

Pérfil de Riesgo de Desastres

Informe Nacional para Argentina

Banco Interamericano de Desarrollo

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

NOTA TÉCNICA N°
IDB-TN-1082

Pérfil de Riesgo de Desastres

Informe Nacional para Argentina

Banco Interamericano de Desarrollo

Marzo 2016

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

Banco Interamericano de Desarrollo.

Perfil de riesgo catastrófico: informe nacional para Argentina / Banco Interamericano de Desarrollo.

p. cm. — (Nota técnica del BID ; 1082)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Natural disasters-Risk assessment-Argentina. 2. Emergency management-Argentina. 3. Disaster relief-Argentina. I. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Medio Ambiente, Desarrollo Rural y Administración de Riesgos por Desastres. II. Título. III. Serie.
IDB-TN-1082

JEL Code: Q54

Palabras clave: Inundacion, Precipitación, deslizamientos, evaluación probabilista de riesgos, sismos, amenaza volcánica, incendios forestales, Argentina, Santa Fé

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2016 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.



Contacto: Tsuneki Hori (Tsunekih@iadb.org)

Contacto: Viviana Alva Hart (vivianaa@iadb.org)

Este documento fue preparado por:

Los consultores del Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE): Omar D. Cardona, Alex H. Barbat, Martha Liliana Carreño Gabriel Bernal, Miguel Mora, Cesar Velásquez y Mario Salgado.

Los especialistas del BID: Tsuneki Hori y Viviana Alva Hart.

También se contó con valiosos aportes del Gobierno de Argentina a través del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva.

El desarrollo y publicación de este documento fue financiado por medio de la Cooperación Técnica Regional RG-T2416, financiada por el Fondo Multidonante de Prevención de Desastres con contribuciones de Canadá, España, Japón y Korea.

Contenido

1. Perfil Nacional de Riesgo Catastrófico de Argentina
2. Evaluación de la Amenaza por Incendios Forestales
3. Evaluación de la Amenaza Volcánica
4. Evaluación Probabilista del Riesgo por Inundación en la Ciudad de Santa Fe
5. Evaluación Probabilista del Riesgo Sísmico en la Gran Mendoza

Perfil de Riesgo Catastrófico de Argentina

Tabla de Contenido

1	Introducción.....	1
2	Metodología de la evaluación de riesgo	2
2.1	Introducción.....	2
2.2	Procedimiento general del análisis de riesgo.....	2
2.3	Procedimiento para el cálculo de riesgo	4
2.3.1	Ecuación básica para el cálculo de riesgo	4
2.3.2	Temporalidad de las amenazas.....	8
2.3.3	Incertidumbre en el proceso de cálculo de pérdidas.....	9
2.3.4	Métricas puntuales del riesgo	10
3	Amenaza sísmica	1
3.1	Introducción.....	1
3.2	Descripción del entorno local	1
3.2.1	Sismo-tectónica de Argentina.....	1
3.3	Procedimiento de análisis	28
3.3.1	Parámetros de sismicidad de las fuentes sismogénicas	30
3.3.2	Atenuación de los parámetros de amenaza.....	30
3.3.3	Cálculo de la amenaza sísmica.....	31
3.4	Información empleada en la modelación.....	32
3.4.1	Catálogo sísmico	32
3.4.2	Fuentes sismogénicas modeladas	35
3.4.3	Parametrización de las fuentes sismogénicas	46
3.4.4	Relaciones de atenuación de movimiento fuerte	49
3.5	Calidad de los datos disponibles.....	50
3.6	Resultados de la amenaza sísmica para Argentina	51
3.6.1	Curvas de amenaza para algunas ciudades.....	51
3.6.2	Espectros de amenaza uniforme para algunas ciudades	53
3.6.3	Mapas de amenaza sísmica para Argentina.....	55
4	Riesgo catastrófico por terremoto	65
4.1	Modelo de activos expuestos	65
4.1.1	Desarrollo del modelo	65
4.1.2	Información general del país	67
4.1.3	Base de datos de construcciones.....	70
4.1.4	Base de datos de infraestructura urbana	74
4.1.5	Base de datos de infraestructura nacional	77
4.1.6	Resumen general de indicadores de exposición	80
4.1.7	Presentación gráfica del modelo de activos expuestos	83
4.2	Vulnerabilidad sísmica de activos.....	105
4.2.1	Aspectos generales	105
4.2.2	Funciones de vulnerabilidad sísmica.....	106
4.2.3	Funciones de vulnerabilidad para los elementos expuestos	106

4.3	Evaluación del riesgo sísmico	111
4.3.1	Aspectos generales	111
4.3.2	Pérdidas totales a nivel país.....	111
4.4	Concentración de riesgo sísmico	114
4.4.1	Comparación de pérdidas por provincia.....	114
4.4.2	Comparación de pérdidas por sector	124
4.4.3	Perdida máxima probable para sectores público y privado	126
4.4.4	Pérdida máxima probable para infraestructura nacional	128
5	Referencias	131

Lista de Figuras

FIGURA 2-1 ESQUEMA GENERAL DEL ANÁLISIS DE RIESGO PROBABILISTA.....	4
FIGURA 2-2. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UN EVENTO ARBITRARIO A DENTRO DEL ESPACIO DE MUESTRO DE PÉRDIDAS S.	5
FIGURA 2-3 SUBDIVISIÓN DEL ESPACIO DE MUESTRO S EN EVENTOS BASE B.	5
FIGURA 2-4 INTERSECCIONES ENTRE EL EVENTO A Y LOS EVENTOS BASE B.	6
FIGURA 2-1 ENTORNO TECTÓNICO DE ARGENTINA (ADAPTADO DE COSTA ET AL., 2000).....	2
FIGURA 2-2 GEOMETRÍA DE LA SUBDUCCIÓN. (A) CSN (S.F) (B) ADAPTADO DE NÚÑEZ (2014) (C) ARMIJO ET AL. (2010).....	4
FIGURA 2-3 FALLAS Y LINEAMIENTOS EN ARGENTINA - ADAPTADO DE SEGEMAR (2015) Y SERNAGEOMIN (2014) (CONTINUACIÓN).....	6
FIGURA 2-4 SISTEMAS DE FALLAS PRINCIPALES EN ARGENTINA (COSTA ET AL., 2000; PINGEL ET AL., 2013; IAFFA ET AL., 2013; LAVENU ET AL., 2000; SEGEMAR, 2015; COSTA ET AL., 2004).....	7
FIGURA 2-5 SISTEMAS DE FALLA ATACAMA Y PRECORDILLERANO (BASADO EN LOS TRABAJOS DE HERVÉ, 1987; MUÑOZ ET AL., 2002; OLIVARES ET AL., 2010; REUTTER ET AL., 1991).....	9
FIGURA 2-6 ELEMENTOS MORFOESTRUCTURALES EN EL NOROESTE DE ARGENTINA (ADAPTADO DE ACOCELLA ET AL., 2010; ALONSO ET AL., 2006; COUTAND ET AL., 2010; DECELLES ET AL., 2011; HAIN ET AL., 2011).	10
FIGURA 2-7 SISTEMAS DE FALLA EN EL NORTE DE ARGENTINA (SEGÚN LOS TRABAJOS DE MASAFERRO ET AL., 2003; DEKEEN ET AL., 2006, ONCKEN ET AL., 2006; PINGEL ET AL., 2003; KLEY Y MONALDI, 1999, 2002; DECELLES ET AL., 2011; CARRAPA Y DECELLES, 2008; IAFFA ET AL., 2013; JORDAN Y ALLMENDINGER, 1986; RAMOS ET AL., 2001; CASA, 2009)	13
FIGURA 2-8 FALLAS DE LA PUNA (BASADO EN EL TRABAJO DE COSTA ET AL., 2000)	15
FIGURA 2-9 ELEMENTOS MORFOESTRUCTURALES ENTRE LOS 28°S Y LOS 33°S (ADAPTADO DE ACOCELLA ET AL., 2010; ALONSO ET AL., 2006; COUTAND ET AL., 2010; DECELLES ET AL., 2011; HAIN ET AL., 2011).....	16
FIGURA 2-10 SISTEMA DE FALLA EL TIGRE (BASADO EN LOS TRABAJOS DE COSTA ET AL., 2000; PERUCCA ET AL, 1999; FAZZITO, 2011).....	17
FIGURA 2-11 FALLAS LAS CHACRAS, LAS TAPIAS-ZONDA Y CERRO LA CAL (BASADO EN LOS TRABAJOS DE COSTA ET AL., 2000; PERUCCA & VARGAS, 2014; FALCONÍ ET AL., 2011; SALOMON ET AL., 2013).....	19
FIGURA 2-12 FALLA SIERRA CHICA (BASADO EN LOS TRABAJOS DE COSTA ET AL., 2000; COSTA ET AL., 2001; SAGRIPANTI ET AL., 2012)	21
FIGURA 2-13 ELEMENTOS MORFOESTRUCTURALES ENTRE LOS 33°S Y LOS 39.4°S.....	23
FIGURA 2-14 SISTEMAS DE FALLA PROCURO-SAN RAMÓN Y EL DIABLO-EL FIERRO (BASADO EN LOS TRABAJOS DE ALFARO, 2011; GONZÁLEZ ET AL., 2012; ARMIJO ET AL., 2010; LEYTON ET AL., 2010; SEREMI, 2011)....	24
FIGURA 2-15 SISTEMA DE FALLA LIQUIÑE – OFQUI (BASADO EN LOS TRABAJOS DE ARANCIBIA ET AL., 1999; CEMBRANO ET AL., 1996; LAVENU ET AL., 2000; RUSSO ET AL., 2011; VARGAS ET AL., 2012)	26
FIGURA 2-16 FALLA DEL LAGO FAGNANO (BASADO EN LOS TRABAJOS DE LAVENU ET AL., 2000; TORRES-CARBONELL ET AL., 2008).....	27
FIGURA 2-17 DIAGRAMA DE FLUJO DEL MÓDULO DE AMENAZA SÍSMICA.....	29
FIGURA 2-18 TASAS DE EXCEDENCIA DE FUENTES USANDO EL MODELO DE SISMICIDAD DE POISSON.....	30
FIGURA 2-19 ANÁLISIS DE COMPLETITUD PARA $M_0=4.5$	33
FIGURA 2-20 CATÁLOGO SÍSMICO (USGS, 2014; ISC-GEM, 2014)	34
FIGURA 2-21 FUENTES SUPERFICIALES CONSIDERADAS EN EL MODELO	39
FIGURA 2-22 FUENTES PROFUNDAS CONSIDERADAS EN EL MODELO	39
FIGURA 2-23 DISTRIBUCIÓN NORMAL PARA ESTABLECER LA MAGNITUD MÁXIMA	46
FIGURA 2-24 RELACIONES DE ATENUACIÓN PARA MAGNITUD DE 7.0 Y PGA	49
FIGURA 2-25 RELACIONES DE ATENUACIÓN PARA MAGNITUD DE 7.5 Y 0.5SEG.....	50
FIGURA 2-26 RELACIONES DE ATENUACIÓN PARA MAGNITUD DE 8.0 Y PGA	50
FIGURA 2-27 CURVA DE AMENAZA PARA PGA PARA MENDOZA	52
FIGURA 2-28 CURVA DE AMENAZA PARA PGA PARA SAN JUAN.....	52
FIGURA 2-29 CURVA DE AMENAZA PARA PGA PARA SAN LUIS.....	52
FIGURA 2-30 CURVA DE AMENAZA PARA PGA PARA CÓRDOBA.....	52
FIGURA 2-31 CURVA DE AMENAZA PARA PGA PARA SALTA	52
FIGURA 2-32 CURVA DE AMENAZA PARA PGA PARA S. S. DE JUJUY	52
FIGURA 2-33 EAU PARA MENDOZA	54
FIGURA 2-34 EAU SAN JUAN	54

FIGURA 2-35 EAU PARA SAN LUIS	54
FIGURA 2-36 EAU PARA CÓRDOBA	54
FIGURA 2-37 EAU PARA SALTA	54
FIGURA 2-38 EAU PARA S. S. DE JUJUY	54
FIGURA 2-39 PGA PARA PERÍODO DE RETORNO DE 475 AÑOS	56
FIGURA 2-40 PGA PARA PERÍODO DE RETORNO DE 1,000 AÑOS.....	57
FIGURA 2-41 PGA PARA PERÍODO DE RETORNO DE 2,500 AÑOS.....	58
FIGURA 2-42 0.5s PARA PERÍODO DE RETORNO DE 475 AÑOS.....	59
FIGURA 2-43 0.5s PARA PERÍODO DE RETORNO DE 1,000 AÑOS.....	60
FIGURA 2-44 0.5s PARA PERÍODO DE RETORNO DE 2,500 AÑOS.....	61
FIGURA 2-45 1.0s PARA PERÍODO DE RETORNO DE 475 AÑOS.....	62
FIGURA 2-46 1.0s PARA PERÍODO DE RETORNO DE 1,000 AÑOS.....	63
FIGURA 2-47 1.0s PARA PERÍODO DE RETORNO DE 2500 AÑOS.....	64
FIGURA 3-1 MODELO DE ACTIVOS EXPUESTOS.....	65
FIGURA 3-2 DIVISIÓN POLÍTICA NACIONAL PRINCIPALES ENTIDADES SUBNACIONALES	68
FIGURA 3-3 EXTENSIÓN TERRITORIAL	83
FIGURA 3-4 POBLACIÓN POR PROVINCIA.....	84
FIGURA 3-5 DENSIDAD POBLACIONAL	84
FIGURA 3-6 ÁREA CONSTRUIDA POR PROVINCIA.....	85
FIGURA 3-7 VALORES EXPUESTOS DE EDIFICACIONES REGULARES POR PROVINCIA	85
FIGURA 3-8 ÁREA CONSTRUIDA POR SECTOR DE USO.....	86
FIGURA 3-9 VALOR EXPUESTO POR SECTOR DE USO.....	86
FIGURA 3-10 ÁREA CONSTRUIDA POR PROVINCIA Y SECTOR DE USO.....	87
FIGURA 3-11 VALOR EXPUESTO POR PROVINCIA Y SECTOR DE USO.....	88
FIGURA 3-12 VALOR EXPUESTO EN INFRAESTRUCTURA URBANA POR PROVINCIA	89
FIGURA 3-13 VALOR EXPUESTO EN INFRAESTRUCTURA URBANA POR SECTOR	90
FIGURA 3-14 VALOR EXPUESTO EN INFRAESTRUCTURA URBANA POR PROVINCIA Y SECTOR	90
FIGURA 3-15 VALOR EXPUESTO EN INFRAESTRUCTURA NACIONAL POR PROVINCIA	92
FIGURA 3-16 VALOR EXPUESTO EN INFRAESTRUCTURA NACIONAL POR SECTOR	92
FIGURA 3-17 VALOR EXPUESTO EN INFRAESTRUCTURA NACIONAL POR PROVINCIA Y SECTOR	93
FIGURA 3-18 VALOR EXPUESTO EN INFRAESTRUCTURA NACIONAL POR PROVINCIA	94
FIGURA 3-19 VALOR TOTAL EXPUESTO EN INFRAESTRUCTURA NACIONAL POR SECTORES	94
FIGURA 3-20 VALOR TOTAL EXPUESTO EN INFRAESTRUCTURA NACIONAL POR PROVINCIAS Y SECTORES	95
FIGURA 3-21 DISTRIBUCIÓN DE POBLACIÓN POR DEPARTAMENTO.....	97
FIGURA 3-22 DENSIDAD POBLACIONAL POR DEPARTAMENTO.....	98
FIGURA 3-23 DISTRIBUCIÓN DE ÁREA CONSTRUIDA POR DEPARTAMENTO.....	99
FIGURA 3-24 DISTRIBUCIÓN DE VALORES EXPUESTOS EN CONSTRUCCIONES REGULARES POR DEPARTAMENTO.....	100
FIGURA 3-25 DISTRIBUCIÓN DE VALORES EXPUESTOS EN INFRAESTRUCTURA URBANA POR DEPARTAMENTO	101
FIGURA 3-26 DISTRIBUCIÓN DE VALORES EXPUESTOS EN INFRAESTRUCTURA NACIONAL POR DEPARTAMENTO.....	102
FIGURA 3-27 DISTRIBUCIÓN DE VALOR EXPUESTO TOTAL POR DEPARTAMENTO.....	103
FIGURA 3-28 DISTRIBUCIÓN RELATIVA DE VALORES EXPUESTOS SEGÚN SECTORES POR PROVINCIA	104
FIGURA 3-29 FUNCIONES DE VULNERABILIDAD (FUNCIÓN ACELERACIÓN ESPECTRAL) PARA CONSTRUCCIONES.....	108
FIGURA 3-30 FUNCIONES DE VULNERABILIDAD (FUNCIÓN ACELERACIÓN ESPECTRAL) PARA INFRAESTRUCTURA.....	109
FIGURA 3-31 EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS POR TERREMOTO	112
FIGURA 3-32 CURVA DE PML POR TERREMOTO	113
FIGURA 3-33 CURVAS DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE DIFERENTES VALORES DE PML, PARA DIFERENTES TIEMPOS DE EXPOSICIÓN	113
FIGURA 3-34 VALORES EXPUESTOS POR PROVINCIA	114
FIGURA 3-35 EJEMPLO DE RESULTADOS POR TERREMOTO PARA LA PROVINCIA DE MENDOZA	116
FIGURA 3-36 VALORES DE PML PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO EN CADA PROVINCIA	117
FIGURA 3-37 VALORES DE AAL POR PROVINCIA	118
FIGURA 3-38 VALORES EXPUESTOS POR PROVINCIA Y AAL AL MILLAR	118
FIGURA 3-39 VALORES DE AAL POR PROVINCIA PARA LOS DIFERENTES SECTORES	119
FIGURA 3-40 DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE AAL (VALOR) POR DEPARTAMENTO	120
FIGURA 3-41 DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE AAL (‰) POR DEPARTAMENTO.....	121
FIGURA 3-42 DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE PML (VALOR) POR PROVINCIA.....	122

FIGURA 3-43 DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE PML (%) POR PROVINCIA	123
FIGURA 3-44 VALORES EXPUESTOS POR USO	124
FIGURA 3-45 VALORES DE AAL POR SECTORES	125
FIGURA 3-46 RESUMEN DE DISTRIBUCIÓN DE AAL POR SECTORES	125
FIGURA 3-47 VALORES EXPUESTOS POR SECTORES.....	126
FIGURA 3-48 CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS Y DE PML PARA CONSTRUCCIONES PÚBLICAS	127
FIGURA 3-49 CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS Y DE PARA CONSTRUCCIONES PRIVADAS	127
FIGURA 3-50 CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS Y DE PML PARA EL SECTOR ENERGÍA	128
FIGURA 3-51 CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS Y DE PML PARA EL SECTOR COMUNICACIONES.....	129
FIGURA 3-52 CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS Y DE PML POR TERREMOTO PARA EL SECTOR DE VÍAS	129
FIGURA 3-53 CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS Y DE PML PARA EL SECTOR HIDROCARBUROS	130

Lista de Tablas

TABLA 2-1 EVENTOS ARBITRARIOS A Y SU MEDIDA DE PROBABILIDAD.....	7
TABLA 2-1 PARÁMETROS DE SISMICIDAD DE LAS FUENTES SÍSMICAS CONSIDERADAS	48
TABLA 3-1 DISTRIBUCIÓN DE ENTIDADES SUBNACIONALES.....	69
TABLA 3-2 CARACTERÍSTICAS DE LAS CIUDADES MÁS IMPORTANTES.....	69
TABLA 3-3 DISTRIBUCIÓN DE ÁREAS CONSTRUIDAS POR UNIDAD SUBNACIONAL Y GRUPO DE USO.....	72
TABLA 3-4 DISTRIBUCIÓN DE VALORES EXPUESTOS POR UNIDAD SUBNACIONAL Y GRUPO DE USO.....	73
TABLA 3-5 VALORES EN EXPOSICIÓN DE SISTEMA DE TRANSPORTE, DE SERVICIOS PÚBLICOS Y REDES.....	75
TABLA 3-6 VALORES EN EXPOSICIÓN DE SISTEMA DE TRANSPORTE, DE SERVICIOS PÚBLICOS Y REDES.....	76
TABLA 3-7 VALORES DE EXPOSICIÓN DE LA RED VIAL NACIONAL.....	78
TABLA 3-8 VALORES DE EXPOSICIÓN DE INFRAESTRUCTURA NACIONAL	79
TABLA 3-9 RESUMEN DE INDICADORES DEL MODELO DE ACTIVOS: INDICADORES PROXY	81
TABLA 3-10 RESUMEN DE INDICADORES DEL MODELO DE ACTIVOS: VALORES EXPUESTOS.....	81
TABLA 3-11 TIPOS DE FUNCIONES DE VULNERABILIDAD, TIPO ESTRUCTURAL Y PERIODO DE VIBRACIÓN	110
TABLA 3-12 RESULTADOS GENERALES DE PML	112
TABLA 3-13 ESCENARIOS CRÍTICOS DE ANÁLISIS.....	114

Lista de Anexos

ANEXO 1 RESULTADOS POR ENTIDADES SUBNACIONALES.....	134
ANEXO 2 RESULTADOS POR SECTORES.....	156

1 Introducción

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

Para alcanzar, entonces, el objetivo general de identificar y cuantificar el riesgo de catástrofe de un país, es necesario utilizar e incluso desarrollar un método que permita tener en cuenta las amenazas naturales en forma integral, que incluya de la manera más completa, y en lo posible detallada, la exposición de los bienes de infraestructura –teniendo en cuenta sus principales características–, que permita tener en cuenta la vulnerabilidad específica de cada componente de dicha infraestructura y que finalmente permita la evaluación del riesgo mediante un proceso de cálculo probabilista apropiado que tenga en cuenta las incertidumbres propias de un proceso de este tipo, las inevitables limitaciones en la información y la capacidad cómputo electrónico.

En la mayoría de los casos es necesario utilizar ciertos enfoques o criterios de simplificación y agregación de información, debido a la ausencia de datos o a la inherente baja resolución de la información. Esta circunstancia en ocasiones significa sacrificar algunas características técnico-científicas o econométricas, como la exactitud y la completitud, consideradas en general como deseables e incluso como ineludibles cuando de riesgo se trata.

Este informe presenta la evaluación del riesgo catastrófico para Argentina, para amenaza por terremoto. La metodología probabilista utilizada es considerada la más robusta para este tipo de modelación e identifica los aspectos más importantes del riesgo de catástrofe con fines de protección financiera de acuerdo con la responsabilidad fiscal del Estado. Adicionalmente, los resultados del análisis pueden ser de especial utilidad para orientar las prioridades del país en materia de gestión del riesgo de desastres en general. Los fundamentos metodológicos y técnicos de esta evaluación del riesgo pueden ser consultados en el informe ERN-CAPRA-T3.2 (Metodología de Análisis Probabilista de Riesgos, ERN 2010), y en el sitio www.ecapra.org.

2 Metodología de la evaluación de riesgo

2.1 Introducción

La gestión del riesgo comprende todo el conjunto de acciones que pueden ser ejecutadas con el fin de reducir el impacto negativo de los desastres en el desarrollo humano. Se trata entonces de una estrategia de desarrollo que debe ser concebida desde las esferas más altas de la administración pública y trascender a todos los niveles institucionales y territoriales de un país. Diversas son las acciones que hacen parte de una adecuada gestión del riesgo, desde la planificación del territorio, hasta la creación de mecanismos de protección financiera para el estado, pasando por la definición de códigos de construcción, la creación de sistemas de alerta y la preparación para la atención a emergencias. Todas estas son igualmente importantes dado que atienden diferentes niveles de riesgo. Sin embargo, el primer paso para una correcta gestión del riesgo es identificarlo y cuantificarlo. El conocimiento del riesgo es entonces un componente fundamental dentro del desarrollo sostenible.

La frecuencia de eventos catastróficos es particularmente baja por lo cual la información histórica, en general, es muy limitada. Considerando las posibilidades de eventos de alta capacidad destructiva en el futuro, la estimación del riesgo debe enfocarse en modelos probabilistas los cuales pueden utilizar la limitada información histórica disponible para pronosticar, de la mejor manera posible, las consecuencias de futuros eventos considerando en forma simultánea las inevitables altas incertidumbres involucradas en los análisis.

El análisis probabilista de riesgos naturales tiene como objetivo fundamental determinar las distribuciones de probabilidad de las pérdidas que pueden sufrir los activos expuestos como consecuencia de la ocurrencia de eventos naturales, integrando de manera adecuada las incertidumbres que existen en las diferentes partes del proceso. Para ello se requiere la representación probabilista tanto de la amenaza, en términos de valores esperados y su dispersión, como de las funciones de vulnerabilidad asociadas a cada amenaza.

La pregunta básica que un análisis probabilista de riesgo debe contestar es: dado que se tiene un conjunto de elementos expuestos a los efectos de una amenaza natural, ¿con qué frecuencias se presentarán pérdidas que superen valores monetarios dados? Dado que las frecuencias de eventos catastróficos son bajas, queda descartada la posibilidad de contestar la pregunta anterior formulando modelos puramente empíricos que dan cuenta únicamente de la valoración de daños observados. Esto obliga a la construcción de modelos probabilistas como el que aquí se describe y se utiliza para la cuantificación del riesgo de una manera prospectiva, es decir, considerando la posible ocurrencia de eventos que aún no han sucedido.

2.2 Procedimiento general del análisis de riesgo

El procedimiento de cálculo probabilista consiste en evaluar las pérdidas en el conjunto de elementos expuestos para cada uno de los escenarios (eventos descritos mediante características específicas) que colectivamente describen las amenazas, y luego agregar de manera probabilista

los resultados obtenidos utilizando como factores de ponderación las frecuencias de ocurrencia de cada uno de los escenarios.

La evaluación probabilista de riesgos naturales para requiere de los siguientes cuatro:

- *Evaluación de la amenaza:* definición de un conjunto estocástico de eventos (sísmicos o hidrometeorológicos, dependiendo del tipo de amenaza) donde cada uno se encuentra caracterizado con su respectiva frecuencia de ocurrencia. El conjunto de escenarios representa de manera integral la amenaza. Cada escenario contiene la distribución espacial de parámetros que permiten construir la distribución de probabilidad de las intensidades en superficie, entendidas como parámetros físicos medibles.
- *Evaluación de los efectos de sitio (únicamente para amenaza sísmica):* en el caso de la amenaza sísmica, se puede desear incluir los efectos locales del sitio de estudio, para lo cual para cada una de las zonas homogéneas de suelo identificadas se definen funciones de transferencia espectrales, las cuales dan cuenta de los efectos de la respuesta dinámica del suelo en el área bajo estudio. Estas consideran además la variación en el valor de amplificación de acuerdo al nivel de aceleración en el basamento rocoso. Esta información se relaciona únicamente con la amenaza sísmica.
- *Definición del inventario de elementos expuestos:* debe definirse el inventario de elementos expuestos el cual debe especificar como mínimo la localización geográfica, el valor de reposición y la clase estructural de cada elemento.
- *Definición de la vulnerabilidad física de los elementos expuestos:* debe asignarse a cada una de las clases estructurales una función de vulnerabilidad la cual relaciona la perspectiva física del elemento con su costo de reposición. Estas funciones caracterizan el comportamiento de cada elemento durante la ocurrencia de un evento (sismo o inundaciones por ejemplo), es decir, definen la distribución de probabilidad de las pérdidas como función de la intensidad producida durante un escenario específico. Las funciones se definen mediante funciones continuas que relacionan el valor esperado del daño con la intensidad del fenómeno. Estas funciones permiten una representación probabilista dado que para cada nivel de daño esperado es posible asignar un valor de desviación estándar que da cuenta de la incertidumbre inherente desde el punto de vista estructural. Para cada tipo de amenaza natural considerada se deben definir y asignar funciones de vulnerabilidad diferentes a cada tipología estructural que esté dentro de la base de datos.

Finalmente el modelo de riesgo probabilista, construido a partir de una secuencia de módulos, cuantifica las pérdidas potenciales tal como se ilustra en la Figura 2-1.

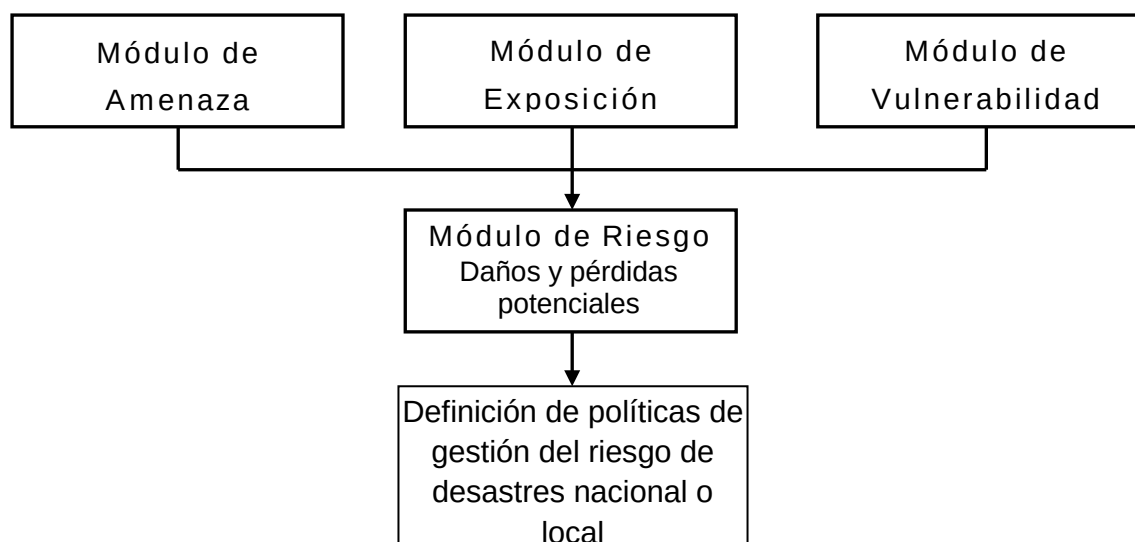


Figura 2-1
Esquema general del análisis de riesgo probabilista

2.3 Procedimiento para el cálculo de riesgo

Esta sección presenta el marco metodológico para la evaluación probabilista de riesgos naturales. A partir de ella se entiende la necesidad de representar la amenaza a partir de un conjunto estocástico de escenarios y cómo se realiza el proceso de convolución entre las amenazas y sus vulnerabilidades físicas asociadas.

2.3.1 Ecuación básica para el cálculo de riesgo

Considerando el objetivo básico del análisis probabilista de riesgos naturales explicado anteriormente, se presenta a continuación la metodología específica de cálculo de las frecuencias de ocurrencia de niveles específicos de pérdidas asociados a los elementos expuestos en períodos de tiempo determinados y ante la ocurrencia terremotos e inundaciones.

Dado que hay incertidumbre en la estimación de la pérdida, esta es entonces modelada como una variable aleatoria. En términos generales, interesa conocer lo siguiente acerca de la pérdida:

- El universo de todas las pérdidas posibles, es decir, el dominio de la variable aleatoria que describe la pérdida.
- La función de densidad de probabilidad de la pérdida, la cual está definida dentro del dominio de la variable.

En términos generales, un evento de pérdida A , definido dentro del universo de todas las pérdidas posibles (o espacio de muestreo) S , se puede representar en un diagrama de conjuntos como se muestra en la Figura 2-2. El evento A es un subconjunto de S , el cual es definido de manera totalmente arbitraria, es decir, su definición depende exclusivamente de a qué pregunta se quiere contestar. En este sentido, el evento A puede estar definido, por ejemplo, como el conjunto de pérdidas mayores a 10 millones, o como el conjunto de pérdidas menores a 100 millones, o incluso como el conjunto de pérdidas entre 10 y 100 millones. Esto significa que A es definido

por el tomador de decisiones, en función del tipo de decisiones que quiera tomar. Ahora bien, la definición de A en sí misma no es de interés; interesa conocer la probabilidad de A , denotada como $P(A)$. Entonces si, por ejemplo, A está definido como el conjunto de pérdidas mayores a 10 millones, lo que realmente interesa conocer es la probabilidad de que la pérdida sea mayor a 10 millones, es decir $P(A)$.

