898.37	1.98	7	9	112.91	2471.03
91	2096	5	112.59	353.54	2.05	5	110.49	496.47	2.04	5	108.22	1757.86	2.03	7	5	124.21	1474.73
92	2097	6	128.49	8.43	2.11	6	124.22	73.00	2.09	6	133.81	266.96	2.13	10	6	139.59	530.21
93	2098	3	156.85	648.18	2.20	3	156.21	549.74	2.19	3	158.04	62.18	2.20	6	3	165.65	9.20
94	2099	5	232.73	10269.17	2.37	5	228.05	9078.76	2.36	5	238.10	7734.61	2.38	12	5	249.45	7539.50
95	2100	10	156.10	610.53	2.19	10	156.93	583.95	2.20	10	185.00	1214.68	2.27	8	10	195.48	1080.07
95		Suma	12482	182239.3	196.2	Suma	12612.9	201438	195.6	Suma	14264.3	223773.8	202.2	Suma	15448.6	371187.1	204.6
		Promedio	131.4		2.1	Promedio	132.8		2.1	Promedio	150.2		2.1	Promedio	162.6		2.2
		Desvest.	59.3		0.2	Desvest.	64.0		0.2	Desvest.	68.4		0.2	Desvest.	87.2		0.2

Paso 5

Serie de precipitación máxima diaria corregida para 2006-2100

De igual manera que para el análisis del escenario de precipitación histórica, a partir de las series de precipitación máxima diaria multianual (Tabla 39) generadas para cada nodo GCM en el rango 2006 a 2100, el siguiente paso corresponde al análisis de frecuencia de

magnitudes con el objetivo de determinar la manera en la que se distribuyen los datos de precipitación.

Bajo los mismos supuestos y FDP mencionados en el escenario histórico, a continuación, se presentan las pruebas de bondad de ajuste y los histogramas de frecuencias normalizado para los nodos GCM seleccionados para la cuenca de drenaje del puente 120.

TABLA 40

Pruebas de bondad de ajuste para FDP conocidas.
Ajuste para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 411543

FDP	Params	K-S+	K-S-	K-S	A-D	CVM	WG	WU
Gumbel	beta=52.20374, delta=102.68461	0.05986	0.12764	0.12764	1.37872	0.27385	0.85562	0.19977
Log Normal	media=134.13456, desv. std.=77.65605	0.06701	0.11735	0.11735	1.56658	0.27694	0.88087	0.22508
Weibull	alfa=2.38763, lambda=0.00674, delta=0.00000	0.05508	0.06722	0.06722	0.31235	0.04962	0.55427	0.04931
Normal	mu=131.38899, sigma=59.00018	0.06343	0.04566	0.06343	0.42342	0.05263	0.55515	0.04865
Gamma	alfa=4.19661, lambda=0.03194	0.05069	0.09934	0.09934	0.77347	0.14103	0.63898	0.12003
Logistic	alfa=131.38899, lambda=0.03074	0.08573	0.0565	0.08573	0.79822	0.11411	0.771	0.10994
Uniforme	min=20.51177, max=277.00634	0.18748	0.05869	0.18748	5.87646	0.95614	1.16727	0.52045
Exponencial	Lambda=0.00761	0.13854	0.25923	0.25923	12.35638	2.35273	2.27716	1.49365
Pareto	alfa=0.57693, beta=20.51177	0.22274	0.3468	0.3468	21.07369	4.29722	3.26449	3.1014

FIGURA 46

Histograma de frecuencias normalizado con Función de Densidad de Probabilidad con mejor bondad de ajuste (en rojo: Gumbel) para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 411543

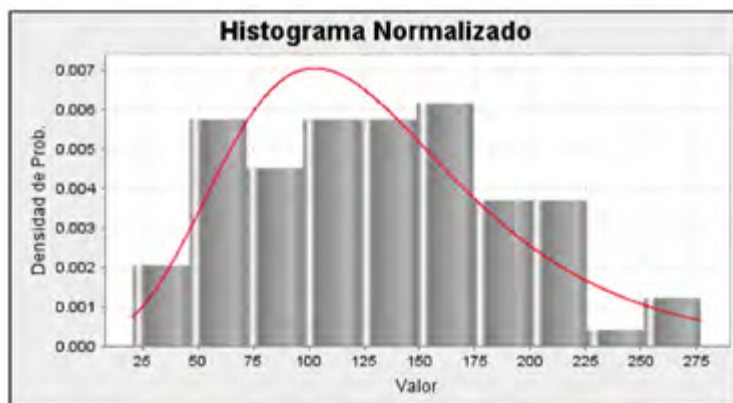


TABLA 41

Pruebas de bondad de ajuste para FDP conocidas.
Ajuste para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 411544

FDP	Params	K-S+	K-S-	K-S	A-D	CVM	WG	WU
Weibull	alfa=2.17874, lambda=0.00668, delta=0.00000	0.04272	0.05183	0.05183	0.24659	0.03538	0.44135	0.03475
Gumbel	beta=54.62001, delta=102.53802	0.0451	0.07556	0.07556	0.45294	0.07551	0.5174	0.06946
Normal	mu=132.76749, sigma=63.64936	0.07914	0.03758	0.07914	0.48615	0.06782	0.65515	0.05431
Gamma	alfa=3.56035, lambda=0.02682	0.04759	0.08698	0.08698	0.62012	0.10402	0.61285	0.08183
Logistic	alfa=132.76749, lambda=0.02850	0.1005	0.03866	0.1005	0.68552	0.1137	0.85072	0.0971
Log Normal	media=138.82625, desv. std.=94.86236	0.08334	0.11735	0.11735	1.78253	0.29084	1.05466	0.23211
Exponencial	Lambda=0.00753	0.13041	0.27011	0.27011	11.38787	2.19443	2.16067	1.40304
Uniforme	min=4.44258, max=331.08217	0.2751	0.06645	0.2751	11.73992	2.27209	1.63708	1.18166
Pareto	alfa=0.30765, beta=4.44258	0.26597	0.45117	0.45117	30.06712	6.36703	3.80553	4.89527

FIGURA 47

Histograma de frecuencias normalizado con Función de Densidad de Probabilidad con mejor bondad de ajuste (en rojo: Gumbel) para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 411544



TABLA 42

Pruebas de bondad de ajuste para FDP conocidas.
Ajuste para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 412983

Distribución	Params	K-S+	K-S-	K-S	A-D	CVM	WG	WU
Gamma	alfa=4.67315, lambda=0.03112	0.04694	0.06492	0.06492	00.36249	0.0625	0.50857	0.05989
Gumbel	beta=56.06132, delta=118.37406	0.05166	0.068	0.068	0.42981	0.07483	0.56432	0.07113
Logistic	alfa=150.15102, lambda=0.02664	0.07298	0.04396	0.07298	0.7098	0.09631	0.53953	0.0668
Normal	mu=150.15102, sigma=68.08554	0.08571	0.04475	0.08571	0.7108	0.08252	0.67868	0.05796
Log Normal	media=151.62199, desv. std.=79.16753	0.05893	0.09641	0.09641	0.86199	0.15837	0.72573	0.13545
Exponencial	Lambda=0.00666	0.14164	0.27884	0.27884	13.22737	2.54747	2.32095	1.66313
Uniforme	min=34.53939, max=355.16814	0.30197	0.02253	0.30197	14.01127	2.88226	1.58432	1.0356
Pareto	alfa=0.73597, beta=34.53939	0.17993	0.31319	0.31319	17.56614	3.50824	2.78509	2.44461
Chi Cuadrada	Grados Lib.=145.00000	0.56243	0.15041	0.56243	40.02937	8.89094	3.46431	4.82049

FIGURA 48

Histograma de frecuencias normalizado con Función de Densidad de Probabilidad con mejor bondad de ajuste (en rojo: Gumbel) para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 412983



TABLA 43

Pruebas de bondad de ajuste para FDP conocidas.
Ajuste para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 412984

Distribución	Params	K-S+	K-S-	K-S	A-D	CVM	WG	WU
Gumbel	beta=62.38131, delta=125.43662	0.03552	0.03232	0.03552	0.15929	0.0168	0.30508	0.01511
Gamma	alfa=3.96259, lambda=0.02437	0.0514	0.03297	0.0514	0.25852	0.03245	0.44188	0.02895
Log Normal	media=163.51563, desv. std.=91.79151	0.04788	0.05905	0.05905	0.33206	0.05029	0.54176	0.04465
Weibull	alfa=1.99280, lambda=0.00543, delta=0.00000	0.08169	0.06157	0.08169	1.0194	0.13941	0.70164	0.13047
Logistic	alfa=162.61671, lambda=0.02092	0.10596	0.06259	0.10596	1.65994	0.28207	0.71288	0.17976
Normal	mu=162.61671, sigma=86.71821	0.10481	0.07442	0.10481	2.10575	0.31734	0.7418	0.23906
Exponencial	Lambda=0.00615	0.12094	0.27735	0.27735	11.77168	2.26767	2.04069	1.52484
Pareto	alfa=0.67294, beta=32.26310	0.17699	0.34467	0.34467	18.48783	3.75435	2.77451	2.65311
Uniforme	min=32.26310, max=511.26730	0.45186	0.02104	0.45186	32.86866	7.05252	2.18319	2.11987
Chi Cuadrada	Grados Lib.=158.00000	0.53681	0.15282	0.53681	37.48587	8.28274	3.30509	4.56893

FIGURA 49

Histograma de frecuencias normalizado con Función de Densidad de Probabilidad con mejor bondad de ajuste (en rojo: Log-Normal) para nodo GCM CSIRO-Mk-3-6-0 - 412984

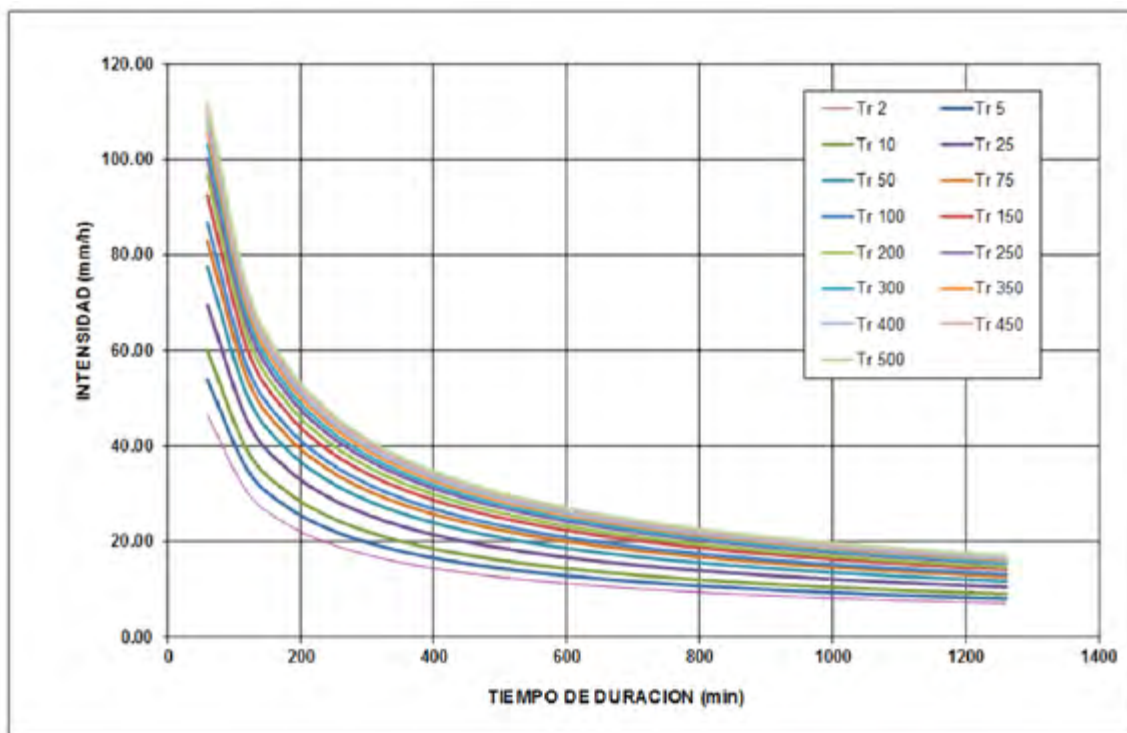


A partir de las pruebas de bondad de ajuste en los nodos analizados (411543, 411544, 412983 y 412984) para la cuenca de drenaje del puente 120, se identifica que la FDP que más se repite en los datos analizados es de tipo Gumbel. Por tanto, esta distribución es seleccionada para estimar las precipitaciones máximas diarias asociadas a los períodos de retorno de interés.

Paso 6

Obtención de curvas IDF para cada cuenca/subcuenca de análisis

Respetando el mismo procedimiento del paso 6 en el escenario histórico, a continuación, se presentan las curvas IDF para la condición de precipitación con cambio climático entre 2006 y 2100 para la cuenca de drenaje del puente 120.



La ecuación generatriz de las curvas IDF para la cuenca del puente 120 es como se muestra a continuación.

Ecuación 6

$$I \left[\frac{mm}{hr} \right] = \frac{522.09 * T^{0.159198}}{t^{0.61754}}$$

Paso 7

Obtención de hietogramas a partir de curvas IDF para cada cuenca/subcuenca de análisis

De igual manera a como se estiman las tormentas de diseño para el escenario de precipitación histórica, se realiza para el escenario de cambio climático. Para el caso particular de la cuenca del puente 120, se estiman las siguientes características de tormentas de diseño. Cabe recordar que en la Tabla 44 se presentan resultados para 6 de los 15 períodos de retorno analizados por simplicidad de lectura.

TABLA 44

Características de tormentas de diseño para la cuenca del puente 120, para períodos de retorno seleccionados – Escenario con Cambio Climático

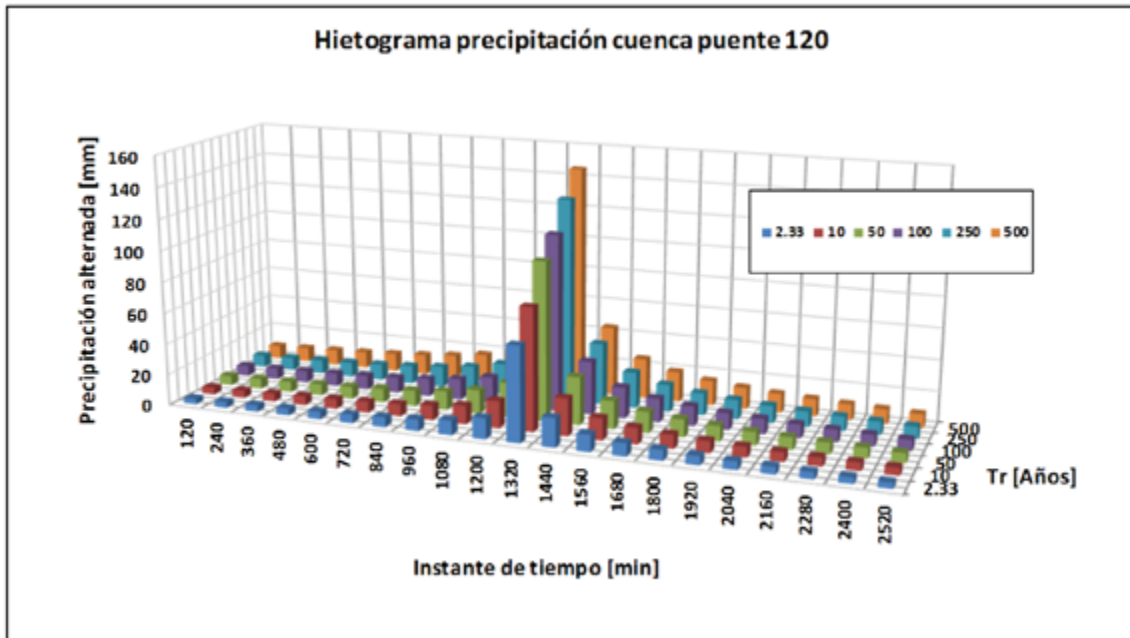
	Tr 2.33 años	Tr 10 años	Tr 50 años	Tr 100 años	Tr 250 años	Tr 500 años
Duración de la tormenta (h)	42	42	42	42	42	42
Intensidad de lluvia (mm/h)	4.63	5.98	7.72	8.62	9.98	11.14
Precipitación en 24 horas (mm)	194.29	251.02	324.33	362.17	419.05	467.94
Intervalos de tiempo (min)	120	120	120	120	120	120

En la tabla anterior, se evidencia que la duración de los hietogramas calculados no cambia con respecto al escenario histórico, puesto que las condiciones geométricas de la cuenca permanecen iguales. Por lo tanto, la duración de cada hietograma es de 42 horas (2520 minutos) para todos los períodos de retorno considerados. El intervalo de tiempo para los que se calculan los bloques de precipitación es de 120 minutos, para un total de 21 datos de precipitación, con el valor máximo estimado en el minuto 1320 del rango. La metodología por medio de la cual se construyen los hietogramas corresponde a bloques alternados a partir de intensidades de precipitación provistos por curvas IDF.

En la Figura 50 se presentan los hietogramas contruidos para la cuenca del puente 120, para períodos de retorno seleccionados en el escenario con cambio climático.

FIGURA 50

Hietogramas (tormentas de diseño) contruïdidos a partir de curvas IDF para la cuenca del puente 120, para períodos de retorno seleccionados



Paso 11

Hidrogramas de creciente asociados a períodos de retorno seleccionados, para todas las cuencas de análisis, para las condiciones de análisis de precipitación con cambio climático

Como se evidencia en el diagrama de flujo presentado en la Figura 2, habiendo reunido los modelos; geométrico, meteorológico, de pérdidas, de transformación y de tránsito de caudales en las cuencas analizadas, el resultado del modelo hidrológico de precipitación-escorrentía planteado corresponde a hidrogramas de creciente asociados a períodos

de retorno de interés. Dichos hidrogramas de creciente relacionan los caudales instantáneos [m³/s] esperados para cada instante de tiempo en un punto de análisis particular. Para este proyecto, los puntos en los que se concentra el análisis corresponden a las 33 localizaciones geográficas de los puentes vehiculares objetivo.

Para el caso específico de la cuenca de drenaje del puente 120, la Tabla 45 presenta los valores de caudal pico para condición de precipitación con cambio climático, para los 15 períodos de retorno analizados.

TABLA 45

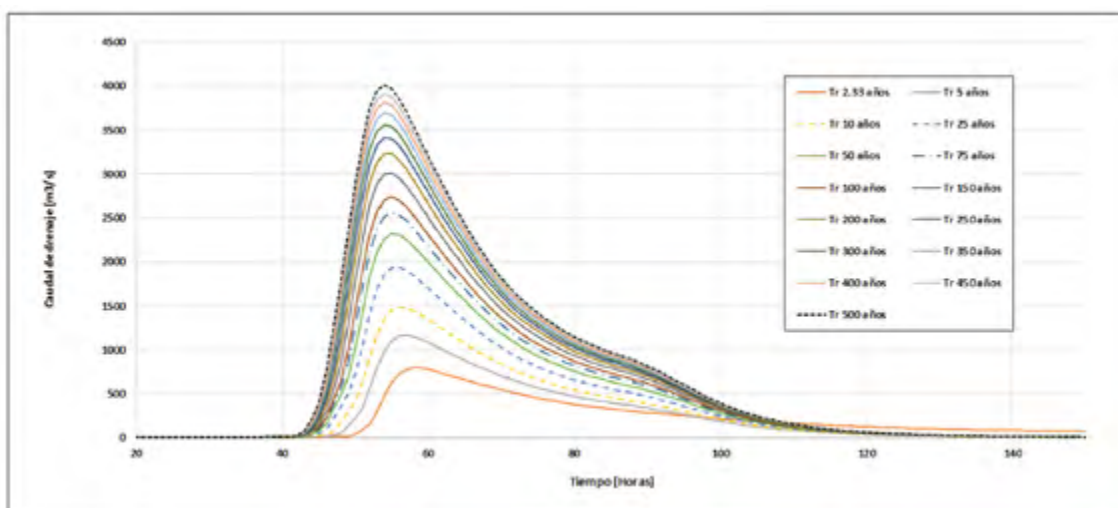
Caudales pico calculados para condición de precipitación con cambio climático, por periodo de retorno, para cuenca de drenaje del puente 120, en comparación con caudales pico históricos

Tr [Años]	Caudal pico Cambio Climático [m ³ /s]	Caudal pico histórico [m ³ /s]	% Cambio (CC/Hist.)
2.33	793.3	793.3	64.19
5	1166.2	1166.2	40.02
10	1487.3	1487.3	29.72
25	1940.2	1940.2	20.53
50	2320.2	2320.2	15.02
75	2557.9	2557.9	12.26
100	2736	2736	10.50
150	3011.1	3011.1	8.61
200	3227.6	3227.6	7.29
250	3413.2	3413.2	6.19
300	3561.3	3561.3	5.14
350	3696	3696	4.30
400	3813.1	3813.1	3.63
450	3913.6	3913.6	2.88
500	4008.4	4008.4	2.43

En la tabla anterior se evidencia que, para el escenario de análisis con condiciones de cambio climático se presenta un incremento en los caudales pico esperados que se pueden igualar o exceder para todo el rango de periodos de retorno analizados. Particularmente, se presentan los mayores incrementos en las frecuencias altas (2.33 a 25 años) con incrementos superiores al 20%. Mientras que para frecuencias bajas (>100 años), el incremento es del 10%, o menor.

FIGURA 51

Hidrogramas de creciente estimados para condición de precipitación con cambio climático en la cuenca de drenaje del puente 120



5.2 Análisis Comparativo

El análisis comparativo de los resultados finales obtenidos para los dos escenarios de precipitación (histórica y con cambio climático) se realiza con base en dos resultados; i) caudales pico para todas las cuencas, para todos los períodos de retorno de análisis y, ii) gráficos de período de retorno vs. Caudal pico para un grupo de puentes seleccionado en los que se evidencian las tres tipologías de resultados obtenidos.

En primera instancia, la Tabla 46 presenta los caudales pico calculados para los escenarios de precipitación histórica y con cambio climático para las 33 cuencas de análisis.