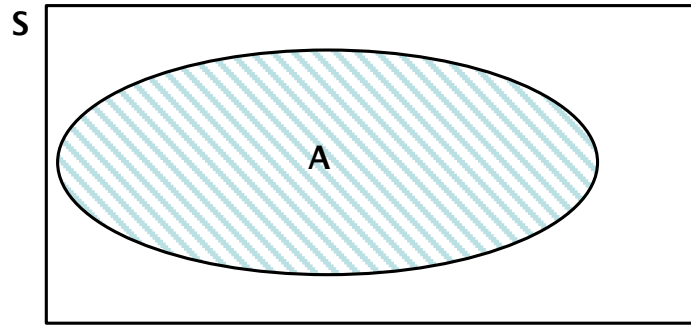


Figura 2-2.

Representación gráfica de un evento arbitrario A dentro del espacio de muestreo de pérdidas S .

Dado que los eventos A son definidos de manera arbitraria, resulta inconveniente realizar el análisis de riesgo para un conjunto A específico. Se requiere encontrar una manera mediante la cual sea posible determinar $P(A)$ para cualquier evento A de interés. Esto se logra subdividiendo el espacio de muestreo S en un número finito de eventos base conocidos, B (Figura 2-3).

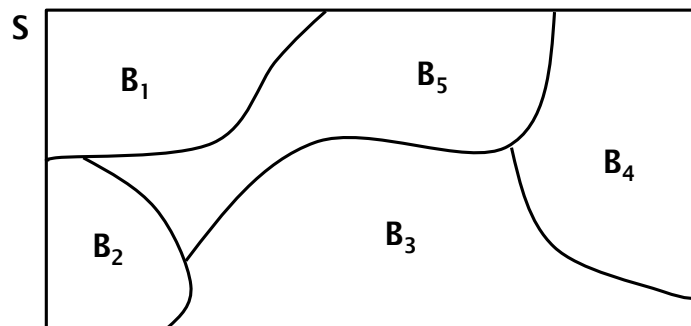


Figura 2-3

Subdivisión del espacio de muestreo S en eventos base B .

Los eventos base B deben cumplir las siguientes características:

- Ser *mutuamente excluyentes*. En términos matemáticos esto significa que los conjuntos nunca se intersectan, es decir, su intersección es el conjunto vacío. En términos del análisis de riesgo esto quiere decir que los eventos de pérdida B no pueden ocurrir simultáneamente.
- Ser *colectivamente exhaustivos*. En términos matemáticos esto implica que la unión de todos los conjuntos B es igual al espacio de muestreo S . En términos del análisis de riesgo esto significa que los eventos B , en conjunto, representan de manera integral el universo de todas las pérdidas posibles.

Ahora bien, para poder determinar $P(A)$, para un evento A cualquiera, hacemos uso de las intersecciones que se producen entre el evento A y los eventos base B (Figura 2-4).

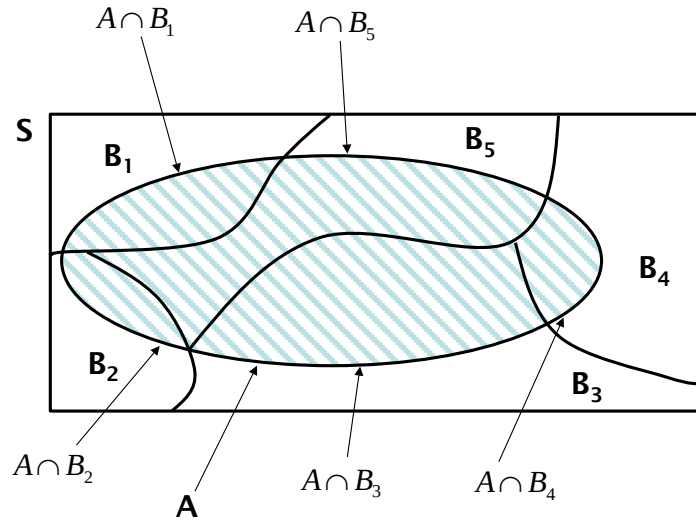


Figura 2-4
Intersecciones entre el evento A y los eventos base B .

Dado que el evento A se puede definir como la unión de sus intersecciones con los eventos base B , y recurriendo al tercer axioma de la teoría de la probabilidad¹, podemos definir a $P(A)$ como la suma, para todos los eventos base B , de la probabilidad de ocurrencia de las intersecciones:

$$P(A) = \sum_{j=1}^n P(A \cap B_j) \quad (\text{Ec. 2-1})$$

Para cualquier evento base B_j , definimos la probabilidad $P(A|B_j)$ como la probabilidad condicional de A , dado que B_j ha ocurrido. Esta probabilidad condicional está dada por:

$$P(A|B_j) = \frac{P(A \cap B_j)}{P(B_j)}, \quad P(B_j) \neq 0 \quad (\text{Ec. 2-2})$$

Nótese que se asume que B_j ha ocurrido. Esto significa que el espacio de muestreo S es ahora reemplazado por un nuevo espacio de muestreo, B_j , y $P(A|B_j)$ no es más que la probabilidad de A en ese nuevo espacio. De esta manera, reemplazando la Ec. 3-2 en la Ecuación 3-1, llegamos a la solución de $P(A)$, que no es más que la definición del teorema de la probabilidad total:

¹ El tercer axioma de la probabilidad establece que, para una colección contable de eventos mutuamente excluyentes, la probabilidad de su unión es igual a la suma de las probabilidades individuales.

$$P(A) = \sum_{j=1}^n P(A | B_j) \cdot P(B_j) \quad (\text{Ec. 2-3})$$

Esta ecuación indica la probabilidad de ocurrencia de cualquier evento de pérdida sobre el espacio S .

Haciendo uso de la Ecuación 3-3 podemos calcular la probabilidad de cualquier evento A . La Tabla 2-1 muestra, a modo de ejemplo, tres eventos A arbitrarios y su medida de probabilidad calculada con la Ecuación 3-3.

Tabla 2-1
Eventos arbitrarios A y su medida de probabilidad.

Eventos arbitrarios A	Probabilidad
Pérdidas mayores a 10 millones	$P(p > 10) = \sum_{j=1}^n P(p > 10 B_j) \cdot P(B_j)$
Pérdidas menores a 100 millones	$P(p < 100) = \sum_{j=1}^n P(p < 100 B_j) \cdot P(B_j)$
Pérdidas entre 10 y 100 millones	$P(p > 10 \cap p < 100) = \sum_{j=1}^n P(p > 10 \cap p < 100 B_j) \cdot P(B_j)$

En resumen, dentro del contexto del análisis de riesgo, la definición de los eventos de interés A es totalmente arbitraria, por lo tanto su probabilidad $P(A)$ se calcula como función de la distribución de probabilidad de la pérdida para cada evento base B_j . Esto implica que los eventos base B no pueden ser definidos de manera arbitraria.

Dado que el número de escenarios que representan de manera integral la amenaza en un territorio cualquiera puede ser centenas, Torres et.al. (2013) proponen el uso de un formato computacional llamado .AME, el cual es un formato raster multicapa diseñado específicamente para amenazas naturales, y que permite un manejo adecuado, en términos computacionales, de la información asociada a los escenarios.

El riesgo físico es comúnmente descrito mediante la llamada *curva de excedencia de pérdidas* (*loss exceedance curve*) que permite calcular las frecuencias, expresada en número de veces por año, con las que ocurrirán eventos en los que se iguale o exceda un valor especificado de pérdida monetaria. Esta frecuencia anual de excedencia se conoce también como tasa de excedencia, y se calcula mediante la siguiente ecuación, que es una de las formas que puede adoptar el teorema de la probabilidad total (Ordaz, 2000):

$$\nu(p) = \sum_{i=1}^{\text{Eventos}} \Pr(P > p | \text{Evento } i) \cdot F_A(\text{Evento } i) \quad (\text{Ec. 2-4})$$

En la ecuación anterior, $v(p)$ es la tasa de excedencia de la pérdida p , $F_A(\text{Evento } i)$ es la frecuencia anual de ocurrencia del evento i , mientras que $Pr(P > p | \text{Evento } i)$ es la probabilidad de que la pérdida sea superior a p dada la ocurrencia del i -ésimo evento. La suma en la ecuación anterior se hace para todos los eventos contenidos en el conjunto de escenarios estocásticos, 677 en este caso para sismo y 250 para inundación. El inverso de la tasa de excedencia $v(p)$ es el período de retorno de la pérdida p , identificado como Tr .

La pérdida p a la que se refiere la Ecuación 3-4 es la suma de las pérdidas que acontecen en todos los elementos expuestos. Considerando lo anterior, es importante recordar que:

- La pérdida p es una cantidad incierta, cuyo valor, dada la ocurrencia de un evento, no puede conocerse con precisión. Debe por tanto ser tratada como una variable aleatoria y deben preverse mecanismos para conocer su distribución de probabilidad, condicionados a la ocurrencia de cierto evento.
- La pérdida p se calcula como la suma de las pérdidas que se presentan en cada uno de los bienes expuestos. Cada uno de los sumandos es una variable aleatoria y entre ellos existe cierto nivel de correlación el cual debe ser incluido en el análisis.

Teniendo en mente la Ecuación 3-4, la secuencia de cálculo probabilista de riesgo es la que se presenta a continuación:

1. Para cada escenario contenido en cada conjunto estocástico se determina la distribución de probabilidades de la pérdida en cada uno de los elementos expuestos.
2. A partir de las distribuciones de probabilidad de las pérdidas en cada elemento, se determina la distribución de probabilidad de la suma de estas pérdidas, tomando en cuenta la correlación que existe entre ellas.
3. Una vez determinada la distribución de probabilidad de la suma de las pérdidas para el evento considerado, se calcula la probabilidad de que esta pérdida exceda un valor determinado.
4. Se determina la contribución de cada evento a la tasa de excedencia de pérdidas p multiplicando (ponderando) la probabilidad determinada en el paso por la frecuencia anual de ocurrencia del evento.

El cálculo se repite para todos los eventos de ambos conjuntos estocásticos.

2.3.2 Temporalidad de las amenazas

Algunos de los fenómenos naturales producen pérdidas por varios conceptos que ocurren de manera simultánea. Por ejemplo, la ocurrencia de un sismo puede generar deslizamientos y detonar un tsunami; los daños por movimiento del suelo, por movimiento en masa y por inundación, entonces, ocurren casi al mismo tiempo, y no pueden considerarse eventos independientes.

El caso que se menciona en el párrafo anterior puede considerarse como uno en que tres amenazas diferentes (sismo, deslizamiento e inundación por marea de tormenta) ocurren simultáneamente, asociadas a la misma *temporalidad*.

La evaluación de pérdidas durante un escenario se realiza entonces considerando que las amenazas que pertenecen a una misma temporalidad ocurren de manera simultánea. No existe una manera sencilla y libre de ambigüedades para evaluar las pérdidas en estas condiciones (varias amenazas ocurriendo simultáneamente). Para este caso se usa la siguiente expresión para evaluar la pérdida en cada uno de los bienes expuestos, que corresponde a un modelo de daño en cascada, en el cual el orden de exposición a las diferentes intensidades es irrelevante:

$$P_i = \prod_{j=1}^M (1 - P_{ij}) \quad (\text{Ec. 2-5})$$

en donde P_i es la pérdida asociada al escenario i , P_{ij} es la pérdida asociada al escenario i por concepto de la amenaza j , y M es el número de amenazas simultáneas consideradas en la temporalidad a la que pertenece el escenario i .

Conviene recordar que P_{ij} son variables aleatorias y, por tanto, P_i también lo es. Sin embargo, si las distribuciones de probabilidad de las P_{ij} son conocidas, y se hacen suposiciones razonables sobre su nivel de correlación (que están perfectamente correlacionadas, por ejemplo) los momentos de la distribución de probabilidad de P_i pueden determinarse a partir de la Ecuación 3-2.

Con esto en mente, en este proyecto se tratan las dos amenazas, sísmica e inundación, cada una de forma individual (cada una en una única temporalidad) ya que se aplican en casos de estudio diferentes para lugares diferentes.

2.3.3 Incertidumbre en el proceso de cálculo de pérdidas

La pérdida que se presenta en un grupo de elementos expuestos durante un escenario es una cantidad incierta que debe ser tratada como una variable aleatoria. Generalmente no es práctico determinar de manera directa la distribución de probabilidad de la pérdida en un elemento expuesto condicionada a la ocurrencia de un escenario.

Por razones metodológicas, la probabilidad de excedencia de la pérdida p , condicionada a la ocurrencia de un evento, se expresa como se presenta en la Ecuación 3-3.

$$\Pr(P > p | \text{Evento}) = \int_I \Pr(P > p | I) \cdot f(I | \text{Evento}) dI \quad (\text{Ec. 2-6})$$

El primer término de la integral, $\Pr(P > p | I)$, es la probabilidad de que la pérdida exceda el valor p dado que la intensidad local fue I ; es evidente que este término toma en cuenta la incertidumbre que hay en las funciones de vulnerabilidad. Por otro lado, el término $f(I | \text{Evento})$ es la densidad de probabilidad de la intensidad, condicionada a la ocurrencia del evento; este término toma en cuenta el hecho de que, dado que ocurrió un evento, la intensidad en el sitio de interés es incierta.

Para poder hacer uso de la metodología anteriormente explicada, se requiere que tanto la amenaza sísmica y por inundación, así como la vulnerabilidad estructural de los elementos bajo análisis sea representada mediante la manera que se explicó anteriormente, es decir, de manera integralmente probabilista.

2.3.4 Métricas puntuales del riesgo

La curva de excedencia de pérdidas calculada aplicando la Ecuación 3-1 tiene toda la información necesaria para caracterizar el proceso de ocurrencia de eventos que produzcan pérdidas. Sin embargo, en ocasiones no es necesario utilizar la curva completa y es preferible utilizar estimadores puntuales del riesgo que permitan expresarlo a través de un solo número, facilitando así el proceso de comunicación a los tomadores de decisiones. Se presentan a continuación los dos estimadores puntuales más comúnmente utilizados.

- (a) Pérdida anual esperada (PAE): se trata del valor esperado de la pérdida anual. Es una cantidad importante puesto que indica que si, por ejemplo, el proceso de ocurrencia de eventos catastróficos fuera estacionario de aquí a una ventana de observación suficientemente grande, su costo total acumulado equivaldría a haber pagado la PAE cada año. Por lo tanto, en un sistema simple de seguro (sin deducibles, coaseguro ni límites de aseguramiento) la PAE sería la prima pura anual justa. La PAE puede obtenerse mediante el cálculo del área bajo la curva de $v(p)$ o directamente mediante la Ecuación 3-4.

$$PAE = \sum_{i=1}^{Eventos} E(P|Evento\ i) \cdot F_A(Evento\ i) \quad (Ec. 2-7)$$

Este valor es posible determinarlo para un portafolio completo de elementos expuestos (las edificaciones en el Gran Mendoza); para un conjunto de elementos (edificaciones industriales) o para un solo elemento (un colegio). Se considera la métrica más robusta y a la vez insensible a las incertidumbres inherentes en el análisis (Marulanda, 2013).

- (b) Pérdida máxima probable (PML por las iniciales en inglés): se trata de una pérdida que ocurre poco frecuentemente, es decir, que está asociada a un período de retorno muy largo (o alternativamente, a una tasa de excedencia muy baja). No existen estándares universalmente aceptados para definir qué quiere decir “poco frecuente”. De hecho, la elección de un periodo de retorno u otro para tomar cierta decisión depende de la aversión al riesgo de quien la está tomando. En la industria aseguradora, por ejemplo, los periodos de retorno utilizados para definir la PML de riesgo sísmico varían entre 200 y 2,500 años dependiendo del nivel de desarrollo económico y de penetración del seguro.
- (c) Probabilidad de quiebra (P_Q): la curva de pérdidas, $v(p)$ calculada con la Ecuación 3-4 indica con qué frecuencia ocurrirán eventos que producirán pérdidas iguales o superiores a una dada, p . Si suponemos que el proceso de ocurrencia de eventos en el tiempo obedece a un proceso de Poisson, entonces es posible calcular la probabilidad de que la pérdida p sea excedida en un lapso de tiempo T , es decir, en los próximos T años, con la siguiente expresión:

$$Pe(p, T) = 1 - e^{-v(p)T} \quad (\text{Ec. 2-8})$$

donde $Pe(p, T)$ es la probabilidad de que la pérdida p sea excedida en los próximos T años. Si se mira con detenimiento, se puede hacer una analogía directa con la Ecuación 3-1 presentada anteriormente.

Lo anterior permite el cálculo de la probabilidad de quiebra considerando diferentes períodos de exposición. Así entonces, esta información permite tener un panorama completo de las probabilidades de excedencia del mismo valor de pérdida de interés, considerando diferentes ventanas de exposición.

Otras métricas del riesgo

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

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

$$f(p) = -\frac{1}{v(0)} \frac{dv(p)}{dp} \quad (\text{Ec. 2-9})$$

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

$$\Pr(P > p) = \frac{v(p)}{v(0)} \quad (\text{Ec. 2-10})$$

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

$$f(t) = v(p)e^{-v(p)t} \quad (\text{Ec. 2-11})$$

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

$$\Pr(N = n) = \frac{(v(p)T)^n e^{-v(p)T}}{n!} \quad (\text{Ec. 2-12})$$

3 Amenaza sísmica

3.1 Introducción

Este capítulo presenta la evaluación probabilista de la amenaza sísmica para Argentina utilizando un modelo geométrico de plano fuente con base en la información disponible. A partir de la sismo-tectónica de la región, estudios previos y la sismicidad histórica registrada, se definieron una serie de fuentes sismogénicas, las cuales cubren gran parte del territorio nacional y permiten dar cuenta de las condiciones de sismicidad generales y su variación regional.

3.2 Descripción del entorno local

3.2.1 Sismo-tectónica de Argentina

Por su ubicación en el continente suramericano, la sismo-tectónica de Argentina es controlada en gran parte por la convergencia entre las Placas de Nazca y Suramérica. Es bien sabido que la Placa de Nazca se desplaza con dirección Este con una velocidad aproximada de 6.6 cm/año, mientras que la placa Suramérica se desplaza con dirección Oeste con una velocidad aproximada de 3 cm/año (traduciéndose en una tasa neta entre 8-9 cm/año (Kendrick et al., 2003), generando una extensa zona de colisión entre ambas placas, afectando gran parte del continente Suramericano incluyendo todo el borde occidental de Argentina. A lo largo de esta convergencia la Placa oceánica de Nazca (más densa) se introduce en el manto terrestre bajo la Placa Suramérica en un proceso de subducción, creando una zona a lo largo de todo el borde occidental del continente de alta sismicidad debido al roce entre ambas placas. Por otro lado, en la parte sur del país se lleva a cabo otro proceso de subducción, pero a menor escala, esta vez entre las Placas Antártica y Suramérica. La Dorsal de Chile es la estructura submarina que genera y separa las placas de Nazca y Antártica a una latitud aproximada de 46°S, punto a partir del cual la Placa Antártica subduce bajo Suramérica. Sin embargo, la velocidad de convergencia entre estas dos placas es mucho menor y por esta razón la actividad sísmica se reduce considerablemente. Finalmente y más hacia el sur del país, una nueva placa se suma a la interacción entre placas. La Placa de Scotia se encuentra al sur de la Placa Suramericana, en la punta del continente, y se mueve lateralmente con respecto a la Placa Antártica y a la Suramericana. En este caso no hay subducción y el movimiento entre placas es de menor magnitud, por lo que la actividad sísmica es reducida si se compara con la anteriormente mencionada en otras zonas del país.

Los diferentes movimientos entre las placas tectónicas mencionadas crean, además, esfuerzos dentro de la placa continental, generando así fracturas al interior de la misma, las cuales se conocen como fallas geológicas. Estas fallas, que en general son de carácter superficial, son fuentes adicionales de sismicidad que pueden afectar áreas alejadas de la zona de subducción. La Figura 3-1 muestra el contexto tectónico de esta región, mientras que la Figura 3-3 muestra los lineamientos de las fallas presentes en Argentina y sus alrededores.

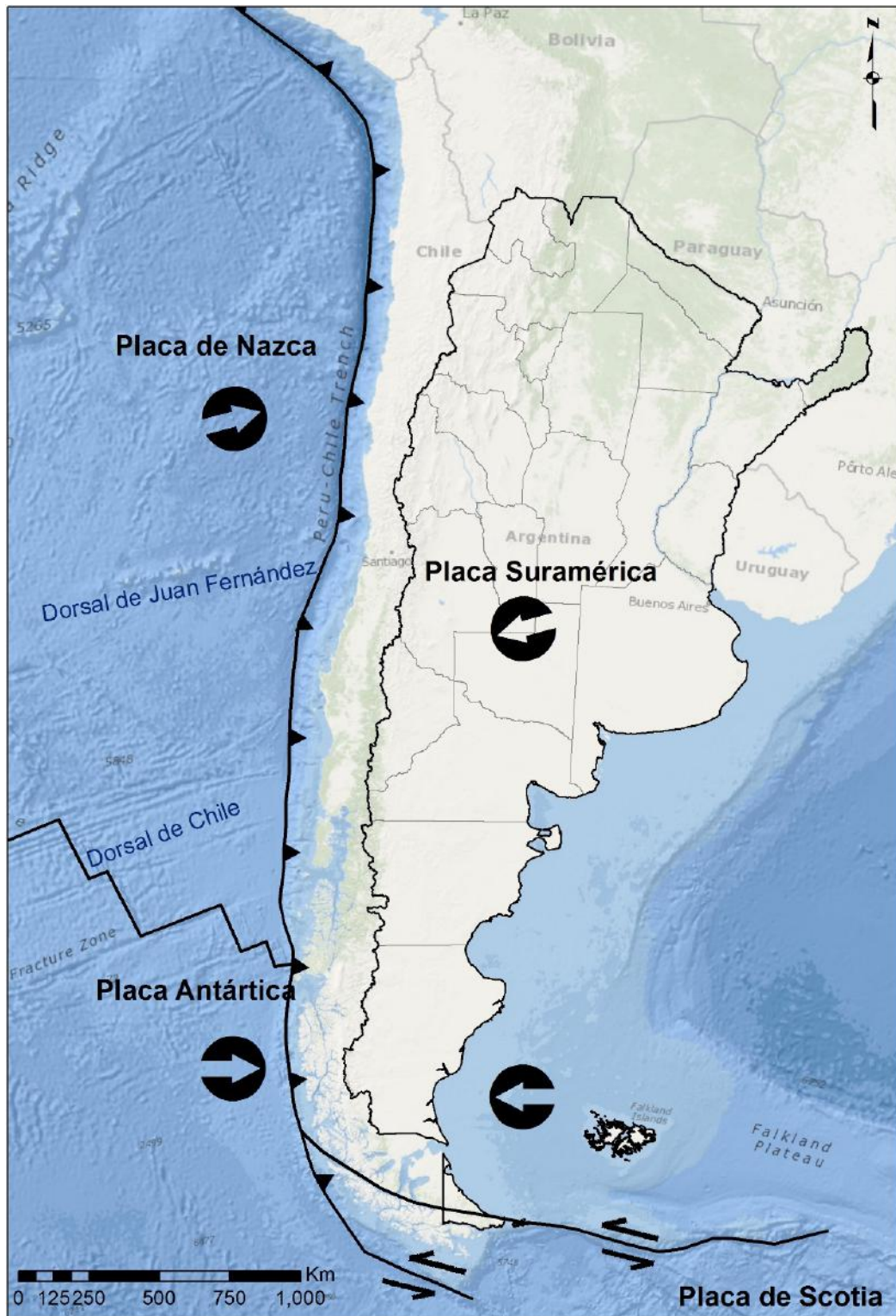


Figura 3-1
Entorno tectónico de Argentina (Adaptado de Costa et al., 2000)

La subducción de la placa de Nazca crea dos ambientes principales de sismicidad dada la geometría misma de la placa en subducción; el primero representa la parte superficial, e inicia a partir del límite de contacto entre ambas placas y llega hasta una profundidad entre los 50-60 km, mientras que el segunda representa la parte profunda de la subducción que llega hasta 200 km o más de profundidad. La parte superficial de la subducción es la zona de acoplamiento de placas y por lo tanto es llamada zona interplaca de tipo *thrust*, mientras que la parte profunda es llamada zona intraplaca ya que los sismos generados allí se deben al rompimiento dentro de la misma placa subductada de Nazca.

Los planos que describen esta subducción son llamados planos de Wadati-Benioff, los cuales cambian su buzamiento a lo largo de la costa Suramericana como se describe a continuación. En la parte norte y hasta los 27°S la subducción es de ángulo intermedio que puede variar entre los 20°-30° de buzamiento; en la parte central entre los 27°S y 33°S la subducción se vuelve de tipo subhorizontal con un ángulo de buzamiento de tan sólo 10° aproximadamente; en la parte sur a partir de los 33°S la subducción retorna a un alto ángulo de buzamiento entre los 20° y 30° (Alfaro, 2011; Armijo et al., 2010; Madariaga, 1998; Núñez, 2014; Jordan et al., 1983; Silva, 2008). La zona central de subducción subhorizontal se da por la subducción de la dorsal de Juan Fernández, cuya corteza nueva es de menor densidad y por lo tanto tiende a flotar. La Figura 3-2 muestra los contornos de profundidad de la subducción según varios autores.

A partir del contexto geológico presentado en la Figura 3-3 es posible identificar trazos generalizados que agrupan las fallas en fuentes sismogénicas principales dada su similar actividad. La Figura 3-4 muestra las estructuras principales adoptadas en el presente estudio.

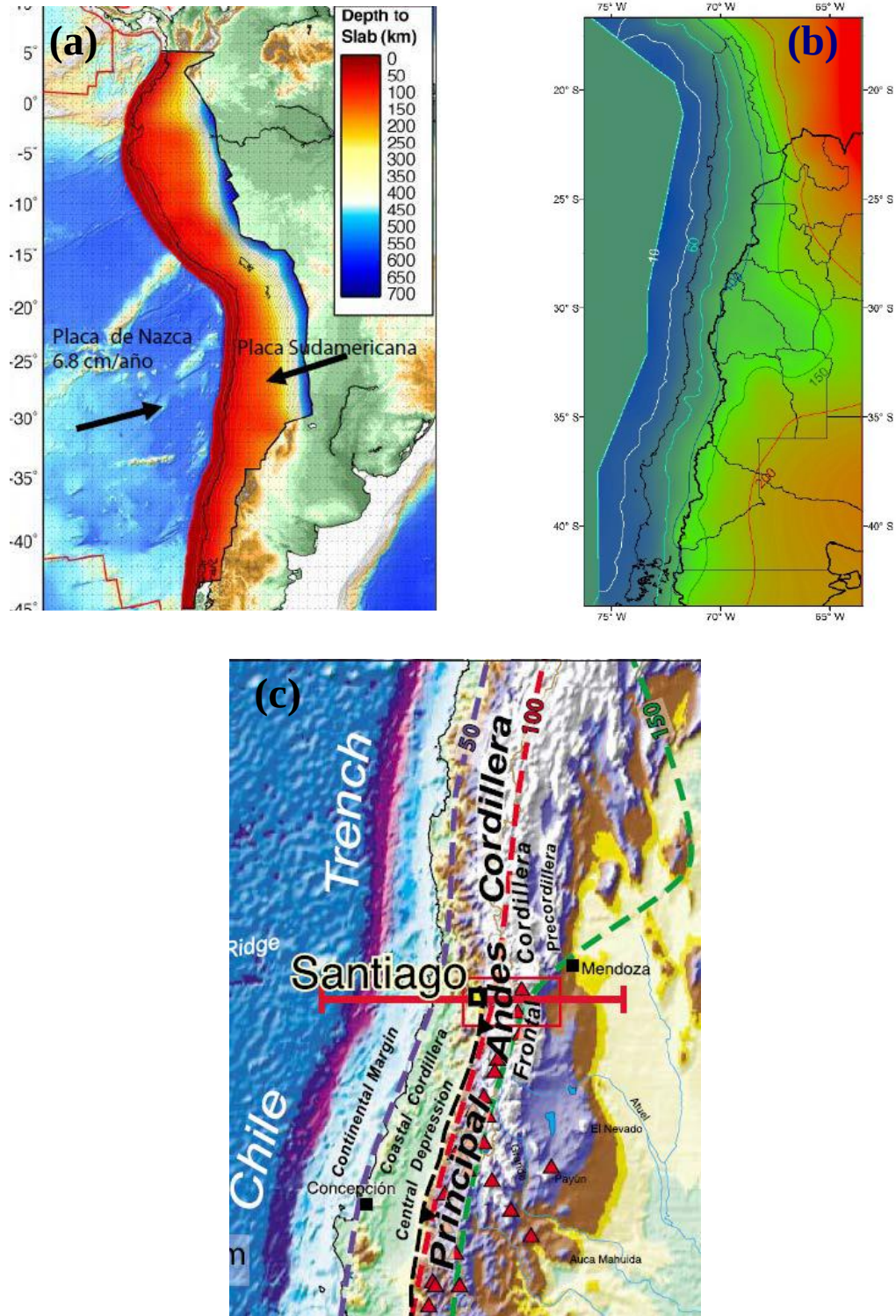


Figura 3-2
Geometría de la subducción. (a) CSN (s.f) (b) Adaptado de Núñez (2014) (c) Armijo et al. (2010)

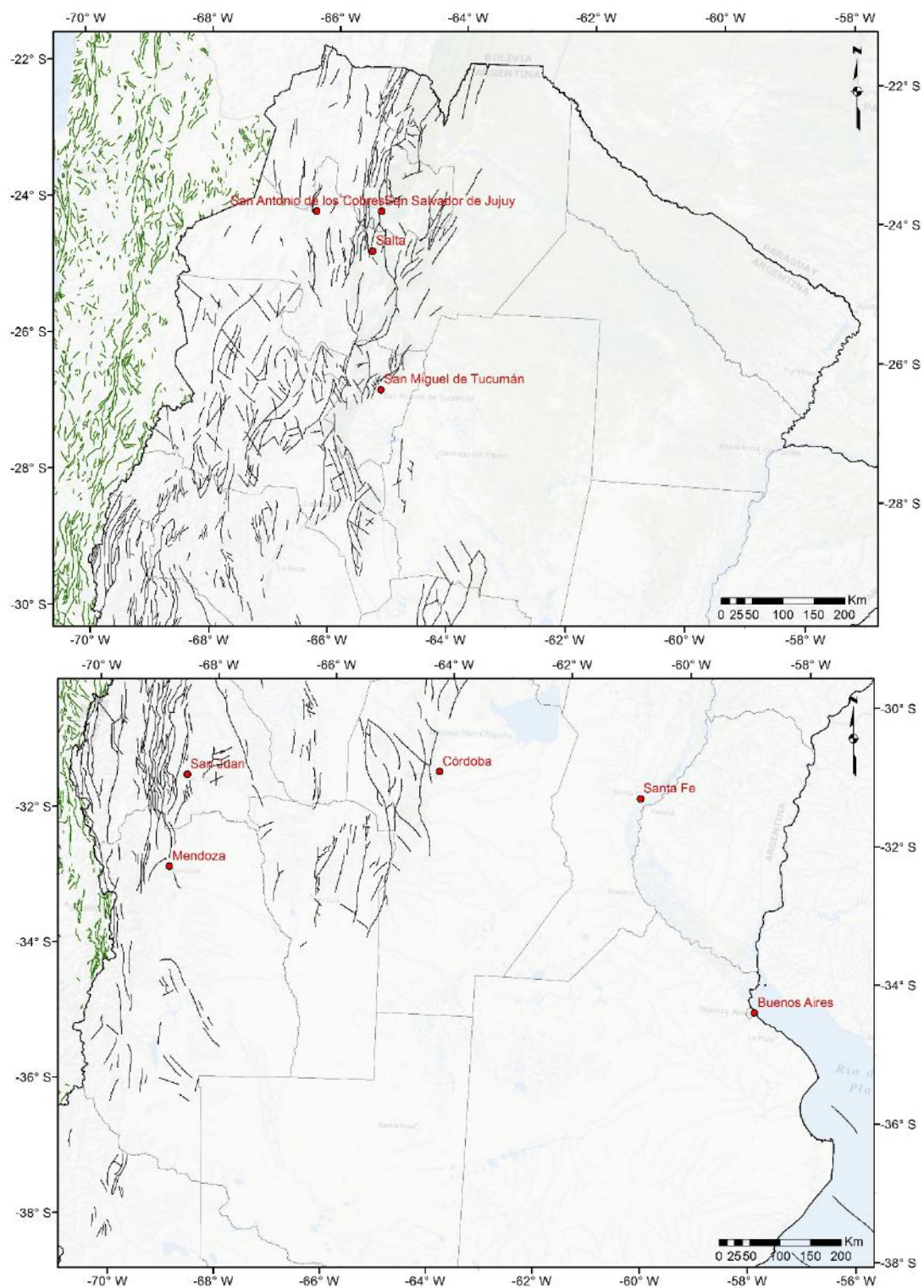


Figura 3
Fallas y lineamientos en Argentina - Adaptado de SEGEMAR (2015) y SERNAGEOMIN (2014) (Continúa)

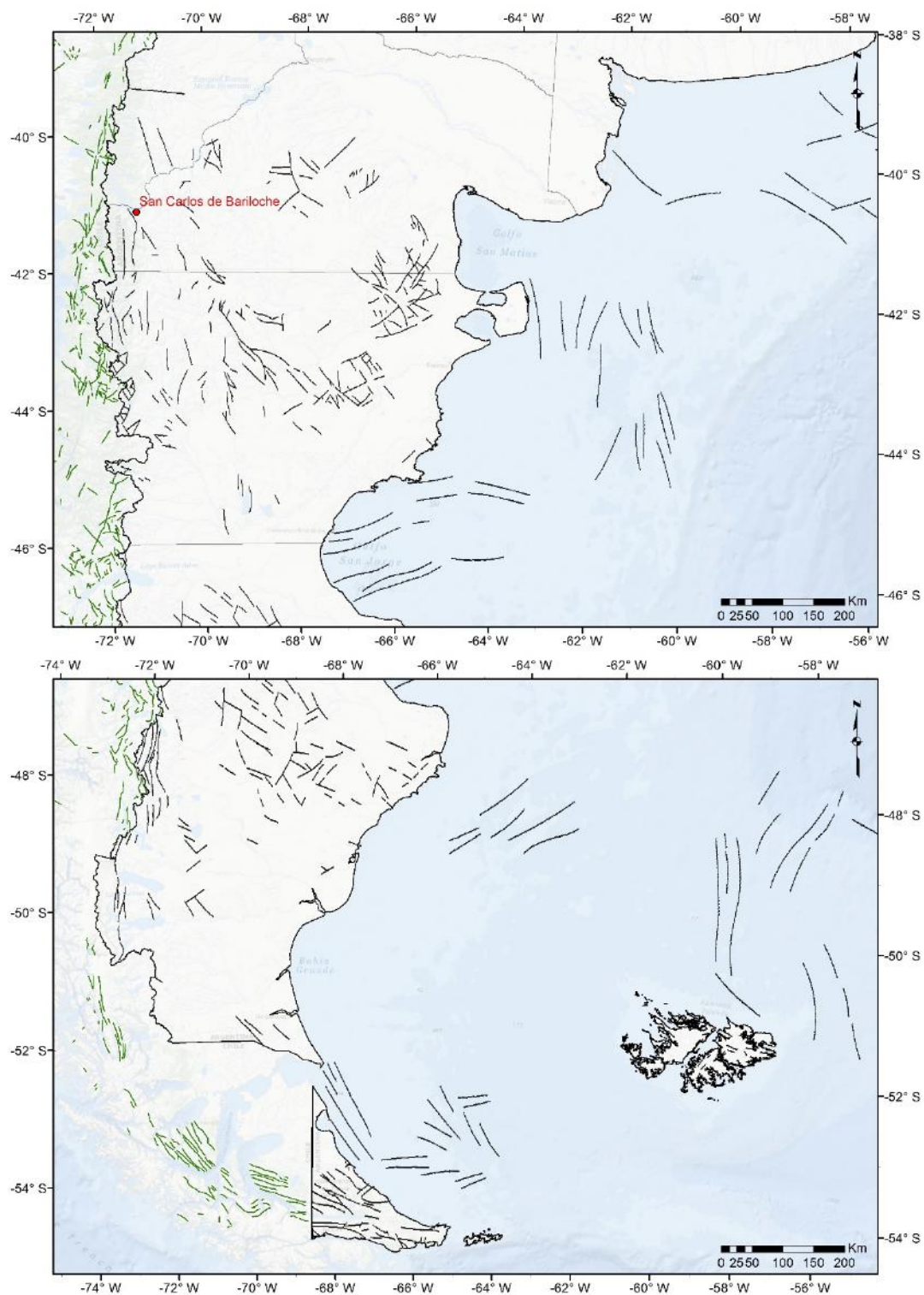


Figura 3-3

Fallas y lineamientos en Argentina - Adaptado de SEGEMAR (2015) y SERNAGEOMIN (2014) (Continuación)

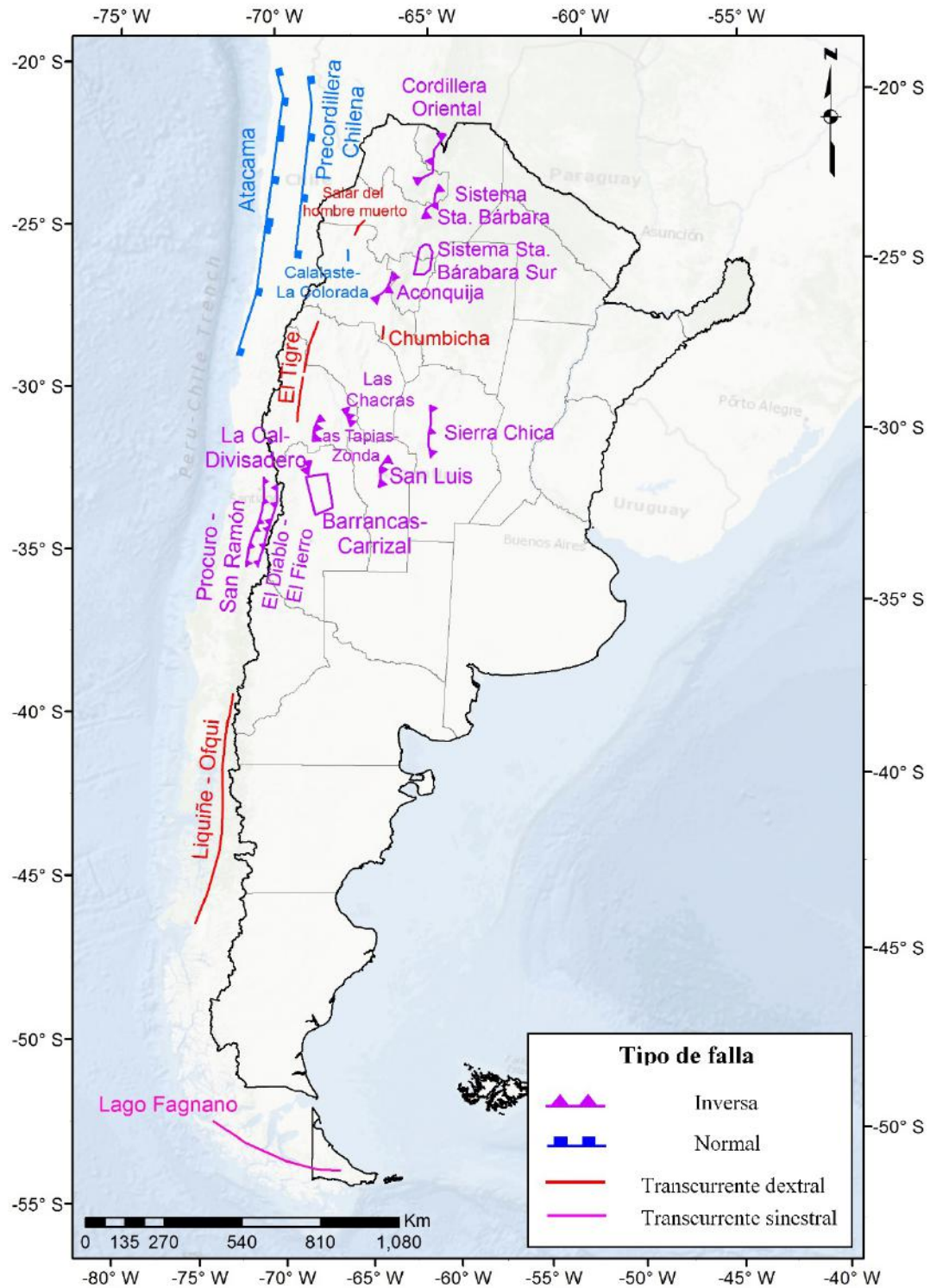


Figura 3-4
Sistemas de fallas principales en Argentina (Costa et al., 2000; Pingel et al., 2013; Iaffa et al., 2013; Lavenu et al., 2000; SEGEMAR, 2015; Costa et al., 2004)

A continuación se describen en detalle las estructuras de la Figura 3-4.

Sistema de fallas de Atacama

En el norte de Chile hasta los 28°S se pueden identificar las siguientes estructuras que definen el perfil del país: Cordillera de la Costa Chilena, Depresión Central Chilena, Precordillera Chilena y la Cordillera Principal Chilena (que corresponde a la Cordillera Occidental de la Puna) (ver Figura 3-6). A lo largo de esta primera estructura desde Iquique hasta La Serena, se extiende el sistema de fallas de Atacama (SFA), compuesta por decenas de tramos de fallas. Este sistema con rumbo generalizado N0.9°E paralelo a la fosa oceánica tiene aproximadamente 1000 kilómetros de longitud y hace parte del ante-arco del norte de Chile. Su origen se debe a la convergencia oblicua entre las placas de Nazca y de Suramérica, siendo este sistema el que acomodaba gran parte del movimiento transcurrente generado (Brown et al., 1991; Herve, 1987; Moscoso y Mpodozis, 1988). Sin embargo, autores como Delouis et al. (1998), Lavenu et al. (2000), Riquelme et al. (2002) concuerdan en que a partir de mediados del Mioceno el sentido de movimiento predominante en este sistema de fallas ha sido vertical, actuando como una falla normal; Dewey y Lamb (1992) estimaron una tasa de desplazamiento transcurrente de menos de 1 mm/año.

El sistema de fallas de Atacama se divide en tres grandes segmentos según su orientación: El Salado, Paposo y Salar del Carmen, como se puede ver en la Figura 1-5. Los tres segmentos presentan un buzamiento subvertical hacia el este (Lavenu et al., 2000) y se les ha atribuido una profundidad aproximada de 10 kilómetros (Delouis et al., 1998).

Sistema de fallas de la Precordillera

En el norte de Chile desde los 22°S hasta los 28°S el perfil de la Cordillera de los Andes se interrumpe por una depresión que la divide en dos, la Precordillera Chilena y la Cordillera Principal Chilena (ver Figura 3-6); esta depresión es llamada la Depresión Preandina Chilena y contiene el Gran Salar de Atacama así como otros salares menores como el salar de Punta Negra y Pedernales (Muñoz et al., 2002). El sistema de fallas precordillerano (SFP) como su nombre lo indica se encuentra en la Precordillera chilena, y está localizado en el ante-arco del norte de Chile; el SFP se encuentra a 100 kilómetros al Este aproximadamente del SFA, y es casi paralelo a este último. Su origen se dio en el Eoceno tardío como una falla transcurrente dextral, la cual fue reactivada hace 38 Ma con desplazamientos sinestrales, para una vez más cambiar la dirección de desplazamiento en el Neogeno a normal con componente dextral (Hoffmann-Rothe et al., 2006).

Este sistema que bordea la Cordillera Domeyko al oeste (este sistema de fallas también en llamado sistema Domeyko), está compuesto de un gran número de fallas anastomosadas, incluyendo las fallas Sierra Moreno, Oeste, Limón Verde, Argomedo-Calama, Salar y Cordillera de la Sal, como se puede ver en la Figura 3-5. Cada una de estas tiene longitudes individuales de más de 100 kilómetros, y por lo general presentan un buzamiento hacia el este de alto ángulo si no vertical (Reutter et al., 1991). Los sismos de Aroma del 2001 ($M_w=6.3$) y del 2002 ($M_w=5.6$) han sido atribuidos a este sistema (Hoffmann-Rothe et al., 2006).

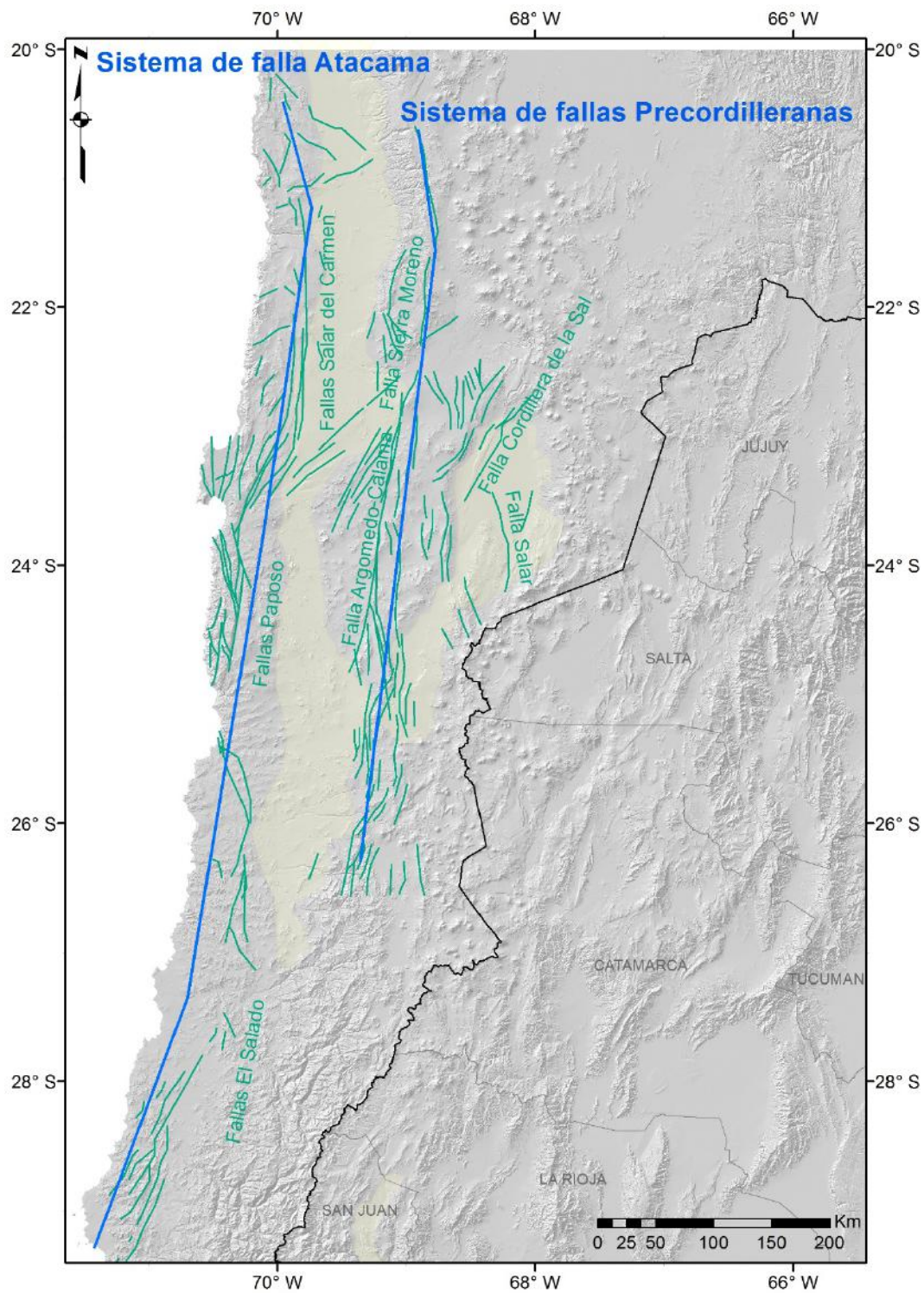


Figura 3-5
Sistemas de falla Atacama y Precordillerano (basado en los trabajos de Hervé, 1987; Muñoz et al., 2002; Olivares et al., 2010; Reutter et al., 1991)

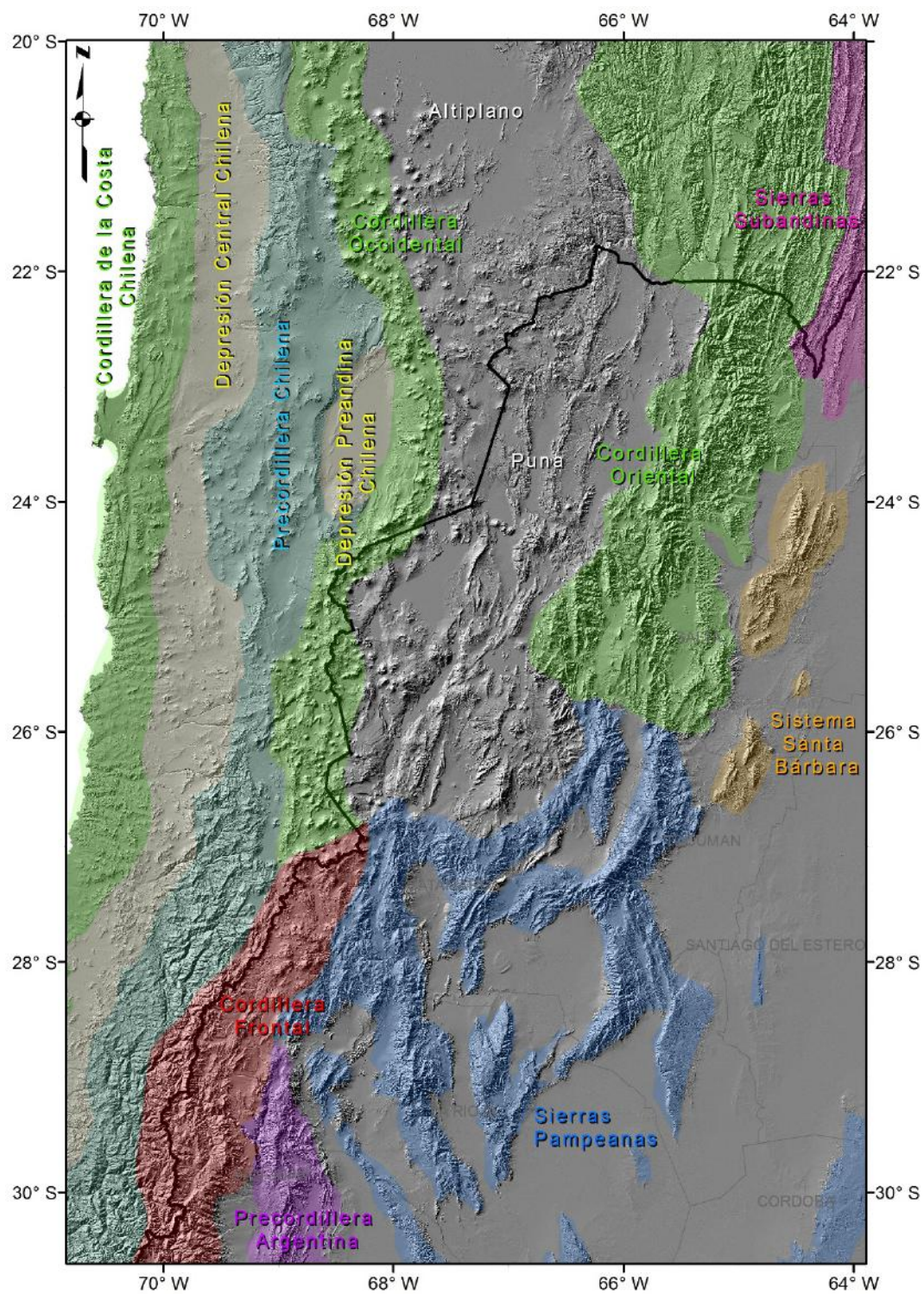


Figura 3-6

Elementos morfoestructurales en el noroeste de Argentina (adaptado de Acocella et al., 2010; Alonso et al., 2006; Coutand et al., 2010; DeCelles et al., 2011; Hain et al., 2011).

Sistema de fallas de la Cordillera Oriental y Sierras Subandinas

La Puna es la extensión sur del Altiplano en Bolivia, y juntos forman los Andes Centrales extendiéndose desde los 15°S hasta los 27°S aproximadamente. La Puna, que tiene una elevación promedio de 3700m y que representa la segunda meseta más grande del mundo después del Tibet, con un área de alrededor de 500,000 km^2 (Carrapa y DeCelles, 2008; Alonso et al., 2006; DeCelles et al., 2011), está delimitada al oeste por la Cordillera Occidental, al este por la Cordillera Oriental, y al sur por las Sierras Pampeanas (ver Figura 1-6). La Puna se originó gracias al acortamiento creado por la subducción de la placa de Nazca en el lado oeste y el cinturón Subandino en el lado este (localizado al este de la Cordillera Oriental); el acortamiento debido a fallas inversas de rumbo generalizado N-S cesó hace aproximadamente 10 Ma, sin embargo, en la Cordillera Oriental el acortamiento continúa hasta el presente (Acocella et al., 2010). En este sector de la Puna hasta los 23°S aproximadamente el mecanismo de deformación de los Andes es de piel fina, caracterizado por ser la cobertura superficial sedimentaria la que sufre la deformación debida al acortamiento. El cinturón Subandino es una zona estrecha de pliegues y estructuras lítricas de encabalgamiento con buzamiento hacia el oeste, mientras que la Cordillera Oriental es una zona compleja de fallas inversas de alto ángulo menos continuas que las de las Sierras Subandinas (Allmendinger et al., 1983; DeCelles et al., 2011). El límite entre estas dos estructuras está dado por una falla de cabalgamiento activa.

Para este estudio se han modelado dos fuentes que hacen parte de estos sistemas y que presentan actividad sísmica evidenciada en el catálogo sísmico utilizado. Estas son la falla Mandeyapecua, localizada en el centro de Bolivia aproximadamente, que bordea la curva que hace los Andes a la altura de los 18.3°S, y otra fuente que se llamará Cordillera Oriental de aquí en adelante, localizada en el norte de la Argentina en el límite entre este país y Bolivia (ver Figura 3-7). La falla Cordillera Oriental representa el límite entre la Cordillera Oriental y las Sierras Subandinas mencionado anteriormente. Por otro lado, la falla Mandeyapecua es una falla inversa con una longitud total de 486 km, un rumbo promedio de N6.7°W y una inclinación de 60° hacia el oeste (Lavenue et al., 2000).

Sistema de fallas Santa Bárbara

Las Sierras Subandinas se encuentran al este de la Cordillera Oriental y llegan hasta los 23°S. Hacia el sur de estas sierras se encuentra este sistema montañoso de Santa Bárbara, entre los 23.5°S y los 26.5°S aproximadamente, el cual en un principio se tomaba como parte del mismo sistema de las Sierras Subandinas; sin embargo, con el avance en el conocimiento geológico se encontraron varias diferencias estratigráficas y estructurales por lo cual ahora se considera un sistema aparte (Kley y Monaldi, 1999). Hacia el norte de este sistema las características estructurales son de piel fina mientras que al sur (Sierras Pampeanas) las características son de piel gruesa; el Sistema Santa Bárbara es un sistema de transición y cuenta con características de ambos mecanismos de deformación (Jordan y Allmendinger, 1986). Este sistema está compuesto por numerosas fallas inversas de ángulo moderado a alto con vergencia tanto hacia el este como hacia el oeste (aunque el buzamiento generalizado es hacia el este, ver Figura 1-7), con una geometría lítrica con un despegue basal a una profundidad de 20km (DeCelles et al., 2011; Kley y Monaldi, 1999).

Sistema de fallas Santa Bárbara Sur

Este sistema de fallas es la continuación hacia el sur del Sistema Santa Bárbara (ver Figura 1-7). Se encuentra localizado en el límite entre las provincias de Tucumán y Salta, al noreste de San Miguel de Tucumán, y está formado por cuatro sierras: Sierra de la Candelaria, Sierra de Medina, Sierra del Campo y Sierra de La Ramada. Estas sierras están bordeadas y a veces atravesadas por un conjunto de fallas inversas de alto ángulo (Iaffa et al., 2013). Las estructuras de falla principal son (1) la falla de rumbo N-S con buzamiento hacia el oeste que levantó las sierras de la Candelaria y Medina, y (2) la falla con buzamiento hacia el este que bordea por el oeste a la Sierra del Campo (Barcelona et al., 2014).

Falla Aconquija

La Sierra de Aconquija hace parte del extremo norte de las Sierras Pampeanas (ver Figura 3-6) y representa el límite occidental (junto con las Cumbres Calchaquies) de la cuenca Tucumán donde se encuentra la ciudad de San Miguel de Tucumán (ver Figura 1-7). Las Sierras Pampeanas son deformaciones de piel gruesa compuestas por una serie de bloques de basamento bordeados por fallas inversas. La Sierra de Aconquija es una estructura doblevergente cuyo frente occidental es muy empinado, mientras que el lado oriental es de pendiente más suave. En el borde occidental de la sierra se encuentra la falla Aconquija, una estructura inversa de alto ángulo con buzamiento hacia el este la cual levantó la sierra hace aproximadamente 7 Ma. Esta falla recorre aproximadamente 70km con un rumbo promedio de N32°E, y la cual llega a una profundidad aproximada de 30km (Casa, 2009; Costa et al., 2000; Cristallini et al., 1997; Ramos et al., 2001).

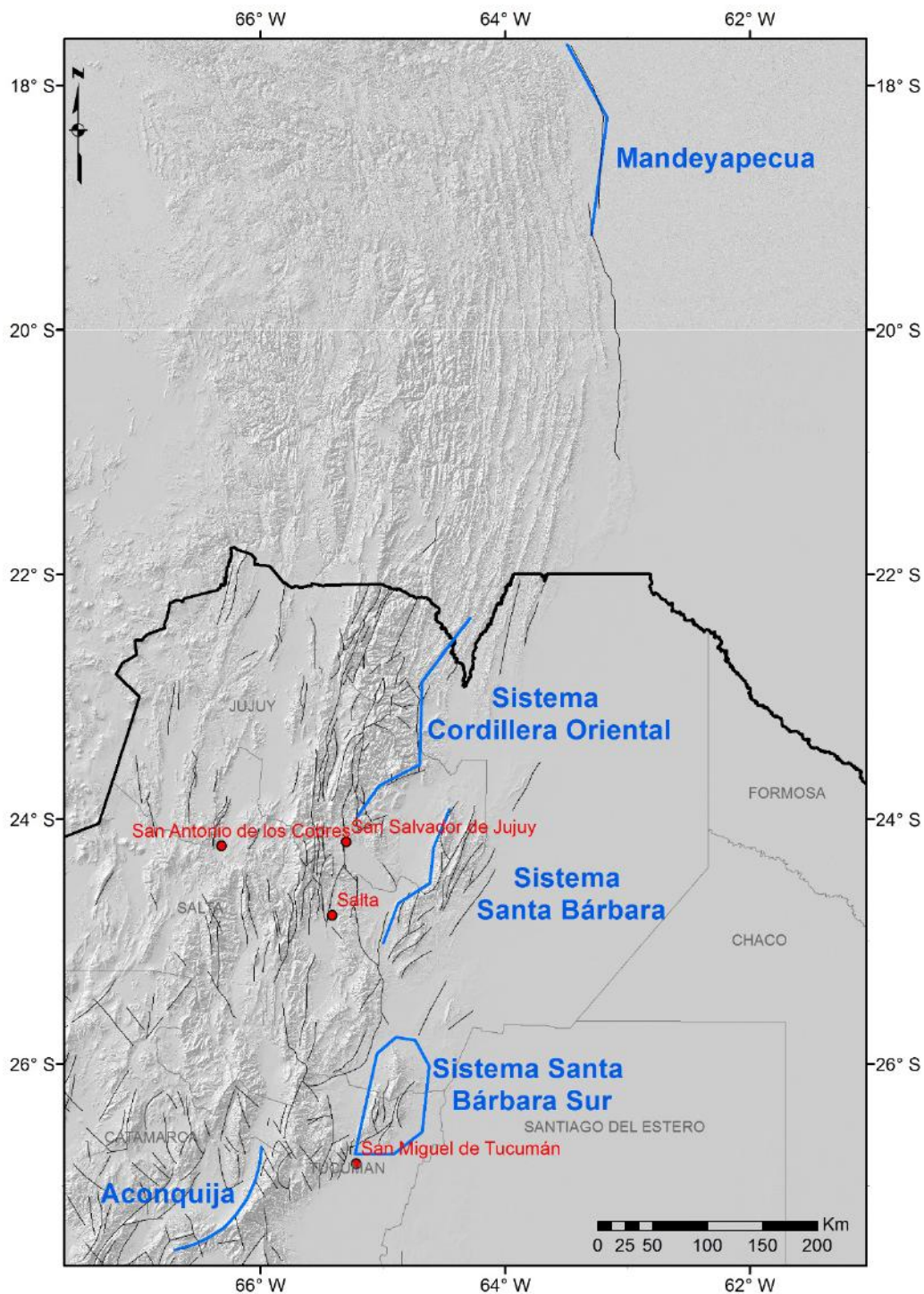


Figura 3-7

Sistemas de falla en el norte de Argentina (según los trabajos de Masferro et al., 2003; Dekeen et al., 2006, Oncken et al., 2006; Pingel et al., 2003; Kley y Monaldi, 1999, 2002; DeCelles et al., 2011; Carrapa y DeCelles, 2008; Iaffa et al., 2013; Jordan y Allmendinger, 1986; Ramos et al., 2001; Casa, 2009)

Fallas Salar del hombre muerto, Calalaste – La Colorada y Chumbicha

Estas fallas se encuentran localizadas en la provincia de Catamarca al sureste de la falla de la Precordillera en Chile (ver Figura 3-8). La falla del Salar del hombre muerto se ubica en el altiplano de Puna en el salar del mismo nombre. Es una falla transcurrente con rumbo $N34^{\circ}W \pm 26^{\circ}$ y una longitud de 54 km. La falla Calalaste - La Colorada también se encuentra ubicada en el altiplano de Puna, y es una falla normal con rumbo $N1^{\circ}W \pm 4^{\circ}$ y una longitud de 29 km. Por otro lado, la falla Chumbicha se ubica al sureste de Catamarca bordeando la Sierra de Ambato con rumbo $N20^{\circ}E$ por una longitud de 50 km (Costa et al., 2000).

Sistema de fallas El Tigre

Entre los $28.4^{\circ}S$ y los $31.4^{\circ}S$ cruzando las provincias de La Rioja y San Juan se encuentra el sistema de falla El Tigre. Este sistema con rumbo $N10^{\circ}E \pm 6^{\circ}$ se encuentra en la Precordillera argentina, la cual está separada de la Cordillera Frontal por el Valle de Uspallata-Calingasta en la provincia de San Juan (ver Figura 3-9).

Numerosos autores consideran que El Tigre es un gran sistema de fallas de casi 800 km de longitud desde la Laguna Brava ($28.3^{\circ}S$ en la provincia de La Rioja, Argentina) hasta el cordón de Cortaderas ($32.3^{\circ}S$ en la provincia de Mendoza, Argentina) (Perucca et al., 1999; Cardó & Díaz, 2005; Bastías et al., 1993). En general este sistema se puede dividir en tres segmentos: norte, desde la Laguna Brava hasta el río Jáchal en la provincia de San Juan; centro, desde el río Jáchal hasta el río San Juan; sur, desde el río San Juan hasta el cordón de Cortaderas en la provincia de Mendoza. El segmento centro, entre $30^{\circ}S$ y $31.3^{\circ}S$, es el más destacado por tener una buena exposición y es el que comúnmente se denomina como la falla El Tigre propiamente. En este estudio se consideran únicamente los segmentos norte y centro de este sistema ya que el lineamiento del segmento sur es difícil de identificar y no tiene una clara asociación con la sismicidad (ver Figura 3-10).

En general el sistema se considera transcurrente dextral con una tasa de movimiento de 1-5 mm/año, con un buzamiento hacia el este entre 75° y 80° y una profundidad de 9 km (Costa et al., 2000; Fazzito, 2011). Este último autor también estima la magnitud máxima posible utilizando dos métodos, el de la ley de escala del momento sísmico y el método estadístico; con el primer método se obtiene para el segmento central una magnitud máxima entre $M_W=6.9$ y $M_W=7.1$, mientras que con el segundo método se obtiene entre $M_W=6.7$ y $M_W=7.0$.