TABLA 46

Caudales pico calculados para condición de precipitación histórica y con cambio climático para 33 cuencas de drenaje en Haití

Pte. Esc		Periodo de retorno [Años]														
		2.33	5	10	25	50	75	100	150	200	250	300	350	400	450	500
120	Hist	284.1	699.5	1045.3	1541.9	1971.8	2244.2	2448.8	2751.8	2992.4	3202	3378.3	3537.1	3674.5	3800.9	3910.8
	CC	793.3	1166.2	1487.3	1940.2	2323.2	2557.9	2736	3011.1	3227.6	3413.2	3561.3	3696	3813.1	3913.6	4008.4
5	Hist	31.7	53.7	66.3	88.7	114	131.2	145.5	169.5	187.7	202.5	215.1	226.1	235.9	244.7	252.7
	CC	50.5	67.5	83.1	115.3	146.4	170.1	188	214.8	235.3	251.7	265.6	277.8	288.6	298.4	307.3
89	Hist	81.5	112	139.8	183.8	214.6	251.3	272.9	306.2	331.1	351.8	369.4	385	398.8	411.3	422.8
	CC	90.9	119.6	144.9	185	220.8	244.3	263.2	291.8	313.5	330.9	345.7	358.8	370.3	381.1	390.6
4	Hist	60.1	82.7	103.9	138.4	170.4	192	209.2	236.1	256.9	273.9	288.7	301.6	313.2	323.6	333.4
	CC	41.4	54.7	66.6	85.2	101.9	112.8	121.2	133.7	143.2	151	157.6	163.5	168.6	173.3	177.7
121	Hist	346.5	509.9	663.6	907.7	1126.6	1276.5	1389.8	1557.6	1693.3	1805.3	1900.7	1984.7	2058	2126	2188
	CC	597.4	784.3	951.5	1211	1443.3	1595	1708.6	1879.3	2011	2118.9	2210.1	2289.5	2360.2	2424.4	2482.8
102	Hist	37.4	86.8	119.3	161	198	226.6	247	278	301	320	336	350	363	374	384
	CC	25.1	37.6	76	107	133.7	149.3	160.4	177.4	190	202	213	222	229.7	236.8	243.2
101	Hist	108.5	146	223	334	418	474	515	578	626	665	699	728	754	778	799
	CC	79.4	105.2	128.1	198.6	273.7	307.6	334.6	374.5	405.4	431.7	453.1	472.4	488.8	504.2	517.2
90	Hist	13.7	30.2	39	57.8	88	101	112	128	141	152	161	168	176	182	187
	CC	4.7	14	19.2	36.2	43.7	50.8	68.1	76.6	83.3	89.8	94.9	98.4	102.5	106.5	109.5
11	Hist	176	342	470	695	897	1044	1154	1318	1444	1553	1652	1736	1809	1880	1943
	CC	200.5	393.3	538.1	776	1004.4	1157.7	1273	1448.4	1591.6	1711.8	1813.8	1906.2	1987.5	2063.4	2133.9
12	Hist	138	236	321	534	795	935	1048	1227	1371	1489	1588	1675	1752	1825	1887
	CC	171.3	271.7	411.4	673.4	897.7	1052.3	1174.4	1375.7	1529.4	1651.8	1756.3	1849.4	1931.7	2006.8	2077.3
97	Hist	31.7	41.5	50.8	65.8	79.7	88.9	96	107	115	122	128	133	138	142	146
	CC	37.1	47.3	56.6	71.2	84.4	93.1	99.7	109.8	117.5	123.9	129.2	134	138.2	142	145.5
66	Hist	13.8	42.5	67.8	108.5	145	172	193	224	249	269	287	303	318	331	343
	CC	38.4	69.5	96.9	135.8	177.2	203.5	223.4	254.5	278.4	298.7	315.8	331	344.8	357.3	369
67	Hist	39.2	60	89	131	175	205	229	266	295	319	340	360	377	393	408
	CC	58.4	90.5	118.1	165.4	210.5	241	264.7	301.4	329.8	353.8	374.6	393.1	409.7	424.9	438.9
68	Hist	78	120	159	228	298	342	373	435	480	514	543	568	590	611	631
	CC	117.7	161.8	208.8	282.8	349.1	393.4	433.7	489.1	528	559.8	586.9	610.9	633.2	656.2	676.9
69	Hist	37	63	92	143	194	228	256	295	329	357	379	399	417	434	451
	CC	57.8	82.9	105.6	142.1	177.2	198.5	213.4	241.5	261	276.3	288.8	299.5	309	319.7	328.9
70	Hist	3	6.1	9.5	16	22	26	30	34	39	43	45.9	48	51	53.5	55
	CC	5.3	8.3	11.1	15.6	19.6	22.5	24.6	27.3	30.4	32.3	33.7	34.9	36.2	37.7	39
71	Hist	39	73	105	161	216	254	283	331	366	396	424	449	470	490	507
	CC	65.8	93	118.9	159.9	195.8	222.2	241.2	267.3	288.9	307.5	322.7	335.3	346.3	356.2	365.8
72	Hist	205	419	594	876	1130	1299	1429	1628	1779	1903	2009	2106	2194	2273	2344
	CC	172.1	260.2	354.5	477.9	582	644.7	694.5	766.2	819.2	861.5	896.3	926.9	954.6	978.3	1000.9
14	Hist	77	107	137	191	242	276	302	343	374	400	421	441	458	474	488
	CC	70.7	87.6	103.4	126.8	147.5	165.2	177.2	194.7	207.3	217.8	226.6	234.5	241.3	247.4	253.1
15	Hist	47	84	133	215	289	338	377	437	485	526	559	589	617	641	661
	CC	48	67.3	95	142.3	183.4	210.5	230.1	258.8	281.1	298.8	313.6	326.6	338.2	348.9	358.7
16	Hist	15	20	28	50	77	95	110	132	150	165	178	189	200	210	218
	CC	22.9	36.3	56.5	95.8	134	160.1	181.3	213.9	239.4	260.7	279.2	295.9	310.5	324	336.6
40	Hist	15	44	82	169	278	353	408	496	562	620	667	709	746	780	811
	CC	24.8	39.3	60.3	93.2	121.8	147.2	168.5	196.2	226.9	248.7	264.3	276.9	289.5	300.1	313.1
38	Hist	4.9	12	20	36	57	71	85	107	124	138	151	162	173	181	190
	CC	6.9	12.6	17	22.9	28.6	33.6	37.8	43.5	48	51.7	55.5	58.5	61.5	63.8	65.4
41	Hist	48.6	88	128	218	299	355	399	467	520	564	602	634	664	691	717
	CC	64.1	87.2	107.9	136.9	183.2	206	222.6	248	266.1	281.7	294.4	305.6	315.2	324.5	333
39	Hist	12	23	35	55	76	91	102	120	133	144	153	162	170	177	184
	CC	17.5	28.3	38.3	53.7	68.5	79.1	87.3	98.1	107.4	115.1	121.6	127	131.7	135.7	139.5
104	Hist	11	15	20	29	38	44	49	56	63	68	73	77	81	85	88
	CC	15.6	21.1	26.9	36.5	45.6	51.8	56.7	64.5	70.8	76.1	80.7	84.8	88.5	91.8	95

Pte. Esc		Período de retorno [Años]													
		2.33	5	10	25	50	75	100	150	200	250	300	350	400	500
54	Hist	9	13	21	41	66	85	100	124	143	160	174	187	198	209
	CC	12.2	19.7	29.8	50.2	72.9	88.6	100.9	120	134.9	147.2	158	167.5	175.9	183.8
48	Hist	3.4	4.5	5.7	8	10	12.8	15	17	20	22	24	26	28	29.4
	CC	4.3	5.3	6.4	8.3	10.3	11.7	12.8	14.6	16.1	17.2	18.3	19.2	20.1	20.9
47	Hist	0.8	1.2	1.5	2	2.5	2.8	3.1	3.5	3.8	4.1	4.3	4.6	4.7	4.9
	CC	5.9	20	34	64	93	114	131	157	177	195	209	223.2	235	246.2
49	Hist	17.3	32.6	50.2	79.4	107.3	126.5	140.9	164	181.9	196.4	209	220	230.2	239.2
	CC	2.1	4.1	6.7	11.8	17	20.6	23.5	28	31.6	34.7	37.4	39.7	41.9	43.8
50	Hist	3.8	6.4	9.4	14.5	19.4	22.6	25.2	29.2	32.4	35	37.2	39.2	41	42.6
	CC	56.1	85.9	116	170	222	259	288	334	370	400	426	449	470	489
51	Hist	80.8	113.7	145.4	197.6	246.8	280.4	306.3	346.2	377.2	402.7	424.6	443.9	461.2	477
	CC	8.5	13	18	27	39	47	54	65	73	80	86	91	96	100
55	Hist	12.2	17.3	22.4	33.6	44.6	52.2	58.1	67.3	74.5	80.5	85.6	90.2	94.2	98
	CC														

De la anterior tabla, de manera general se infieren tres tipologías de resultados en términos de comparación de caudales pico para los dos escenarios modelados. Estas tres tipologías se clasifican en; incremento, decrecimiento y sin cambio. Para estas tres tipologías se concluye lo siguiente a partir de la información de la Tabla 46, Tabla 47 y Tabla 48.

Del total de 33 puentes, en términos del cambio de caudal pico en condiciones de precipitación con cambio climático en relación con la condición histórica, 15 (45%) puentes incrementan su caudal, 2 (6%) puentes permanecen sin cambios y 16 (48%) puentes disminuyen su caudal. De estos grupos de puentes, se evidencia que:

i. Para el grupo que incrementa su caudal pico; el cambio mínimo (o máxima disminución) es de -66% y el promedio es -29%. Mientras que el cambio máximo es de 193% y el promedio

es del 22%. Adicionalmente, 10 de 15 puentes presentan un aumento para todo el rango de periodos de retorno analizados. Para los 5 puentes restantes, únicamente se presentan disminuciones mínimas en periodos de retorno altos (>100 años). La disminución máxima se da en el período de retorno de 500 años, alrededor de 13%.

ii. Para el grupo de puentes que permanecen sin cambio de caudal; la disminución mínima es de -8%, el incremento máximo del 17% y el promedio es 1%. Adicionalmente, en todos los casos para periodos de retorno bajos (<50 años) hay incremento de caudal.

iii. Para el grupo de puentes que disminuyen su caudal; 9 de 16 puentes (69, 70, 71, 40, 38, 41, 39, 48, 47) presentan un aumento, de hasta 77%, para frecuencias altas (periodos de retorno hasta 10 años).

TABLA 47

Cambio porcentual de caudales pico calculados para condición de precipitación histórica y con cambio climático para 33 cuencas de drenaje en Haití

Punto	Cambio %															Clase
	2.3	5	10	25	50	75	100	150	200	250	300	350	400	450	500	
P120	▲ 179%	▲ 67%	▲ 42%	▲ 26%	▲ 18%	▲ 14%	▲ 12%	▲ 9%	▲ 8%	▲ 7%	▲ 5%	▲ 4%	▲ 4%	▲ 3%	▲ 2%	▲ 27%
P5	▲ 59%	▲ 26%	▲ 25%	▲ 30%	▲ 28%	▲ 30%	▲ 29%	▲ 27%	▲ 25%	▲ 24%	▲ 23%	▲ 23%	▲ 22%	▲ 22%	▲ 22%	▲ 28%
P89	▲ 12%	▲ 7%	▲ 4%	▲ 1%	▲ 3%	▼ -3%	▼ -4%	▼ -5%	▼ -5%	▼ -6%	▼ -6%	▼ -7%	▼ -7%	▼ -7%	▼ -8%	▼ -2%
P4	▼ -31%	▼ -34%	▼ -36%	▼ -38%	▼ -40%	▼ -41%	▼ -42%	▼ -43%	▼ -44%	▼ -45%	▼ -45%	▼ -46%	▼ -46%	▼ -46%	▼ -47%	▼ -42%
P121	▲ 72%	▲ 54%	▲ 43%	▲ 33%	▲ 28%	▲ 25%	▲ 23%	▲ 21%	▲ 19%	▲ 17%	▲ 16%	▲ 15%	▲ 15%	▲ 14%	▲ 13%	▲ 27%
P102	▼ -33%	▼ -57%	▼ -36%	▼ -34%	▼ -32%	▼ -34%	▼ -35%	▼ -36%	▼ -37%	▼ -37%	▼ -37%	▼ -37%	▼ -37%	▼ -37%	▼ -37%	▼ -37%
P101	▼ -27%	▼ -28%	▼ -43%	▼ -41%	▼ -35%	▼ -35%	▼ -35%	▼ -35%	▼ -35%	▼ -35%	▼ -35%	▼ -35%	▼ -35%	▼ -35%	▼ -35%	▼ -35%
P90	▼ -66%	▼ -54%	▼ -51%	▼ -37%	▼ -50%	▼ -50%	▼ -39%	▼ -40%	▼ -41%	▼ -41%	▼ -41%	▼ -41%	▼ -42%	▼ -41%	▼ -41%	▼ -45%
P11	▲ 14%	▲ 15%	▲ 14%	▲ 12%	▲ 12%	▲ 11%	▲ 10%	▲ 10%	▲ 10%	▲ 10%	▲ 10%	▲ 10%	▲ 10%	▲ 10%	▲ 10%	▲ 11%
P12	▲ 24%	▲ 15%	▲ 28%	▲ 26%	▲ 13%	▲ 13%	▲ 12%	▲ 12%	▲ 12%	▲ 11%	▲ 11%	▲ 10%	▲ 10%	▲ 10%	▲ 10%	▲ 14%
P97	▲ 17%	▲ 14%	▲ 11%	▲ 8%	▲ 6%	▲ 5%	▲ 4%	▲ 3%	▲ 2%	▲ 2%	▲ 1%	▲ 1%	▲ 0%	▲ 0%	▲ 0%	▲ 5%
P66	▲ 178%	▲ 64%	▲ 43%	▲ 25%	▲ 22%	▲ 18%	▲ 16%	▲ 14%	▲ 12%	▲ 11%	▲ 10%	▲ 9%	▲ 8%	▲ 8%	▲ 8%	▲ 30%
P67	▲ 49%	▲ 51%	▲ 33%	▲ 26%	▲ 20%	▲ 18%	▲ 16%	▲ 13%	▲ 12%	▲ 11%	▲ 10%	▲ 9%	▲ 9%	▲ 8%	▲ 8%	▲ 19%
P68	▲ 51%	▲ 35%	▲ 31%	▲ 24%	▲ 17%	▲ 15%	▲ 16%	▲ 12%	▲ 10%	▲ 9%	▲ 8%	▲ 8%	▲ 7%	▲ 7%	▲ 7%	▲ 17%
P69	▲ 56%	▲ 32%	▲ 15%	▲ -1%	▼ -9%	▼ -13%	▼ -17%	▼ -18%	▼ -21%	▼ -23%	▼ -24%	▼ -25%	▼ -26%	▼ -26%	▼ -27%	▼ -8%
P70	▲ 77%	▲ 36%	▲ 17%	▼ -3%	▼ -11%	▼ -13%	▼ -18%	▼ -20%	▼ -22%	▼ -25%	▼ -27%	▼ -27%	▼ -29%	▼ -30%	▼ -29%	▼ -8%
P71	▲ 69%	▲ 27%	▲ 13%	▲ -1%	▼ -9%	▼ -13%	▼ -15%	▼ -19%	▼ -21%	▼ -22%	▼ -24%	▼ -25%	▼ -26%	▼ -27%	▼ -28%	▼ -8%
P72	▼ -16%	▼ -38%	▼ -40%	▼ -45%	▼ -48%	▼ -50%	▼ -51%	▼ -53%	▼ -54%	▼ -55%	▼ -55%	▼ -56%	▼ -56%	▼ -57%	▼ -57%	▼ -49%
P14	▼ -8%	▼ -18%	▼ -25%	▼ -34%	▼ -39%	▼ -40%	▼ -41%	▼ -43%	▼ -45%	▼ -46%	▼ -46%	▼ -47%	▼ -47%	▼ -48%	▼ -48%	▼ -38%
P15	▲ 2%	▼ -20%	▼ -29%	▼ -34%	▼ -37%	▼ -38%	▼ -39%	▼ -41%	▼ -42%	▼ -43%	▼ -44%	▼ -45%	▼ -45%	▼ -46%	▼ -46%	▼ -36%
P16	▲ 53%	▲ 82%	▲ 102%	▲ 92%	▲ 74%	▲ 69%	▲ 65%	▲ 62%	▲ 60%	▲ 58%	▲ 57%	▲ 57%	▲ 55%	▲ 54%	▲ 54%	▲ 66%
P40	▲ 65%	▼ -11%	▼ -26%	▼ -45%	▼ -56%	▼ -58%	▼ -59%	▼ -60%	▼ -60%	▼ -60%	▼ -60%	▼ -61%	▼ -61%	▼ -62%	▼ -61%	▼ -45%
P38	▲ 41%	▲ 5%	▼ -15%	▼ -36%	▼ -50%	▼ -53%	▼ -56%	▼ -59%	▼ -61%	▼ -63%	▼ -63%	▼ -64%	▼ -64%	▼ -65%	▼ -66%	▼ -45%
P41	▲ 32%	▲ -1%	▼ -16%	▼ -33%	▼ -39%	▼ -42%	▼ -44%	▼ -47%	▼ -49%	▼ -50%	▼ -51%	▼ -52%	▼ -53%	▼ -53%	▼ -54%	▼ -37%
P39	▲ 46%	▲ 23%	▲ 9%	▼ -2%	▼ -10%	▼ -13%	▼ -14%	▼ -18%	▼ -19%	▼ -20%	▼ -21%	▼ -22%	▼ -23%	▼ -23%	▼ -24%	▼ -9%
P104	▲ 42%	▲ 41%	▲ 35%	▲ 26%	▲ 20%	▲ 18%	▲ 16%	▲ 15%	▲ 12%	▲ 12%	▲ 11%	▲ 10%	▲ 9%	▲ 8%	▲ 8%	▲ 19%
P54	▲ 36%	▲ 52%	▲ 42%	▲ 22%	▲ 10%	▲ 4%	▲ 1%	▼ -3%	▼ -6%	▼ -8%	▼ -9%	▼ -10%	▼ -11%	▼ -12%	▼ -13%	▲ 6%
P48	▲ 26%	▲ 18%	▲ 12%	▲ 4%	▲ 3%	▼ -9%	▼ -15%	▼ -14%	▼ -20%	▼ -22%	▼ -24%	▼ -26%	▼ -28%	▼ -29%	▼ -30%	▼ -10%
P47	▲ 38%	▲ 17%	▲ 7%	▲ 0%	▼ -4%	▼ -7%	▼ -10%	▼ -11%	▼ -13%	▼ -15%	▼ -16%	▼ -17%	▼ -17%	▼ -18%	▼ -20%	▼ -6%
P49	▲ 193%	▲ 63%	▲ 48%	▲ 24%	▲ 15%	▲ 11%	▲ 8%	▲ 4%	▲ 3%	▲ 1%	▲ 0%	▼ -1%	▼ -2%	▼ -3%	▼ -3%	▲ 24%
P50	▲ 81%	▲ 56%	▲ 40%	▲ 23%	▲ 14%	▲ 10%	▲ 7%	▲ 4%	▲ 3%	▲ 1%	▲ -1%	▼ -1%	▼ -2%	▼ -3%	▼ -4%	▲ 15%
P51	▲ 44%	▲ 32%	▲ 25%	▲ 16%	▲ 11%	▲ 8%	▲ 6%	▲ 4%	▲ 2%	▲ 1%	▲ 0%	▼ -1%	▼ -2%	▼ -2%	▼ -3%	▲ 9%
P55	▲ 44%	▲ 33%	▲ 24%	▲ 24%	▲ 14%	▲ 11%	▲ 8%	▲ 4%	▲ 2%	▲ 1%	▲ 0%	▼ -1%	▼ -2%	▼ -2%	▼ -3%	▲ 10%

TABLA 48

Tipologías de resultados obtenidas a partir de comparación de condiciones de precipitación histórica y con cambio climático para 33 cuencas de drenaje en Haití.

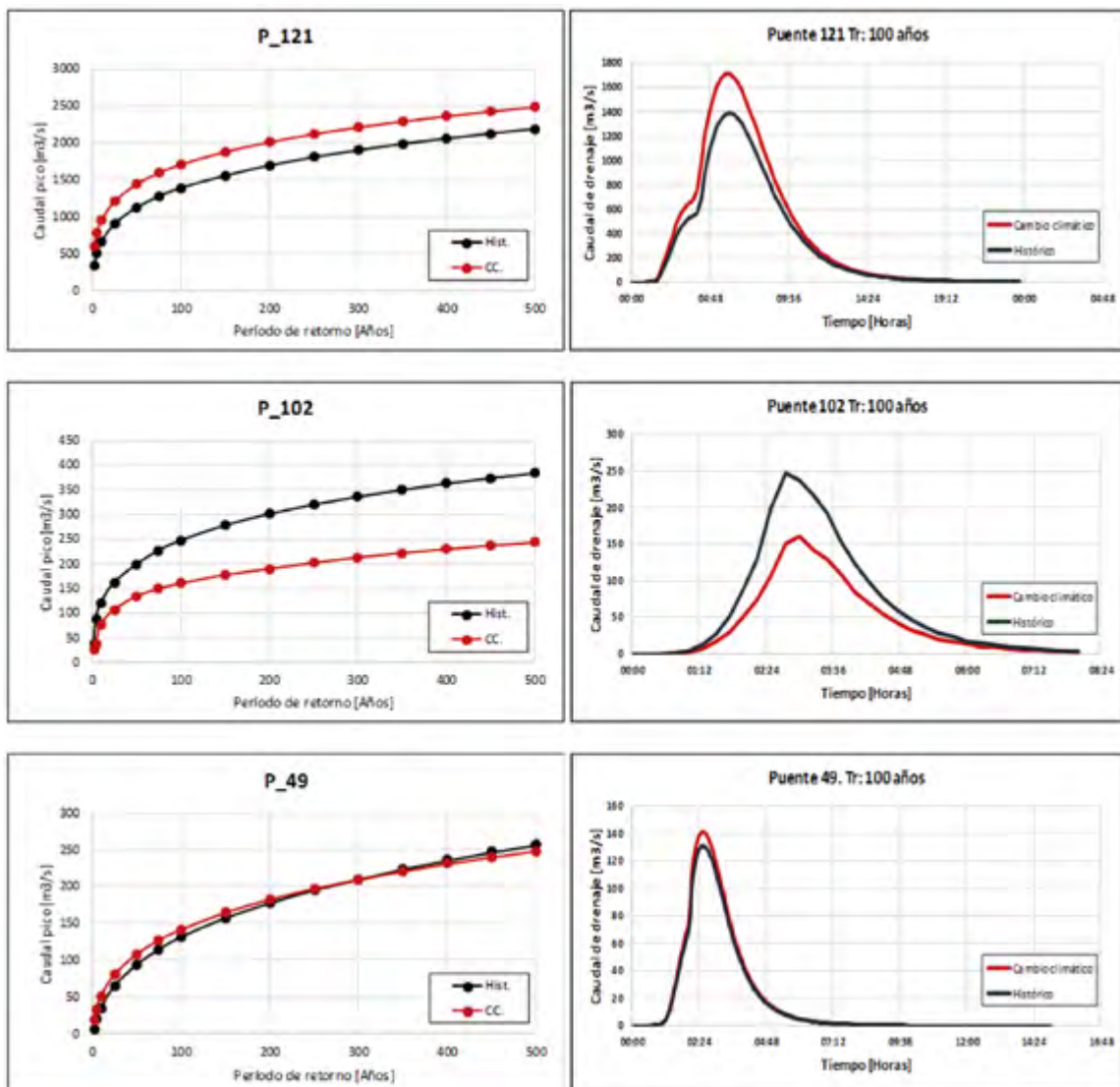
Tipología	Min	Max	Avg.
Decrece	-66%	77%	-29%
Sin cambio -	-8%	17%	1%
Incrementa -	-13%	193%	22%

Las tres tipologías de resultados obtenidas se pueden evidenciar de manera gráfica a continuación, para los puentes 121 (aumenta), 102 (disminuye) y 49 (permanece igual) a partir de curvas que relacionan el período de retorno vs. Caudal pico [m³/s], y de un hidrograma de creciente ejemplo para el período de retorno de 100 años. La totalidad de curvas de período

de retorno vs. Caudal pico por cuenca se pueden consultar en el Anexo E: Curvas de período de retorno vs. Caudal pico por cuenca. Mientras que para consultar la totalidad de hidrogramas calculados para las 33 cuencas, para 100 años de período de retorno se debe ir al Anexo D: Hidrogramas calculados por cuenca, para 100 años de período de retorno.

FIGURA 52

Comparativo de curvas de período de retorno [Años] vs. Caudal pico [m³/s] para puentes seleccionados para condición histórica y con cambio climático



6. CONCLUSIONES

En este documento se presentan los objetivos, metodología y resultados del análisis hidrológico de 33 cuencas de drenaje correspondientes a la localización de 33 puentes vehiculares en Haití. El modelo propuesto es producto de las metodologías existentes en el estado del arte para el análisis hidrológico de eventos extremos. El enfoque sugerido para el análisis tiene las siguientes características:

i. Datos de entrada:

Topografía:

Se hace uso de la mejor información topográfica disponible de uso libre, con resolución espacial de 12.5 metros.

Precipitación:

Se hace uso de dos fuentes principales de información de precipitación máxima en 24 horas. La primera corresponde a las estaciones de precipitación diaria localizadas en tierra. Esta información tiene un total de 147 estaciones distribuidas de manera relativamente uniforme en todo el país. Cabe aclarar que, para la gran mayoría de las estaciones recibidas, la información de localización geográfica tuvo que ser inferida a partir de los nombres de las comunidades, departamentos y/o ciudades en conjunto con los nombres de las estaciones que coincidieran.

Adicionalmente, la cantidad y calidad de la información de precipitación diaria para dichas estaciones es deficiente, ya que menos del 5% de las estaciones tiene información mayor a 30 años para las temporadas de lluvia bimodal en las que se presentan los valores de precipitación máxima. Esta condición de calidad y cantidad de información de los pluviómetros en tierra condujo a la utilización de la segunda fuente de información, la cual corresponde a datos de precipitación diaria entre 1950 y

2005 para el modelo climático global CSIRO Mk 3.6.0, del proyecto CMIP5 y de los datos obtenidos bajo un proceso de escalamiento estadístico del BCSD.

Una vez delimitadas las cuencas de análisis se realizó un proceso de selección de los pluviómetros y nodos del modelo CSIRO que son usadas en el análisis particular de cada cuenca. Finalmente, se hizo uso de 43 pluviómetros y de 30 nodos con información de precipitación del modelo escalado CSIRO.

Tipo de suelo y cobertura vegetal para determinar la capacidad de infiltración por el método de número de curva (CN):

Cada una de las cuencas se analizan a partir de subcuencas más pequeñas que se caracterizan por un valor de CN. Los diferentes valores de CN se obtuvieron a partir de los siguientes datos:

1. Tipo de suelo para todo el país, por medio de la clasificación WRB (World Reference Base), a partir del cual se establece el valor de CN para una malla con datos cada 250 metros.
2. Cobertura vegetal: Se utilizó el sistema de clasificación IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) para land cover, con la fuente de información MCD12Q1.

Combinando estas dos fuentes de información por medio de una herramienta SIG, se obtienen los valores de CN para cada espacio del territorio de Haití, con una resolución espacial de 250 metros. Por tanto, cada una de las cuencas y subcuencas de análisis presentan diversos valores de CN en función del tipo de suelo y de las actividades que se desarrollan en la superficie del mismo, en un esfuerzo por simular el comportamiento real de la infiltración en el suelo.

ii. El método:

El método seleccionado para la modelación hidrológica es de tipo semidistribuido, debido a que subdivide el análisis de las cuencas en áreas de menor área que permiten zonificar el análisis y detallar de mejor manera la distribución espacial de la precipitación y los aportes de cada subcuenca al hidrograma de crecimiento.

1. Los métodos de pérdida de precipitación seleccionados para el análisis son: retención en el dosel arbóreo, retención de precipitación en la superficie del terreno a partir de las condiciones de topografía, infiltración a partir del método de número de curva (CN) del SCS.
2. El método de transformación utilizado es el hidrograma triangular unitario, del SCS.
3. No se considera flujo base debido a falta de datos
4. Método de enrutamiento o tránsito de hidrogramas: se seleccionó el método de Muskingum – cunge para el tránsito de hidrogramas desde las subcuencas hacia el cauce principal y el punto de drenaje final.

A partir de curvas IDF construidas específicamente para cada cuenca considerando los pluviómetros y los nodos del modelo climático escalado, se calculan las tormentas de análisis asociadas a los períodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 y 500 años.

La herramienta computacional utilizada para la modelación hidrológica es el HEC-HMS, del U.S Army Corps of Engineers (USACE).

La ventaja de los modelos distribuidos y semidistribuidos sobre los modelos agregados

para la determinación de caudales es el hecho de que consideran la variabilidad espacial de los parámetros físicos que juegan un papel en los procesos hidrológicos (evaporación, infiltración, escorrentía, tránsito del agua por un cauce, etc.).

iii. Por último, la metodología propuesta no requiere del uso de software comercial. En términos generales, se recomienda tener acceso a SIG y herramientas de cálculo y de gestión de datos. Dentro de las herramientas de uso abierto más usuales, se resaltan: QGIS, PostGIS, PostgreSQL y paquetes estadísticos con ambientes de programación como R, con los cuales se puede llevar a cabo actividades que involucren el manejo y cálculo de datos.

En segunda medida, como resultado del análisis de datos de precipitación diaria para el escenario histórico y proyectado a partir de GCM, se pudo corroborar que, con respecto a las tendencias y proyecciones de precipitación en Haití que se registran en otros proyectos de escalamiento de datos de RCM (PRECIS), los resultados obtenidos se encuentran acordes ya que en dichas tendencias se resalta que (Taylor et al., 2015):

- Variabilidad significativa año a año debido a la influencia de fenómenos como El Niño Oscilación Sur (ENOS)
- Insignificante tendencia ascendente
- Fuerte señal decadal

A futuro:

- Tendencia a la reducción de precipitación a mediados de la década del 2020 con 3 a 4% menos precipitación en la media anual. En la década de 2030 se espera que haya un 6% menos de precipitación. Para el final de siglo (2100), se espera un 20% menos lluvia para el escenario más severo.

Si bien por medio del uso del GCM CSIRO-Mk-3-6-0, a partir de los datos escalados del NEX-GDDP (BCSD), se pudo corroborar el resultado obtenido en publicaciones anteriores en las que se hizo uso de otras fuentes de datos proyectados (PRECIS, por ejemplo) respecto de la esperada reducción en la precipitación media en la cuenca de El Caribe, es necesario concluir y resaltar que los resultados obtenidos a partir de dichos modelos corresponden a proyecciones atadas a numerosos supuestos, más no predicciones. Por tanto, estas proyecciones tienen un alto nivel de incertidumbre en términos de magnitudes, tendencias, cambios de tendencia, tiempo de ocurrencia, entre otros, lo cual hace que los resultados obtenidos deban ser mirados y tenidos en cuenta como una herramienta de análisis valiosa, pero que debe ser considerada con precaución y no como una verdad absoluta de la realidad futura en un territorio. En resumen, si bien para la modelación hidrológica es alentador que se obtengan resultados equivalentes, comparables y similares bajo diferentes modelos y estrategias de escalamiento de datos, sigue siendo muy relevante para los estudios la realización de procesos de validación y calibración constante de modelos a partir de datos recopilados en campo por medio de dispositivos idóneos, según la variable que se desee analizar.

Adicional a lo anterior, a partir del análisis de precipitación para el escenario histórico y proyectado considerando datos de GCM, fue posible corroborar la prevalencia de las condiciones de variabilidad de precipitación que se han presentado históricamente en el país. Específicamente, según la variabilidad interanual histórica de la precipitación en Haití (1905-2005) (Moron, Frelat, Karly, Jeune, & Gauchet, 2015), se concluye que:

- Las áreas más secas se localizan en sotavento de los vientos E-NE, ya sea en la península norte, en el valle del Artibonito (NW-SE eje desde Gonaïves), o en el E-W de la vaguada del valle desde Puerto Príncipe entre Chaîne de la Selle y Chaîne du trou d'eau.
- Los sectores más húmedos se encuentran en barlovento del Massif du Nord (SW de Cap Haitien). La península sur es particularmente húmeda, especialmente en las pendientes de la cara SE del Massif de la Hotte.

Considerando lo anterior, si bien se pudo confirmar la tendencia negativa en la precipitación media según modelos de proyección GCM entre 2006 y 2100, en virtud de la variabilidad climática (en este caso, de precipitación) que se prevé se mantenga a futuro en Haití, existen zonas en las cuales las condiciones de precipitación con respecto al escenario histórico presentan incrementos. En otras, disminuciones. Y en otras, se prevé que permanezcan igual. Como consecuencia de lo anterior, los resultados comparativos obtenidos a partir de los modelos hidrológicos calculados para los escenarios de precipitación histórica vs. con condiciones de cambio climático arrojaron los siguientes resultados generales:

Se estima que 15 (cuencas de drenaje) puentes incrementan su caudal pico con respecto a la condición histórica, 2 puentes permanecen sin cambios y 16 puentes disminuyen su caudal pico para la condición con cambio climático. De estos grupos de puentes, se evidencia que:

- Para el grupo que incrementa su caudal pico, el cambio mínimo (o máxima disminución) es de -66% y el promedio es -29%. Mientras que el cambio máximo es de 193% y el promedio es del 22%. Adicionalmente, 10 de 15 puentes presentan un aumento para todos los periodos de retorno. (Para los 5 restantes únicamente se presentan disminuciones pequeñas en periodos de retorno largos de máximo 13% para el periodo de retorno de 500 años).
- Para el grupo que permanece igual, el mínimo es -8%, el máximo es 17% y el promedio es 1%. Adicionalmente, siempre para periodos de retorno bajos hay aumento. Para periodos de retorno altos hay una disminución (más o menos en un periodo de retorno de 50 años ocurre el cambio).
- Para el grupo que disminuye, 9 de 16 puentes (69, 70, 71, 40, 38, 41, 39, 48, 47) tienen un aumento (de hasta 77%) para frecuencias altas (periodos de retorno hasta 10 años).

Como consecuencia y conclusión principal de las tendencias de precipitación proyectadas a futuro y de los cambios en las condiciones de variabilidad climática en el territorio, se resalta la importancia de incluir condiciones de cambio climático en los análisis hidrológicos que se realizan usualmente para el diseño y dimensionamiento de proyectos de infraestructura vial. Puesto que, si bien los modelos climáticos no ofrecen certeza absoluta sobre las condiciones climáticas futuras, dichas proyecciones sí ofrecen información valiosa sobre futuros plausibles que se pueden presentar en un territorio. Si este tipo de información se combina de manera adecuada con información histórica, es posible generar resultados más completos y consistentes, que permitan incrementar la capacidad en el diseño de infraestructura vial. Un ejemplo claro de esto es la posibilidad de comparación de resultados de caudales esperados bajo condiciones de precipitación histórica y con cambio climático, lo cual permite seleccionar para cada caso, la condición de diseño más crítica entre los dos resultados.



Puente Estimé, Jérémie (RN7)

7. REFERENCIAS

- **Aparicio Mijares, F. J. (1989).** *Fundamentos De Hidrología De Superficie.* In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- **BID. (2011).** *Indicadores de riesgo de desastre y de gestión de riesgos: Programa para América Latina y el Caribe: Haití. Indicadores de Riesgo de Desastre y de Gestión de Riesgos: Programa Para América Latina y El Caribe: Haití.* <https://doi.org/10.18235/0000203>
- **Bras, R. . (1990).** *Hydrology: An introduction to hydrologic science* (Addison-Wesley, ed.). Reading, MA.
- **Candela, A., & Aronica, G. T. (2014).** *Probabilistic floodplain hazard mapping : managing uncertainty by using a bivariate approach for flood frequency analysis.* *EGU General Assembly 2014*, 16, 7914.
- **Chow, V. Te, Maidment, D., & Mays, L. (1988).** *Applied Hydrology.*
- **de Risi, R., Jalayer, F., de Paola, F., Iervolino, I., Giugni, M., Topa, M. E., ... Gasparini, P. (2013).** *Flood risk assessment for informal settlements.* *Natural Hazards*, 69(1), 1003-1032. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0749-0>
- **FAO. (2015).** *IUSS Working Group - World Reference Base for Soil Resources.* In *World Soil Reports*. <https://doi.org/10.1017/S0014479706394902>
- **Gumbel, E. . (1941).** *The return period of flood flows.* *New School for Social Research*, 18(4), 495-513. <https://doi.org/10.1214/aop/1176995579>
- **Jones, R., Noguier, M., Hassell, D., Hudson, D., Wilson, S., Jenkins, G., ... (Hadley Centre for Climate Prediction and Research, U. (2004).** *Generating High Resolution Climate Change scenarios using PRECIS.* *Met Office Hadley Centre*, 40pp.
- **Leadbetter, M. R. (1983).** *Extremes and local dependence in stationary sequences.* *Zeitschrift für Wahrscheinlichkeitstheorie Und Verwandte Gebiete*, 65(2), 291-306. <https://doi.org/10.1007/BF00532484>
- **Melton, F. (2015).** *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP).* NASA, 1-8. Retrieved from https://cds.nccs.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/06/NEX-GDDP_Tech_Note_v1_08June2015.pdf
- **Merz, B., & Thieken, A. H. (2004).** *Flood Risk Analysis: Concepts and challenges.* *Österreichische Wasser-Und Abfallwirtschaft*, (56), 27-34. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/257343530_Flood_risk_analysis_Concepts_and_challenges
- **Moron, V., Frelat, R., Karly, P., Jeune, J., & Gaucherel, C. (2015).** *Interannual and intra - annual variability of rainfall in Haiti (1905 - 2005).* *Climate Dynamics*, 915-932. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2326-y>

- **Ordaz, M., Torres, M. A., & Domínguez, R. (2013).** *Vulnerabilidad Y Riesgo Por Inundaciones.*
- **Ryu, J., & Hayho, K. (2013).** *Understanding the sources of Caribbean precipitation biases in CMIP3 and CMIP5 simulations.* (February).
- **Salas, J. D., & Obeysekera, J. (2014).** *Revisiting the concepts of return period and risk for nonstationary hidrologic extreme events.* *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(3), 554–568. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000820](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000820).
- **Taylor, M., Clarke, L., Centella, A., Bezanilla, A., Stephenson, T., Jones, J., ... Charlery, J. (2018).** *Future Caribbean Climates in a World of Rising Temperatures : Ameircan Meteorological Society*, 2907–2926. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0074.1>
- **Taylor, M., Douglas, C., Campbell, J., Jones, J., Brown, A., & Stephenson, T. (2015).** *Haiti-Historical and Future Climate Changes.* BID, (November).
- **USACE. (2000).** *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual.* (March), 158.
- **Versluis, A., & Rogan, J. (2010).** *Mapping land-cover change in a Haitian watershed using a combined spectral mixture analysis and classification tree procedure.* 6049(May 2009). <https://doi.org/10.1080/10106040902977584>

► Sitios de internet

[1] Ver: PRECIS

http://clearinghouse.caribbeanclimate.bz/?db_type=Climate%20Model&country=&collection=-V501&s=§or=&topic=

[2] Ver: NEX-GDDP

<https://cds.nccs.nasa.gov/nex-gddp/>

[3] Ver: ETCCDI

<http://etccdi.pacificclimate.org/>

[4] Ver: Índices de valores extremos de precipitación analizados.

http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml

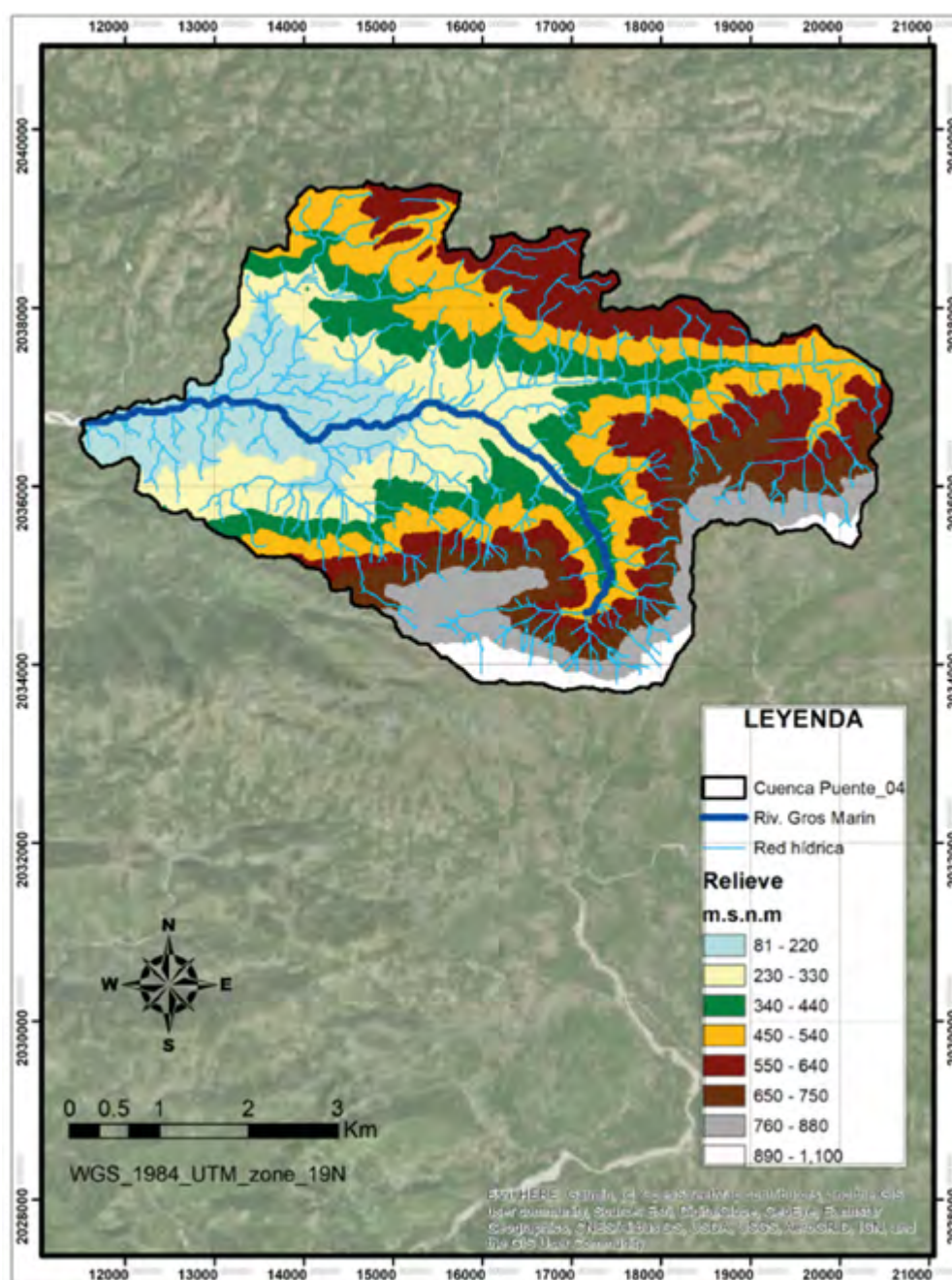
[5] Ver: Climate Explorer: KNMI Climate Change Atlas

https://climexp.knmi.nl/plot_atlas_form.py

8. ANEXOS

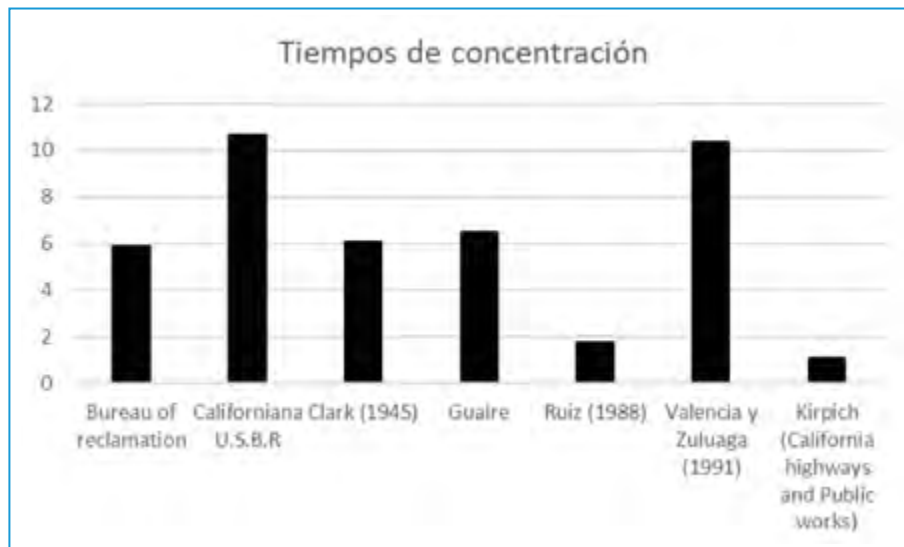
8.1 Anexo A: Delimitación de cuencas y propiedades morfométricas por cuenca

CUENCA P04

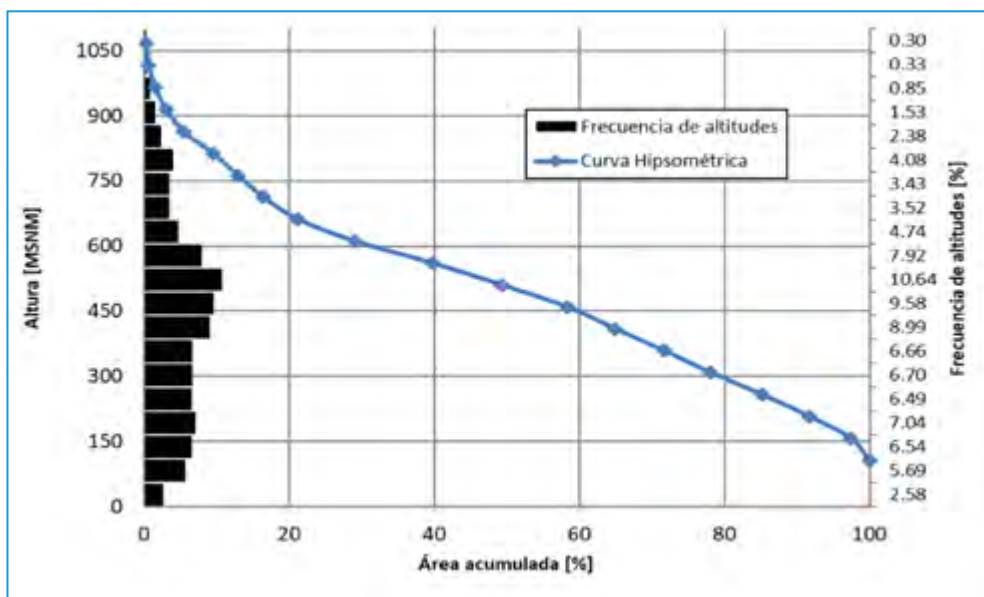


PARAMETROS MORFOMÉTRICOS CUENCA - 04		
Descripción	Unidad	Valor
Area	Km2	29.63
Perímetro de la cuenca	Km	36.68
Cotas		
Máxima	msnm	1091.00
Mínima	msnm	81.00
Centroide: (PSC: WGS1984 UTM Zone 19N)		
X centroide	°	16101.499
Y centroide	°	2036543.757
Z centroide	msnm	632.50
Longitud Cuenca	Km	9.07
Ancho Cuenca	Km	5.01
Altitud		
Altitud media	msnm	632.50
Altitud más frecuente	msnm	561.00
Altitud de frecuencia media (1/2)	msnm	519.95
Pendiente		
Pendiente promedio de la cuenca	%	12.36
Red Hídrica		
Longitud del curso principal (Prop. Morfo)	Km	12.32
Longitud del curso principal	Km	8.26
Cota mínima cauce principal	msnm	81
Cota máxima cauce principal	msnm	493
Orden de la red hídrica	UND	5
Longitud Red hídrica	Km	162.02
Pendiente promedio en la red hídrica	%	1.90
Pendiente promedio en cauce principal	m/m	0.0499
Parámetros generados		
Tiempo de concentración	Horas	6.87
Factor de forma [F]		0.360
Coeficiente de compacidad [Kc]		1.900
Densidad de drenaje	Km/Km ²	5.468
Coef. De Circularidad (Cc)	Km2/Km2	0.277
Coef. De torrencialidad (Ct)	#/Km2	17.922

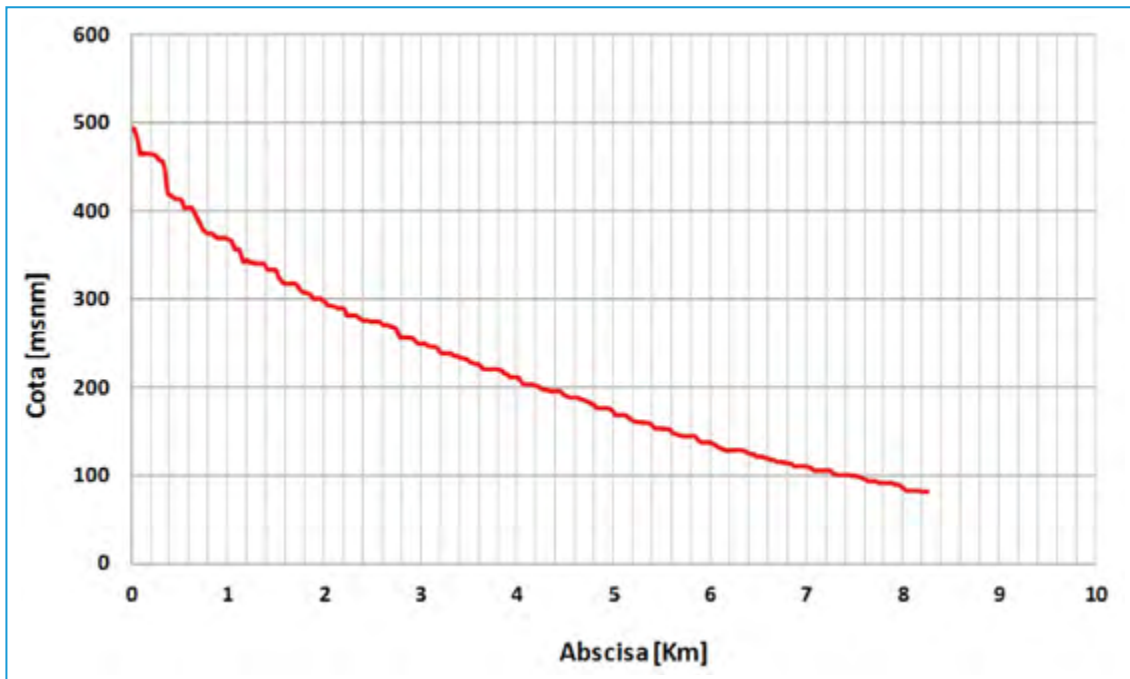
Tiempos de concentración [Horas]