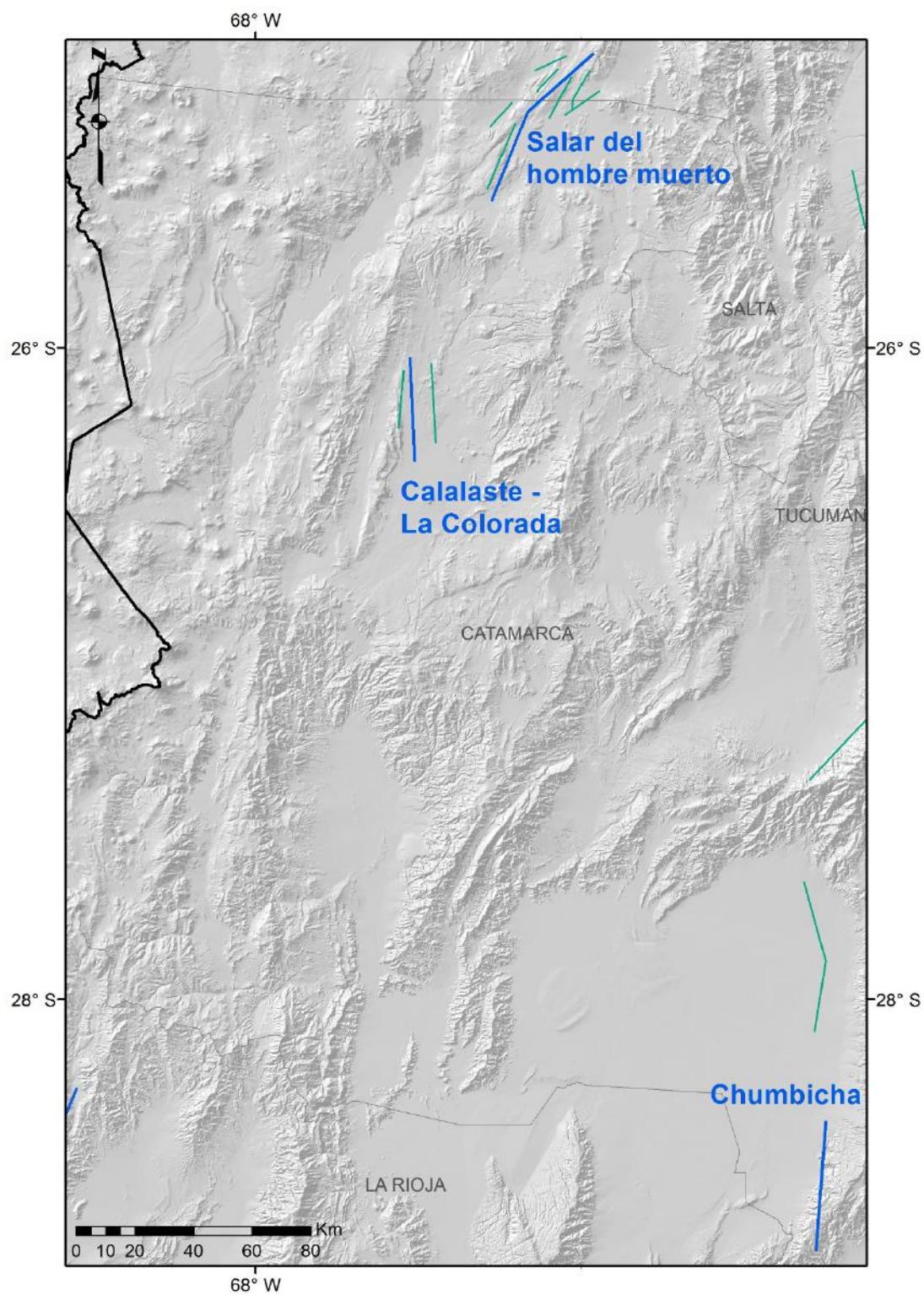


Figura 3-8
Fallas de la Puna (basado en el trabajo de Costa et al., 2000)

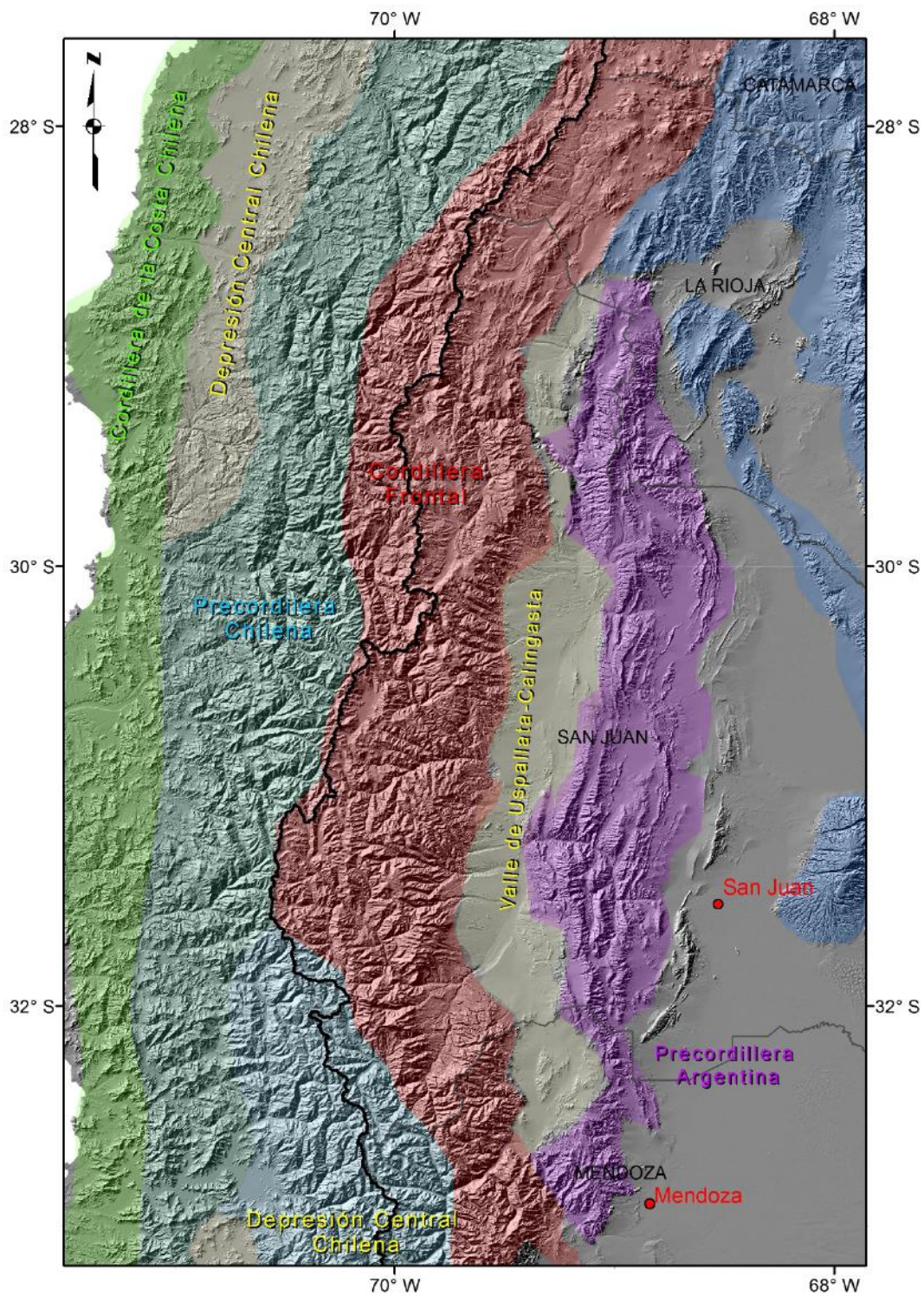


Figura 3-9

Elementos morfoestructurales entre los 28°S y los 33°S (adaptado de Acocella et al., 2010; Alonso et al., 2006; Coutand et al., 2010; DeCelles et al., 2011; Hain et al., 2011)

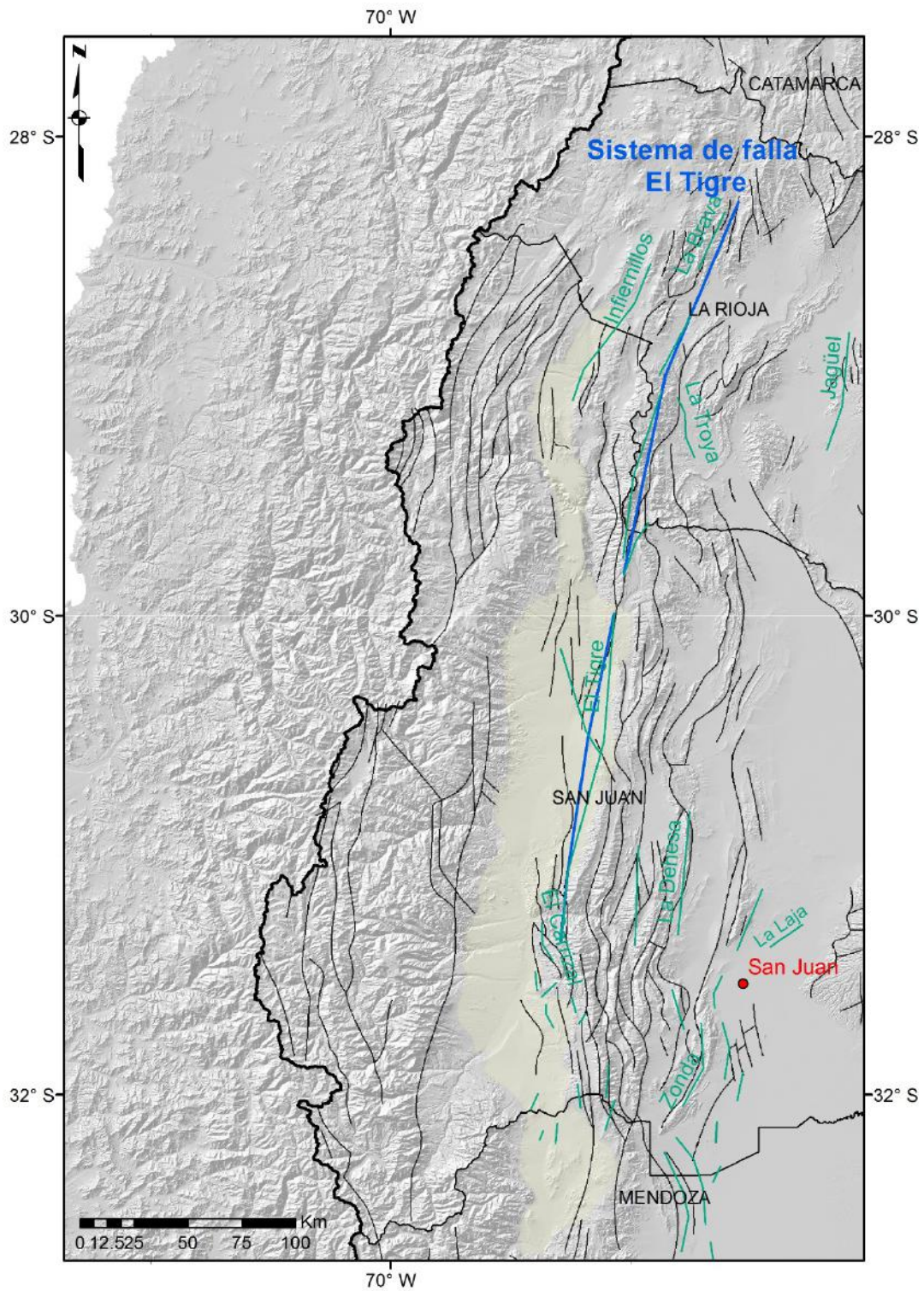


Figura 3-10
 Sistema de falla El Tigre (basado en los trabajos de Costa et al., 2000; Perucca et al, 1999; Fazzito, 2011)

Fallas Las Chacras, Las Tapias-Zonda y Cerro la Cal - Divisadero

Al sureste del sistema de fallas El Tigre en el sur de la provincia de San Juan y el norte de la provincia de Mendoza en el territorio argentino se encuentran una serie de fallas activas importantes que se encuentran cerca de las ciudades de San Juan y Mendoza: Las Chacras, Las Tapias-Zonda y Cerro la Cal – Divisadero Largo.

La falla Las Chacras se encuentra a 104 km aproximadamente hacia el noreste de San Juan cruzando la Sierra Pie de Palo, bordeando la Sierra de la Huerta por el oeste (ver Figura 3-11). Esta falla inversa tiene un rumbo promedio de $N28^{\circ}W \pm 12^{\circ}$, una longitud de 68 km, un buzamiento entre 45° y 60° hacia el este, y se estima que la magnitud máxima probable es de $M_w=7.1$ (Perucca & Vargas, 2014; Costa et al., 2000).

El sistema de falla Las Tapias-Zonda se encuentra en el borde oriental de la Precordillera argentina, pasando muy cerca de la ciudad de San Juan (ver Figura 3-11). Para este estudio se han agrupado en este sistema las fallas Los Berros, Las Tapias, Villicum, Marquesado, Rinconada, Maradona, y Cerro Zonda, todas de carácter inverso, con ángulos de buzamiento que varían entre 25° y 60° (a excepción de la falla Las Tapias que tiene un buzamiento de 80°) y con magnitudes máximas probables que varían entre $M_w=5.9$ y $M_w=7.6$ (Perucca & Vargas, 2014). El terremoto del 10 de junio de 1952 de magnitud $M_s=6.8$ fue atribuido a la falla Rinconada que hace parte de este sistema, el cual se sintió una extensa región de Chile y Argentina y dejó algunas víctimas fatales (Perucca & Vargas, 2014).

El sistema de fallas Cerro la Cal – Divisadero se encuentra ubicada en el norte de la provincia de Mendoza a lo largo del borde occidental de la Precordillera argentina, y se extiende desde el Cerro la Cal hacia el sur pasando por el borde oriental de la ciudad de Mendoza. Para este estudio se han agrupado en este sistema las fallas Cerro la Cal y Divisadero Largo. La falla Cerro la Cal es de carácter inverso hacia el oeste con un ángulo de buzamiento entre 40° - 50° , una tasa de movimiento de 0.2-5mm por año, y una magnitud máxima probable que varía entre $M_w=6.8$ y $M_w=6.9$ (Costa et al., 2000; Falconí et al., 2011, Salomon et al., 2013). Esta falla ha generado sismos históricos como el terremoto de 1861 que destruyó casi totalmente la ciudad causando 6000 muertes (Salomon et al., 2013).

Sistema Barranca - Carrizal

Hacia el sur de la ciudad de Mendoza se encuentran las fallas y los pliegues de Barrancas, Carrizal, La Ventana, Punta de las Bardas y Vacas Muertas que se extienden hasta casi los $33.5^{\circ}S$. Las fallas Barrancas son de tipo inverso de alto ángulo, tienen rumbo promedio de $N26^{\circ}W$ y tienen buzamientos tanto hacia el este como hacia el oeste; por otro lado, los demás son pliegues relacionados con fallas en el piedemonte (Costa et al., 2000). Las fallas individuales tienen una escasa caracterización y por lo tanto han sido agrupadas en una misma fuente, la cual para este estudio se modeló como un plano horizontal de sismicidad.

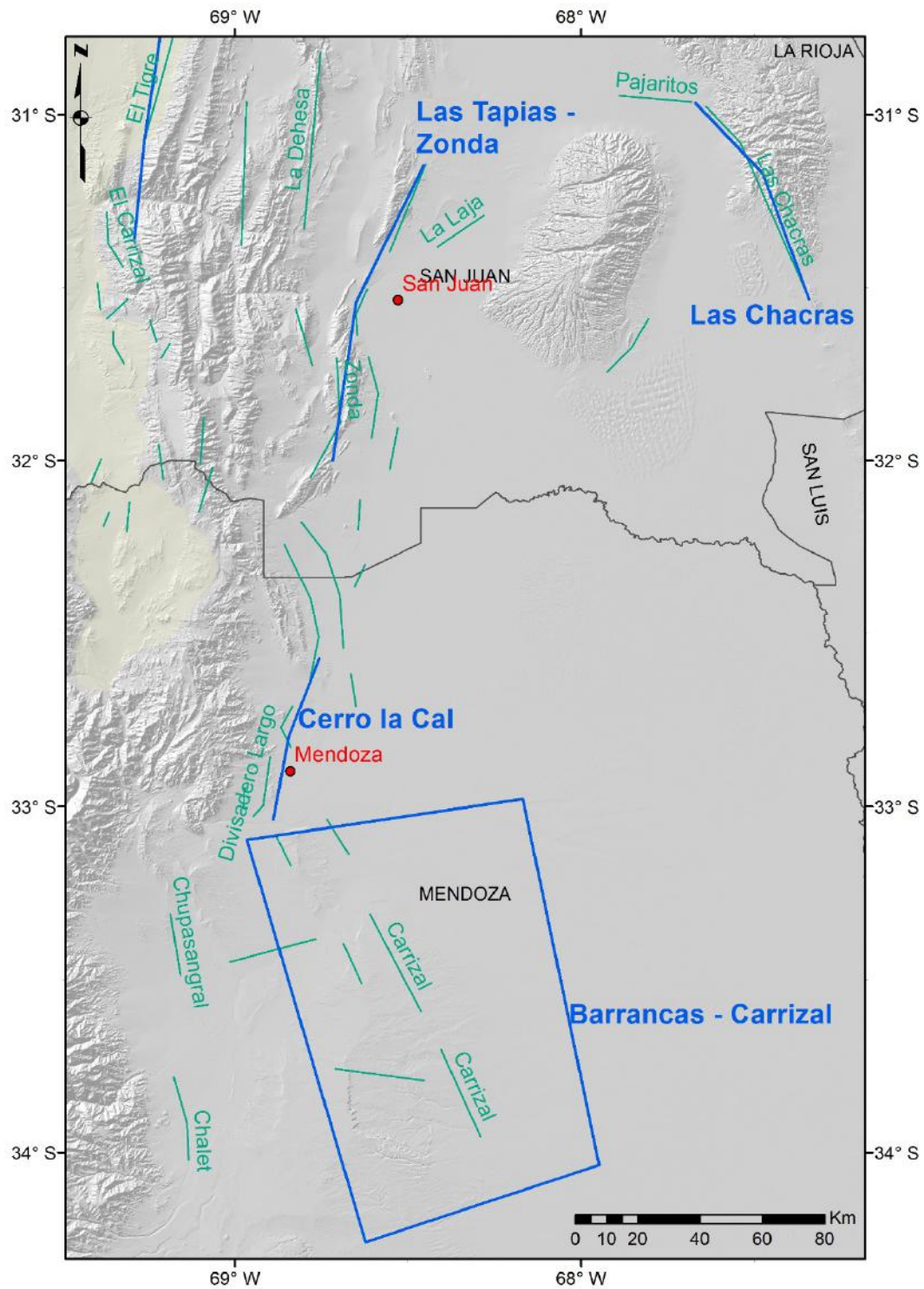


Figura 3-11
Fallas Las Chacras, Las Tapias-Zonda y Cerro la Cal (basado en los trabajos de Costa et al., 2000; Perucca & Vargas, 2014; Falconí et al., 2011; Salomon et al., 2013)

Sistema de falla Sierra Chica

Este sistema se encuentra localizado en la provincia de Córdoba a unos 25 km aproximadamente hacia el oeste de la ciudad de Córdoba, y recorre el borde oriental de la Sierra Chica (ver Figura 3-12). El sistema agrupa las fallas Cosquin, Carlos Paz, Potrero de Garay y Santa Rosa, y tiene un rumbo promedio de $N4^{\circ}E$ y una longitud de 185 km. Es un sistema de carácter inverso con un buzamiento de 20° - 60° hacia el este, y se estima una magnitud máxima probable entre $M_w=6.5$ y $M_w=7.6$ (Costa et al., 2000; Costa et al., 2001; Sagripanti et al., 2012).

Falla San Luis

La falla San Luis está localizada al este de la ciudad del mismo nombre y continúa hacia el noreste de la ciudad a lo largo de 116km aproximadamente con rumbo promedio $N3^{\circ}E$. Esta falla incluye las fallas menores de La Higuera, Lorenzillo y Las Cuevas (ver Figura 1-12). Los tres tramos están compuestos por fallas inversas con ángulos de buzamiento entre los 30° y 45° hacia el este (Costa et al., 2000).

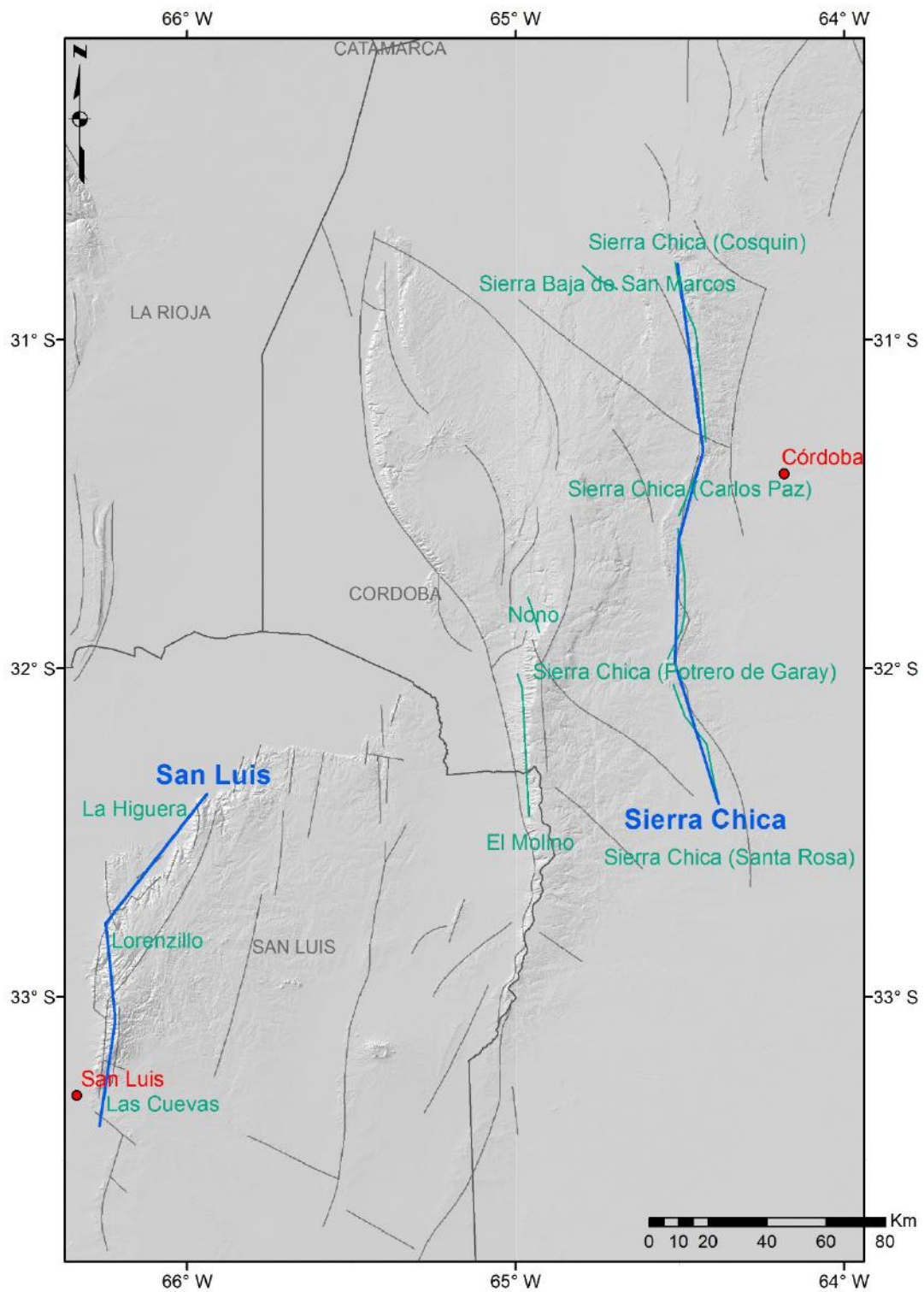


Figura 3-12

Falla Sierra Chica (basado en los trabajos de Costa et al., 2000; Costa et al., 2001; Sagripanti et al., 2012)

Sistema de fallas Procuro–San Ramón

En la zona central de Chile, a partir de los 33°S, reaparece la Depresión Central Chilena, la cual se extiende hasta los 40°S, separando la Cordillera de la Costa de la Cordillera Principal. En la Depresión Central de las regiones de Maule, Bernardo O'Higgins y Región Metropolitana se encuentra el sistema de falla Procuro–San Ramón que se extiende desde los 33°S hasta los 35.9°S, marcando el límite entre la Depresión Central y la Cordillera Principal (ver Figura 3-13).

La Depresión Central entre los 33°S y los 36°S se originó como un graben debido a la extensión de la cuenca Abanico durante el Eoceno-Oligoceno, delimitado por las fallas Procuro y San Ramón al oriente y las falla Los Ángeles e Infiernillo al occidente; sin embargo, durante el Mioceno temprano estos sistemas se invirtieron, reactivándose como fallas inversas (Alfaro, 2011). El sistema Procuro – San Ramón es la rampa del límite occidental de lo que Armijo et al. (2010) llama el Encabalgamiento Oeste Andino (West Andean Thrust), el cual representa un gran margen inverso en el flanco oriental de la Cordillera de los Andes, con vergencia opuesta a la de la subducción. El segmento de falla que recorre el oriente de Santiago es llamado falla San Ramón, mientras que su continuación hacia el sur es llamado falla Procuro (ver Figura 3-14). La falla Procuro – San Ramón, por lo tanto, es caracterizada como una falla inversa con un buzamiento 50°E hacia el este y profundidad máxima de 10 km, y una tasa de desplazamiento de 4 mm/año aproximadamente (Armijo et al., 2010; Silva, 2008). En cuanto a la magnitud máxima de este sistema, este valor ha sido estimado entre $M_W=7.0$ y $M_W=7.5$ (Armijo et al., 2010; Leyton et al., 2010; SEREMI, 2011; Silva, 2008).

Sistema de fallas El Diablo–El Fierro

Este sistema corre paralelo al sistema Procuro – San Ramón, y es la estructura más oriental de la Cordillera Principal entre los 33°S y los 36°S (ver Figura 3-13). La falla El Diablo se extiende desde los 33.3°S hasta los 34.3°S en el segmento noreste del sistema, mientras que la falla El Fierro se extiende desde los 34.4°S hasta los 36°S en el segmento suroeste del sistema (ver Figura 3-14). Este sistema tiene un movimiento inverso, con un componente dextral, cuyo buzamiento está entre los 45°-50° hacia el oeste (Alfaro, 2011), y cuya magnitud máxima se estima en $M_W=7.3$ según el estudio realizado por SEREMI (2011).

A este sistema se le han atribuido al menos dos sismos importantes, los sismos de Las Melosas del 4 de septiembre de 1958 y Curicó del 28 de agosto de 2004. El primero de estos fue de $M_W=6.9$ y ocurrió en la intersección de los ríos Maipo y Volcán bajo la Cordillera Principal a 15 km de profundidad aproximadamente, y el segundo fue de $M_W=6.5$ y ocurrió en la Cordillera Principal de la región de Maule cerca del nacimiento del río Teno en las coordenadas 35.17°S, 70.525°W (Alfaro, 2011).

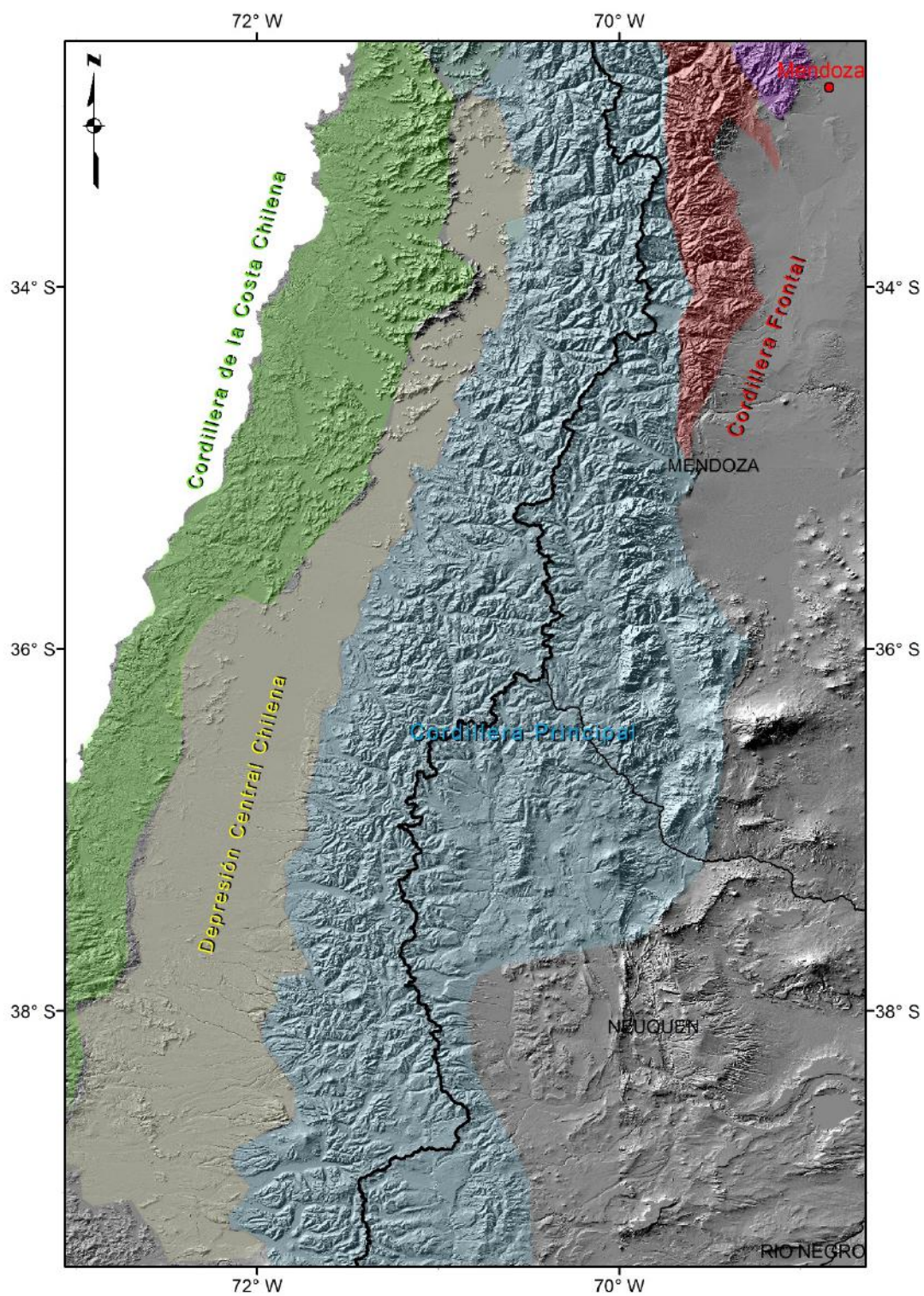


Figura 3-13
Elementos morfoestructurales entre los 33°S y los 39.4°S

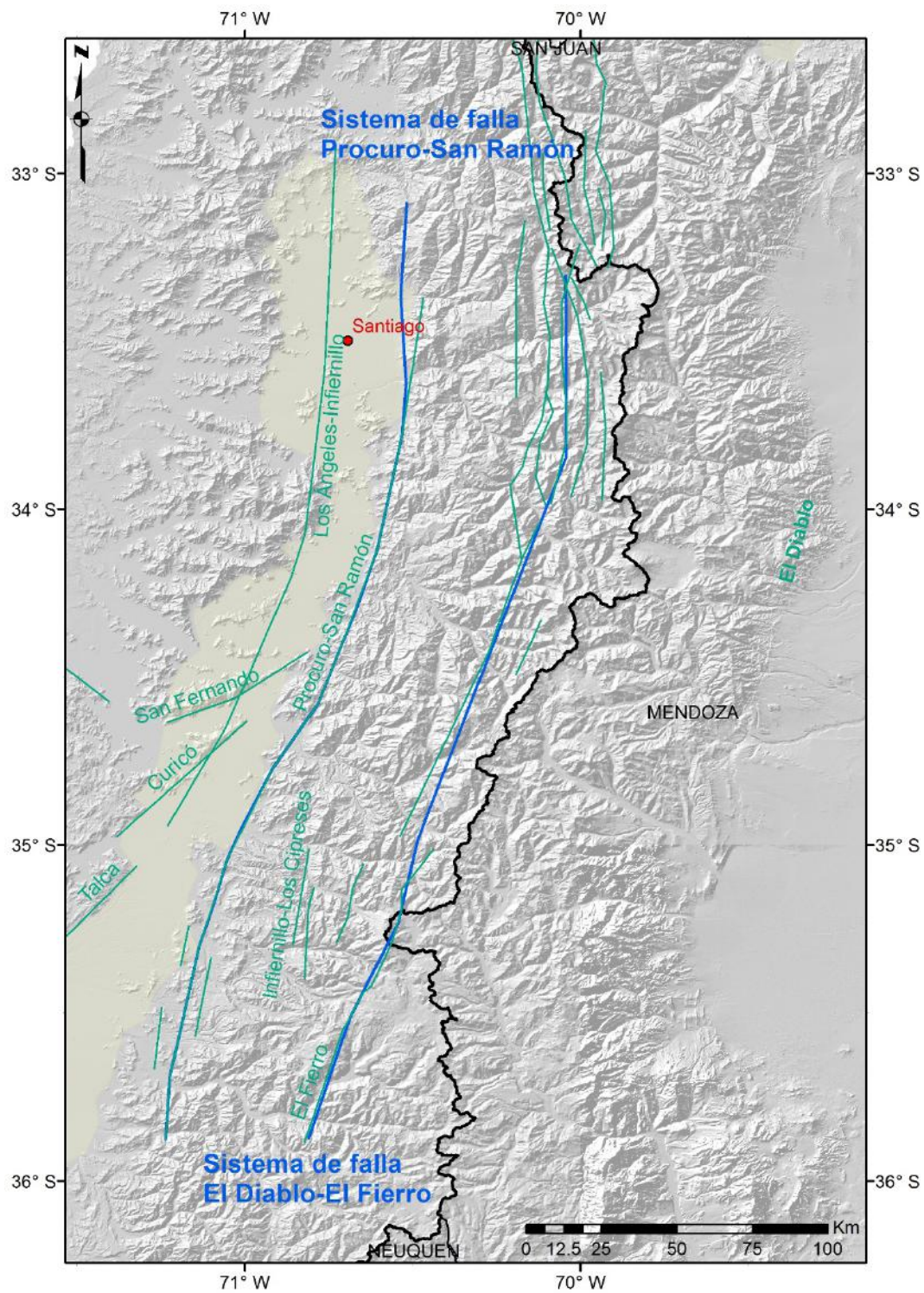


Figura 3-14

Sistemas de falla Proculo-San Ramón y El Diablo-El Fierro (basado en los trabajos de Alfaro, 2011; González et al., 2012; Armijo et al., 2010; Leyton et al., 2010; SEREMI, 2011)

Sistema de fallas Liquiñe-Ofqui

El sistema de falla Liquiñe-Ofqui (SFLO) tiene una longitud total de más de 800 km, empezando desde la población de Liquiñe en la Región de Los Ríos en Chile, bajando en dirección suroeste y doblándose hacia el oeste hasta el istmo de Ofqui en la Región de Aysén en Chile. Este sistema se originó en el Mesozoico, y al igual que el SFA, acomodaba el componente transcurrente sinistral de la convergencia oblicua entre la placa de Nazca y la de Suramérica; en el Mioceno el movimiento se invirtió a ser dextral.