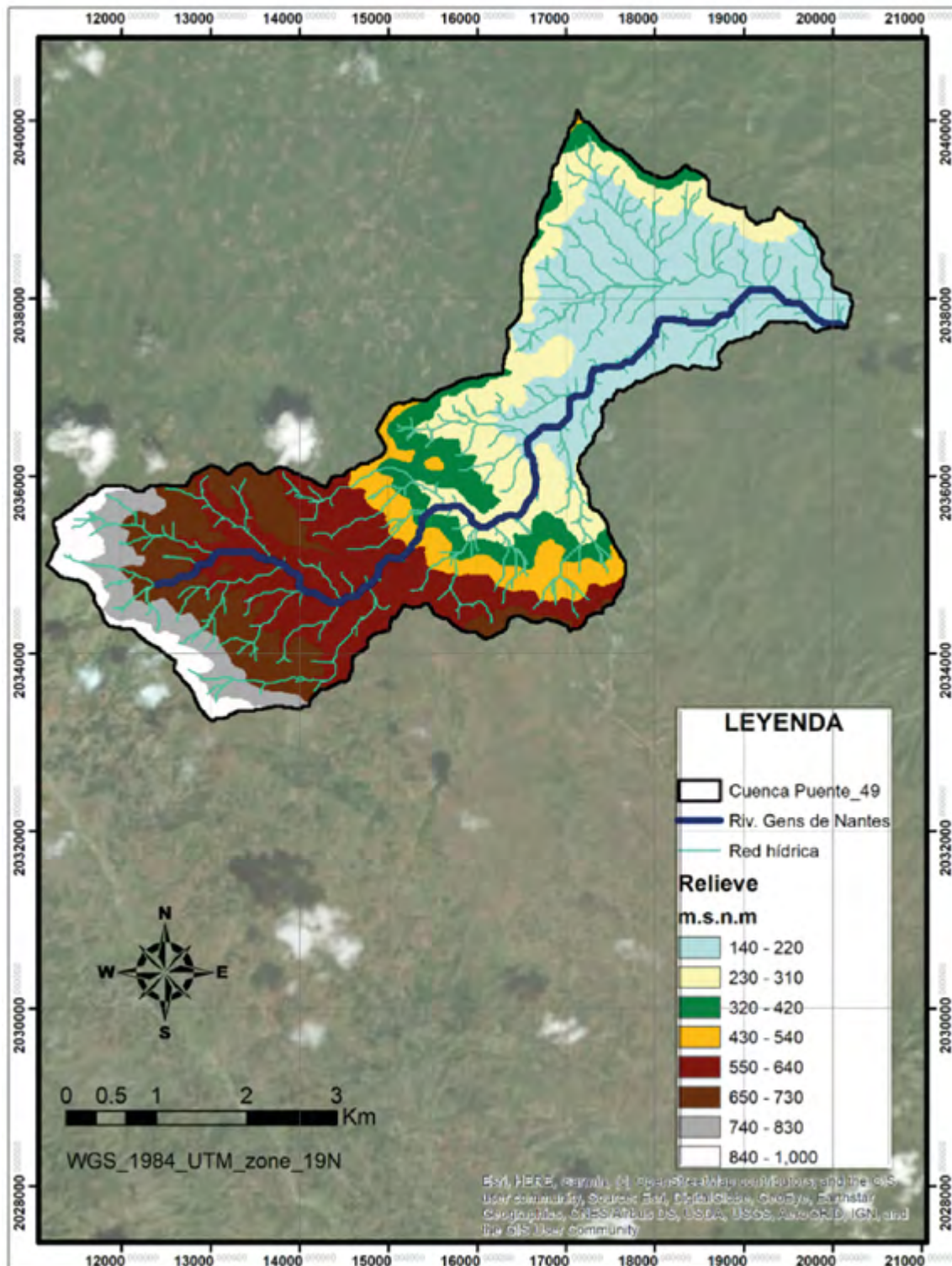
Curva hipsométrica



Perfil longitudinal

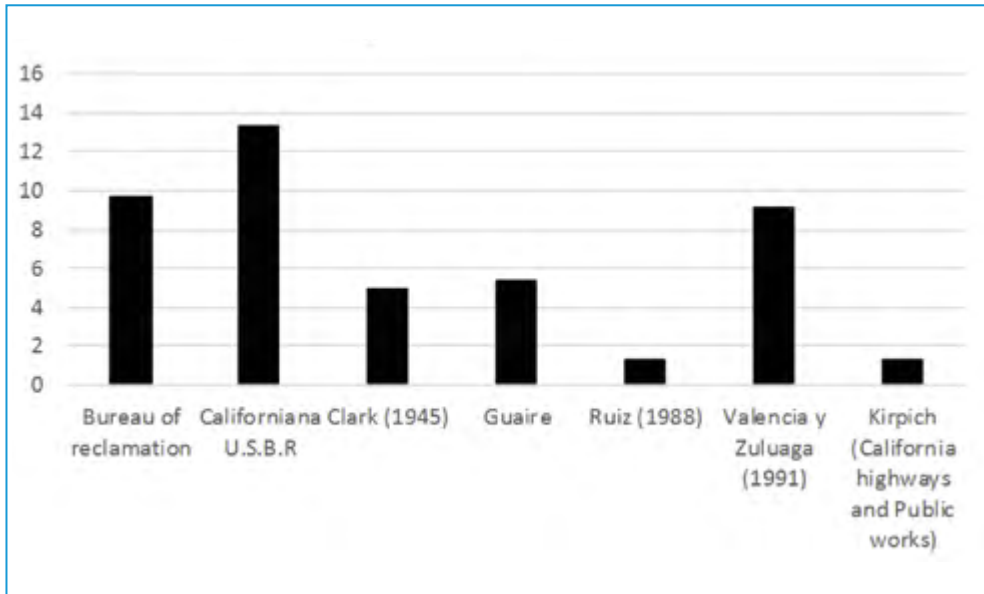


CUENCA P49

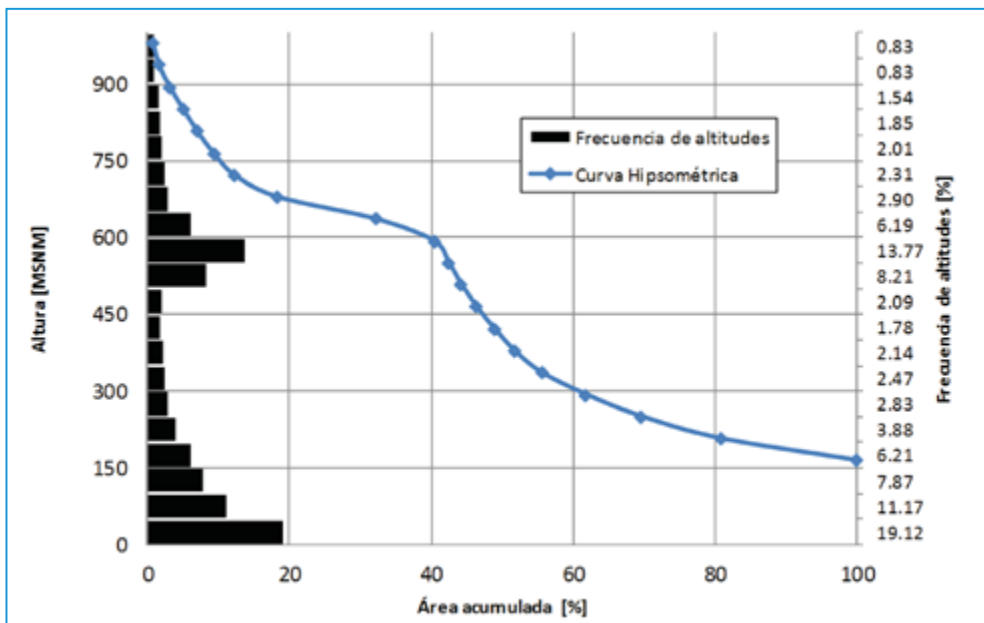


PARAMETROS MORFOMÉTRICOS CUENCA - 49		
Descripción	Unidad	Valor
Area	Km2	20.77
Perímetro de la cuenca	Km	36.55
Cotas		
Máxima	msnm	1001.00
Mínima	msnm	143.00
Centroide: (PSC: WGS1984 UTM Zone 19N)		
X centroide	°	206221.049
Y centroide	°	2151382.825
Z centroide	msnm	546.31
Longitud Cuenca	Km	9.28
Ancho Cuenca	Km	3.14
Altitud		
Altitud media	msnm	546.31
Altitud más frecuente	msnm	164.00
Altitud de frecuencia media (1/2)	msnm	457.44
Pendiente		
Pendiente promedio de la cuenca	%	20.01
Red Hídrica		
Longitud del curso principal (Prop. Morfo)	Km	12.55
Longitud del curso principal	Km	10.9
Cota mínima cauce principal	msnm	143.00
Cota máxima cauce principal	msnm	667.00
Orden de la red hídrica	UND	6
Longitud Red hídrica	Km	104.92
Pendiente promedio en la red hídrica	%	2.27
Pendiente promedio en cauce principal	m/m	0.0481
Parámetros generados		
Tiempo de concentración	Horas	4.30
Factor de forma [F]		0.241
Coeficiente de compacidad [Kc]		2.262
Densidad de drenaje	Km/Km ²	5.051
Coef. De Circularidad (Cc)	Km2/Km2	0.195
Coef. De torrencialidad (Ct)	#/Km2	16.755

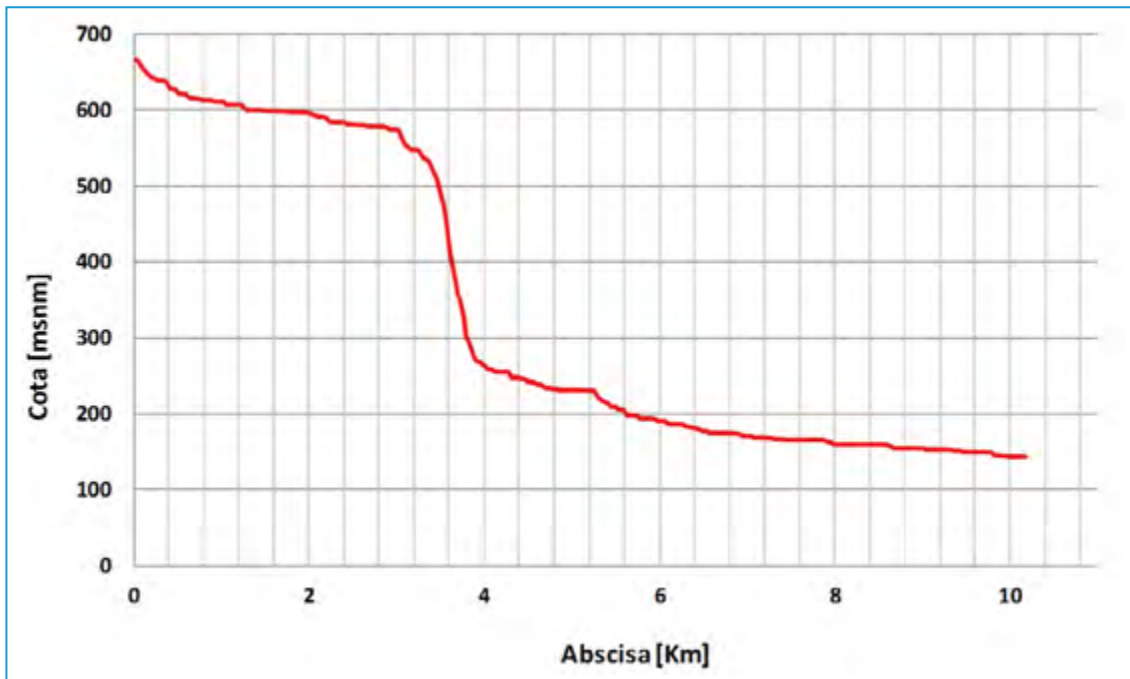
Tiempos de concentración [Horas]



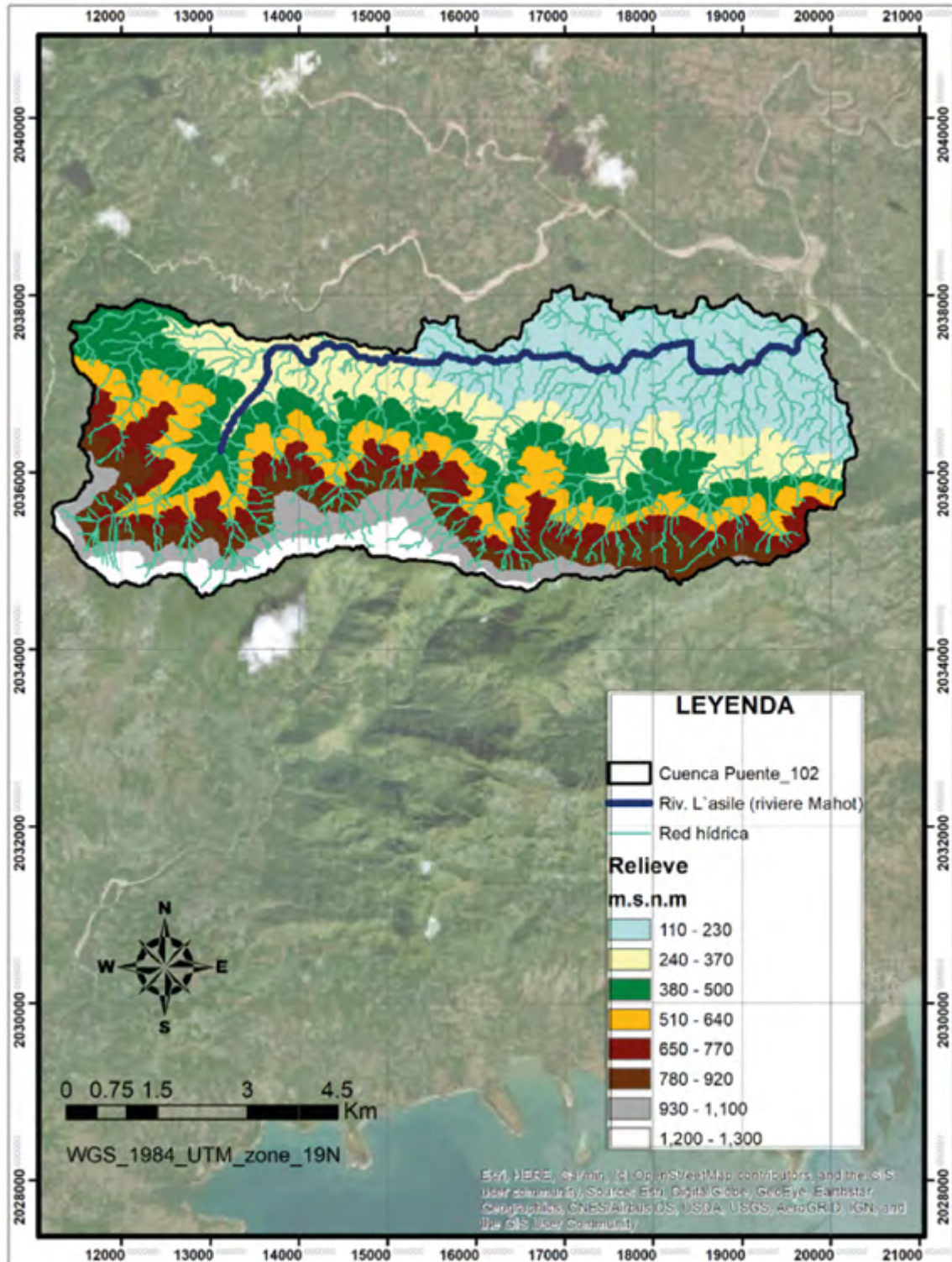
Curva hipsométrica



Perfil longitudinal

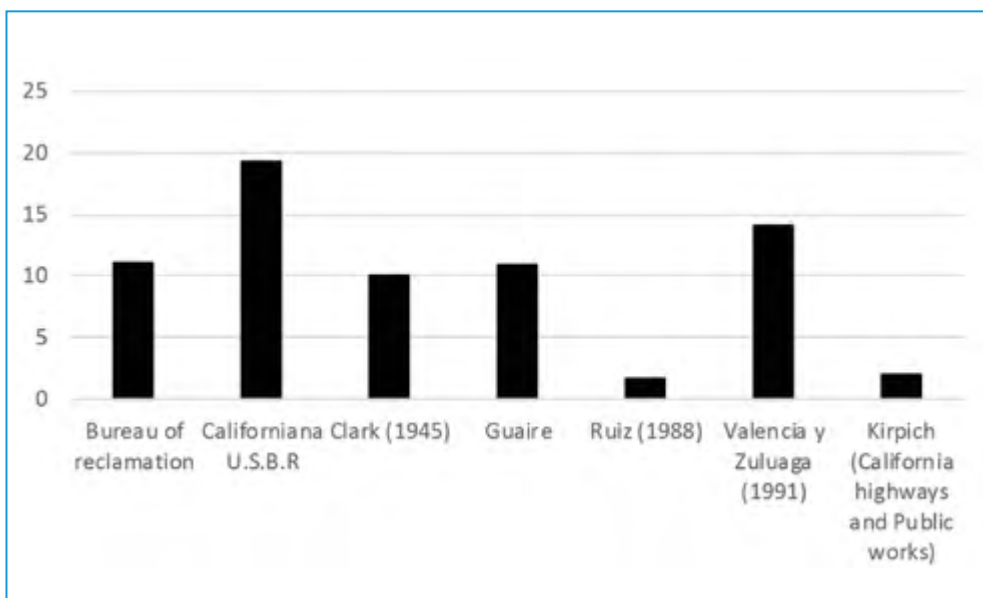


CUENCA P102

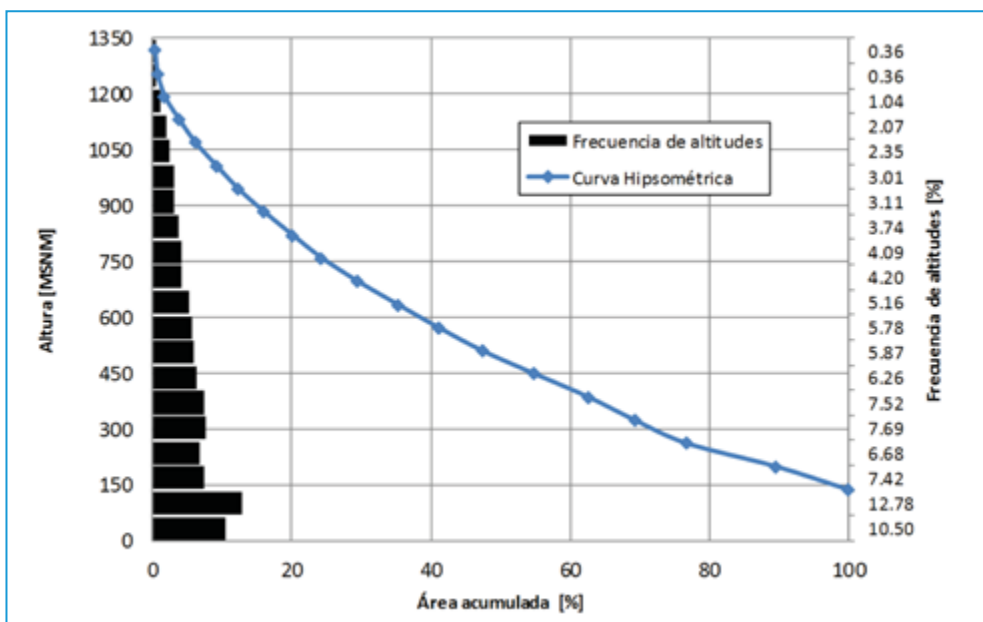


PARAMETROS MORFOMÉTRICOS CUENCA - 102		
Descripción	Unidad	Valor
Area	Km2	51.77
Perímetro de la cuenca	Km	50.93
Cotas		
Máxima	msnm	1349.00
Mínima	msnm	107.00
Centroide: (PSC: WGS1984 UTM Zone 19N)		
X centroide	°	27967.278
Y centroide	°	2035623.929
Z centroide	msnm	694.47
Longitud Cuenca	Km	12.84
Ancho Cuenca	Km	4.06
Altitud		
Altitud media	msnm	694.47
Altitud más frecuente	msnm	200.50
Altitud de frecuencia media (1/2)	msnm	558.16
Pendiente		
Pendiente promedio de la cuenca	%	13.62
Red Hídrica		
Longitud del curso principal (Prop. Morfo)	Km	17.24
Longitud del curso principal	Km	13.24
Cota mínima cauce principal	msnm	0
Cota máxima cauce principal	msnm	364.0000019
Orden de la red hídrica	UND	6
Longitud Red hídrica	Km	301.63
Pendiente promedio en la red hídrica	%	2.14
Pendiente promedio en cauce principal	m/m	0.0275
Parámetros generados		
Tiempo de concentración	Horas	9.60
Factor de forma [F]		0.314
Coeficiente de compacidad [Kc]		1.996
Densidad de drenaje	Km/Km ²	5.826
Coef. De Circularidad (Cc)	Km2/Km2	0.251
Coef. De torrencialidad (Ct)	#/Km2	18.079

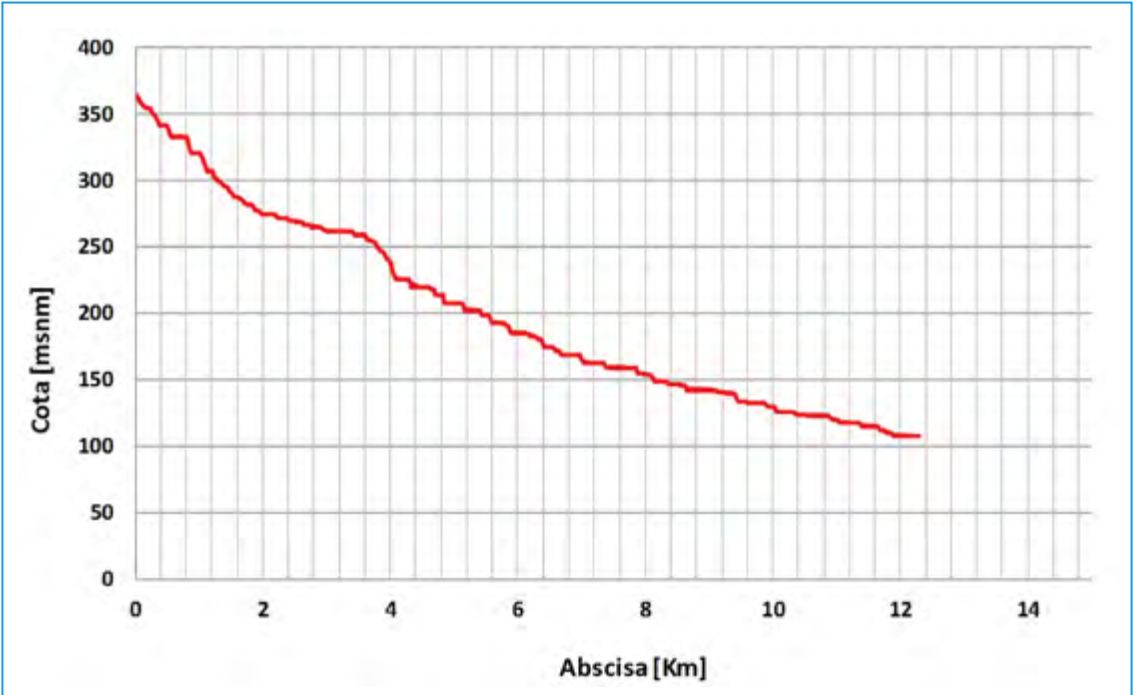
Tiempos de concentración [Horas]