El SFLO está compuesto por dos ramas principales que se bifurcan y corren paralelas entre los 44°S y los 46.3°S, creando una estructura transformante dúplex. El segmento occidental se extiende por el canal Moraleda, mientras que el oriental lo hace en tierra, y ambos están unidos por una serie de fallas normales escalonadas en el área intermedia. Hacia el sur y norte de esta estructura el lineamiento del SFLO se concentra en una sola línea. Algo que cabe resaltar es la relación espacial tan estrecha que existe entre el lineamiento de este sistema con la cadena de volcanes cuaternarios (ver Figura 3-15). El sistema se ha caracterizado como transcurrente dextral con buzamiento subvertical con una profundidad entre 8-9 km, y una magnitud máxima de $M_w=7.1$ (Arancibia et al., 1999; Lavenu et al., 2000; Cembrano et al., 1996; Russo et al., 2011, Vargas et al., 2013).

Dos sismos importantes han sido atribuidos a este sistema, uno en 1965 y otra serie de eventos en el 2007; el sismo del 28 de noviembre de 1965 ocurrió en las cercanías del volcán Hudson (Lavenu et al., 2000), mientras que los eventos del 2007 comenzaron el 10 de enero y se extendieron hasta el 23 de enero (con magnitud máxima de $M_w=5.3$), y todos ocurrieron en el segmento oriental del sistema en las cercanías del fiordo de Aysén (Russo et al., 2011; Vargas et al., 2013).

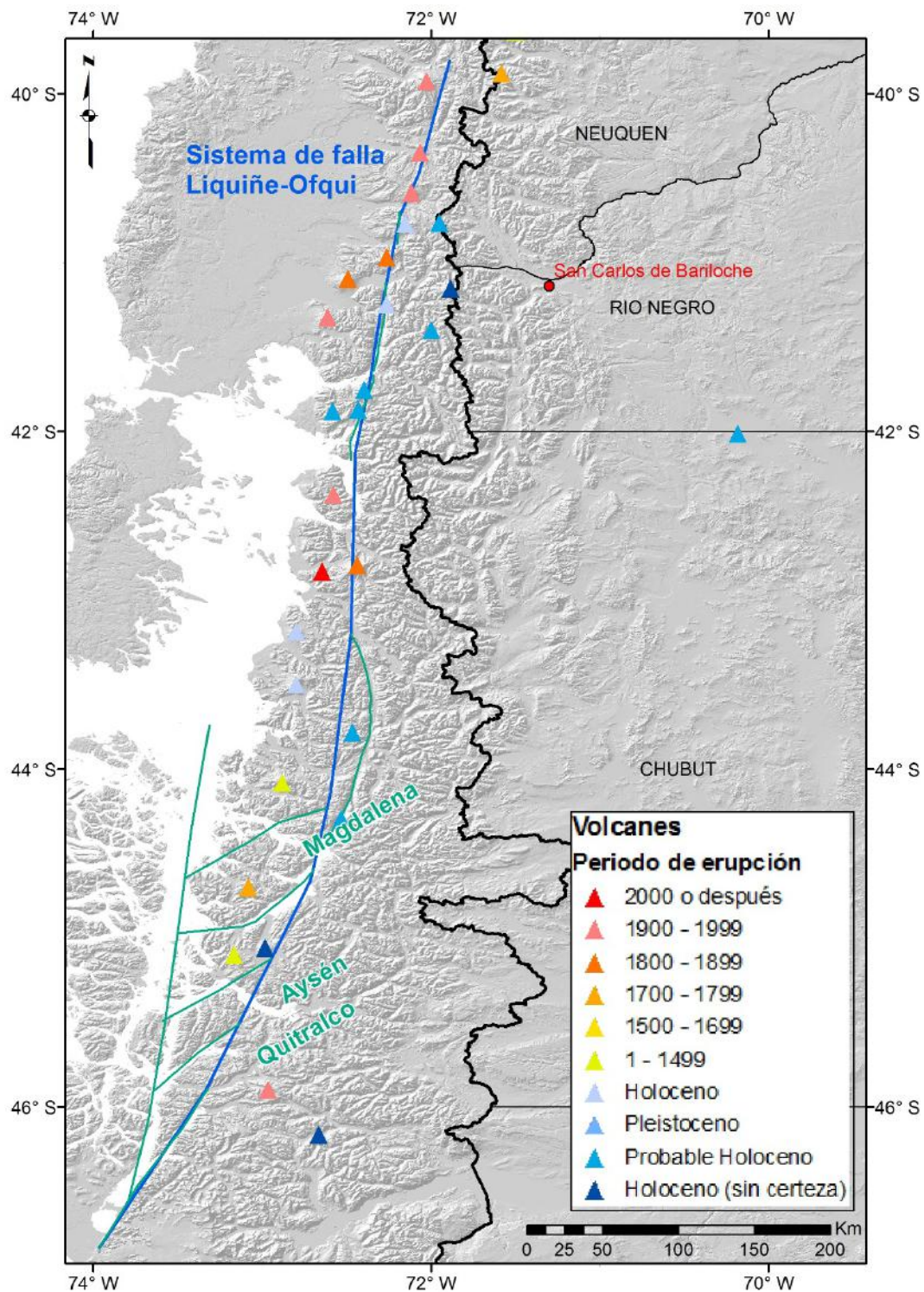


Figura 3-15

Sistema de falla Liquiñe – Ofqui (basado en los trabajos de Arancibia et al., 1999; Cembrano et al., 1996; Lavenu et al., 2000; Russo et al., 2011; Vargas et al., 2012)

Falla del Lago Fagnano

En la Patagonia la placa Suramericana tiene su fin, y una nueva placa tectónica entra a jugar un papel en la sismotectónica de esta parte sur del continente: la placa Scotia. La placa Scotia entra a manera de cuña en el espacio que queda entre las placas Suramericana y Antártica; el límite entre Scotia y Suramérica forma una falla transformante con rumbo Este-Oeste que se extiende desde el extremo occidental del estrecho de Magallanes hasta el borde oriental de la plataforma continental argentina.

Esta falla llamada falla del Lago Fagnano o falla de Magallanes presenta un movimiento sinistral de buzamiento subvertical con una tasa de desplazamiento de 6.6 mm/año (Lavenu et al., 2000; Torres-Carbonell et al., 2008).

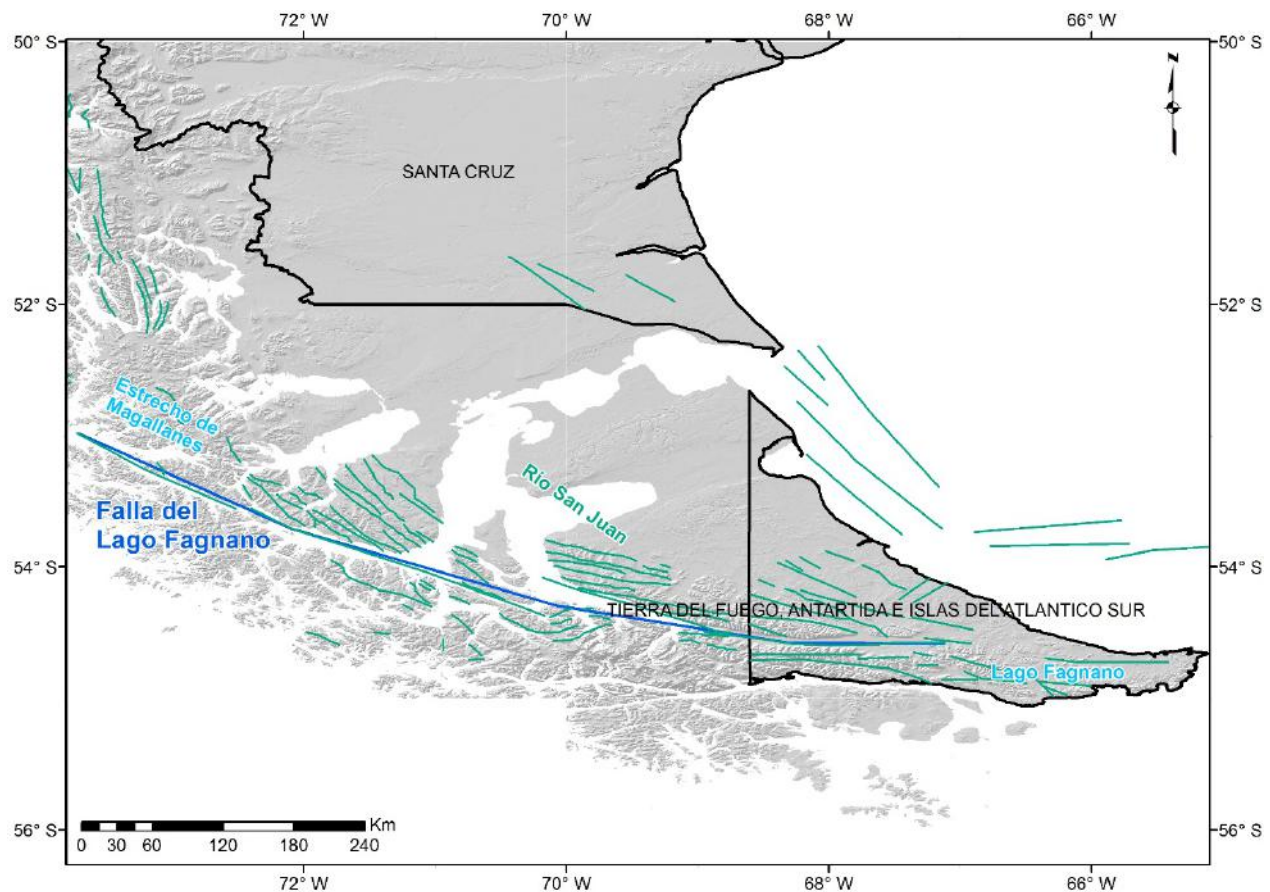


Figura 3-16

Falla del Lago Fagnano (basado en los trabajos de Lavenu et al., 2000; Torres-Carbonell et al., 2008)

3.3 Procedimiento de análisis

La Figura 3-17 presenta un diagrama de flujo con los principales elementos del modelo de amenaza sísmica aplicado. Los pasos principales de la metodología utilizada son los siguientes:

- (1) *Definición y caracterización de las fuentes sismogénicas principales:* a partir de la información geológica y neotectónica recolectada, así como estudios previos, se definen geométricamente las principales fuentes sismogénicas.
- (2) *Asignación de parámetros de sismicidad a las diferentes fuentes sísmicas:* con base en el catálogo sísmico histórico, y estudios previos realizados, se asignan los parámetros de sismicidad a cada fuente sismogénica identificada.
- (3) *Generación de un conjunto de eventos estocásticos compatible con la distribución de ubicación, profundidad, frecuencias y magnitudes:* a partir de toda la información anterior, se genera un conjunto de eventos sísmicos posibles por medio de un muestreo basado en división recursiva de la geometría de las fuentes, y asignación de parámetros de sismicidad a cada segmento de manera ponderada según su aporte de área en el área total. Para cada segmento se generan una serie de escenarios de diversas magnitudes, cuyas probabilidades de ocurrir se calculan a partir la curva de recurrencia de magnitudes específica de esa fuente.
- (4) *Modelo de atenuación de parámetros de movimiento del terreno:* con base en información recolectada, estudios previos y el estado del conocimiento actual acerca de las funciones de atenuación espectrales, se definen las funciones de atenuación apropiadas.
- (5) *Generación de mapas de amenaza de eventos representativos:* se generan los mapas de distribución espacial de intensidad sísmica, de acuerdo con sus valores máximos y espectrales.
- (6) *Aplicación del modelo de probabilista de amenaza sísmica:* obtención de mapas de amenaza sísmica para diferentes parámetros de intensidad. Los mapas se calculan para diferentes períodos de retorno de análisis.
- (7) *Parámetros de movimiento del terreno:* los parámetros de movimiento del terreno que mejor representan los daños eventuales en obras de infraestructura son los siguientes:
 - Aceleración máxima del terreno.
 - Aceleraciones espectrales para diferentes períodos estructurales de vibración.

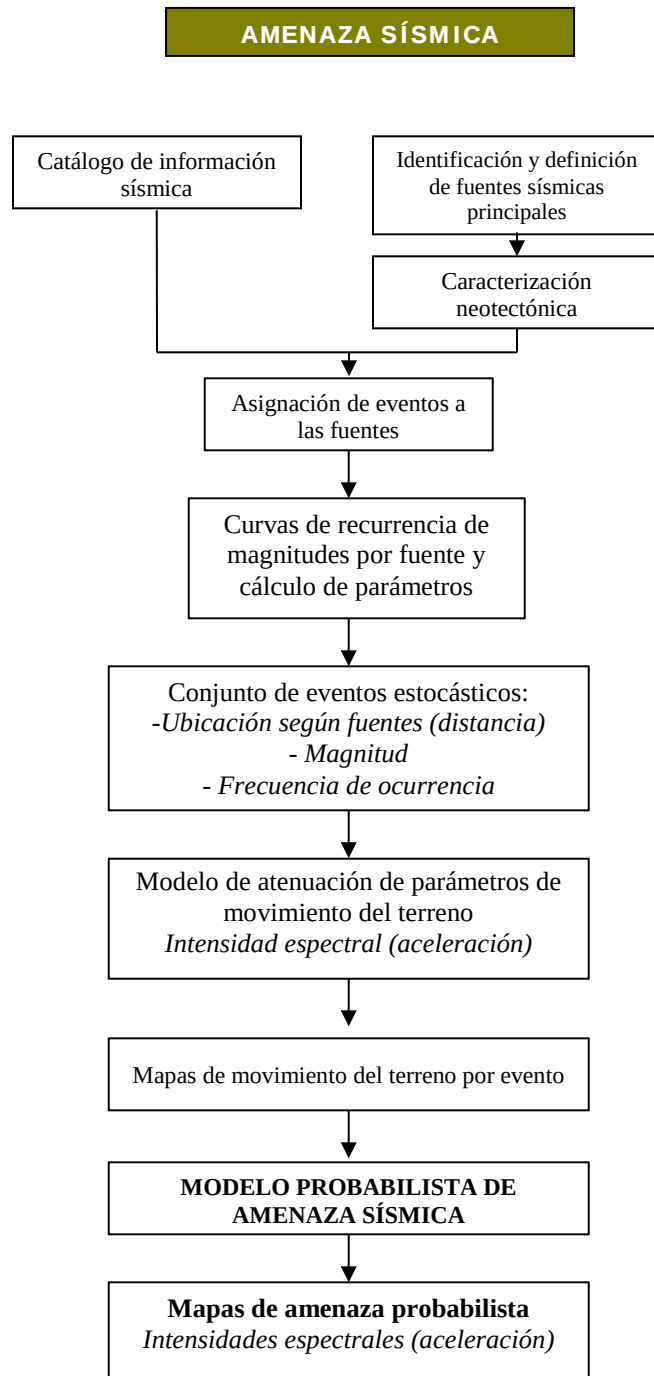


Figura 3-17
Diagrama de flujo del módulo de amenaza sísmica

3.3.1 Parámetros de sismicidad de las fuentes sismogénicas

La actividad de la i -ésima fuente sísmica se especifica en términos de la tasa de excedencia de las magnitudes, $\lambda_i(M)$, generadas por esta fuente. La tasa de excedencia de magnitudes mide qué tan frecuentemente se generan temblores con magnitud superior a una específica. En este estudio, para todas las fuentes sismogénicas, la función $\lambda_i(M)$ es una versión modificada de la relación de Gutenberg y Richter (1944). Así entonces, la sismicidad queda descrita de la siguiente manera (Cornell, 1968):

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_U}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_U}} \quad (\text{Ec. 3-1})$$

donde M_0 es la magnitud umbral. λ_0 , β y M_U son parámetros que definen la tasa de excedencia de cada una de las fuentes sismogénicas. Estos parámetros, diferentes para cada fuente, se estiman por medio de procedimientos estadísticos, en este caso, de máxima verosimilitud, que incluyen información sobre las regiones tectónicas del país, más información basada en criterio de expertos, especialmente sobre el valor de M_U , la máxima magnitud que se estima, puede generarse en cada fuente. La Figura 3-18 presenta a manera de ejemplo dos curvas de recurrencia para dos fuentes sismogénicas diferentes.

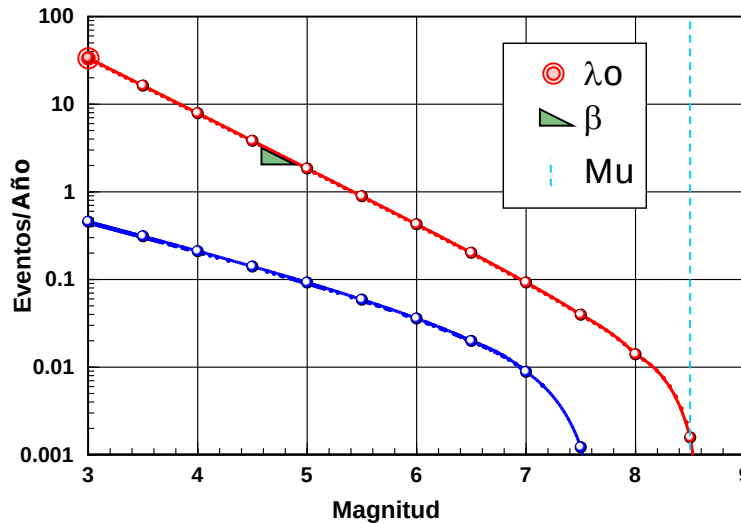


Figura 3-18
Tasas de excedencia de fuentes usando el modelo de sismicidad de Poisson

3.3.2 Atenuación de los parámetros de amenaza

Una vez determinada la tasa de actividad de cada una de las fuentes sismogénicas, es necesario evaluar los efectos que, en términos de intensidad sísmica, produce cada una de ellas en un sitio de interés. Para ello se requiere saber qué intensidad se presentaría en el sitio en cuestión, en el

presente caso a nivel del basamento rocoso, si en la i -ésima fuente sismogénica ocurriera un sismo con magnitud dada. A las expresiones que relacionan magnitud, posición relativa fuente-sitio (distancia) e intensidad sísmica se les conoce como *relaciones de atenuación*. Usualmente, la posición relativa fuente-sitio se especifica mediante la distancia focal, es decir, la distancia entre el foco sísmico y el sitio considerando así la profundidad del evento. Las relaciones de atenuación pueden adoptar formas muy diversas. En este caso se utilizan diversas leyes de atenuación dependiendo del tipo de sismo y además espectrales. Como se verá más adelante, se considera que las intensidades sísmicas relevantes son las ordenadas del espectro de respuesta $\mathbf{a}$, (pseudoaceleraciones, 5% del amortiguamiento crítico), cantidades que son aproximadamente proporcionales a las fuerzas laterales de inercia que se generan en las estructuras durante sismos.

La intensidad sísmica no está exenta de incertidumbre por lo que no puede considerarse como una variable determinista. Por esta razón, se supone que la intensidad sísmica $\mathbf{a}$ es una variable aleatoria con distribución lognormal con mediana dada por la ley de atenuación y desviación típica del logaritmo natural igual a σ_{lna} . Dentro de los análisis desarrollados se clasifican las fuentes sísmicas en dos grupos; fuentes intraplaca y fuentes de subducción. A cada uno de estos tipos de fuentes está asociada una relación de atenuación diferente.

Como se mencionó anteriormente, se utilizan relaciones de atenuación espectrales que toman en cuenta el hecho de que la atenuación es diferente para ondas de diferentes frecuencias, con lo cual es posible calcular el espectro de respuesta esperado dadas una magnitud y una distancia.

3.3.3 Cálculo de la amenaza sísmica

Una vez conocidas la sismicidad de cada una de las fuentes y los patrones de atenuación de las ondas generadas en cada una de ellas, puede calcularse la amenaza sísmica considerando la suma de los efectos de la totalidad de las fuentes sísmicas y la distancia entre cada fuente y el sitio donde se encuentran los elementos expuestos de interés. La amenaza, expresada en términos de las tasas de excedencia de intensidades $\mathbf{a}$, se calcula mediante la siguiente expresión (Ordaz, 2000):

$$\nu(\mathbf{a}) = \sum_{n=1}^N \int_{M_0}^{M_U} -\frac{\partial \lambda}{\partial M} \Pr(A > \mathbf{a} | M, R_i) dM \quad (\text{Ec. 3-2})$$

donde la sumatoria abarca la totalidad de las fuentes sismogénicas N , y $\Pr(A > \mathbf{a} | M, R_i)$ es la probabilidad de que la intensidad exceda un cierto valor, dadas la magnitud del sismo M , y la distancia entre la i -ésima fuente y el sitio R_i . Las funciones $\lambda_i(M)$ son las tasas de actividad década una de las fuentes sismogénicas. La integral se realiza desde M_0 hasta M_U , lo que indica que se toma en cuenta, para cada fuente sismogénica, la contribución de todas las magnitudes. En el presente estudio M_0 es igual para todas las fuentes mientras que M_U varía en cada caso.

Conviene hacer notar que la ecuación anterior sería exacta si las fuentes sismogénicas fueran puntos. Dado que en realidad son volúmenes los epicentros no sólo pueden ocurrir en los centros de las fuentes sino, con igual probabilidad, en cualquier punto dentro del volumen correspondiente. Se debe tomar en cuenta esta situación subdividiendo las fuentes sismogénicas en este caso en triángulos, en cuyo centro de gravedad se considera concentrada la sismicidad del

triángulo. La subdivisión se hace recursivamente hasta alcanzar un tamaño de triángulo suficientemente pequeño como para garantizar la precisión en la integración de la ecuación anterior.

En vista de que se supone que, dadas la magnitud y la distancia, la intensidad tiene distribución lognormal, la probabilidad $\Pr(A > a | M, R_i)$ se calcula de la siguiente manera (Ordaz, 2000):

$$\Pr(A > a | M, R_i) = \Phi \left(\frac{1}{\sigma_{Lna}} \ln \frac{\text{MED}(A | M, R_i)}{a} \right) \quad (\text{Ec. 3-3})$$

siendo $\phi()$ la distribución normal estándar, $\text{MED}(A | M, R_i)$ la mediana de la intensidad (dado por la ley de atenuación correspondiente) y σ_{Lna} su correspondiente desviación estándar.

Los cálculos de la amenaza sísmica se han realizado utilizando el programa de cálculo CRISIS 2014 V1.2 (Ordaz et al., 2014) que permite la obtención de los resultados de amenaza sísmica en manera compatible con la Plataforma CAPRA, es decir en términos de un conjunto de escenarios estocásticos para la posterior evaluación probabilista de riesgo sísmico.

3.4 Información empleada en la modelación

3.4.1 Catálogo sísmico

Para la realización del este estudio se contó con los catálogos del USGS (United States Geological Survey) y del ISC-GEM (International Seismological Centre-Global Earthquake Model). Ambos catálogos fueron examinados, realizando las debidas revisiones para determinar la calidad y completitud de la información contenida en cada uno de ellos.

Una vez se realizó el proceso de unión de los catálogos se realizó un análisis de completitud de los eventos para diferentes valores umbral de magnitud. Para esto, se ha seguido el procedimiento propuesto por Tinti y Mulargia (1985) en el cual anualmente se acumulan de manera gráfica el número de eventos que igualan o exceden la magnitud umbral y así entonces, determinar el año a partir del cual la pendiente de la curva se mantiene constante. Se dice entonces que el catálogo está completo para la magnitud M_0 a partir del año encontrado, y son los eventos dentro de esta ventana de tiempo los que se consideran para el proceso de caracterización y parametrización de las fuentes sismogénicas.

El catálogo utilizado para este estudio consta de eventos registrados dentro del territorio nacional pero también considerando aquellos ocurridos en el Océano Pacífico y en países fronterizos como Chile y Bolivia, entre 77°O y 51.5°O de longitud y 58.5°S y 14°S de latitud. Tras haber seleccionado una magnitud umbral (M_0) de 4.5, haber eliminado réplicas y haber realizado en análisis de completitud, el catálogo resultante consta de 8,156 eventos que abarcan el período de tiempo entre el 01/01/1973 y el 31/12/2013. En los registros del catálogo se ha encontrado una máxima de $M_w=8.8$.

La Figura 3-19 muestra el análisis de completitud realizado para la magnitud umbral (M_0) de 4.5. Como se puede ver, la curva tiene una pendiente aproximadamente constante desde el inicio, lo que indica que el catálogo de eventos para dicha magnitud umbral está completo a partir del año 1973. Adicionalmente, la Figura 1-20 muestra los eventos presentes en el catálogo sísmico utilizado.