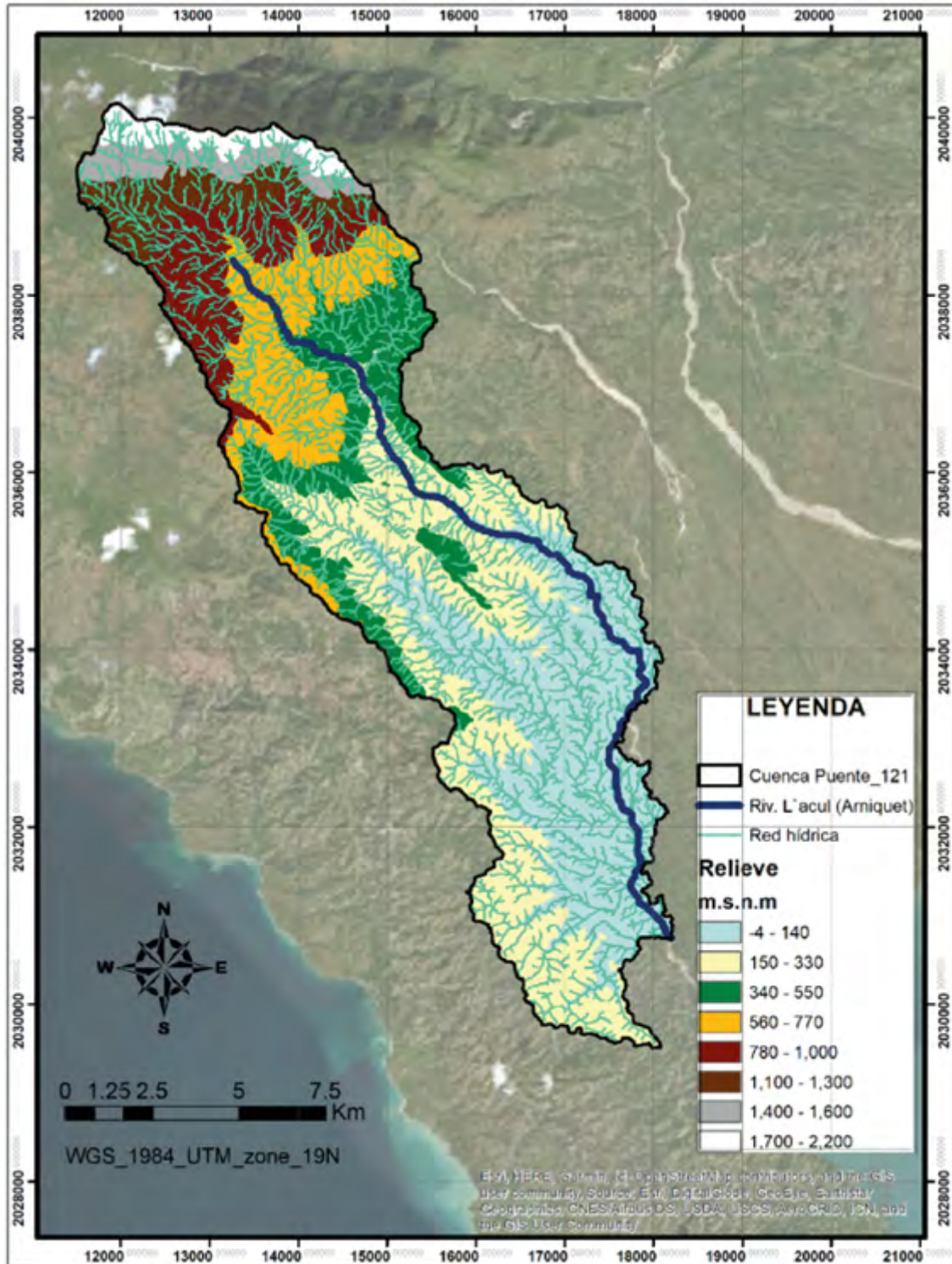
Curva hipsométrica



Perfil longitudinal

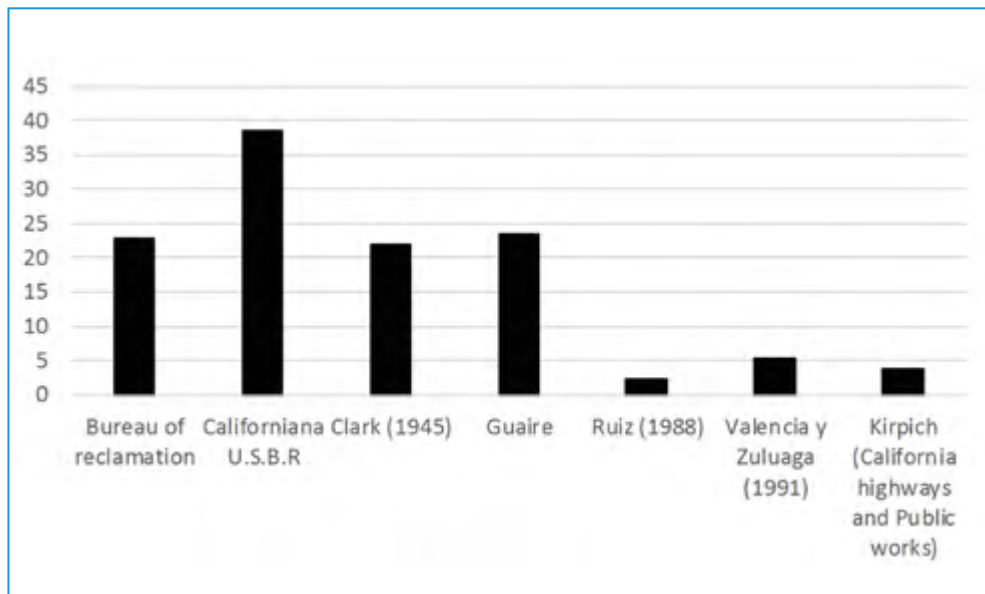


CUENCA P121

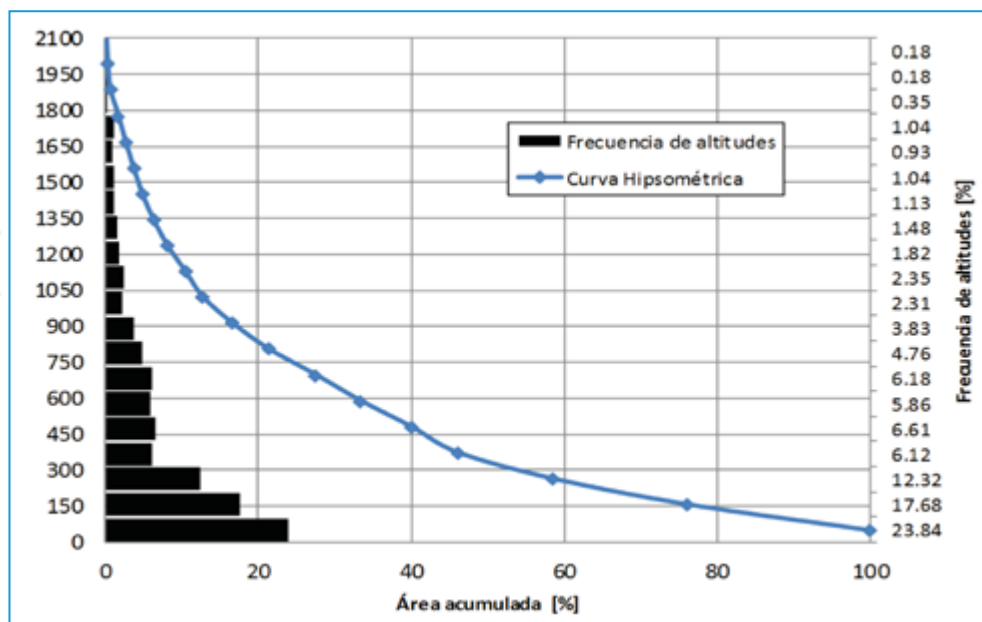


PARAMETROS MORFOMÉTRICOS CUENCA - 121		
Descripción	Unidad	Valor
Area	Km2	169.76
Perímetro de la cuenca	Km	116.82
Cotas		
Máxima	msnm	2154.00
Mínima	msnm	0.00
Centroide: (PSC: WGS1984 UTM Zone 19N)		
X centroide	°	-23503.397
Y centroide	°	2024348.399
Z centroide	msnm	892.98
Longitud Cuenca	Km	28.88
Ancho Cuenca	Km	6.54
Altitud		
Altitud media	msnm	892.98
Altitud más frecuente	msnm	49.50
Altitud de frecuencia media (1/2)	msnm	541.05
Pendiente		
Pendiente promedio de la cuenca	%	10.06
Red Hídrica		
Longitud del curso principal (Prop. Morfo)	Km	37.52
Longitud del curso principal	Km	29.17
Cota mínima cauce principal	msnm	0
Cota máxima cauce principal	msnm	641.444439
Orden de la red hídrica	UND	6
Longitud Red hídrica	Km	934.48
Pendiente promedio en la red hídrica	%	1.58
Pendiente promedio en cauce principal	m/m	0.0220
Parámetros generados		
Tiempo de concentración	Horas	10.85
Factor de forma [F]		0.204
Coeficiente de compacidad [Kc]		2.528
Densidad de drenaje	Km/Km ²	5.505
Coef. De Circularidad (Cc)	Km2/Km2	0.156
Coef. De torrencialidad (Ct)	#/Km2	17.248

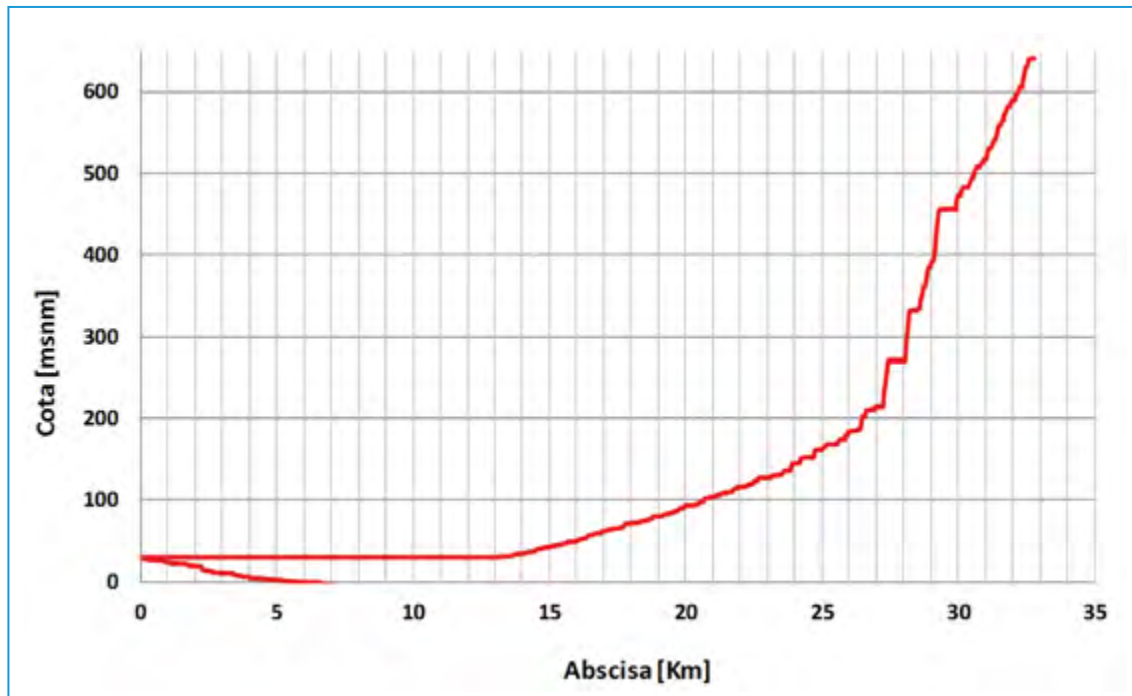
Tiempos de concentración [Horas]



Curva hipsométrica



Perfil longitudinal



8.2 Anexo B: Tabla de localización e información base de estaciones pluviométricas en campo

ID	Depto.	Comuna	Estación	Lat (N)	Lon (N)	Cota (m.s.n.m)	Periodo de medición (Años)
0	OUEST	CITE SOLEIL	DAMIEN	18.60	-72.28	20	1929-2016
1	OUEST	DELMAS	DELMAS 33	18.56	-72.29		
2	OUEST	PORT-AU-PRINCE	PAP-RUE DU CENTRE (FIC)	18.55	-72.34	15	
3	SUD	LES CAYES	LES CAYES (FIC)	18.19	-73.75	21	1993-2010
4	NORD	CAP HAITIEN	CAP HAITIEN (FIC)	19.73	-72.20	7	
5	OUEST	PETIONVILLE	PETIONVILLE (FIC-JUVENAT 1-	18.52	-72.30	401	
6	OUEST	PETIONVILLE	PETIONVILLE (FIC-JUVENAT2/GABRIEL DESHAYES)	18.52	-72.30	403	
7	SUD-EST	JACMEL	JACMEL (FIC)	18.24	-72.54	21	
8	ARTIBONITE	SAINT MARC	SAINT MARC (FIC)	19.12	-72.70	29	
9	OUEST	GANTHIER	GANTHIER(BAS BOEN)	18.60	-72.20	142	
10			Dajabon	19.33	-71.42	36	1931-2003
11			Elias Piña	18.52	-71.42	387	1939-1997
12			Hondo Valle	18.43	-71.41	890	1953-2012
13			Jimani	18.29	-71.51	31	1949-2012
14			La Descub.	18.34	-71.44	9	1939-2003
15			Monte Cristi	19.51	-71.38	7	1933-2012
16			P. Salcedo	19.42	-71.45	5	1958-1991
17			Pedernales	18.02	-71.44	11	1939-1992
18			Restauración	19.19	-71.41	594	1939-1998
19	NORD OUEST		AUBERT	19.91	-72.83		88-90
20	NORD OUEST	BAIE DE HENNE	BAIE DE HENNE	19.67	-73.21		77-84;86-88
21	NORD OUEST	BASSIN BLEU	BASSIN BLEU	18.24	-73.21		39-52;67-69;77-86
22	NORD OUEST	BOMBARDOPOLIS	BOMBARDOPOLIS	19.68	-72.42		80-84;86-88
23	NORD OUEST		CABARET	18.73	-72.42		66-69;77-88
24	NORD OUEST	JEAN RABEL	JEAN RABEL	19.85	-73.19		77-92
25	NORD OUEST	MOLE SAINT NICOLAS	MOLE SAINT NICOLAS	19.80	-73.38		48-50;77-82;84-86
26	NORD OUEST		POSTE METIER	19.89	-72.92		60-63;65-69;77-85
27	NORD OUEST	SAINT LOUIS DU NORD	SAINT LOUIS DU NORD	19.93	-72.71		98
28			CAMP PERRIN (FIC)	18.33	1-73.86		90-97
29	NORD	CAP HAITIEN	CAP HAITIEN	19.74	-72.21		48-51;53-66;88-98
30	SUD	CAYES	CAYES	18.20	-73.75		48-51;53-58;69-78;88-00
31	ARTIBONITE	GONAIVES	GONAIVES	19.45	-72.68	5	48-51;53-56;60-00
32	SUD EST	JACMEL	JACMEL	18.24	-72.53		48-51;53-66
33	SUD EST	LA VALLEE DE JACMEL	LA VALLEE DE JACMEL	18.28	-72.67		88-00
34	OUEST	LEOGANE	LEOGANE	18.51	-72.62		53-54;60-79; 88-94
35			OUANAMINTHE	19.55	-71.73		88-00
36	OUEST	PETION VILLE	PETION VILLE	18.51	-72.29		48-51;53-66;88-00
37			PETION VILLE (JUVENAT)	18.52	-72.30		88-00
38	OUEST	PETIT GOAVE	PETIT GOAVE	18.43	-72.85		48-51;53-58;88-92
39			PLAISANCE	19.60	-72.47	420	23;25;31-32;39-52;65-67;75-98
40	OUEST	PORT AU PRINCE	PORT AU PRINCE	18.59	-72.31		48-51;53-66;88-98
41	OUEST	PORT AU PRINCE	PORT AU PRINCE(LALUE)	18.54	-72.33		48-51;53-58

ID	Depto.	Comuna	Estación	Lat (N)	Lon (N)	Cota (m.s.n.m)	Periodo de medición (Años)
42			PORT DE PAIX	19.93	-72.83		89-94
43			SAINT LOUIS DU NORD	19.93	-72.71		67-95
44	ARTIBONITE	SAINT MARC	SAINT MARC	19.10	-72.69		50-51;53-58;88-98;
45	OUEST	ANSE A GALET	Anse-à-Galets	18.83	-72.87		48-51;53-58 ; 77-79
46	GRAND ANSE	ANSE A VEA	ANSE A VEAU	18.50	-73.35		48-51;55-58
47	SUD EST	BAINET	BAINET	18.19	-72.76		48-51;53-63
48	CENTRE		BAPTISTE	18.80	-71.78		59-60;77-96
49	OUEST		CABARET	18.73	-72.42		48-51;53-57
50	CENTRE	CERCA LA SOURCE	CERCA LA SOURCE	19.16	-71.79		56-61;77-79
51			CHAUFFARD	18.47	-72.41		58-69
52	ARTIBONITE		DESSALINES	19.26	-72.52		48-51;53-58
53	OUEST		FOND VERRETTES	18.40	-71.85		48-50
54	OUEST		FORET DES PINS	18.33	-71.79		51;53-58;77-90
55			GAILLARD	18.25	-72.40		48-51;53-66
56	OUEST		GANTHIER	18.53	-72.07		48-51;53-54; 71-79
57			GRAND BOIS	18.23	-73.65		51;53;58
58	NORD	GRANDE RIVIERE DU NORD	GRANDE RIVIERE DU NORD	19.58	-72.17		48-51;53-58
59	CENTRE	HINCHE	HINCHE	19.14	-72.02		48-51;53-58;64-66
60	CENTRE	LASCAHOBAS	LASCAHOBAS	18.83	-71.94		48-51;53-58
61	NORD	LIMBE	LIMBE	19.70	-72.41		39-52;54;60-63;70-71;75-87
62	GRAND ANSE			18.59	-74.21		51;53-58;62-66;77-79
63	NORD	MARMELADE	MARMELADE	19.52	-72.36	710	23;25;31-32;39-40;42-58;60-68
64	CENTRE	MIREBALAIS	MIREBALAIS	18.84	-72.10		48-51;53-66
65	CENTRE	HINCHE	HINCHE	19.14	-72.01		77-92
66	SUD	PORT A PIMENT	PORT A PIMENT	18.25	-74.10		48-51;53-58
67				19.94	-72.85		48-51;53-58;67-94
68	ARTIBONITE	SAINT MICHEL	SAINT MICHEL	19.37	-72.34		48-51;53-66
69	OUEST	THOMAZEAU	THOMAZEAU	18.65	-72.09		48-51;53-55
70	ARTIBONITE	VERRETTES	VERRETTES	19.05	-72.47		48-51;53-58
71			BAYONNAIS	19.41	-72.48		64-68;77-79
72	NORD	PILATE	ATREL	19.70	-72.66		95-97
73	NORD	DONDON	BASSIN CAIMAN	19.80	-72.38		95-96
74	NORD	PLAISANCE	BEDORET	19.60	-72.47		95-97
75	SUD EST	MARIGOT	BERRY	18.23	-72.32		95-96
76	SUD	CAMP PERRIN	CAMP PERRIN (PADF)	18.32	-73.86		93-95
77	CENTRE	MIREBALAIS	DESVARIEUX	18.84	-72.10		95-96
78	CENTRE	BOUCAN CARRE	DUBUISSON	18.92	-72.15		96
79	CENTRE	SAUT D'EAU	LA BONNE	18.82	-72.20		
80	CENTRE	MIREBALAIS	MIREBALAIS	18.84	-72.10		
81	OUEST	LEOGANE	PALMISTE AVIN	18.51	-72.62		
82	GRAND ANSE	BEAUMONT	BEAUMONT	18.48	-73.95		88-90;92-93;96-98
83	SUD	LES ANGLAIS	LES ANGLAIS	18.31	-74.22		39-41;49-58;91-93;98
84	SUD	AQUIN	SAINT LOUIS DU SUD	18.26	-73.55		76-97
85	SUD EST	BELLE ANSE	MAPOU	18.24	-72.07		96-98
86			ANSE A PITRES	18.05	-71.76		79-92
87			ANSE ROUGE	19.64	-73.05		77

ID	Depto.	Comuna	Estación	Lat (N)	Lon (N)	Cota (m.s.n.m)	Periodo de medición (Años)
88	OUEST		ARCAHAIE	18.77	-72.51		39-54; 60-76
89			BAYONNAIS	19.41	-72.48		64-68; 77-79
90	OUEST		BIZOTON	18.53	-72.38		55-56
91			BOIS DEHORS	19.33	-72.65		49-51; 55-56; 59
92	ARTIBONITE		BOIS NEUF	19.02	-72.75		41-45
93			BOREL	19.10	-72.50		43-50
94			BORGNE	19.84	-72.52		39-41; 47-50
95			BOURDON	18.54	-72.32		66-71; 73-79
96			CABARET (NORD'OUEST)	19.87	-73.01		66-69; 77-88
97			CABARET (OUEST)	18.73	-72.42		48-51; 53-57
98			CAMP PERRIN	18.32	-73.86		39-89
99			CAP HAITIEN	19.74	-72.21		40-00
100			CAYES (AGRONOMAT)	18.20	-73.75		79-96
101			CHANTAL	18.20	-73.89		52-60
102			CORNILLON	18.68	-71.94		51-67
103	OUEST		DAMIEN	18.60	-72.28	20	40-56; 59-00
104	OUEST		DELMAS	18.54	-72.31		88-00
105			DESDUNES	19.29	-72.64		39-70; 77-79
106			DESRONVILLES	19.47	-72.65	19	64-67; 69-71; 76-89
107	ARTIBONITE		DESSLINESI	19.26	-72.52		39-70; 77-79
108	ARTIBONITE		ENNERY	19.48	-72.48	320	23;25;31;39-62;64-67;77-88
109			FOND DES NEGRES	18.37	-73.23		40-48; 64-67; 77-79
110	OUEST		FONDS PARISIENS	18.51	-71.98		49-56
111	OUEST		FURCY	18.42	-72.30		39-61; 77-79
112	OUEST	KENSCOFF	GODET KENSCOFF	18.45	-72.29		77-79
113			GRAND PRE	19.62	-72.18		77-90
114			GRANDE RIVIERE DU NORDI	19.58	-72.17		39-75; 77-90
115	ARTIBONITE		GRANDE SALINE	19.26	-72.76		39-62
116	OUEST		GRENIER	19.38	-71.76		42-47
117			GROS MORNE	19.66	-72.67	220	23;25;31-32;39-68; 77-79
118			HATTE LATHAN	18.64	-72.26		48-52; 66-71
119	SUD EST		JACMEL (CRS)	18.23	-72.52		95-98
120	SUD EST		JACMEL (FIC)	18.24	-72.53		88-00
121			JEREMIE	18.64	-74.12		45-46;55-58;60-79
122	OUEST		KENSCOFF	18.45	-72.29		39-69
123	ARTIBONITE		LA CHAPELLE	18.91	-72.31		39-43; 45-67
124			LA CITADELLE	19.57	-72.24		39-79
125	ARTIBONITE		L'ESTERE	19.31	-72.61		64-70
126			LIMONADE	19.67	-72.13		77-81
127			MILOT	119.61	-72.21		77-82;85-89
128		PETION VILLE	NERETTE	18.52	-72.29		64-66
129	ARTIBONITE		PETITE RIVIERE DE L'ARTIBONITE	19.12	-72.48		39-46;50;52-53;57-68;77-79
130	NORD	PILATE	PILATE	19.67	-72.55	320	23;25;48-51;53-71;77;84-87
131			POINTE A RAQUETTE	18.79	-73.06		77-79
132	ARTIBONITE		PONT SONDE	19.15	-72.62		39-44; 77-79
133			PORT-AU-PRINCE	18.59	-72.31		39-66; 88-00
134			PORT-AU-PRINCE(PETIT SEMINAIRE	18.55	-72.34		53;56-57;59-79

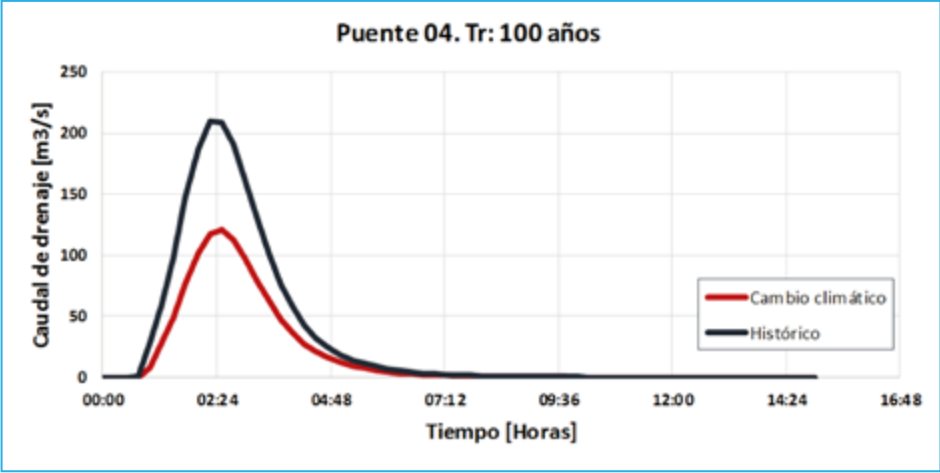
ID	Depto.	Comuna	Estación	Lat (N)	Lon (N)	Cota (m.s.n.m)	Periodo de medición (Años)
135			PORT SALUT	18.09	-73.93		87-88
136			RIV. GRISE	18.60	-72.29		39-47;52
137			ST JEAN DU SUD	18.08	-73.81		87-97
138	ARTIBONITE		SAINT MARC	19.10	-72.69		39-46;48-56;58-79;89-00
139	ARTIBONITE		SAINT MICHEL DE L'ATTALAYE	19.37	-72.33		23;25;31-32;39-45;48-80
140			SAUT MATHURINE	18.37	-73.85		54-62;87-88
141			SOURCE PHILIPPE (LA GONAVE)	18.82	-73.12		66-69;73-74
142			SOURCES CHAUDES	19.64	-72.92		64-66;77-79
143			TERRE NEUVE	19.60	-72.78		23;31-32;35;39-58;64-69;77-79
144			TIBURON	18.32	-74.40		77-79
145			TROU DU NORD	19.61	-72.02		77-91
146	ARTIBONITE		VERRETTES	19.05	-72.47		39-67

8.3 Anexo C: Estaciones pluviométricas y Nodos GCM seleccionados por cada cuenca.

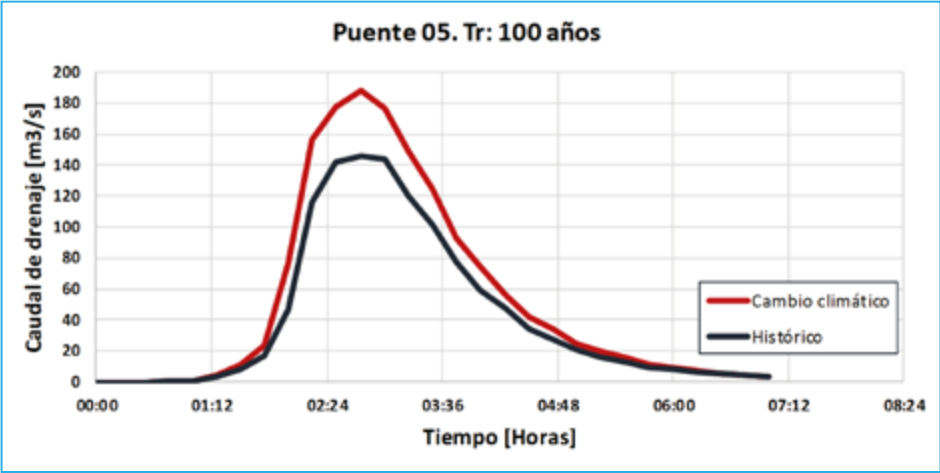
Pte	Río	Estación pluviométrica (ID)	Nodo GCM (ID)	Area Cuenca [Km2]	Tiempo concentración [Hr]	Comentarios
P120	Estimé	121, 62, 144, 83	411544, 411543, 412983, 412984	567.49	41.96	
P5	Rivière Bonbon	121, 62	411544, 411543, 412983	30.04	6.09	Características torrenciales. TC<6 horas y pendientes superiores al 10%
p89	Rivière des Abricots	121, 62	411544, 411543, 412983	58.97	11.60	
P4	Rivière Gros Marin	57, 84	412,987	29.27	9.31	
P121	L'Acul (Arniquet)	101, 135, 28, 76, 137	414425, 412984, 412985	169.50	25.54	
P102	L'Asile(l'asile) riviere mahot	46, 84	412987, 412986	51.95	8.71	
P101	L'Asile(tournade) riviere pins	46, 84	412987, 412986	168.52	22.89	
p90	Rivières Brossard	46	412987	32.62	8.21	
P11	Rivière Grise	112, 111, 56, 36, 128, 37	412991, 412992	300.07	20.30	
P12	Rivière Grise	112, 111, 56, 36, 128, 37	412991, 412992	288.37	18.21	
p97	Source gros madanm * (galette millet)	112, 111, 36, 128, 37, 5	412991	9.28	3.88	Características torrenciales. TC<6 horas y pendientes superiores al 10%
P66	Petite Rivière de Jacmel	33, 7, 32, 119	414430, 412990	25.44	13.07	
P67	Dlo Génée	33, 7, 32, 119	414430, 412990	23.51	6.54	
P68	Rivière Madame Louis	47, 33	414430	28.90	8.58	
P69	Rivière Trou Mahot	47, 33	414430	20.63	5.57	
P70	Rivière Jean Charles	47, 33	414429, 414430	1.80	2.03	

Pte	Río	Estación pluviométrica (ID)	Nodo GCM (ID)	Area Cuenca [Km2]	Tiempo concentración [Hr]	Comentarios
P70	Ravine Militon (Rivière penn)	47, 33	414429, 414430	24.10	6.15	
P71	Rivière de Bainet	ron	412989, 414429	426.77	36.01	
P14	Rivière Torcelle *	123, 23, 88	410111, 411551	68.87	13.78	
P15	Rivière Bretelle *	123, 23, 88, 79, 118	410111, 411551	98.01	15.68	
P16	Rivière Froide	142, 143	405789	24.77	6.56	
P40	Rivière de Henne	20, 25	405787, 405788, 404347	169.97	25.76	
P38	Rivière de Jean Rabel	24, 20	404347, 404348	42.50	8.48	
P41	Rivière de Jean Rabel	24, 20	404347, 404348	142.14	23.13	
P39	Rivière de Catinette	24, 20	404347, 404348	22.74	7.40	
P104	Perches(Haut des Perches) Riviere cochon gras	145	405793, 407233	16.21	4.18	Características torrenciales. TC<6 horas y pendientes superiores al 10%
P54	Rivière Boquette	145, 35, 116	405793, 407233	16.85	5.17	Características torrenciales. TC<6 horas y pendientes superiores al 10%
P48	Rivière Boudeau	116, 35	407233, 407234	20.74	8.13	
P47	Rivière	116, 35	407233, 407234	0.93	1.36	Según MDT, localización se hizo con otro punto cercano
P49	Rivière Gens de Nantes	116, 35	407233, 407234	20.84	5.75	
P50	Rio Libon	116, 35	407233, 407234	2.65	2.61	Según MDT, localización se hizo con otro punto cercano
P51	Rivière Terre Neuve	116, 35	407233	39.68	9.95	
P55	Grande Rivière Du Nord	116, 35	407233	9.84	4.30	Características torrenciales. TC<6 horas y pendientes superiores al 10%

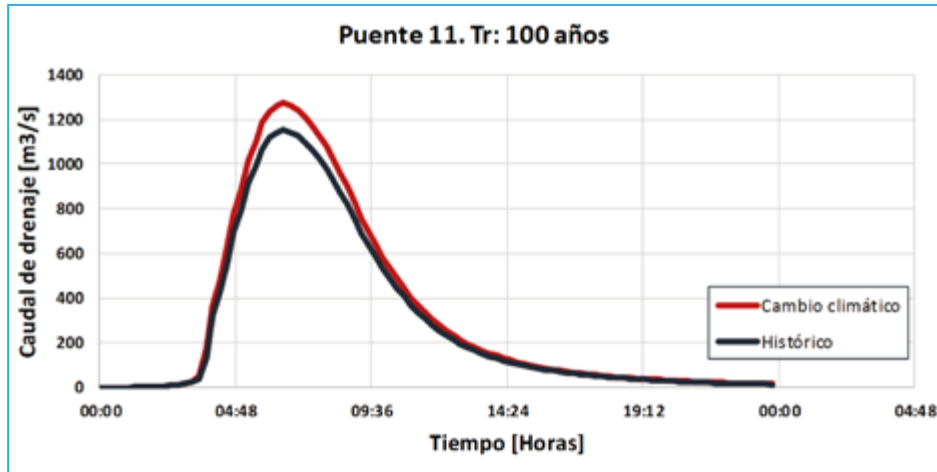
8.4 Anexo D: Hidrogramas calculados por cuenca, para 100 años de período de retorno



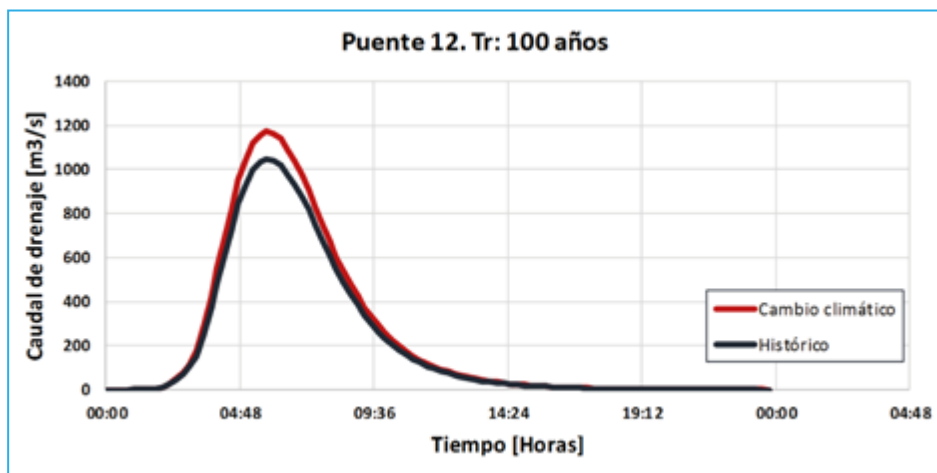
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	209.2	100
Condición con Cambio a Climático	121.2	57.93
Caudal Máximo	209.2	



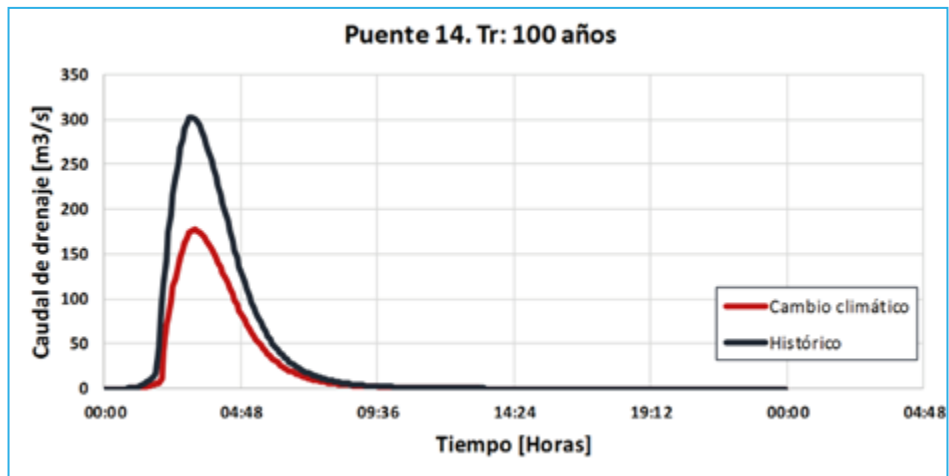
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	145.5	77.39
Condición con Cambio a Climático	188	100
Caudal Máximo	188	



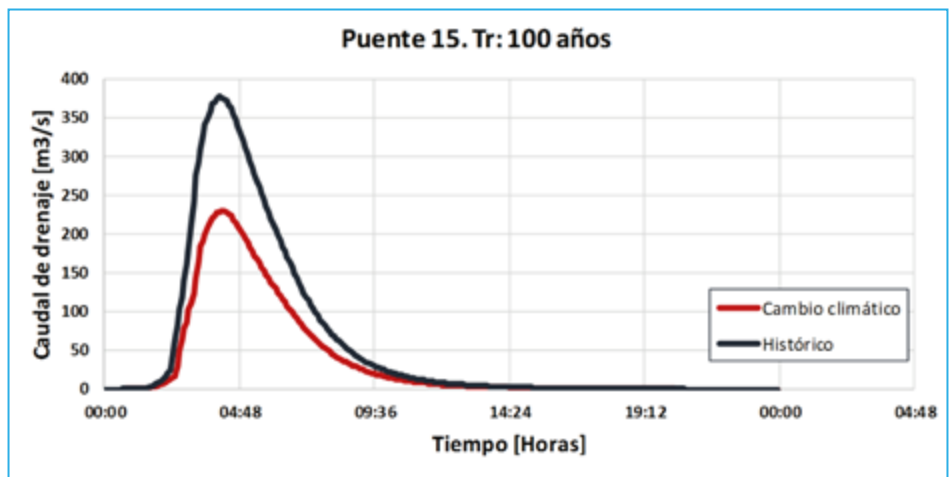
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	1154.2	90.67
Condición con Cambio a Climático	1273	100
Caudal Máximo	1273	



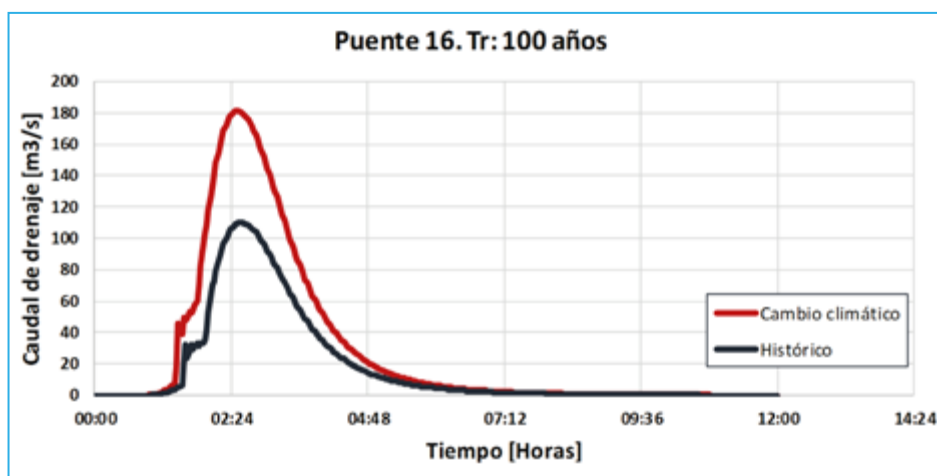
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	1154.2	90.67
Condición con Cambio a Climático	1273	100
Caudal Máximo	1273	



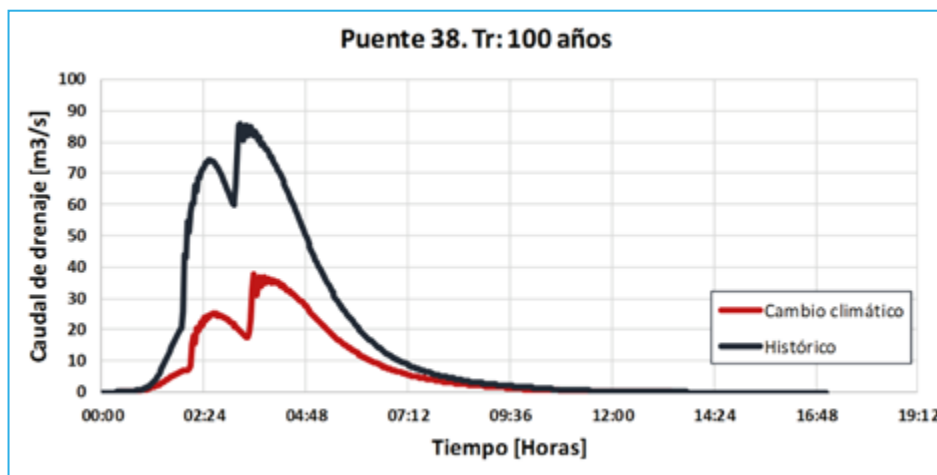
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	302.8	100
Condición con Cambio a Climático	177.2	59
Caudal Máximo	302.8	



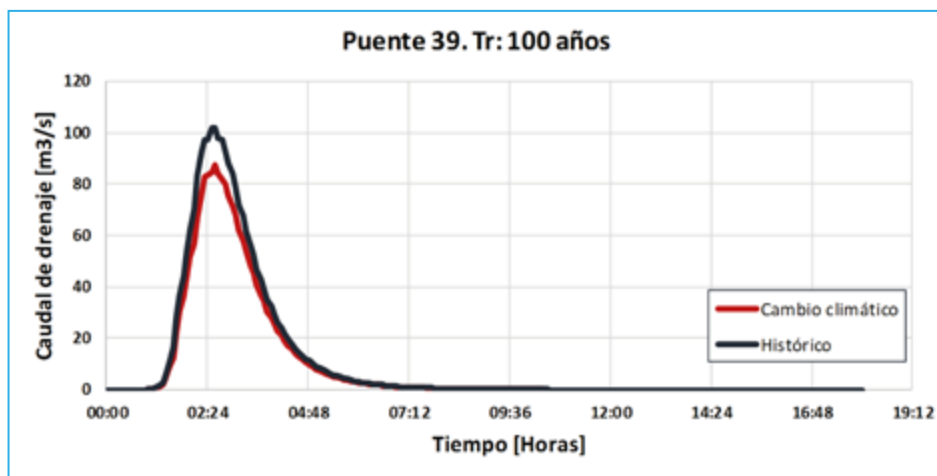
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	377.3	100
Condición con Cambio a Climático	230.1	61
Caudal Máximo	377.3	



	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	110.2	60.78
Condición con Cambio a Climático	181.3	100
Caudal Máximo	181.3	



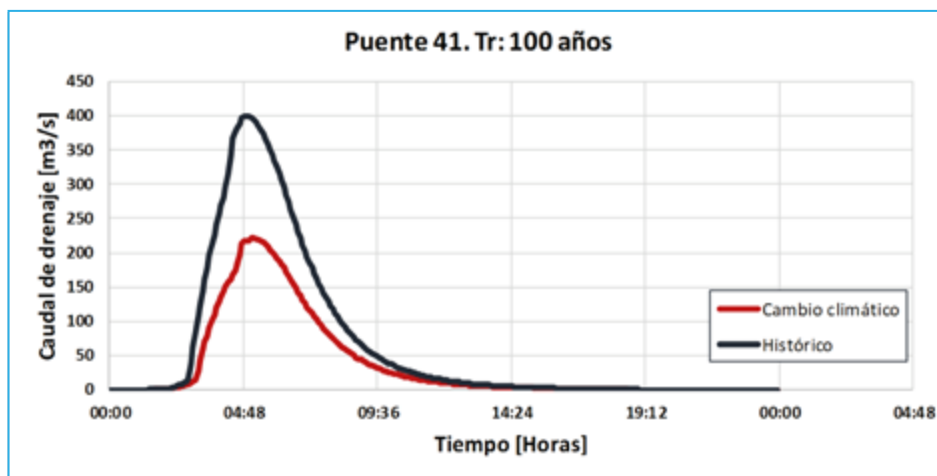
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	85.8	100
Condición con Cambio a Climático	37.8	44
Caudal Máximo	85.8	



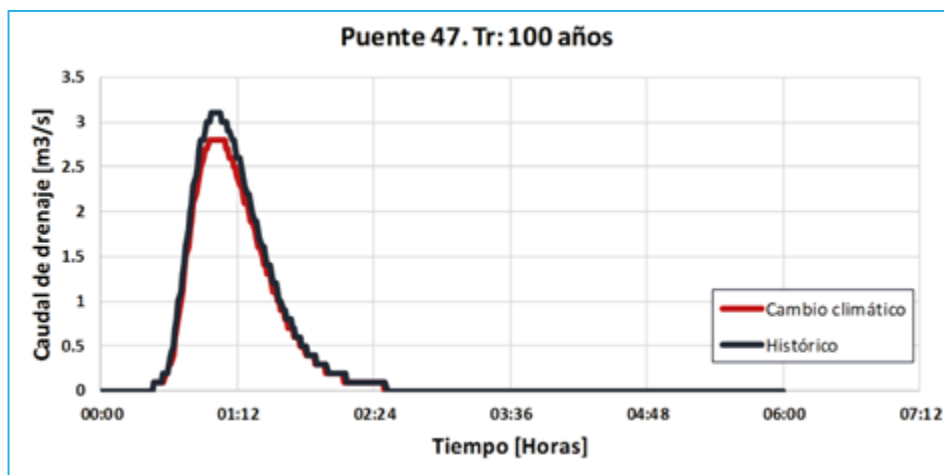
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	102.1	100
Condición con Cambio a Climático	87.3	86
Caudal Máximo	181.3	



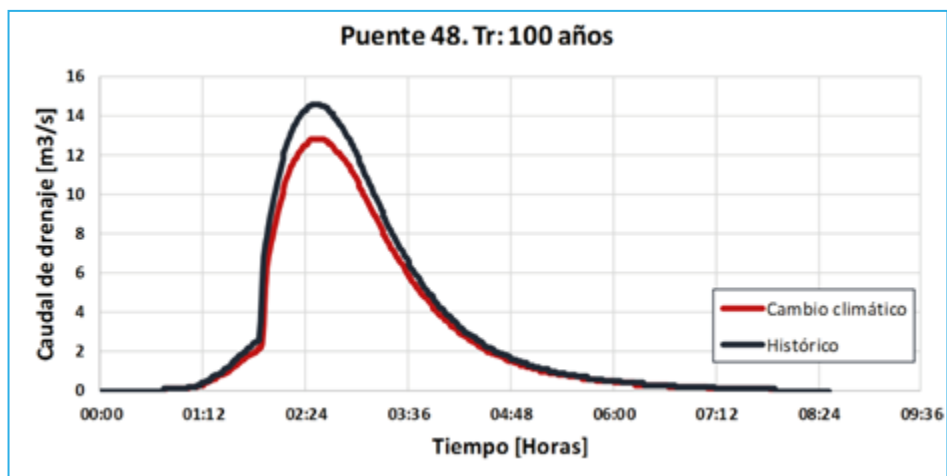
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	408.1	100
Condición con Cambio a Climático	168.5	41
Caudal Máximo	408.1	



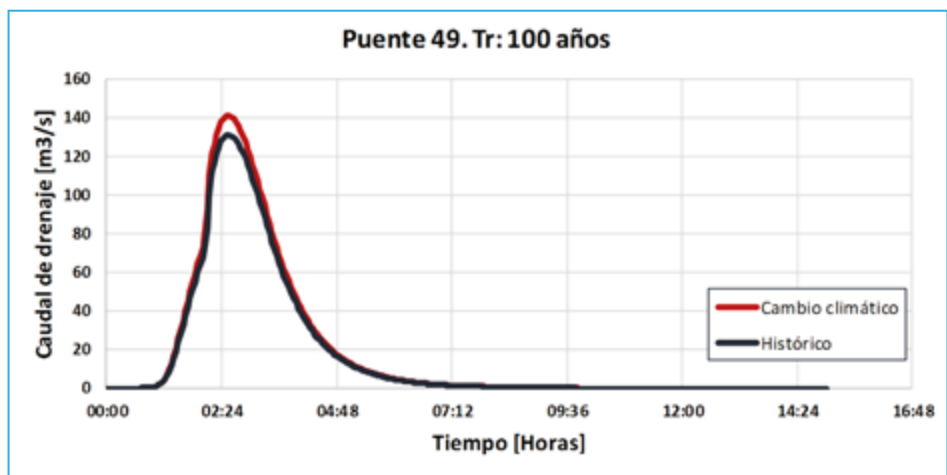
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	399.3	100
Condición con Cambio a Climático	222.6	56
Caudal Máximo	399.3	



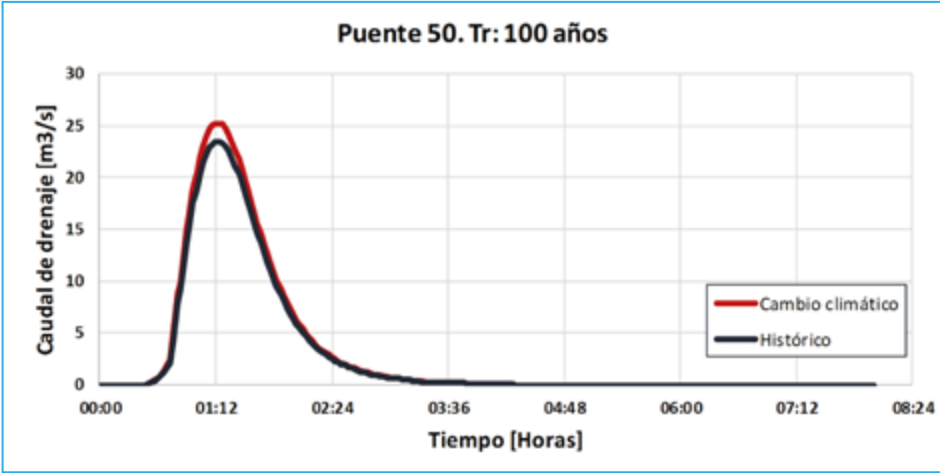
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	3.1	100
Condición con Cambio a Climático	2.8	90
Caudal Máximo	3.1	



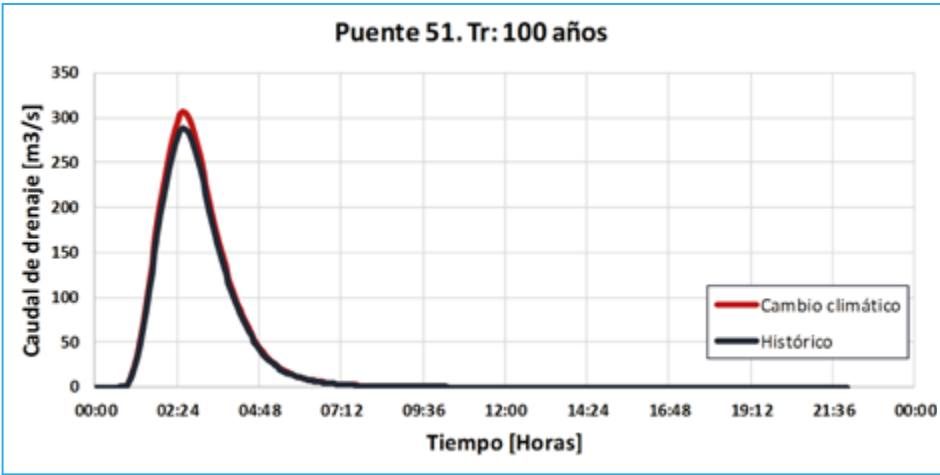
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	14.6	100
Condición con Cambio a Climático	12.8	88
Caudal Máximo	14.6	



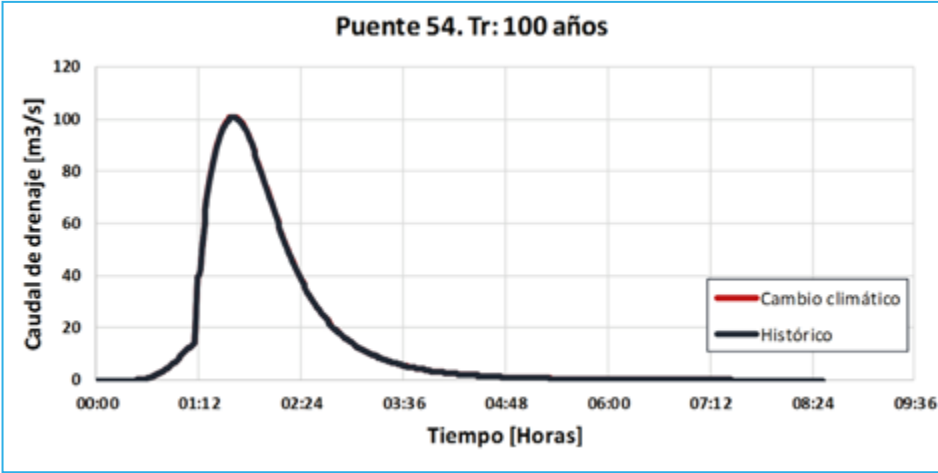
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	131	92.97
Condición con Cambio a Climático	140.9	100
Caudal Máximo	140.9	