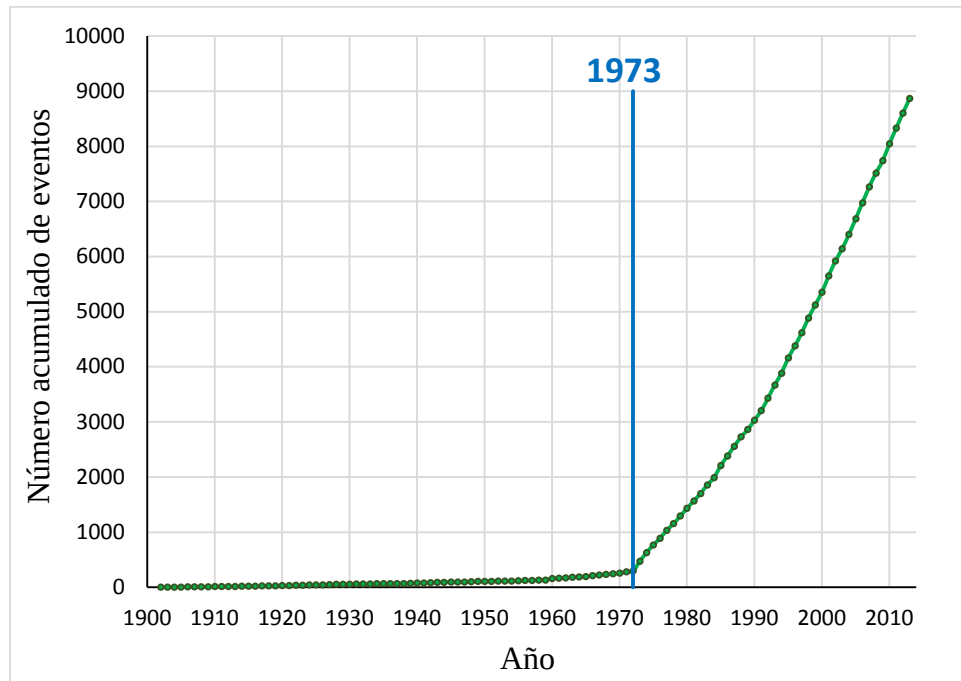


Figura 3-19
Análisis de completitud para $M_0=4.5$

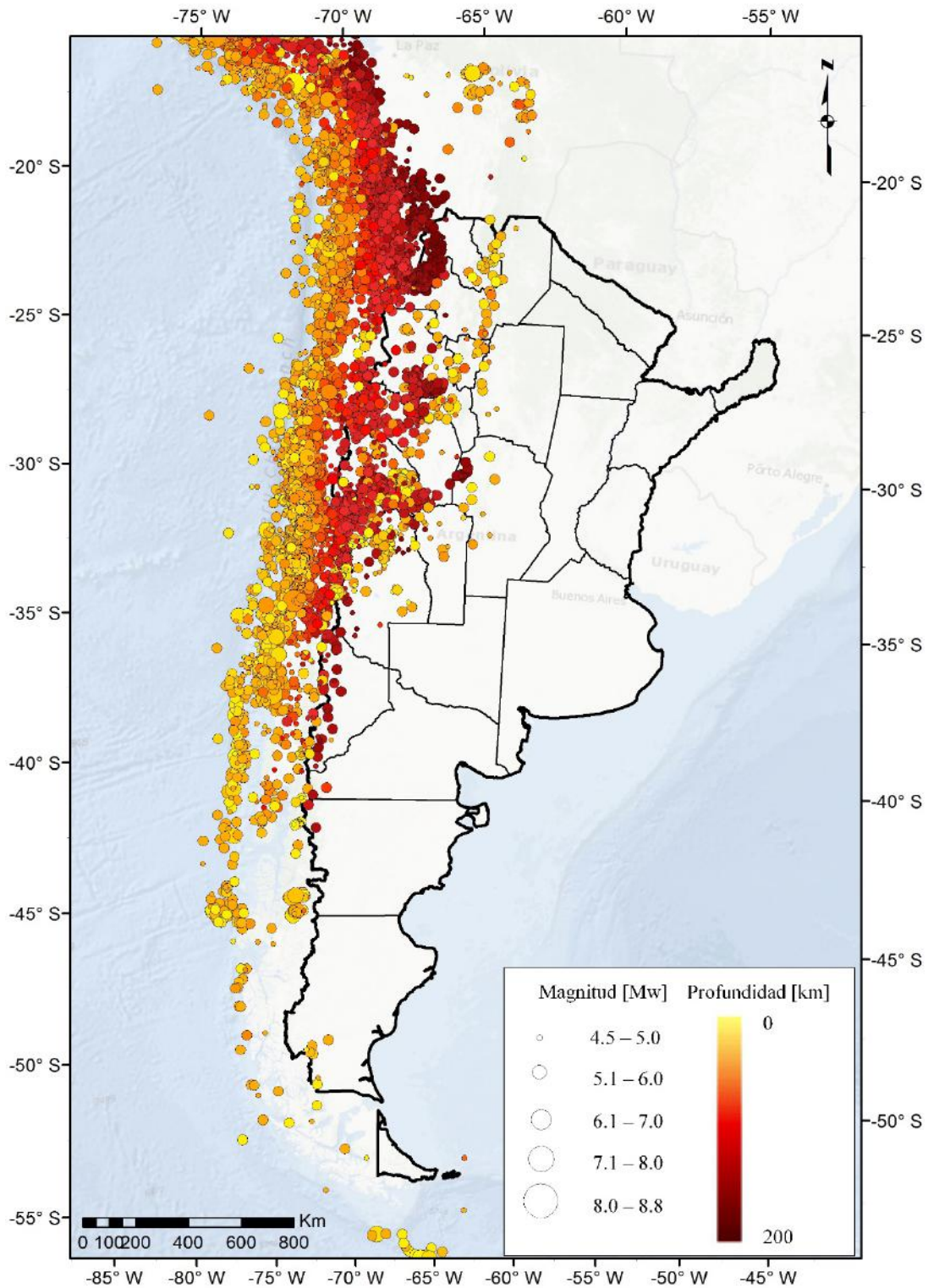
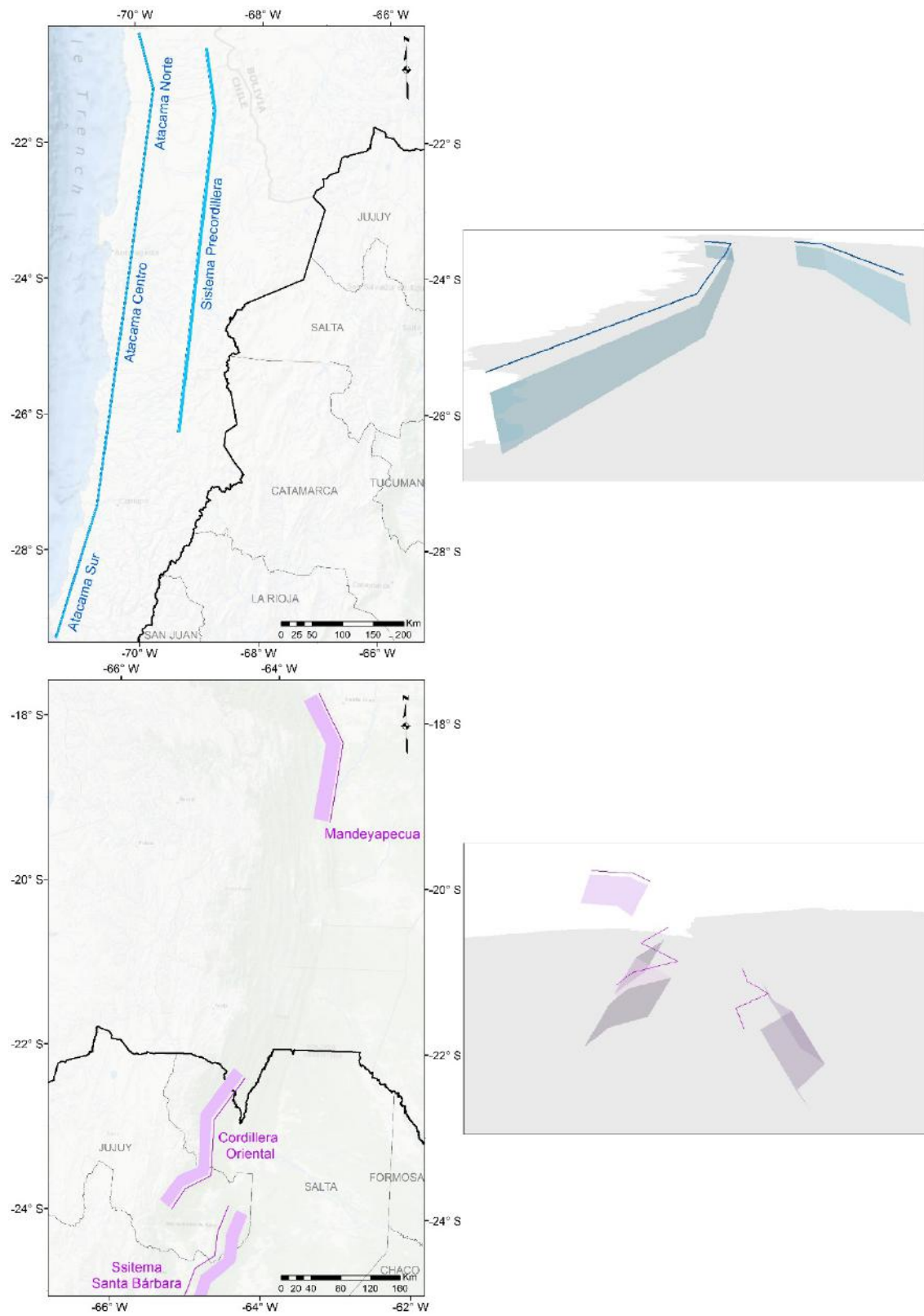


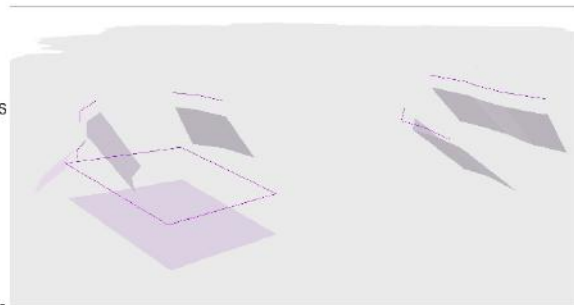
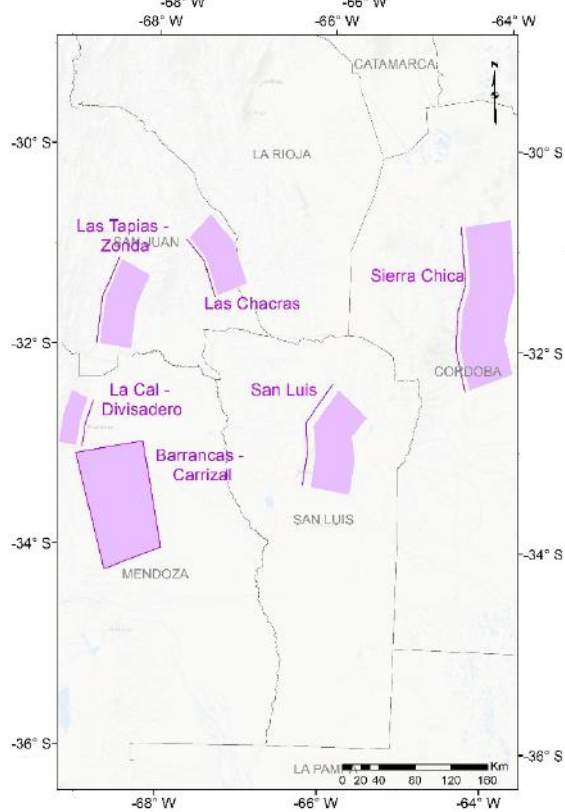
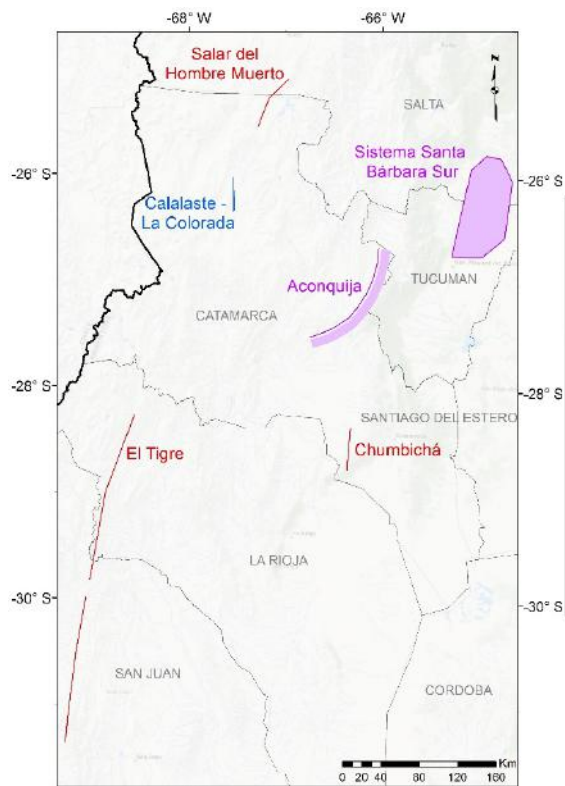
Figura 3-20
Catálogo sísmico (USGS, 2014; ISC-GEM, 2014)

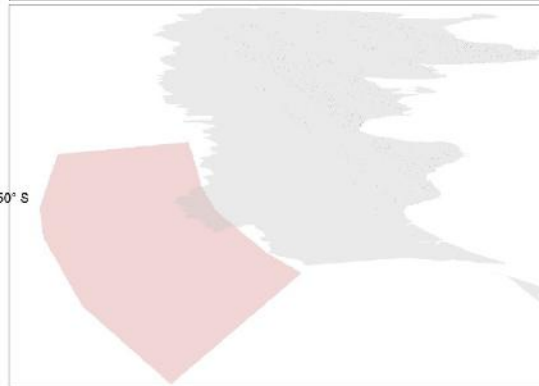
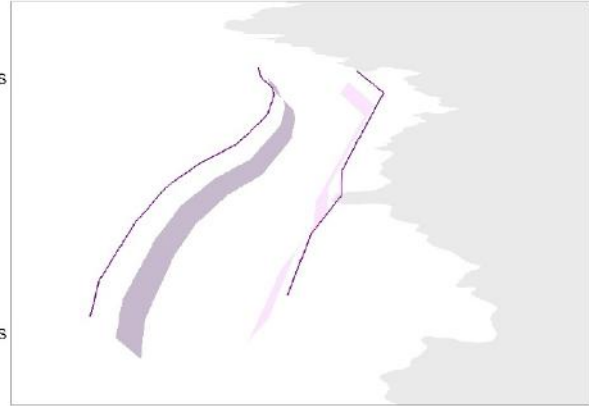
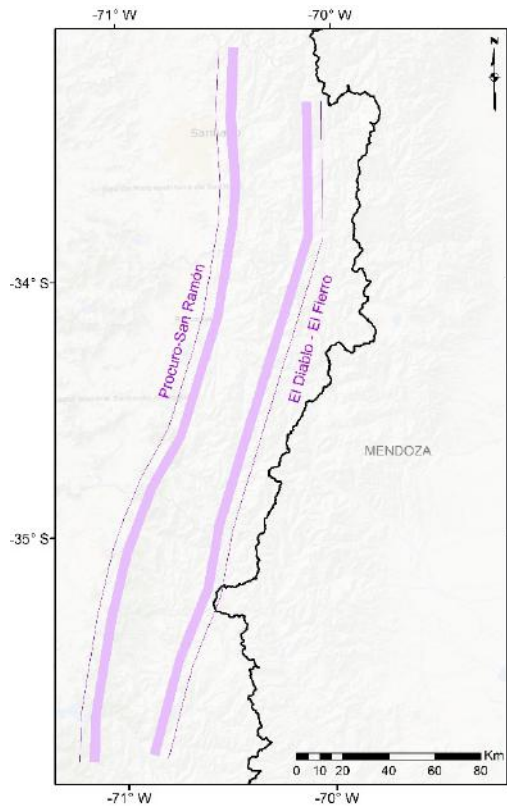
3.4.2 Fuentes sismogénicas modeladas

El modelo de cálculo de la amenaza sísmica se basa en la información de fuentes sismogénicas a nivel nacional. Para la construcción del modelo se revisaron primero los estudios y modelos de amenaza realizados previamente para Argentina, de forma que se tuviera un mejor entendimiento de la sismotectónica regional y conocimiento acerca de los estudios previos realizados.

La Figura 1-21 muestra la geometría de las fuentes superficiales mientras que la Figura 1-22 muestra la geometría utilizada para la subducción.







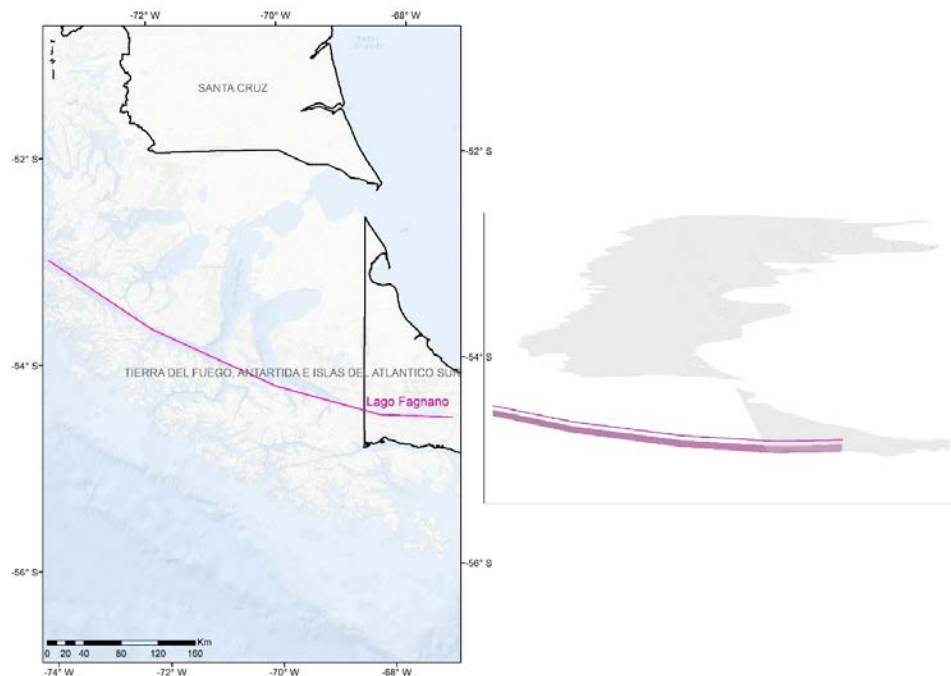


Figura 3-21
Fuentes superficiales consideradas en el modelo

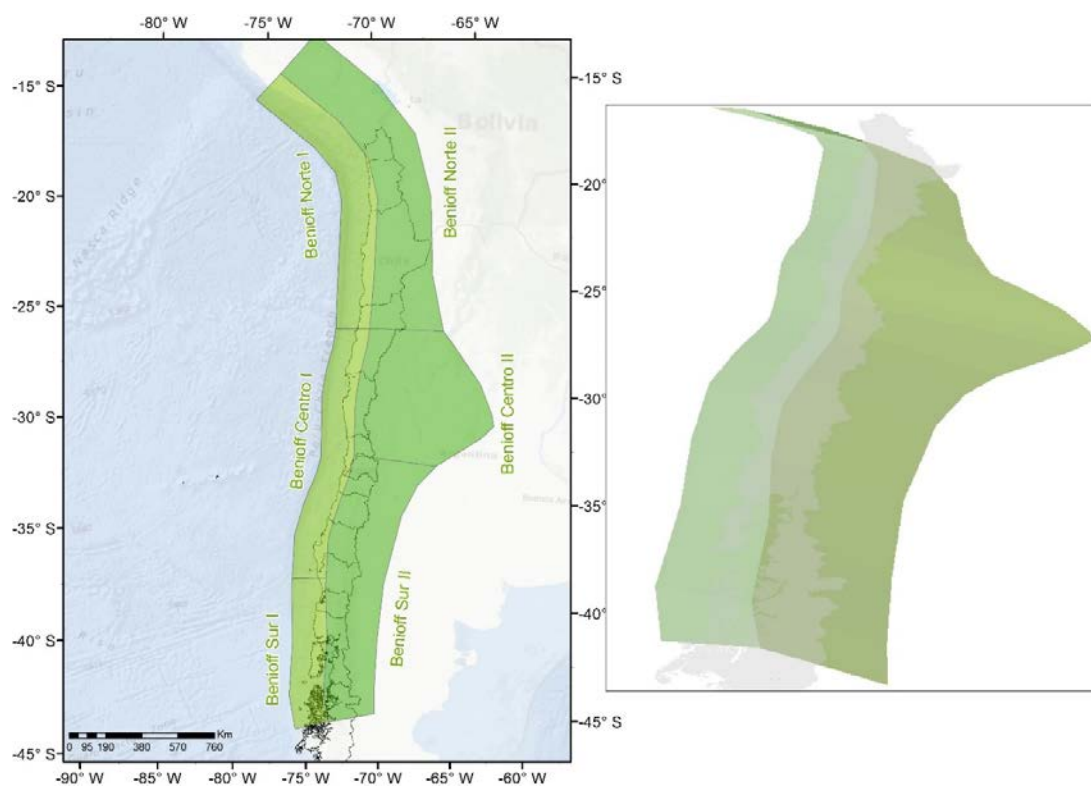


Figura 3-22
Fuentes profundas consideradas en el modelo

A continuación se describen cada una de las fuentes utilizadas en el modelo de amenaza sísmica del presente proyecto.

1 Atacama (Norte)

Como se mencionó anteriormente, el sistema de Atacama se puede dividir en tres grandes segmentos (El Salado, Paposo y Salar del Carmen); para la modelación se decidió dividir esta fuente en tres segmentos según el catálogo sísmico y que corresponden cercanamente a la definición de estos tres segmentos. Esta fuente corresponde al segmento norte de la fuente, desde Iquique (20.3°S) hasta los 22.4°S. Se ha modelado como un plano con ángulo de buzamiento de 80° hacia el Este y un rango de profundidades entre 5 km y 40 km. $M_U = 7.0$ (Silva, 2008).

2 Atacama (Centro)

Esta fuente corresponde al segmento central de la fuente Atacama, desde los 22.4°S hasta los 25.3°S; al igual que el segmento norte, esta fuente tiene un ángulo de buzamiento de 80° hacia el Este y un rango de profundidades entre 5 km y 40 km. $M_U = 7.0$ según el estudio de Silva (2008) para fuentes corticales en general, dada la ausencia de este dato para esta fuente en específico.

3 Atacama (Sur)

Esta fuente corresponde al segmento sur de la fuente Atacama, desde los 25.3°S hasta los 29.3°S; al igual que el segmento norte y centro, esta fuente tiene un ángulo de buzamiento de 80° hacia el Este y un rango de profundidades entre 5 km y 30 km. $M_U = 7.0$ (Silva, 2008).

4 Precordillera

Esta fuente recorre el borde occidental de la Cordillera Domeyko desde los 20.6°S hasta los 26.3°S. Se ha modelado como un plano con buzamiento de 80° hacia el Este entre los 5 km y 50 km de profundidad. $M_U = 7.0$ según el estudio de Silva (2008) para fuentes corticales en general, dada la ausencia de este dato para esta fuente en específico.

5 Mandeyapecua

Esta fuente, junto con la fuente Cordillera Oriental, representan parte del cinturón de cabalgamiento Andino del este del Altiplano; estas fuentes se han modelado separadas dado que el catálogo sísmico presenta actividad únicamente en estos dos lugares y por lo tanto no cabía una modelación de una fuente única que recorra todo el borde oriental del Altiplano desde Bolivia hasta la Argentina. La fuente Mandeyapecua se modeló entonces como un plano inclinado hacia el oeste con un ángulo de 60° y profundidades entre 5 km y 40 km, y un $M_U = 7.2$ según la longitud del trazo más largo según el diagrama de Costa et al. (2000) y utilizando la relación de Wells y Coppersmith (1994).

6 Cordillera Oriental

Como se mencionó anteriormente, esta fuente representa parte del cinturón de cabalgamiento que se encuentra en el extremo norte de la Argentina. Se ha modelado como un plano inclinado a 60° hacia el oeste con profundidades entre 10 km y 35 km (Pingel et al., 2013; Masaferró et al., 2003; DeCelles et al., 2011; Carrapa et al., 2005). $M_U = 7.0$ según la longitud del trazo más largo según un diagrama de Pingel et al. (2013) y utilizando la relación de Wells y Coppersmith (1994).

7 Sistema Santa Bárbara

Como se discutió anteriormente, a pesar de tener fallas con vergencias opuestas, la vergencia predominante es hacia el oeste, por lo cual se ha modelado como un plano con buzamiento de 60° hacia el este con profundidades entre 10 km y 40 km (Pingel et al., 2013; Dakeen et al., 2006; Kley y Monaldi, 1999). $M_U = 6.9$ según la longitud máxima de la traza según un diagrama de Pingel et al. (2013) y utilizando la relación de Wells y Coppersmith (1994).

8 Sistema Santa Bárbara Sur

Este sistema cuenta con fallas de vergencia distinta, donde ninguna predomina; por esta razón se ha modelado como una fuente *background*, es decir, como una fuente generalizada de sismicidad. Esto se hizo debido a las diferencias en las vergencias y características de las numerosas fallas que componen el sistema. Por lo tanto se modeló como un plano horizontal a una profundidad de 34.4 km (profundidad promedio de los sismos asociados). $M_U = 7.0$ según la longitud de la traza mayor según un diagrama de Pingel et al. (2013) y utilizando la relación de Wells y Coppersmith (1994).

9 Aconquija

Se ha modelado como un plano con buzamiento de 75° y con profundidades entre los 5 km y los 45 km (Iaffa et al., 2013; Jordan y Allmendinger, 1986; Ramos et al., 2001). $M_U = 7.1$ según la longitud máxima de la traza según un diagrama de Pingel et al. (2013) y utilizando la relación de Wells y Coppersmith (1994).

10 El Tigre (Norte)

Como se mencionó anteriormente, el sistema El Tigre se puede dividir en tres segmentos; para esta modelación se han incluido los segmentos norte y centro al tener una sismicidad asociada más clara. Esta fuente corresponde al segmento norte que se extiende desde los 28.3°S hasta los 29.8°S , y se ha modelado como un plano con un ángulo de buzamiento de 75° hacia el Este comenzando a 5 km de profundidad y hasta 40 km de profundidad. Se le ha asignado un valor de M_U de $M_W=7.1$ según el valor reportado por Fazzito (2011).

11 El Tigre (Sur)

Esta fuente corresponde al segmento central del sistema El Tigre que se extiende entre los 30°S hasta los 31.4°S, que en este caso se ha renombrado como segmento sur al haber incluido únicamente dos segmentos en el modelo. Se ha modelado, al igual que el segmento norte, como un plano con buzamiento hacia el Este de 75°, y entre 5 km y 40 km de profundidad. Se le ha asignado el mismo valor de M_U que para el segmento norte.

12 Procuero – San Ramón (Norte)

El sistema Procuero – San se extiende desde los 33.1°S hasta los 35.9°S. Se ha modelado como un plano con ángulo de buzamiento de 50° hacia el Este en un rango de profundidades entre 5 km y 40 km. Se le ha asignado un valor de M_U de $M_W=7.3$ según el estudio realizado por SEREMI (2011).

13 El Diablo – El Fierro (Norte)

El sistema El Diablo – El Fierro se ha dividido en dos segmentos de la misma forma que se hizo con el sistema Procuero – San Ramón; según la sismicidad del área se dividió este sistema a la altura de los 34.6°S. Esta fuente corresponde al segmento norte, el cual se ha modelado como un plano con buzamiento de 50° hacia el Oeste con profundidades que varían entre los 5 km y los 40 km. Se le ha asignado un valor de M_U igual a $M_W=7.3$ según el valor reportado por SEREMI (2011).

14 El Diablo – El Fierro (Sur)

Esta fuente corresponde al segmento sur (hasta los 35.8°S) del sistema, y al igual que el segmento norte, se ha modelado como un plano con 50° de buzamiento hacia el Oeste, con profundidad entre 5 km y 40 km. Se le ha asignado el mismo valor de M_U que para el segmento norte.

15 Liquiñe – Ofqui (Norte)

El sistema Liquiñe – Ofqui se ha dividido en tres segmentos, nuevamente según la sismicidad de la zona. Esta fuente corresponde al segmento norte que se extiende desde Liquiñe (39.8°S) hasta los 41.7°S, el cual se ha modelado como un plano con buzamiento de 80° hacia el Este desde los 5 km de profundidad hasta 10 km de profundidad. Se le ha asignado un valor de M_U igual a $M_W=7.1$ según el estudio de Vargas et al. (2012).

16 Liquiñe – Ofqui (Centro)

Esta fuente corresponde al segmento centro del sistema, que se extiende desde los 41.7°S hasta los 44.1°S. Al igual que el segmento norte, se ha modelado de la misma manera que el segmento norte: como un plano con buzamiento de 80° hacia el este entre 5-20 km de profundidad. Se le ha asignado el mismo de valor de M_U que para el segmento norte ($M_W=7.1$).

17 Liquiñe – Ofqui (Sur)

Esta fuente corresponde al segmento sur del sistema, que se extiende desde los 44.1°S hasta el istmo de Ofqui (44.1°S). Al igual que los otros dos segmentos, se ha modelado de la misma manera que los segmentos norte y central: como un plano con buzamiento de 80° hacia el este entre 5-20 km de profundidad. Se le ha asignado el mismo valor de M_U que para el segmento norte ($M_W=7.1$).

18 Lago Fagnano

Esta fuente que se extiende desde el extremo oeste del estrecho de Magallanes hasta el extremo este del Lago Fagnano en Tierra del Fuego (Argentina), se ha modelado como un plano inclinado hacia el suroeste con un ángulo de buzamiento de 80°, con profundidad entre 6 km y 15 km. $M_U=7.1$ Silva (2008).

19 Salar del hombre muerto

Esta fuente se ha modelado como un plano vertical desde los 5 km de profundidad hasta los 60 km. $M_U=7.0$ según el estudio de Silva (2008) para fuentes corticales en general, dada la ausencia de este dato para esta fuente en específico.

20 Calalaste – La Colorada

Esta fuente se ha modelado como un plano vertical con un rango de profundidades entre 5 km y 60 km. $M_U=7.0$ según el estudio de Silva (2008) para fuentes corticales en general, dada la ausencia de este dato para esta fuente en específico.

21 Chumbicha

Esta fuente se ha modelado como un plano vertical entre los 20 km y 60 km de profundidad. $M_U=7.0$ según el estudio de Silva (2008) para fuentes corticales en general, dada la ausencia de este dato para esta fuente en específico.

22 Sierra Chica

Esta fuente se ha modelado como un plano inclinado hacia el este con un buzamiento de 45° entre los 15 km y los 60 km de profundidad. $M_U=7.0$ (valor máximo del estudio de Costa (2004)).

23 San Luis

Se ha modelado como un plano con buzamiento de 37° hacia el este y con profundidades entre los 7 km y los 40 km (Costa et al., 2000). $M_U = 7.0$ según la longitud de la traza mayor según un Costa et al. (2000) y utilizando la relación de Wells y Coppersmith (1994).

24 Las Chacras

Esta fuente se ha modelado como un plano inclinado hacia el noreste con un ángulo de 58° con un rango de profundidades entre los 15 km y los 60 km. $M_U = 7.1$ (Perucca & Vargas, 2014).

25 Las Tapias – Zonda

Esta fuente se ha modelado según las características de la falla Villicum-Zonda al ser la principal: como un plano inclinado hacia el este con un buzamiento de 50° entre los 5 km y los 60 km, con un $M_U = 7.6$ (Perucca & Vargas, 2014).

26 Cerro la Cal - Divisadero

Esta fuente se ha modelado como un plano inclinado hacia el oeste con un ángulo de 37.5° entre 5 km y 20 km de profundidad. $M_U = 6.9$ (Salomon et al., 2013).

27 Barrancas – Carrizal

Se ha modelado como una fuente *background*, es decir, como una fuente generalizada. Esto se hizo debido a la escasa caracterización existente para este grupo de pliegues y fallas que componen el sistema. Por lo tanto se modeló como un plano horizontal a una profundidad de 22.2 km (profundidad promedio de los sismos asociados). $M_U = 6.9$ según la longitud de la traza mayor según Costa et al. (2000) y utilizando la relación de Wells y Coppersmith (1994).

28 Antártica

Esta fuente también se ha modelado como un plano horizontal debido a que la convergencia entre las placas de Antártica y Suramérica no generan una zona de subducción, pero existe un área de sismicidad superficial que es lo que esta fuente recoge. La fuente se modeló a una profundidad de 30.7 km, que corresponde a la profundidad promedio de los sismos asociados a esta fuente. $M_U = 7.0$ según el estudio de Silva (2008) para fuentes superficiales en general, dada la ausencia de este dato para esta fuente en específico.

29 Benioff Norte I

La subducción se ha dividido en subducción interplaca (superficial) e intraplaca (profunda), y dentro de cada zona se subdividió en zonas Norte, Centro y Sur según la sismicidad y los ángulos de buzamiento, resultando en un total de seis fuentes de subducción. A las tres fuentes de subducción interplaca se les asignó un $M_U = 8.8$ mientras que a las tres fuentes de subducción intraplaca se les asignó un $M_U = 8.0$ según los estudios de Leyton et al. (2010), Silva (2008) y

SERNAGEOMIN (2011). Para determinar la geometría de estas fuentes se utilizó los trabajos de Núñez (2014), Armijo et al., 2010 y CSN (s.f).

La fuente Benioff Norte I corresponde a la subducción interplaca en la zona norte del país. Se ha modelado como un plano inclinado hacia el Este con un ángulo de buzamiento de 16.25° entre 5 km y 60 km de profundidad.

30 Benioff Norte II

Esta fuente corresponde a la subducción intraplaca en la zona norte. Se ha modelado como un plano inclinado hacia el Este con un ángulo de buzamiento de 26.65° entre 60 km y 200 km de profundidad.

31 Benioff Centro I

Esta fuente corresponde a la subducción interplaca en la zona centro. Se ha modelado como un plano inclinado hacia el Este con un ángulo de buzamiento de 17.23° entre 5 km y 60 km de profundidad.

32 Benioff Centro II

Esta fuente corresponde a la subducción intraplaca en la zona centro. Se ha modelado como un plano inclinado hacia el Este cuyo ángulo de buzamiento varía entre X° y 10.9° en su punto más superficial

33 Benioff Sur I

Esta fuente corresponde a la subducción interplaca en la zona sur. Se ha modelado como un plano inclinado hacia el Este con un ángulo de buzamiento de 17.33° entre 5 km y 60 km de profundidad.

34 Benioff Sur II

Esta fuente corresponde a la subducción intraplaca en la zona sur. Se ha modelado como un plano inclinado hacia el Este con un ángulo de buzamiento de 26.6° entre 60 km y 200 km de profundidad.

3.4.3 Parametrización de las fuentes sismogénicas

Cada una de las fuentes sismogénicas se caracteriza mediante una serie de parámetros de sismicidad los cuales se determinan con base en la información sísmica disponible tal y como se mencionó anteriormente. Estos parámetros son los siguientes:

- Tasa de recurrencia de sismos para la magnitud umbral: corresponde al número promedio de eventos por año de sismos con magnitud mayor que 4.0 que ocurren en una determinada fuente. Se determina mediante el parámetro λ_0 .
- Recurrencia de magnitudes: se identifica mediante el parámetro β que representa la pendiente promedio de la curva de recurrencia de magnitudes (curva de número de eventos con magnitud mayor que M , versus magnitud sísmica M) en la zona de magnitudes bajas.
- Magnitud máxima (M_U): se estima con base en la máxima longitud de ruptura posible de cada una de las fuentes, otras características morfotectónicas y criterio de expertos.

Utilizando el catálogo sísmico descrito anteriormente se calcularon los parámetros λ_0 , β y $CV(\beta)$. Los valores de magnitud máxima (M_U) fueron obtenidos de una variedad de estudios como se menciona en la sección anterior.