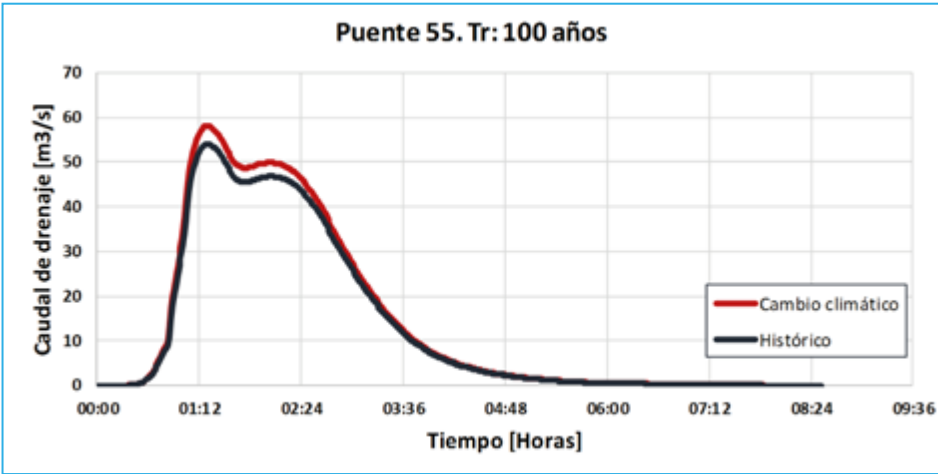
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	23.5	93.25
Condición con Cambio a Climático	25.2	100
Caudal Máximo	25.2	



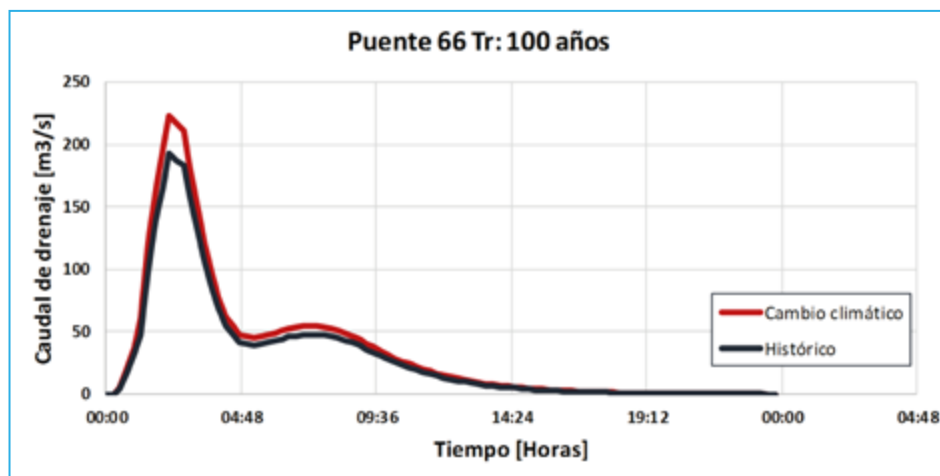
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	288.6	94.22
Condición con Cambio a Climático	306.3	100
Caudal Máximo	306.3	



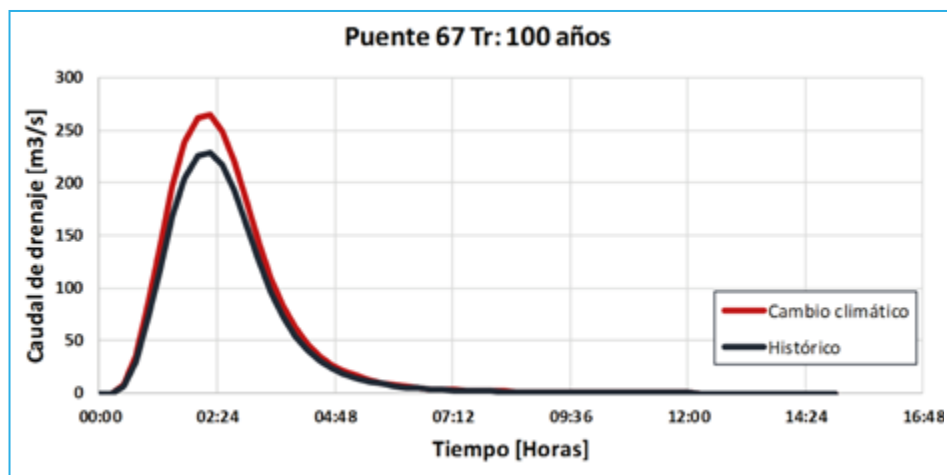
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	100.6	99.7
Condición con Cambio a Climático	100.9	100
Caudal Máximo	14.6	



	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	100.6	99.7
Condición con Cambio a Climático	100.9	100
Caudal Máximo	100.9	



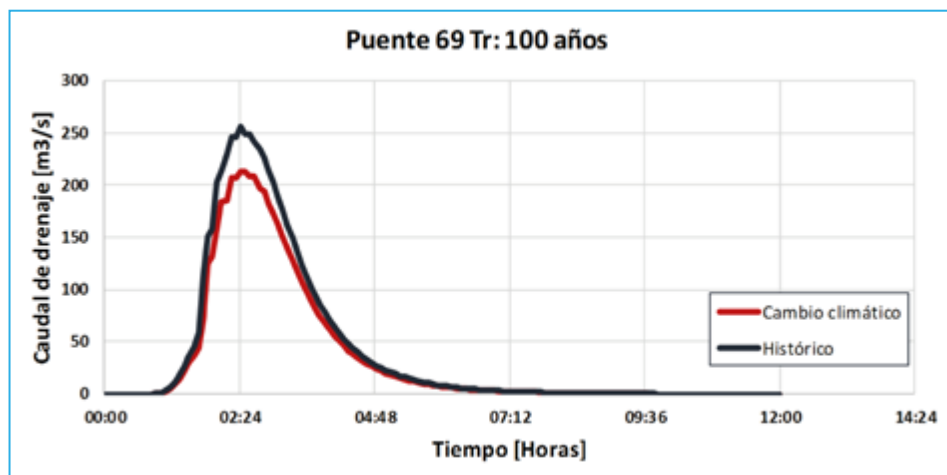
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	193.2	86.48
Condición con Cambio a Climático	223.4	100
Caudal Máximo	223.4	



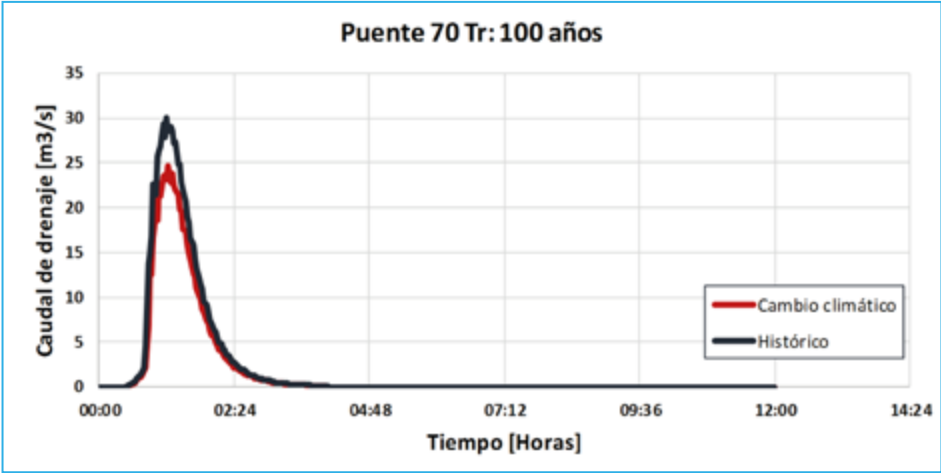
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	229	86.51
Condición con Cambio a Climático	264.7	100
Caudal Máximo	264.7	



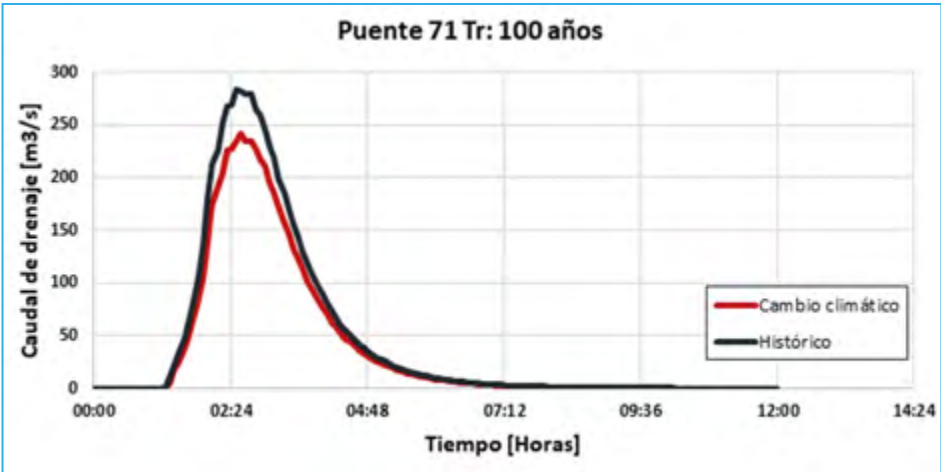
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	373.4	86.1
Condición con Cambio a Climático	433.7	100
Caudal Máximo	433.7	



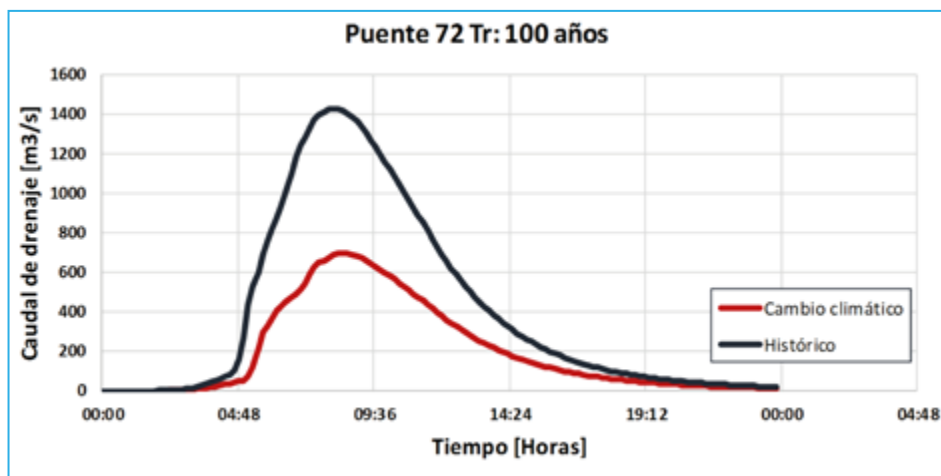
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	256.3	100
Condición con Cambio a Climático	213.4	83
Caudal Máximo	256.3	



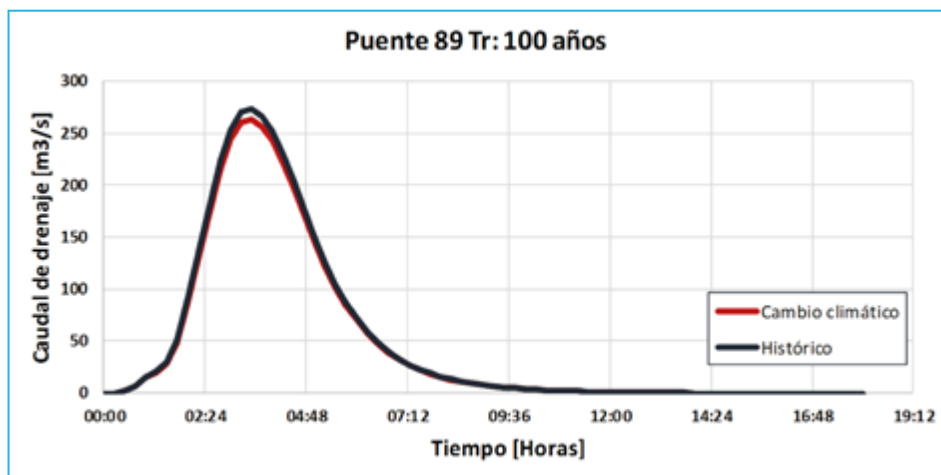
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	30	100
Condición con Cambio a Climático	24.6	82
Caudal Máximo	30	



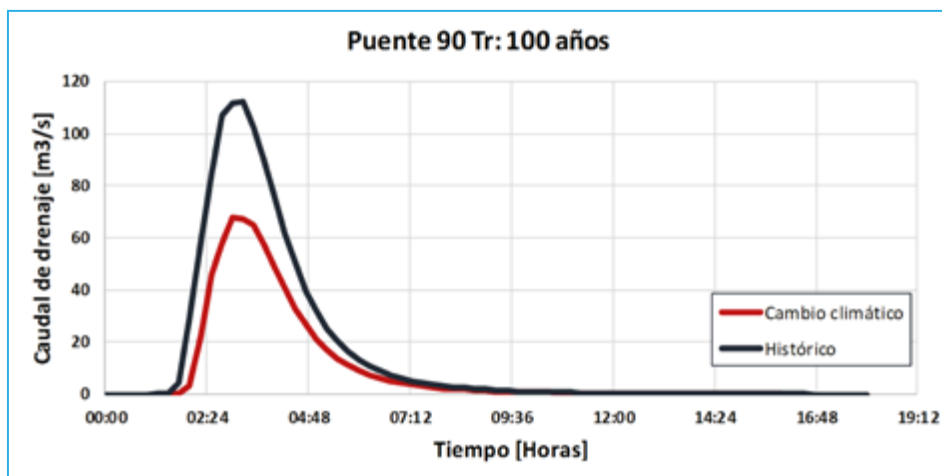
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	283.2	100
Condición con Cambio a Climático	241.2	85
Caudal Máximo	283.2	



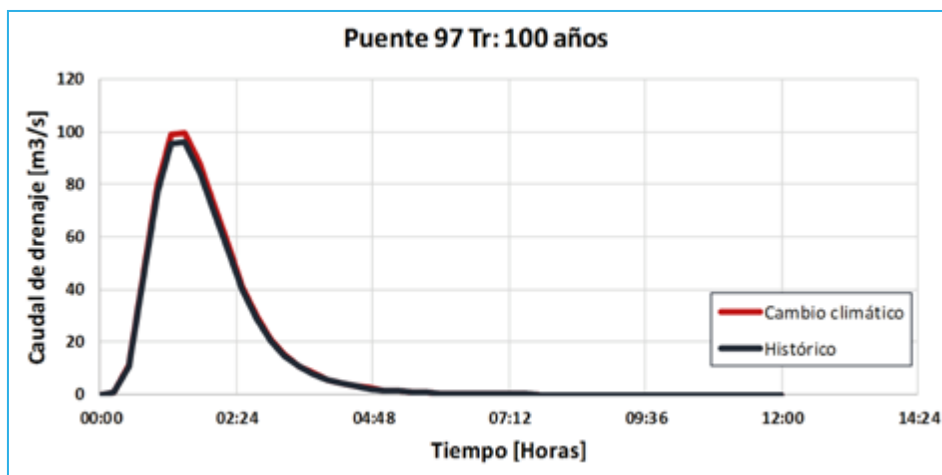
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	1429.4	100
Condición con Cambio a Climático	694.5	49
Caudal Máximo	1429.4	



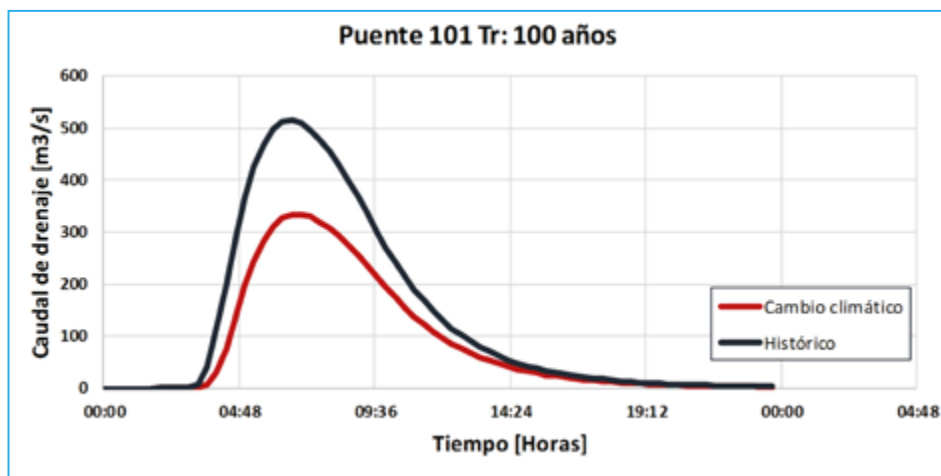
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	272.9	100
Condición con Cambio a Climático	263.2	96
Caudal Máximo	272.9	



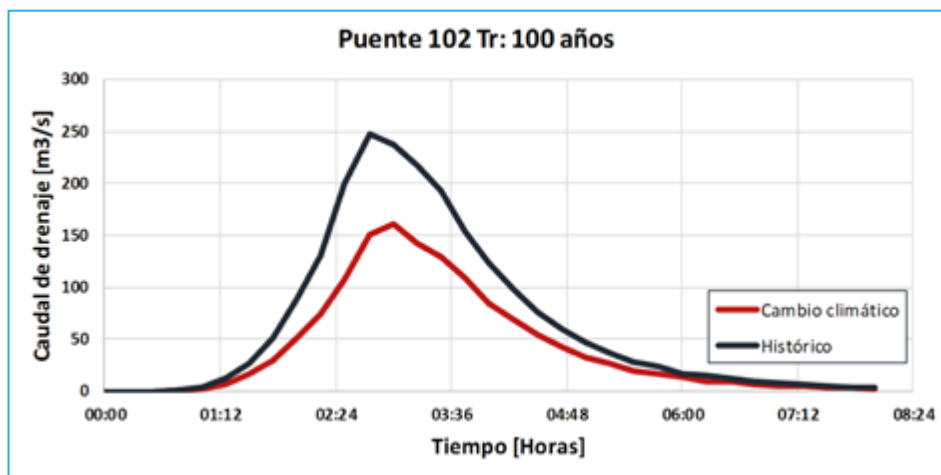
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	112.3	100
Condición con Cambio a Climático	68.1	61
Caudal Máximo	112.3	



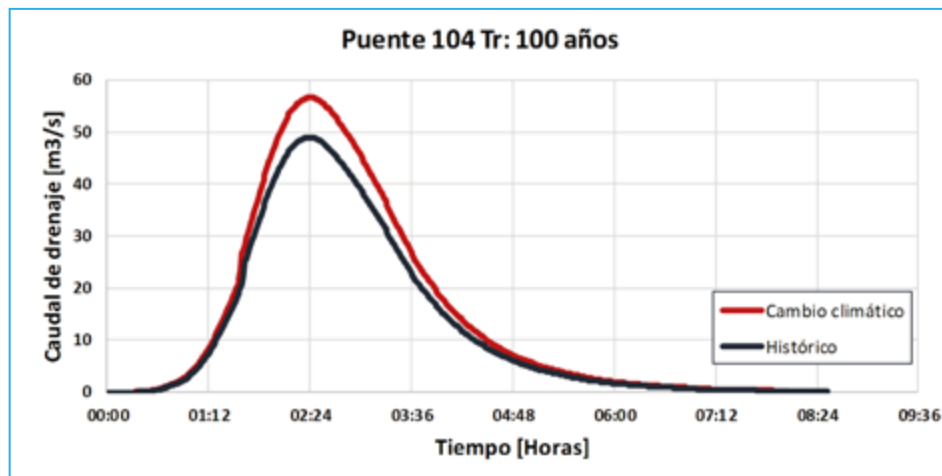
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	96	96.29
Condición con Cambio a Climático	99.7	100
Caudal Máximo	99.7	



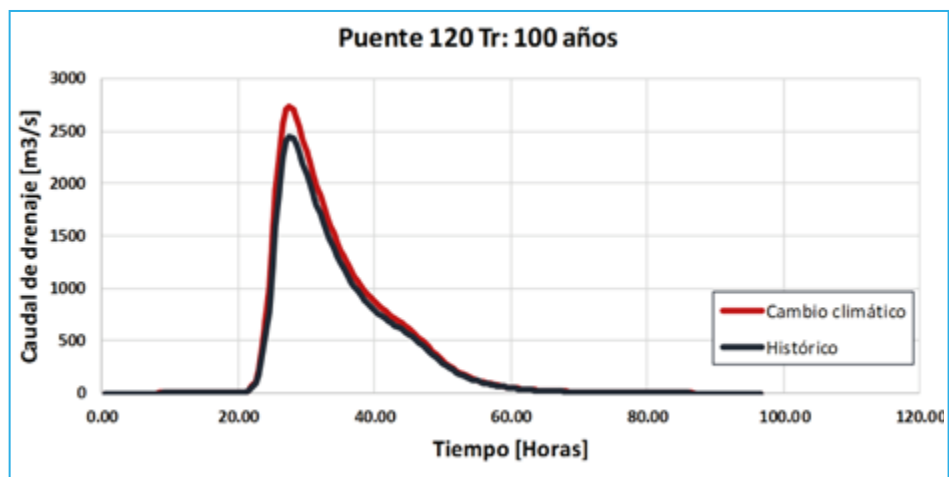
	Caudal pico (m³/S)	%
Condición histórica	515.7	100
Condición con Cambio a Climático	334.6	65
Caudal Máximo	515.7	



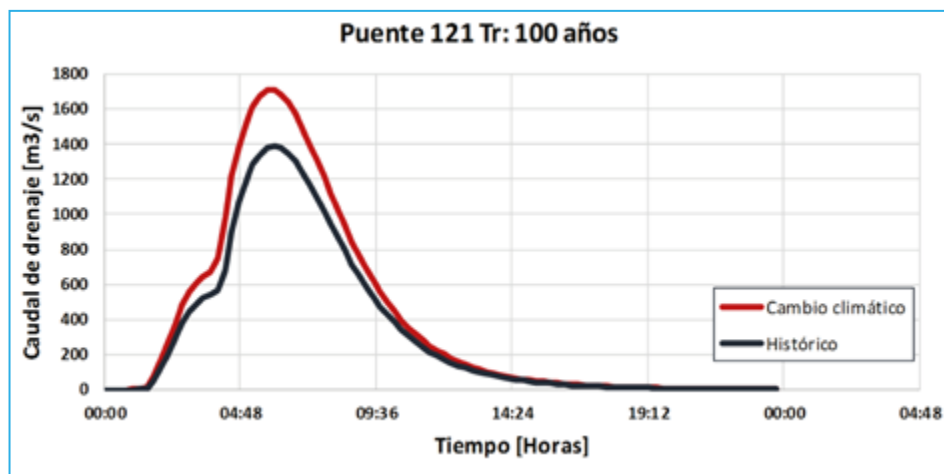
	Caudal pico (m³/S)	%
Condición histórica	247.4	100
Condición con Cambio a Climático	160.4	65
Caudal Máximo	247.4	



	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	49	86.42
Condición con Cambio a Climático	56.7	100
Caudal Máximo	56.7	

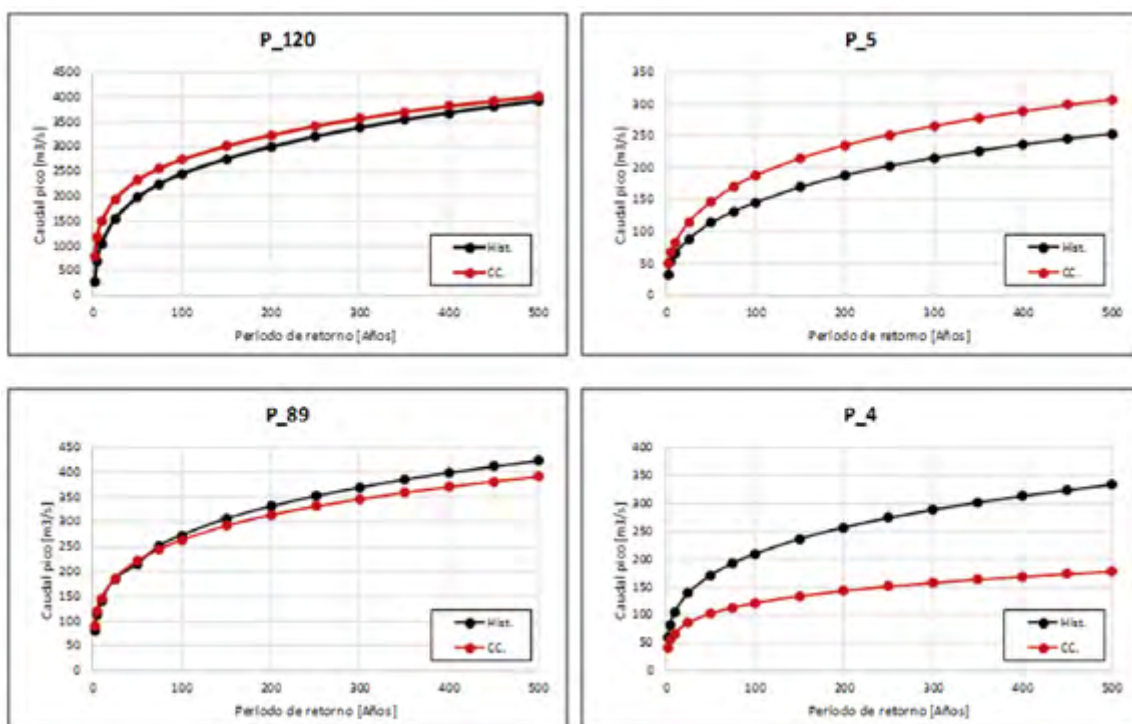


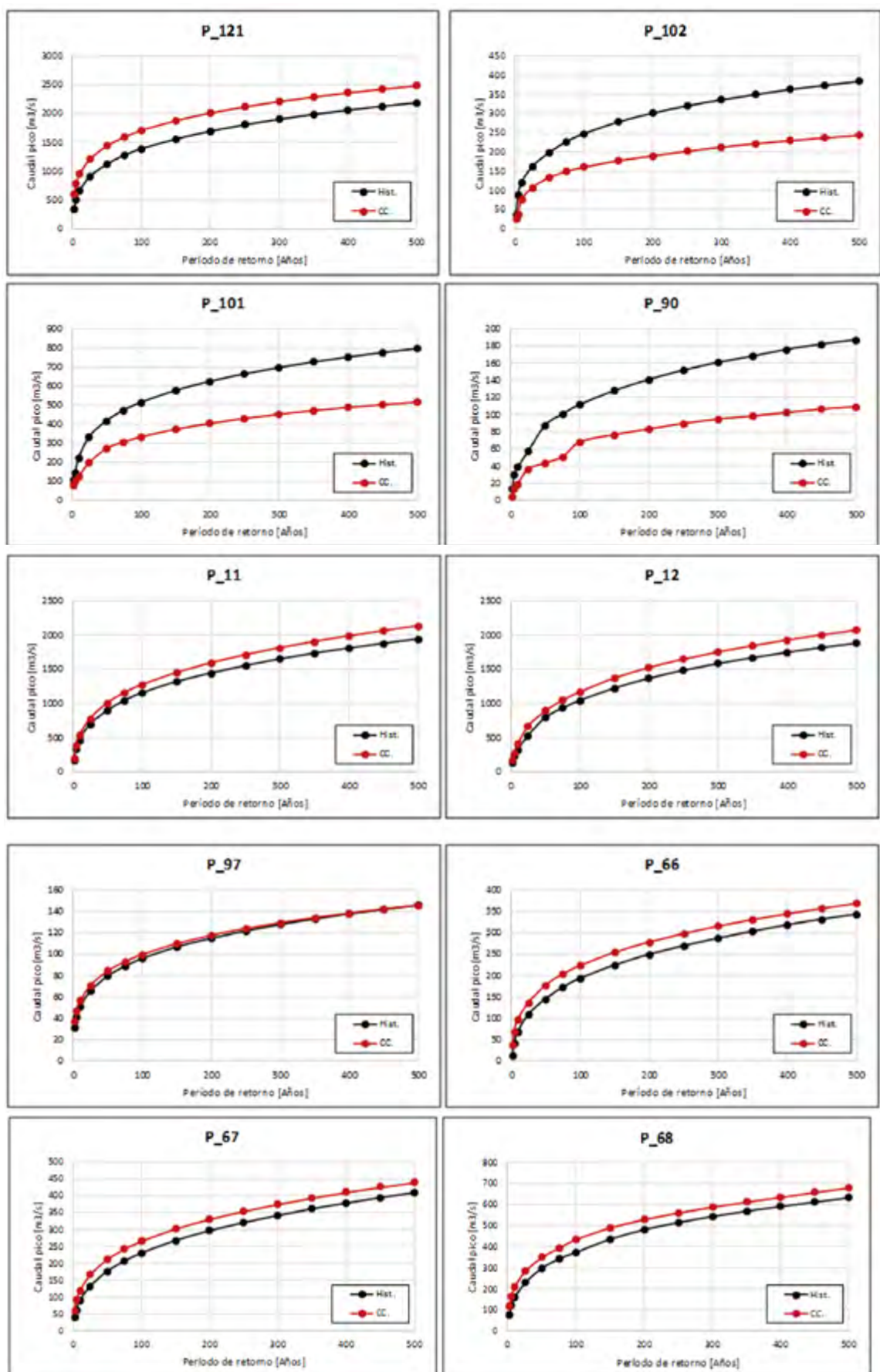
	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	2448.8	89.5
Condición con Cambio a Climático	2736	100
Caudal Máximo	2736	

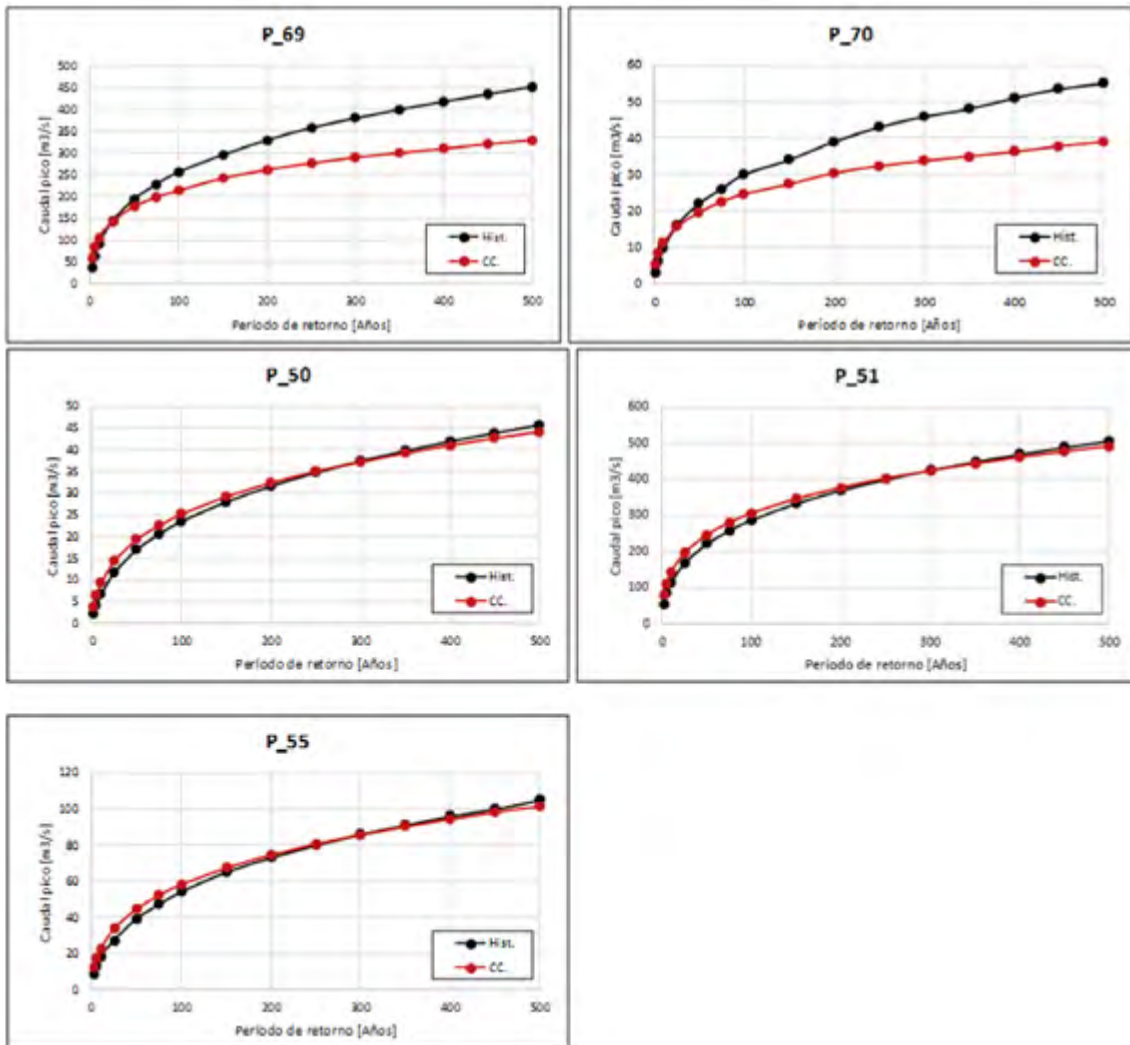


	Caudal pico (m3/S)	%
Condición histórica	13.89.8	81.34
Condición con Cambio a Climático	1708.6	100
Caudal Máximo	1708.6	

8.5 Anexo E: Curvas de periodo de retorno vs. Caudal pico por cuenca







8.6 Anexo F: Resultados de hidrogramas para 4 cuencas con cambios en las condiciones de cobertura vegetal

En la Sección 3.1.1 de este documento se presentan los supuestos y consideraciones de la metodología planteada para el cálculo de hidrogramas de crecienta en condiciones de precipitación histórica y con cambio climático. Dentro de estos supuestos se encuentra el siguiente:

- Dentro del modelo hidrológico planteado se fijan las condiciones de cobertura vegetal y de tipo de suelo para la estimación de hidrogramas de crecienta asociados a períodos de retorno. Esto significa que, se asume que la cobertura vegetal no presenta cambios en la modelación para ninguno de los períodos de retorno de análisis, lo cual repercute en que la capacidad de infiltración en el modelo se mantiene constante para las cuencas analizadas.

Como consecuencia de este supuesto, para todos los períodos de retorno y para los dos escenarios de análisis, las capacidades de infiltración y de generación de escorrentía en las 33 cuencas de drenaje permanecen constantes. Por tanto, el cambio en los resultados de caudales pico e hidrogramas de crecienta entre escenarios y entre períodos de retorno, corresponde exclusivamente al cambio en las condiciones de precipitación.

Como un ejercicio adicional de modelación que surge a partir del interés de conocer cuántas

serían las condiciones que se pueden esperar en términos hidrológicos en un contexto de cambio climático y de cambio en las coberturas vegetales y, por ende, en las condiciones de infiltración y capacidad de generación de escorrentía de una cuenca, se planteó el análisis extra de cuatro cuencas (120, 89, 5 y 4) considerando un escenario adicional de posibles cambios en la cobertura vegetal que se pueden presentar en cada una de ellas.

Es necesario establecer que, si bien la incertidumbre de tipo aleatorio, epistémico y ontológico que se presenta en el análisis hidrológico convencional es alta en la mayoría de los casos de análisis, al incluirse un nuevo escenario de un posible cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo de una cuenca dicha incertidumbre se incrementa en proporciones que no son fáciles de estimar. Lo anterior debido a que los cambios que se introducen en un territorio a nivel de uso del suelo y de su cobertura vegetal obedecen cada vez más a la interacción humana sobre dicho territorio. Por lo tanto, el deseo de generar una proyección del cambio en el comportamiento debe verse y analizarse con un lente crítico en la medida en que puede ser un futuro esperado ante unas condiciones dadas, pero corresponde a una única posibilidad dentro de una cantidad infinita de cambios que se pueden generar en una ventana de tiempo tan grande como 2006 a 2100.

⁶Este último cambio bajo la idea de que, por un lado, por efectos del cambio en temperatura el cambio climático puede generar un cambio y/o degradación de la cobertura vegetal. Y, por otro lado, por efectos antropogénicos en los usos de la tierra se podría, a su vez, presentar degradación física del suelo.

Por lo anterior, es importante que el lector tenga en cuenta que los resultados que se presentan a continuación pretenden generar un análisis en torno a la importancia de la gestión del riesgo de desastres como un todo dentro de una cuenca hidrográfica. Es decir, que se entienda y se analice que no sólo se debe prestar atención a los cambios en las condiciones de precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, etc. que se pueden presentar en un territorio, sino que es igual de importante prestar atención a los cambios que el ser humano puede introducir en forma de planes de ordenamiento legalmente concebidos, y en forma de actividades de explotación y uso del suelo de carácter ilegal, que modifican de manera drástica las condiciones en las que el suelo infiltra, permea, evapora y escurre el agua lluvia. En consecuencia, no se pretende establecer que los resultados corresponden a una realidad en el futuro y que se deben tener en cuenta para etapas de factibilidad, pre-diseño y diseños finales de ningún tipo. Más bien, son resultados que pueden ser utilizados en evaluaciones probabilistas de riesgo por inundación que vinculen de manera adecuada la mayor cantidad de escenarios posibles que se pueden presentar en una cuenca y que pueden afectar la generación de caudales extremos, con el objetivo de plantear análisis de pérdidas económicas y consecuencias sobre elementos expuestos.

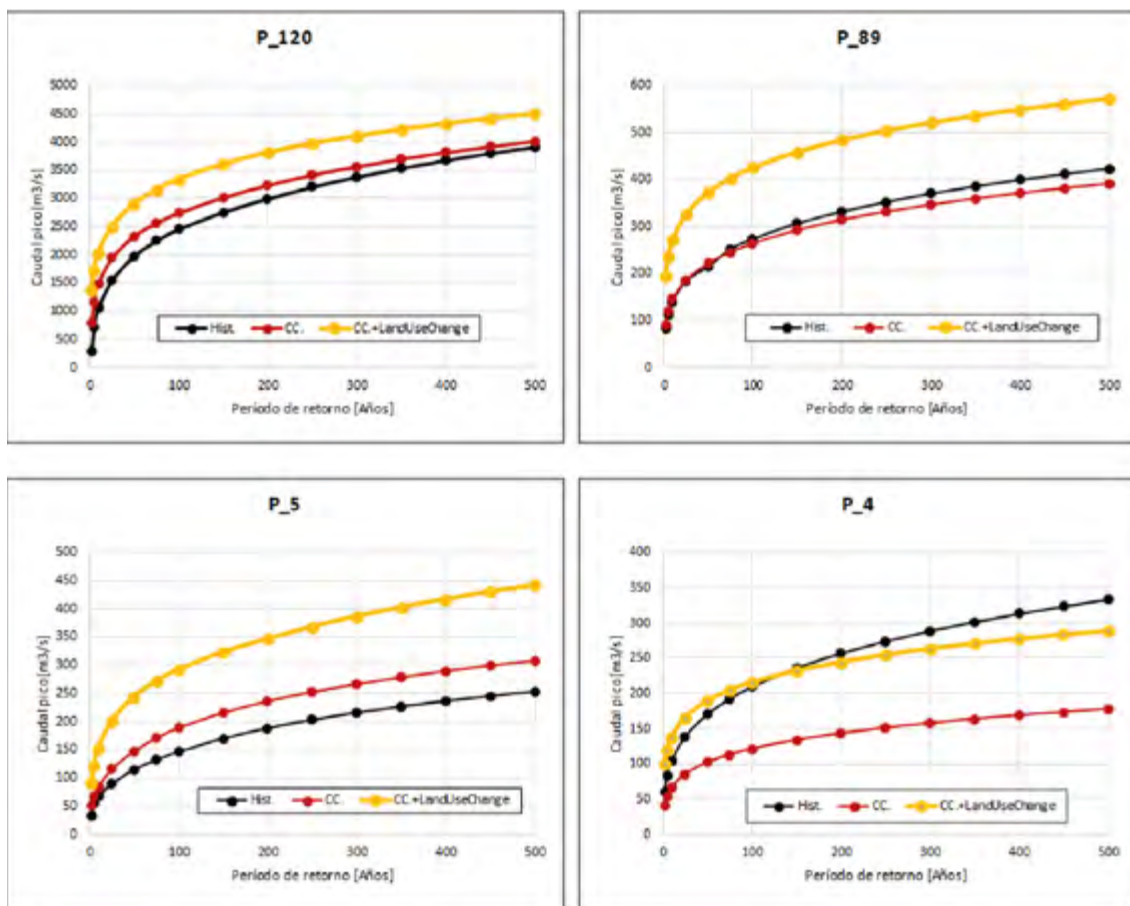
Para posibilitar el análisis objeto de este anexo, hubo la necesidad de plantear nuevos supuestos y/o consideraciones metodológicas. Estas son:

- i.** Las condiciones de cambio en la cobertura vegetal para las cuencas seleccionadas se plantea considerando los resultados obtenidos por Versluis & Rogan (2010), en su artículo titulado "Mapping land-cover change in a Haitian watershed using a combined spectral mixture analysis and classification tree procedure".
- ii.** Los resultados se obtienen para 4 cuencas; 120, 5, 89 y 4. La selección de las cuencas obedece a que en ellas se evidencian las 3 tipologías en que se diferencian los resultados históricos vs. Cambio climático (incremento, decrecimiento, sin cambio).
- iii.** Se asume que el incremento en el proceso de impermeabilización de la cuenca es lineal en el tiempo, respetando las condiciones que se presentaron entre el año 1979 y 2000 en la cuenca estudiada por Versluis & Rogan (2010) al sur-orienté de Haití.

iv. Las condiciones del proceso de impermeabilización se asumen iguales para todas las cuencas, a partir de los resultados obtenidos en el estudio de Versluis & Rogan (2010). Es decir, no se hace distinción en los posibles comportamientos del cambio de cobertura vegetal en las 4 cuencas analizadas.

v. Se estima un valor de CN para la cuenca del estudio de Versluis & Rogan (2010) para el año 1979 y otro valor de CN para el año 2000. A partir de allí se estima un cambio en el CN (condiciones de infiltración de precipitación) para ese período. Posteriormente, respetando una relación lineal, se estima el cambio hasta el año 2100.

Partiendo de los supuestos planteados anteriormente y aplicando la metodología de modelación hidrológica de precipitación esorrentía descrita en el documento, se obtienen los resultados que se presentan a continuación en términos de; i) curvas de período de retorno vs. Caudal pico y, ii) cambio porcentual de caudal pico por cuenca, para cada período de retorno.



Puente Escenario		Periodo de retorno [Años]														
		2.33	5	10	25	50	75	100	150	200	250	300	350	400	450	500
P120	Hist.	284.1	699.5	1045.3	1541.9	1971.8	2244.2	2448.8	2751.8	2992.4	3202	3378.3	3537.1	3674.5	3800.9	3910.8
	CC.	793.3	1166.2	1487.3	1940.2	2323.2	2557.9	2736	3011.1	3227.6	3413.2	3561.3	3696	3813.1	3913.6	4008.4
	CC.+LUC	1364.2	1706.4	2018.9	2494.9	2888.8	3142.9	3330	3601.7	3802	3963.5	4094.8	4214.1	4316.9	4408.2	4490.8
P5	Hist.	31.7	53.7	66.3	88.7	114	131.2	145.5	169.5	187.7	202.5	215.1	226.1	235.9	244.7	252.7
	CC.	50.5	67.5	83.1	115.3	146.4	170.1	188	214.8	235.3	251.7	265.6	277.8	288.6	298.4	307.3
	CC.+ LUC	90.4	120.8	151.8	200.9	243.6	271.2	291.6	322.5	345.9	367.5	385.9	402	416.4	429.3	441.1
P89	Hist.	81.5	112	139.8	183.8	214.6	251.3	272.9	306.2	331.1	351.8	369.4	385	398.8	411.3	422.8
	CC.	90.9	119.6	144.9	185	220.8	244.3	263.2	291.8	313.5	330.9	345.7	358.8	370.3	381.1	390.6
	CC.+ LUC	193.1	234.6	270.7	325.2	371.9	401.9	424.4	457.9	482.9	503.2	520.3	535.2	548.5	560.4	571.2
P4	Hist.	60.1	82.7	103.9	138.4	170.4	192	209.2	236.1	256.9	273.9	288.7	301.6	313.2	323.6	333.4
	CC.	41.4	54.7	66.6	85.2	101.9	112.8	121.2	133.7	143.2	151	157.6	163.5	168.6	173.3	177.7
	CC.+ LUC	99.9	120	138.3	165.6	189.2	204.2	215.5	232.2	244	254.8	263.3	270.8	277.3	283.2	288.7

Puente	Ese.	Cambio %															Clase
		2-3	5	10	25	50	75	100	150	200	250	300	350	400	450	500	
P120	Hist.	▲380.2%	▲143.9%	▲93.1%	▲61.8%	▲46.5%	▲40.0%	▲36.0%	▲30.9%	▲27.1%	▲23.8%	▲21.2%	▲19.1%	▲17.5%	▲16.0%	▲14.8%	▲64.8%
	CC.	72.0%	46.3%	35.7%	28.6%	24.3%	22.9%	21.7%	19.6%	17.8%	16.1%	15.0%	14.0%	13.2%	12.6%	12.0%	24.8%
	CC+LUC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P5	Hist.	▲185.2%	▲125.0%	▲129.0%	▲126.5%	▲113.7%	▲106.7%	▲100.4%	▲90.3%	▲84.3%	▲81.5%	▲79.4%	▲77.8%	▲76.5%	▲75.4%	▲74.6%	▲101.7%
	CC.	79.0%	79.0%	82.7%	74.2%	66.4%	59.4%	55.1%	50.1%	47.0%	46.0%	45.3%	44.7%	44.3%	43.9%	43.5%	57.4%
	CC+LUC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P89	Hist.	▲136.9%	▲109.5%	▲93.6%	▲76.9%	▲73.3%	▲59.9%	▲55.5%	▲49.5%	▲45.8%	▲43.0%	▲40.9%	▲39.0%	▲37.5%	▲36.3%	▲35.1%	▲62.2%
	CC.	▲112.4%	▲96.2%	▲86.8%	▲75.8%	▲68.4%	▲64.5%	▲61.2%	▲56.9%	▲54.0%	▲52.1%	▲50.5%	▲49.2%	▲48.1%	▲47.0%	▲46.2%	▲64.6%
	CC+LUC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P4	Hist.	▲66.2%	▲45.1%	▲33.1%	▲19.7%	▲11.0%	▲6.4%	▲3.0%	▼-1.7%	▼-5.0%	▼-7.0%	▼-8.8%	▼-10.2%	▼-11.5%	▼-12.5%	▼-13.4%	7.6%
	CC.	▲141.3%	▲119.4%	▲107.7%	▲94.4%	▲85.7%	▲81.0%	▲77.8%	▲73.7%	▲70.4%	▲68.7%	▲67.1%	▲65.6%	▲64.5%	▲63.4%	▲62.5%	▲82.9%
	CC+LUC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Como resumen de los resultados obtenidos, se concluye que:

i. Para las 4 cuencas analizadas, se presenta un aumento consistente de los caudales pico, incluidas las cuencas que en el análisis comparativo fueron clasificados dentro de las tipologías sin cambio y decrecimiento.

ii. Para las dos cuencas que en el análisis comparativo presentaban incremento en el caudal pico con condiciones de cambio climático: la cuenca del puente 120 presenta un cambio porcentual con respecto al histórico de 65% (comparado con un 27% antes). Lo anterior representan un 25% de aumento en promedio sobre el efecto del cambio climático sin cambio de cobertura vegetal. Para la cuenca del puente estos cambios son del 102% y 57%, respectivamente.

iii. Para la cuenca del puente 89 (tipología sin cambio): el cambio porcentual con respecto al histórico es de un 62% (comparado con un -2%

antes), lo cual representa un 65% de aumento, en promedio, sobre el efecto del cambio climático sin cambio de cobertura vegetal.

iv. Para la cuenca del puente 4 (tipología decreciente): el cambio porcentual con respecto al histórico es de un 8% (comparado con un -42% antes), lo cual representa un 83% de incremento, en promedio, sobre el efecto del cambio climático sin cambio de cobertura vegetal. Ésta es la única cuenca que presenta disminución para algunos periodos de retorno. En este caso, para los periodos de retorno altos (eventos de muy baja frecuencia), a partir de 150 años, se presenta un decrecimiento máximo del -13%.

En resumen, la inclusión del cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo representa una gran diferencia en los efectos de las condiciones futuras con cambio climático, ya que los cambios son grandes con respecto a no incluirlo (mínimo de un 25% a un 83% más).

En conclusión: más allá de los valores exactos de cambio de los resultados de caudal pico para cada período de retorno obtenidos a partir del cambio en las condiciones de escurrimiento de las cuencas analizadas, el ejercicio plantea la necesidad de planear, diseñar y ejecutar acciones de Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas en las cuales se considere no solo la influencia del cambio de las condiciones de precipitación a futuro, sino también el cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo.