Dado que existe una alta incertidumbre en la determinación de este parámetro, este no se determina a partir de un valor fijo sino que se trata como una variable aleatoria que sigue una distribución normal la cual se determina a partir de su valor esperado y la desviación estándar y se trunca a dos valores como se muestra en la Figura 3-23.

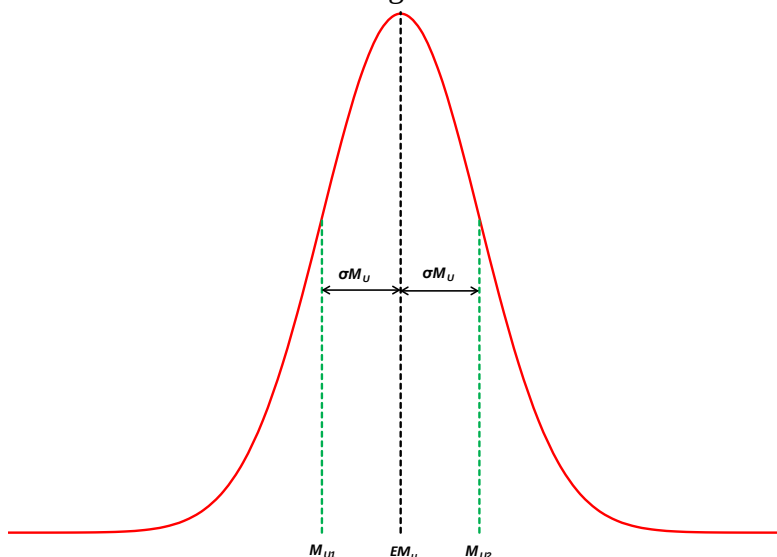


Figura 3-23
Distribución normal para establecer la magnitud máxima

Una vez se asignan los eventos a cada una de las fuentes sísmicas se procede a su parametrización para calcular los parámetros λ_0 y β . Para cada una de las fuentes se calculan los parámetros a partir del método de máxima verosimilitud (McGuire, 2004) el cual ha demostrado reflejar con una mayor calidad el valor de ambos parámetros si se compara con el método de regresiones lineales. Para realizar la parametrización de las fuentes se determina una magnitud umbral (M_0) igual a 4.5 por varias razones, entre ellas la de la eliminación automática de un gran porcentaje de las réplicas, la alta sismicidad de la zona y porque eventos con magnitud inferior a esta no generan daños considerables en la infraestructura bajo análisis en el presente proyecto.

El parámetro λ_0 describe la actividad de la falla en una escala de tiempo determinada que para fines de este estudio se definió en años. El valor de este parámetro es igual a la tasa de actividad anual de la falla calculada a partir del número de eventos con magnitud mayor o igual a la umbral (N) dividido entre la ventana de tiempo en el cual fueron observados (t).

$$\lambda_0 = \frac{N}{t} \quad (\text{Ec. 3-4})$$

La ventana de tiempo t para este caso consistió en el número de años a partir del cual el catálogo puede considerarse como completo que como se vio corresponde al año 1973. El parámetro β describe la pendiente de la regresión logarítmica siguiendo la definición de la ecuación de regresión de magnitudes establecida por Gutenberg y Richter (1944) que tiene la forma:

$$N(m) = e^{(\lambda - \beta m)} \quad (\text{Ec. 3-5})$$

y se calcula como:

$$\beta = \frac{N}{\sum_{i=1}^N (M - M_0)} \quad (\text{Ec. 3-6})$$

donde N es el número de eventos con magnitud mayor o igual a la umbral (M_0) entre la sumatoria de la diferencia entre la magnitud de los eventos (M) y la magnitud umbral. Este parámetro muestra la capacidad que tiene una fuente sísmica de generar eventos de grandes magnitudes, la cual aumenta conforme este parámetro toma valores menores. Adicionalmente, al parámetro β se le calcula su coeficiente de variación (CV) a partir de la división que hay de la media entre la desviación estándar para dar un manejo apropiado a este parámetro.

$$CV = \frac{1}{\sqrt{N-1}} \quad (\text{Ec. 3-7})$$

En el cálculo de la amenaza sísmica y debido a la incertidumbre asociada a la determinación del valor de la magnitud última esperada en cada fuente, es posible describir una distribución normal de probabilidad a partir de un valor esperado y un valor de desviación estándar. La Tabla 2-1 presenta los parámetros utilizados para cada una de las fuentes.

Tabla 3-1
Parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas consideradas

Fuentes		Parámetros					
No.	Nombre	# eventos	λ_0	β	cv (β)	Mu (Mw)	σ(Mu)
1	Atacama N	18	0.44	1.45	0.24	7.0	0.1
2	Atacama C	29	0.71	1.16	0.19	7.0	0.1
3	Atacama S	27	0.66	1.09	0.20	7.7	0.1
4	Precordillera	31	0.76	1.58	0.18	7.0	0.1
5	Mandeyapequa	15	0.366	1.58	0.27	7.2	0.1
6	Cordillera Oriental	21	0.512	1.56	0.22	7.0	0.1
7	Sistema Santa Bárbara	11	0.268	1.16	0.32	6.9	0.1
8	Sistema Santa Bárbara Su	10	0.244	1.56	0.33	7.0	0.1
9	Aconquija	10	0.24	1.43	0.33	7.1	0.1
10	El Tigre N	9	0.22	1.73	0.35	7.1	0.1
11	El Tigre S	18	0.44	2.25	0.24	7.1	0.1
12	Procuero-San Ramón	11	0.27	2.50	0.32	7.3	0.1
13	El Diablo-El Fierro N	45	1.10	2.22	0.15	7.3	0.1
14	El Diablo-El Fierro S	16	0.39	1.82	0.26	7.3	0.1
15	Liquiñe-Ofqui N	20	0.49	1.61	0.23	7.1	0.1
16	Liquiñe-Ofqui C	19	0.46	1.74	0.24	7.1	0.1
17	Liquiñe-Ofqui S	29	0.71	1.28	0.19	7.1	0.1
18	Lago Fagnano	6	0.15	1.67	0.45	7.1	0.1
19	Salar de hombre muerto	6	0.15	1.62	0.45	7.0	0.1
20	Calalaste-la Colorada	8	0.20	1.21	0.38	7.0	0.1
21	Chumbicha	14	0.34	1.26	0.28	7.0	0.1
22	Sierra Chica	8	0.20	1.82	0.38	7.0	0.1
23	San Luis	10	0.24	1.56	0.33	7.0	0.1
24	Las Chacras	76	1.85	1.30	0.12	7.1	0.1
25	Las Tapias-Zonda	24	0.59	1.90	0.21	7.6	0.1
26	La Cal - Divisadero	20	0.49	2.70	0.23	6.9	0.1
27	Barrancas-Carrizal	44	1.073	2.22	0.15	6.9	0.1
28	Antártica	33	0.80	1.40	0.18	7.0	0.1
29	Benioff Norte I	771	18.80	1.32	0.04	8.8	0.1
30	Benioff Norte II	3230	78.78	1.66	0.02	8.0	0.1
31	Benioff Centro I	1947	47.49	1.70	0.02	8.8	0.1
32	Benioff Centro II	1163	28.37	1.84	0.03	8.0	0.1
33	Benioff Sur I	163	3.98	1.23	0.08	8.8	0.1
34	Benioff Sur II	294	7.17	1.88	0.06	8.0	0.1

3.4.4 Relaciones de atenuación de movimiento fuerte

Las relaciones de atenuación de movimiento fuerte, conocidas también como Ground Motion Prediction Equations (GMPE) son funciones que determinan la intensidad esperada, en este caso aceleración espectral, en un determinado lugar dependiendo de la distancia al foco del evento y la magnitud del mismo. Como se ha mencionado, estas relaciones son espectrales, lo que quiere decir que también dependen del período ya que diferentes frecuencias atenúan de manera diferente.

Se han seleccionado las leyes de atenuación propuestas por Sadigh et al. (1997) y Zhao et al. (2006) que dan cuenta de las características del movimiento en roca. Estas relaciones de atenuación han sido asignadas a fuentes superficiales y de subducción respectivamente.

Las Figura 3-24 a Figura 3-26 muestran los valores de atenuación para diferentes mecanismos, magnitudes y ordenadas espectrales de manera ilustrativa (Sadigh et al. 1997 strike-slip: rojo, Sadigh et al. 1997 reverse: amarillo, Zhao et al. 2006 interface: naranja y Zhao et al. 2006 intraslab: verde).

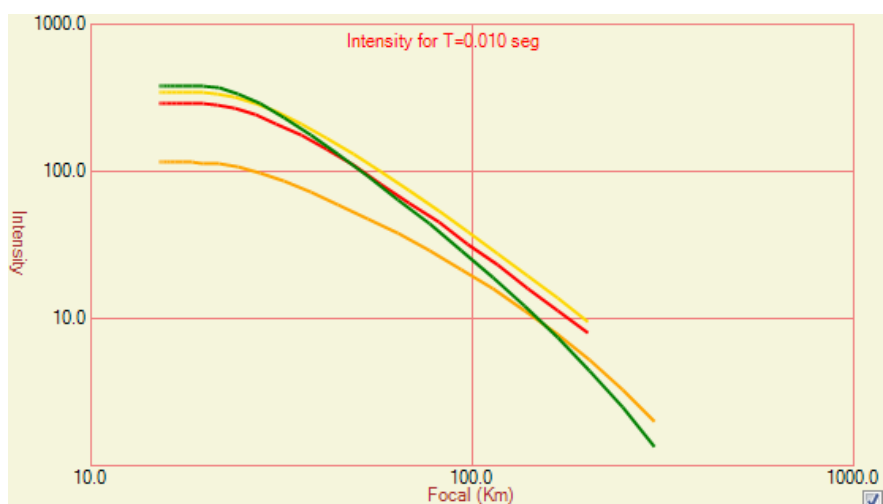


Figura 3-24

Relaciones de atenuación para magnitud de 7.0 y PGA

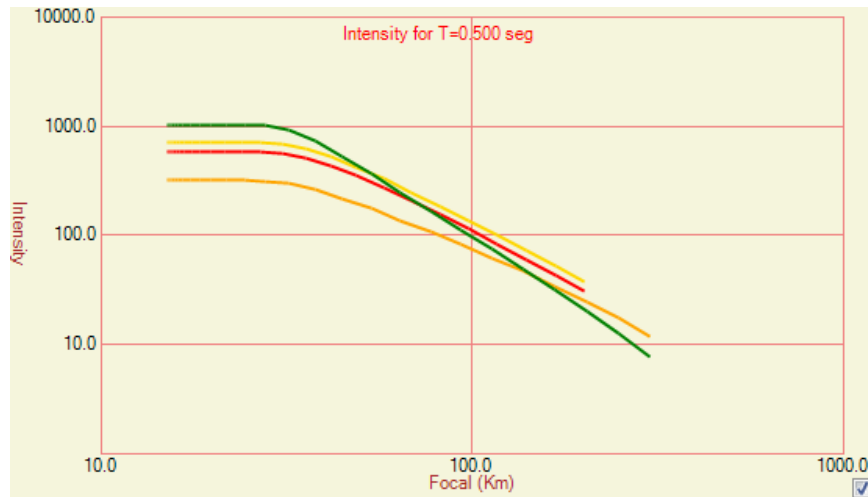


Figura 3-25
Relaciones de atenuación para magnitud de 7.5 y 0.5seg

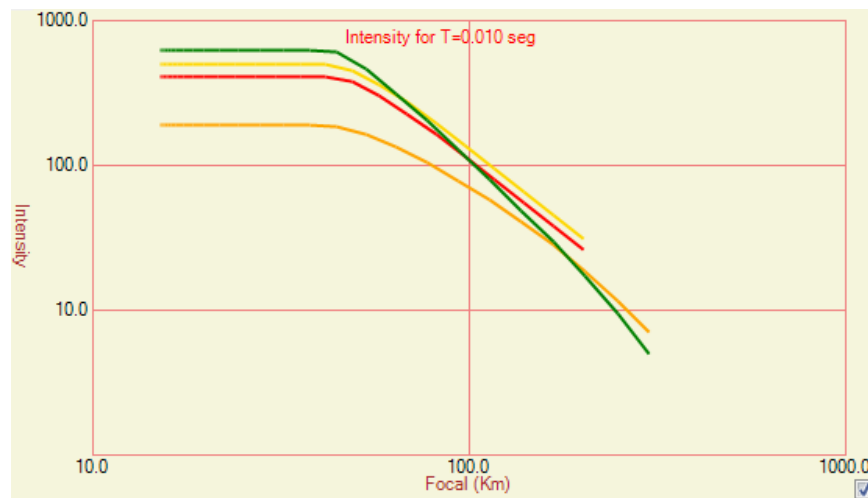


Figura 3-26
Relaciones de atenuación para magnitud de 8.0 y PGA

3.5 Calidad de los datos disponibles

La información de amenaza sísmica disponible, y presentada en las secciones precedentes de este capítulo, cuenta con una calidad y resolución buena para el análisis a nivel país. La geometría de fuentes propuesta, su sismicidad asociada y las funciones de atenuación empleadas para la estimación de las intensidades de movimiento del terreno cumplen con las condiciones de calidad para un modelo de amenaza sísmica regional y nacional.

Por otra parte, la resolución de cálculo de la amenaza sísmica no depende generalmente de las características de la información. La modelación espacial de la amenaza se hace mediante la definición de una malla de cálculo de tamaño arbitrario. La excesiva refinación de la malla no

implica necesariamente una mejora en los resultados. La resolución de la malla debe ser acorde con el tamaño de las fuentes sísmicas del modelo. Normalmente, el área de influencia de los fenómenos sísmicos tiene un radio de acción del orden de 200 km, área que cubre la malla de cálculo empleada. Todos los resultados de amenaza quedan expresados como valores puntuales en cada uno de los nodos de la malla. La resolución final de la amenaza corresponde al tamaño de la malla empleada.

La resolución para el análisis de amenaza debe ser compatible con la resolución de la información de exposición, y por lo tanto con la resolución final deseada en los análisis de riesgo. Cabe destacar que en el marco del presente proyecto dicha evaluación se realizará a nivel país utilizando un proxy de elementos expuestos.

3.6 Resultados de la amenaza sísmica para Argentina

El resultado principal de una evaluación probabilista de amenaza sísmica consiste en la obtención de la curva de excedencia de intensidades. Estas intensidades en el presente estudio corresponden a valores de aceleración espectral y entonces, por consiguiente, en cada una de ellas se puede leer la tasa de excedencia (en años) para diferentes valores. Los resultados se obtienen para cada punto de la malla de análisis por lo que es posible entonces, a partir de estos obtener mapas de amenaza para diferentes períodos de retorno como los que se presentan en la siguiente sección.

Dado que el análisis de amenaza sísmica ha sido realizado para diferentes ordenadas espectrales, seleccionando de manera arbitraria uno o varios períodos de retorno es posible obtener espectros de amenaza uniforme. Cada uno de estos tiene la particularidad de que, para cada ordenada espectral, se tiene asociado el mismo período de retorno.

3.6.1 Curvas de amenaza para algunas ciudades

Las Figura 3-27 a la Figura 3-32 presentan las curvas de excedencia para aceleración máxima del terreno (PGA) en algunas ciudades de Argentina.

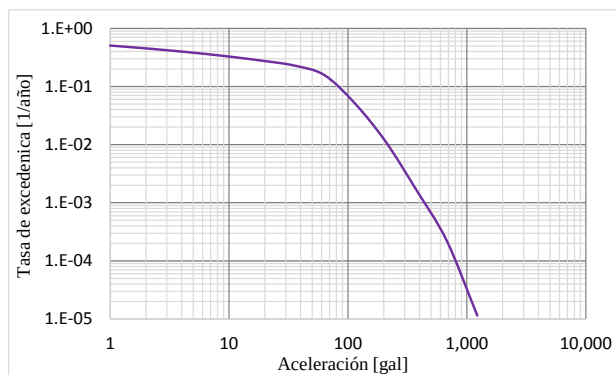


Figura 3-27

Curva de amenaza para PGA para Mendoza

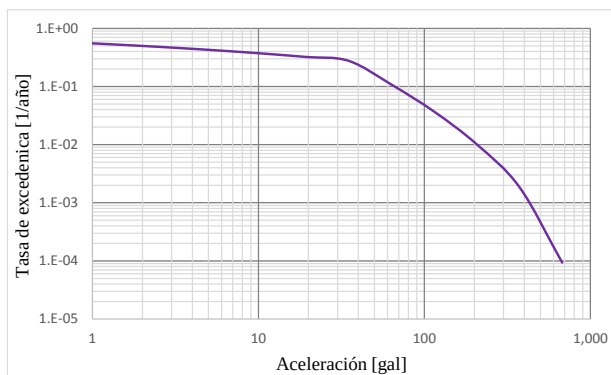


Figura 3-28

Curva de amenaza para PGA para San Juan

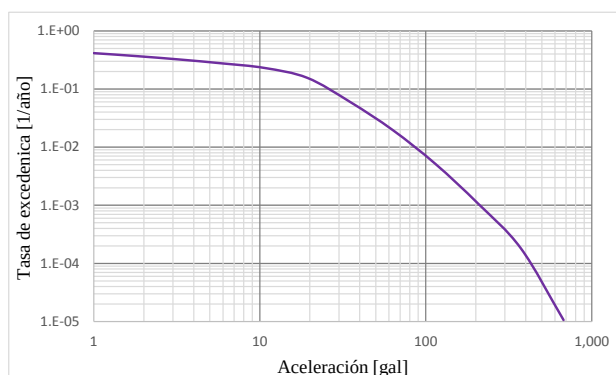


Figura 3-29

Curva de amenaza para PGA para San Luis

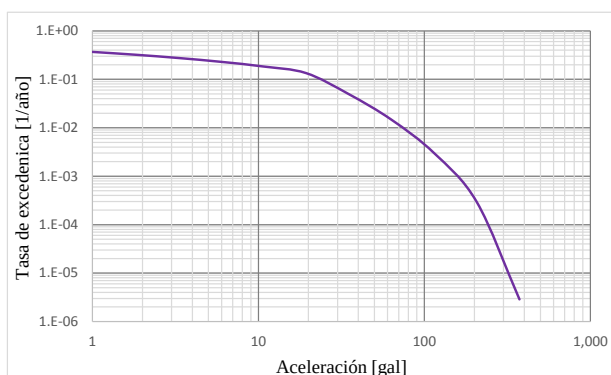


Figura 3-30

Curva de amenaza para PGA para Córdoba

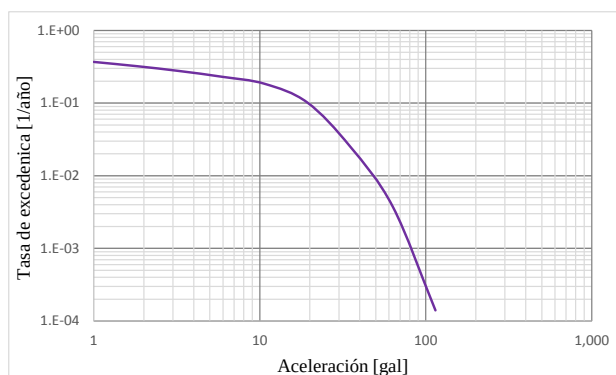


Figura 3-31

Curva de amenaza para PGA para Salta

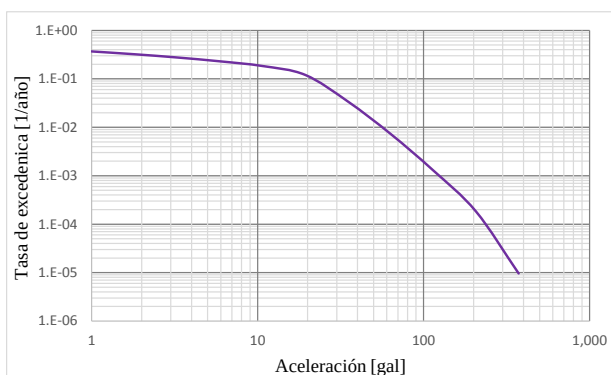


Figura 3-32

Curva de amenaza para PGA para S. S. de Jujuy

3.6.2 Espectros de amenaza uniforme para algunas ciudades

Para las mismas ciudades donde se han seleccionado las curvas de amenaza para la aceleración máxima del terreno (PGA), las Figura 3-33 a la Figura 3-38 presentan los espectros de amenaza uniforme para diferentes períodos de retorno, siendo estos 100, 250, 475, 1,000 y 2,500 años.

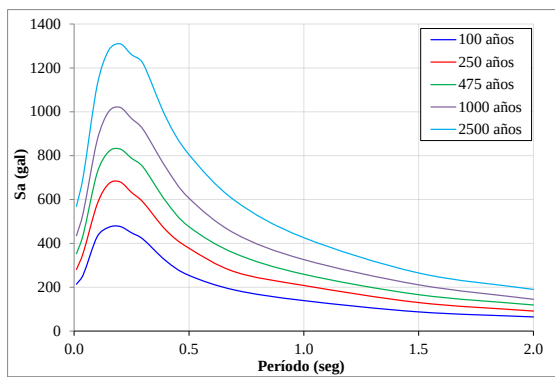


Figura 3-33
EAU para Mendoza

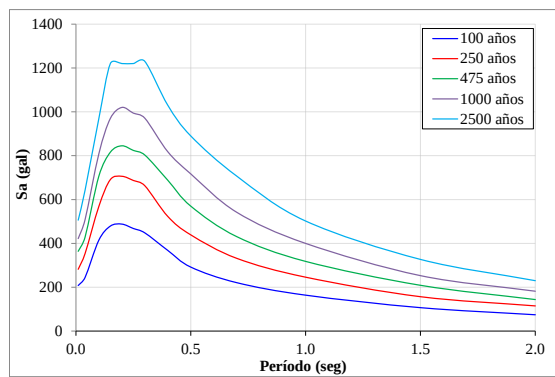


Figura 3-34
EAU San Juan

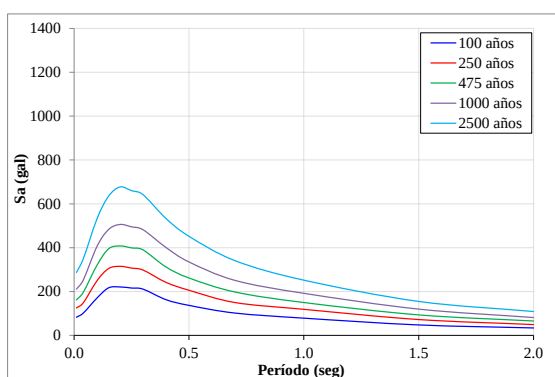


Figura 3-35
EAU para San Luis

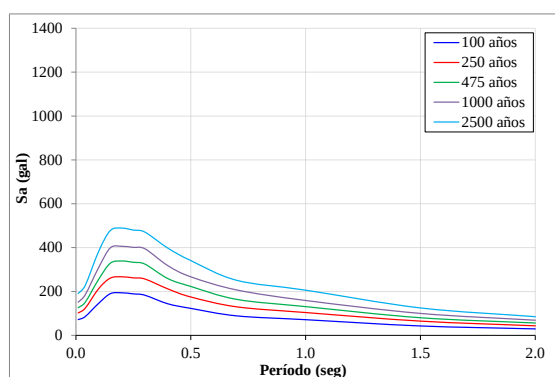


Figura 3-36
EAU para Córdoba

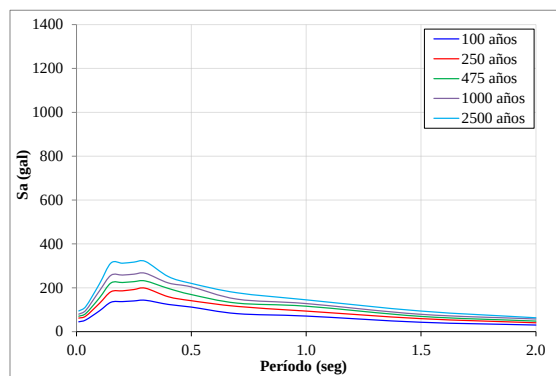


Figura 3-37
EAU para Salta

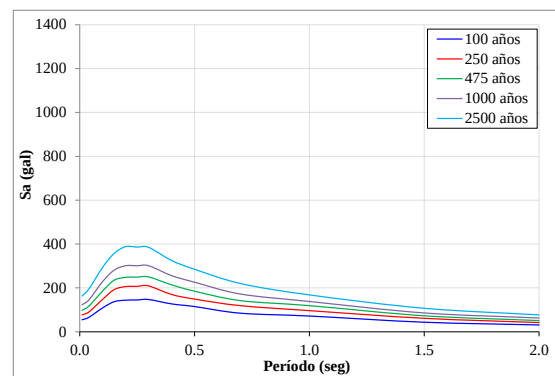


Figura 3-38
EAU para S. S. de Jujuy

3.6.3 Mapas de amenaza sísmica para Argentina

Se calculó la amenaza sísmica de Argentina para varios períodos fundamentales de vibración y varios períodos de retorno. Los mapas de amenaza sísmica que se presentan a continuación, permiten visualizar la distribución de las intensidades máximas probables debidas a la ocurrencia de sismos simultáneos en todas las fuentes generadoras, para el período de retorno correspondiente. Son mapas de amenaza indicativos del peligro específico de la zona, y sus aplicaciones permiten adoptar criterios para la zonificación de amenaza, insumo para normativas de diseño y planes de socialización del riesgo.

En las Figura 3-39 a Figura 3-47 se presentan los mapas de amenaza calculados para la Argentina, para aceleración máxima del terreno (PGA), y aceleración espectral para períodos estructurales de 0.5 y 1.0 segundos, para períodos de retorno de 500, 1,000 y 2,500 años. Como se mencionó anteriormente, la totalidad de los cálculos fueron realizados empleando el programa CRISIS 2014 V1.2 (Ordaz et. al. 2014).

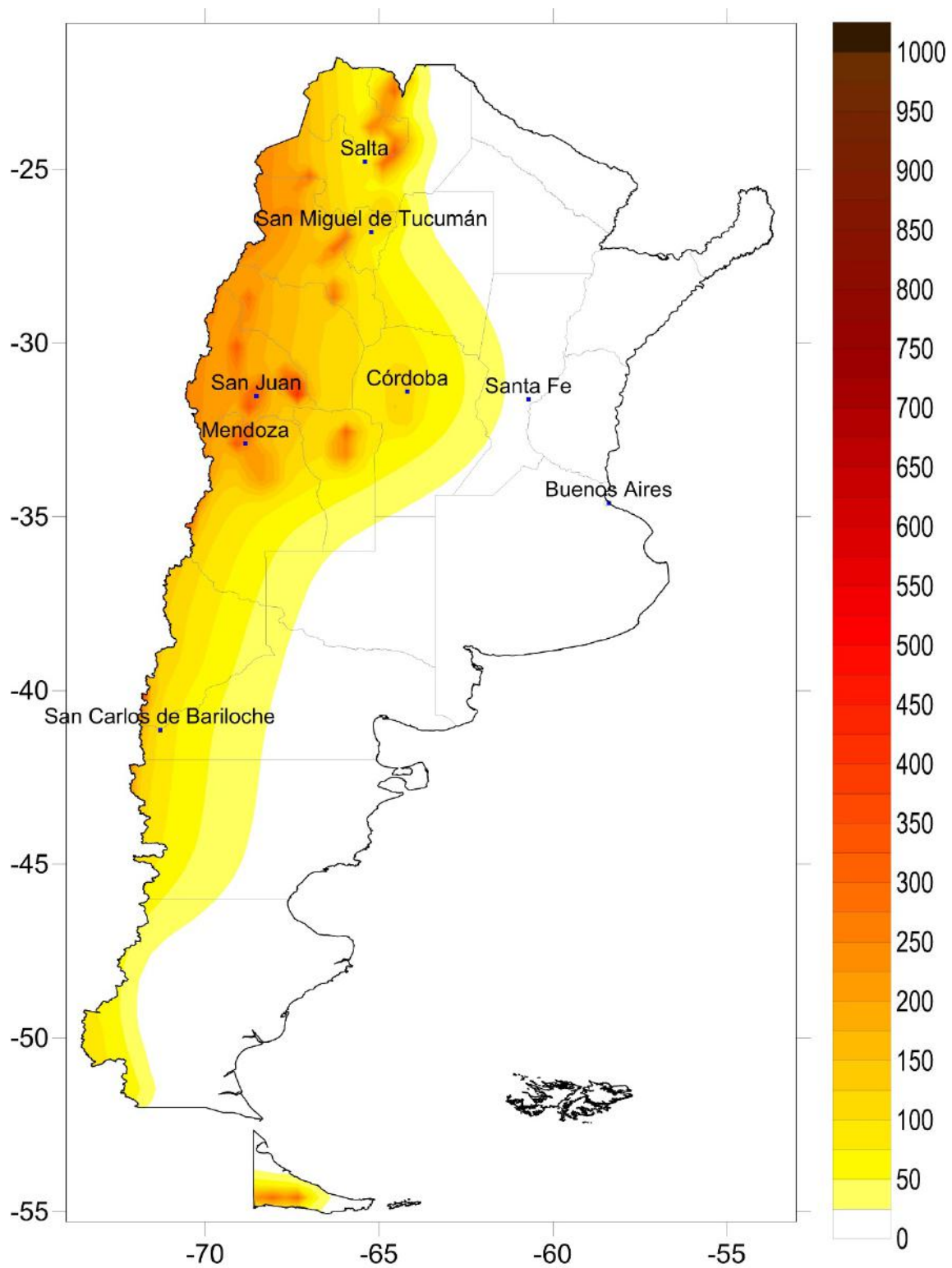


Figura 3-39
PGA para período de retorno de 475 años

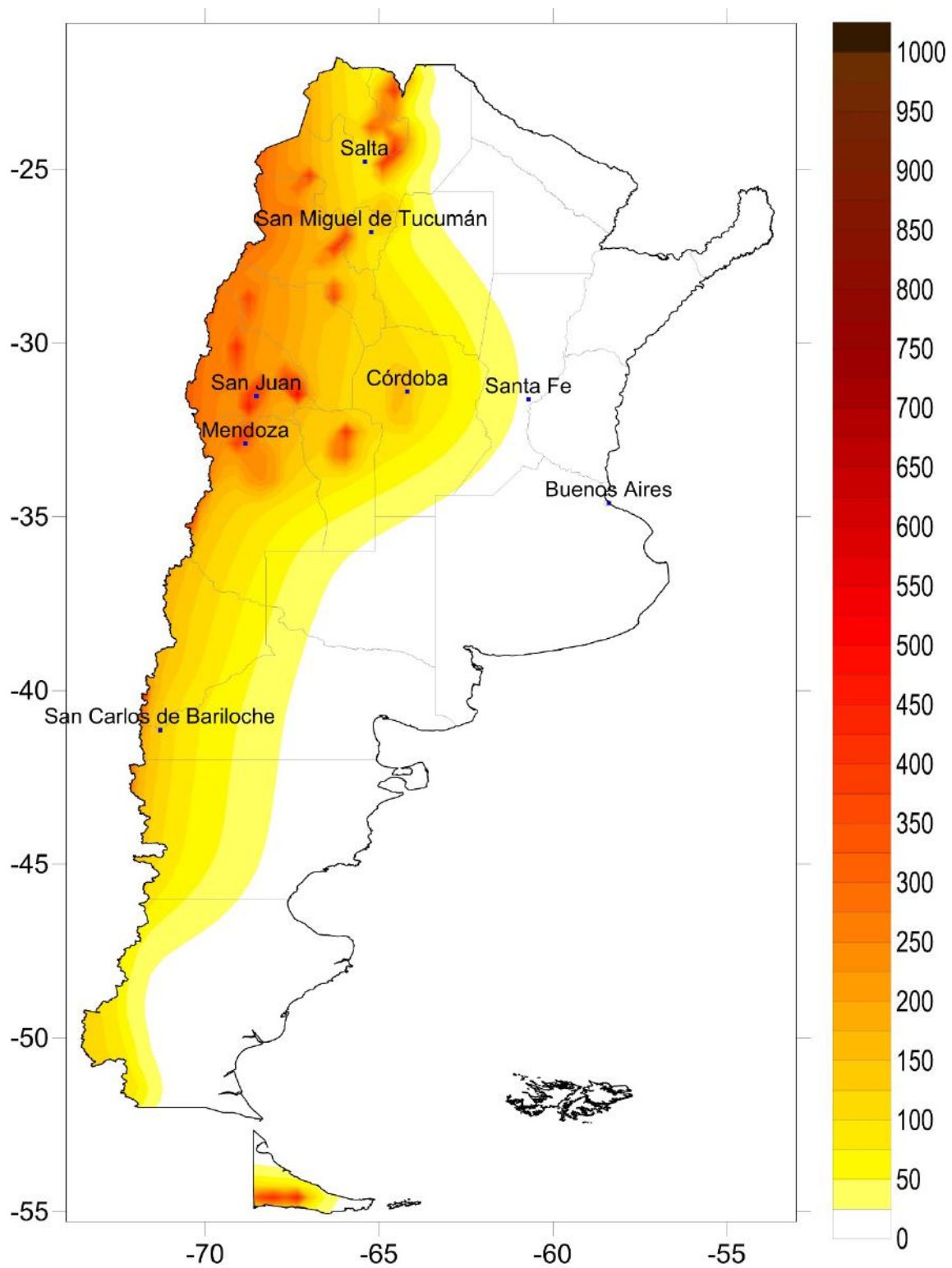


Figura 3-40
PGA para período de retorno de 1,000 años

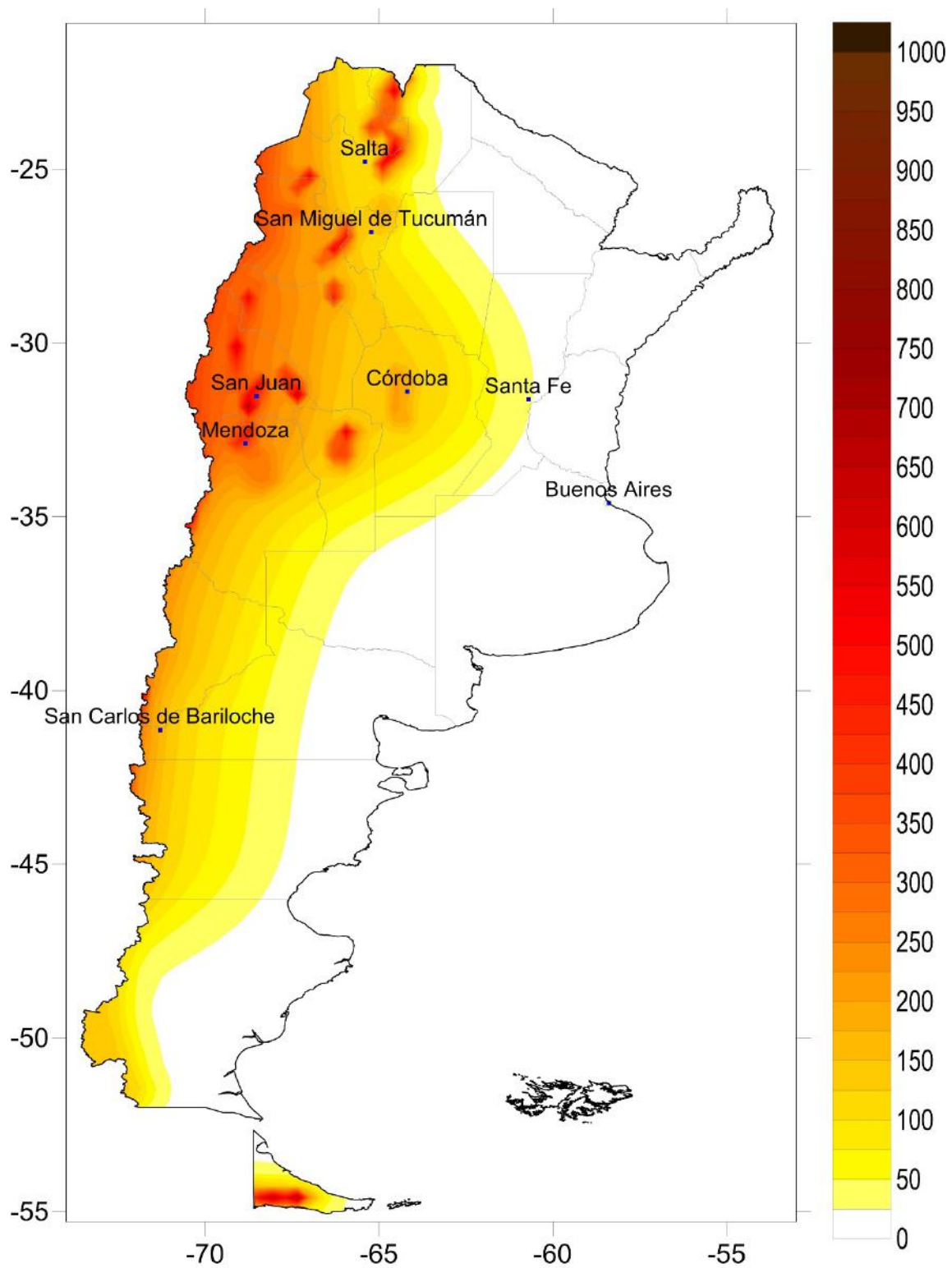


Figura 3-41
PGA para período de retorno de 2,500 años

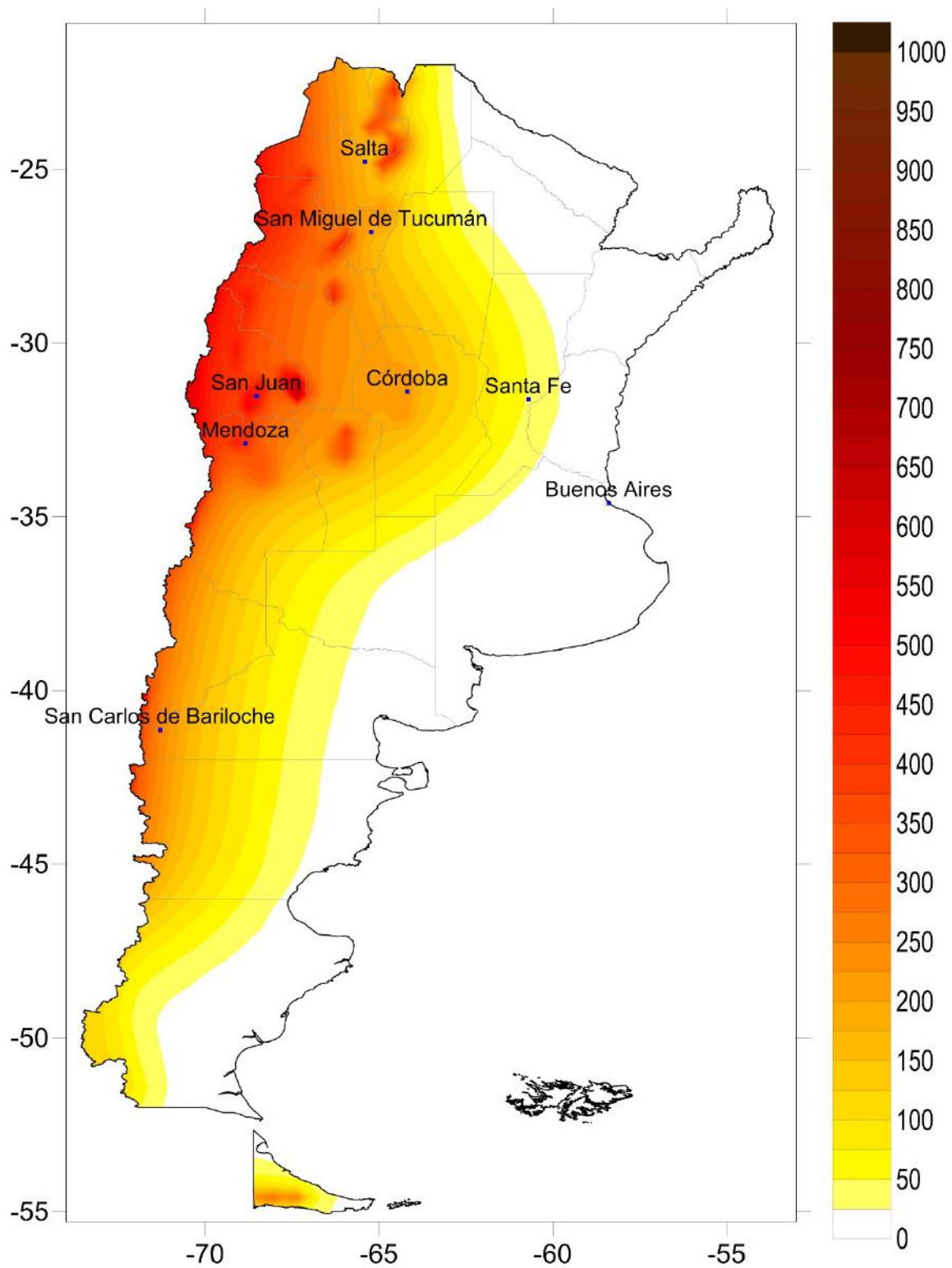


Figura 3-42
0.5s para período de retorno de 475 años

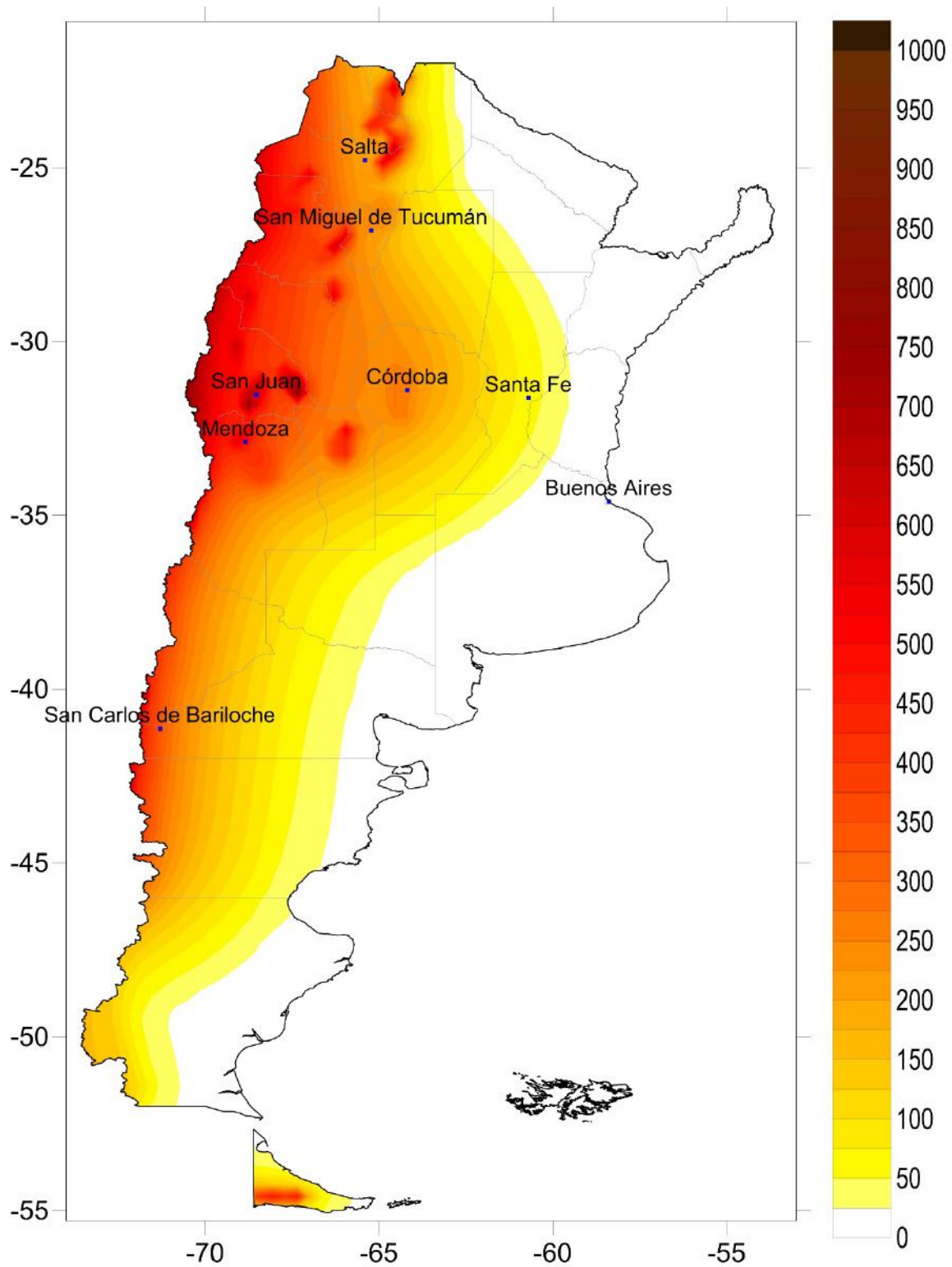


Figura 3-43
0.5s para período de retorno de 1,000 años

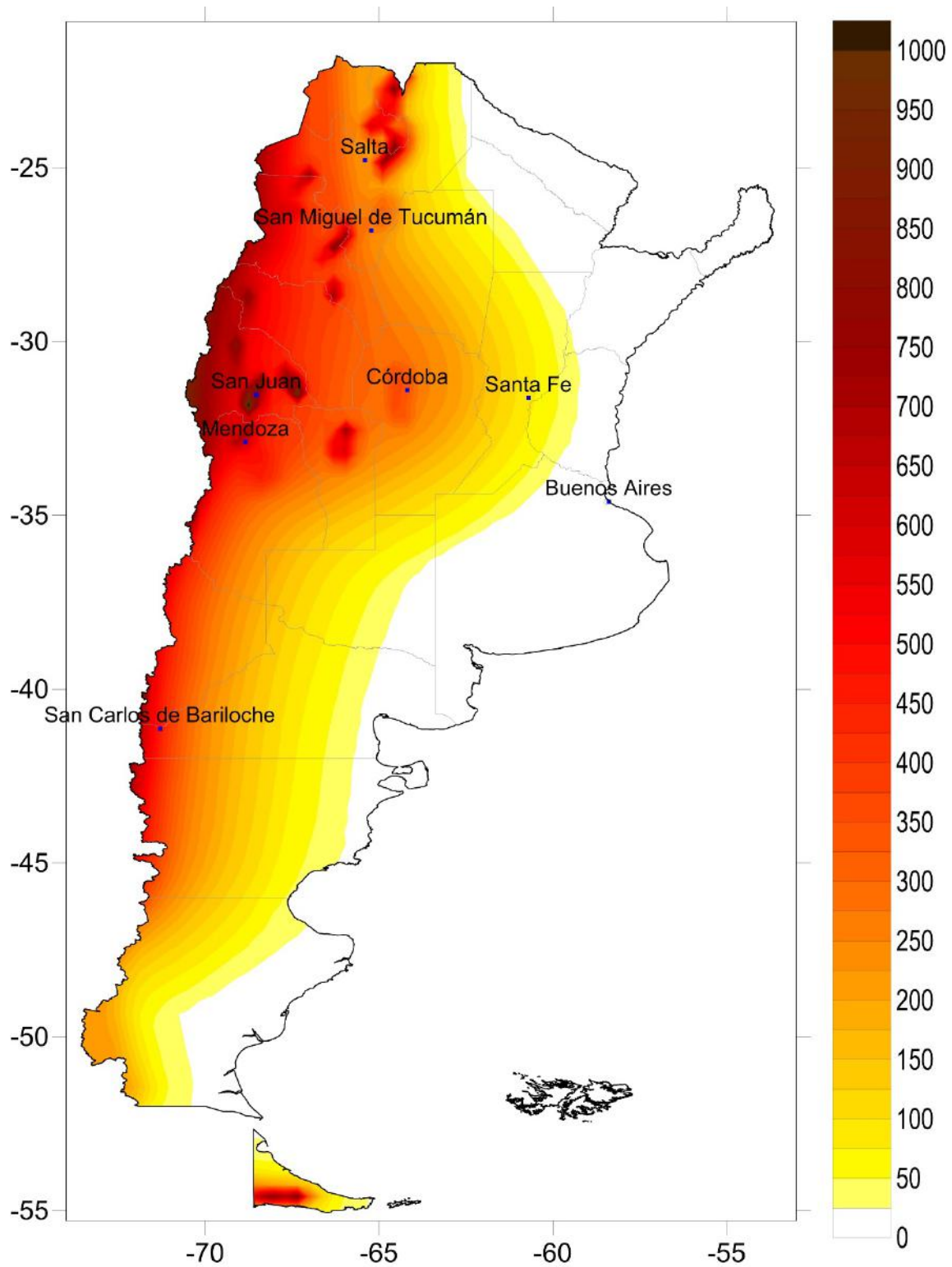


Figura 3-44
0.5s para período de retorno de 2,500 años

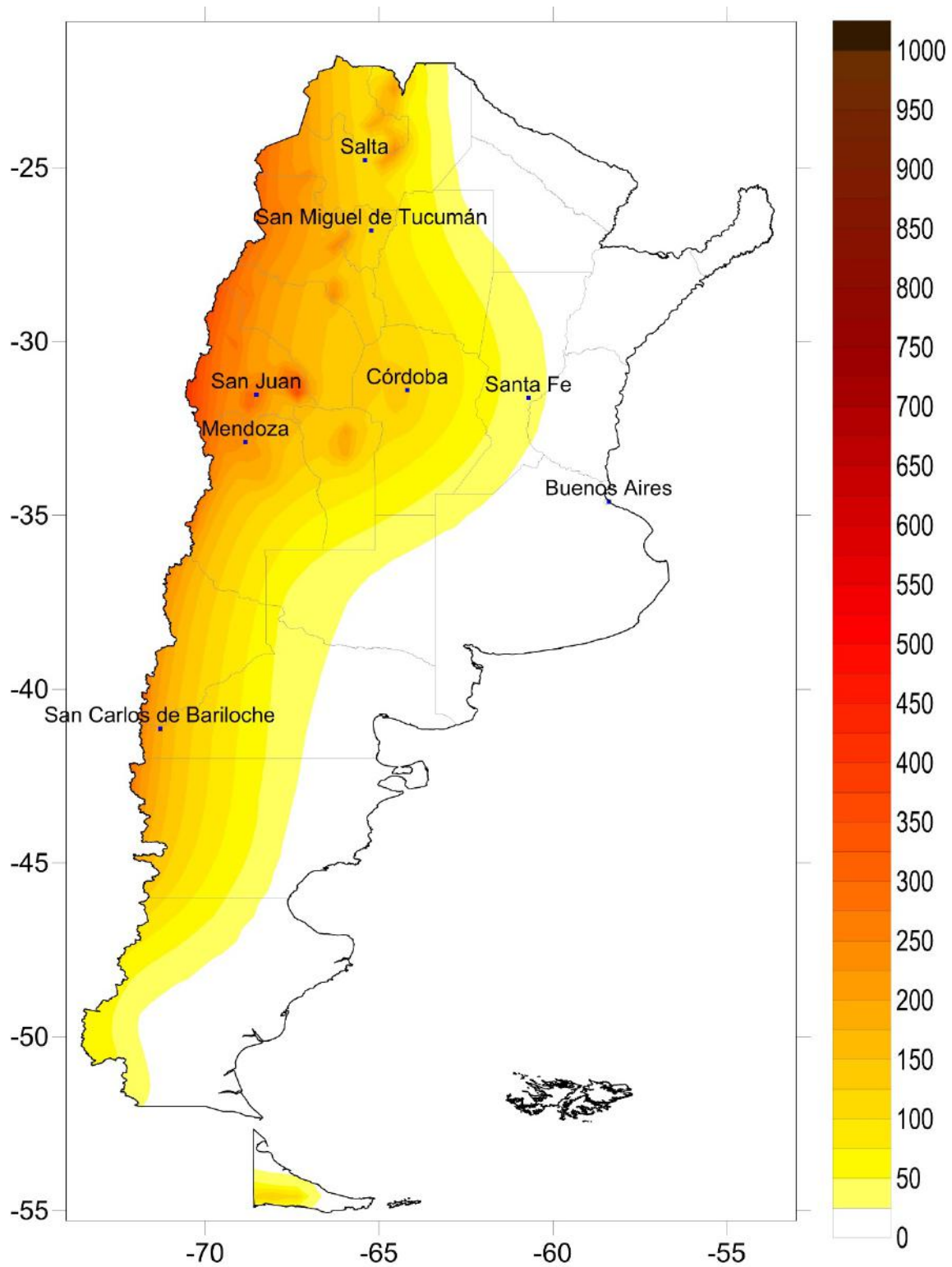


Figura 3-45
1.0s para período de retorno de 475 años

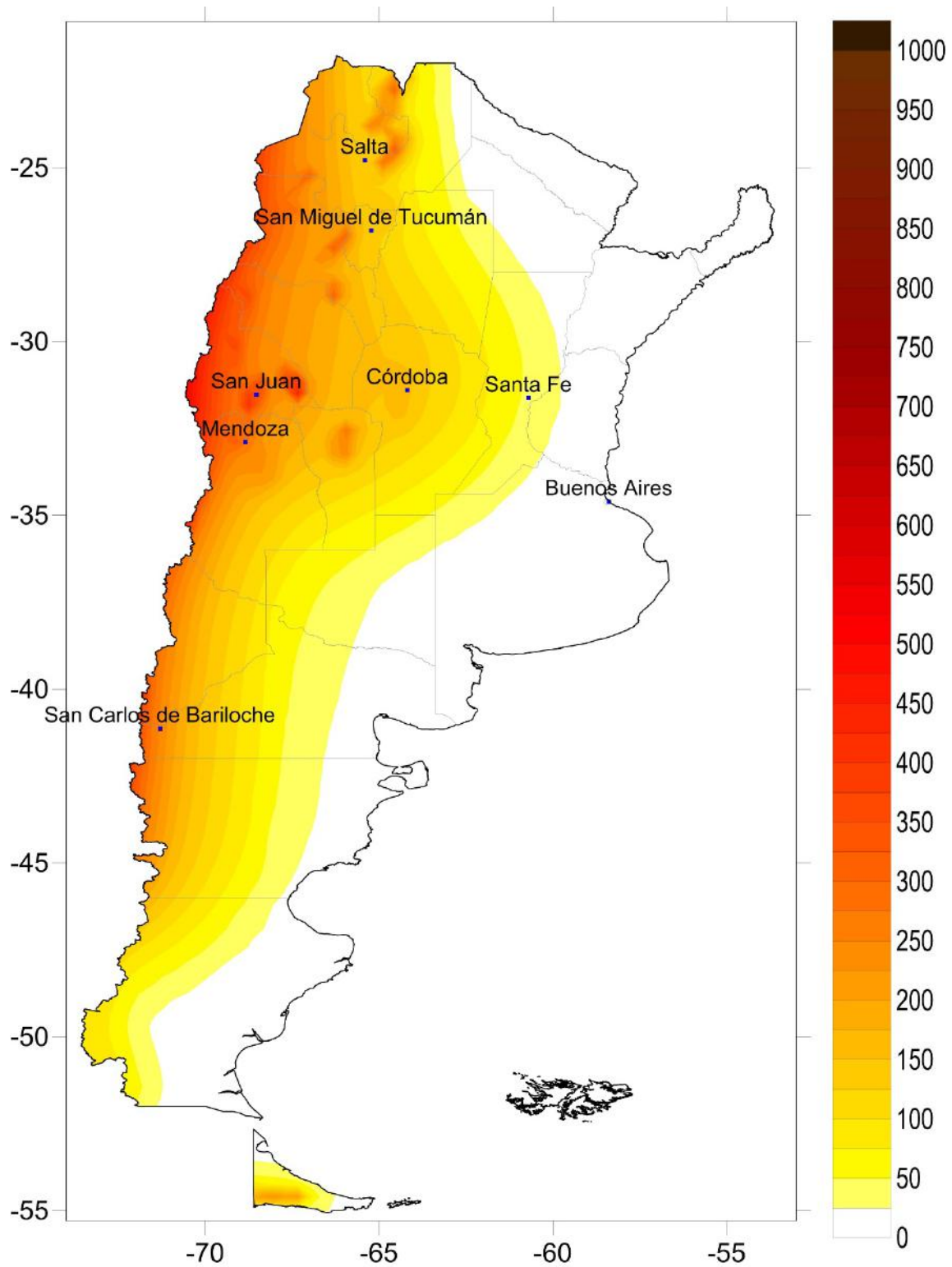


Figura 3-46
1.0s para período de retorno de 1,000 años

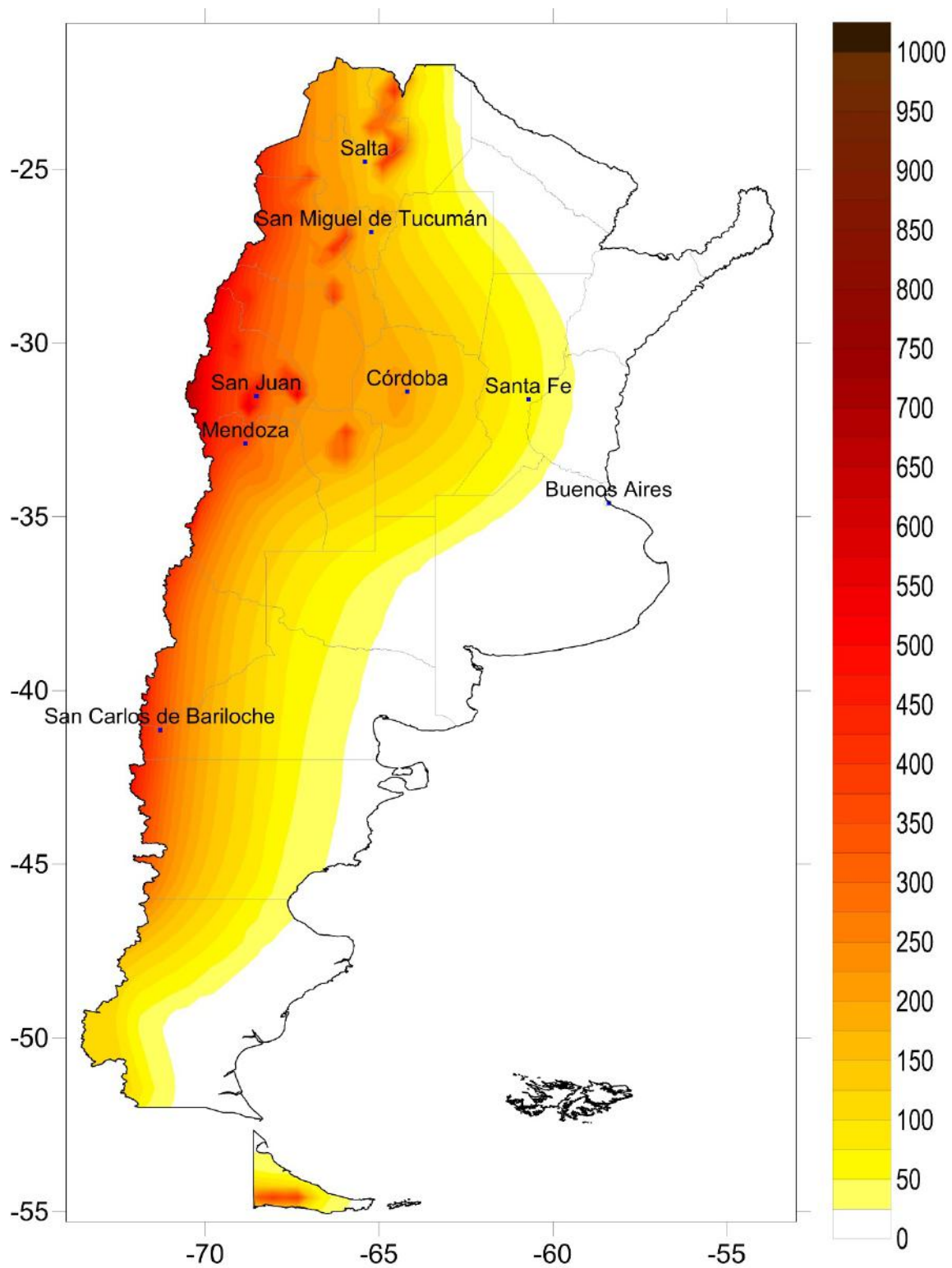


Figura 3-47
1.0s para período de retorno de 2500 años

4 Riesgo catastrófico por terremoto

4.1 Modelo de activos expuestos

4.1.1 Desarrollo del modelo

La información de exposición frente a fenómenos naturales corresponde al inventario de bienes inmuebles e infraestructura que pueden ser afectados y se expresa en términos de activos y de población. Es un componente fundamental en el análisis o evaluación de riesgo y de su resolución y detalle depende el grado de precisión de los resultados. El modelo puede evaluarse con diferentes niveles de resolución y cuando no se cuenta con información al detalle es necesario realizar estimaciones aproximadas que representen o den cuenta de dicho inventario de activos expuesto en forma aproximada. La Figura 4-1 presenta el procedimiento general para desarrollar un modelo simplificado de activos expuestos para el país.

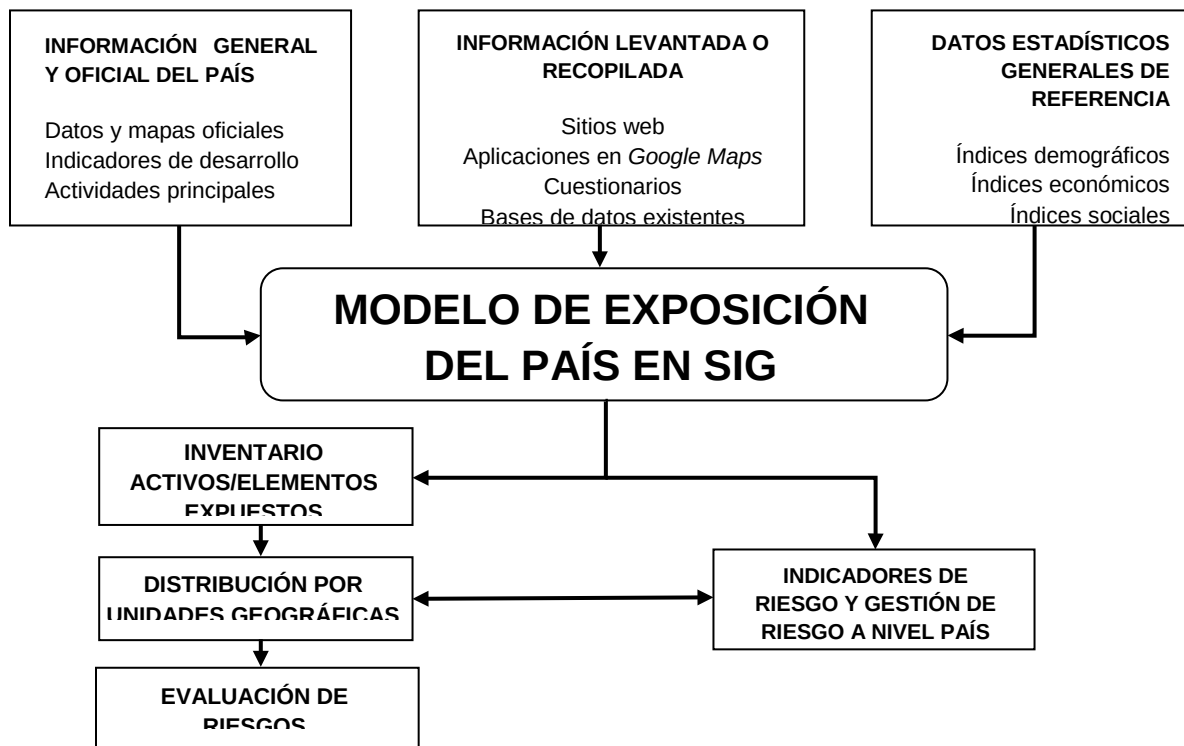


Figura 4-1
Modelo de activos expuestos

El objetivo del modelo simplificado de activos expuestos es además distribuir el inventario geográficamente, de tal manera que represente en forma general la ubicación de los activos y de la población expuesta. La exposición estará dada por tipos de componentes con su ubicación geográfica, el valor asignado de reposición, la ocupación estimada en número de personas y las características que permitan asignar funciones de vulnerabilidad ante las diferentes amenazas con fines de estimar el riesgo. Estas bases de exposición están conformadas por indicadores de exposición en términos de tipo de infraestructura general del país y de las ciudades, su valoración económica y su ocupación humana. El modelo también intenta proporcionar información para la formulación de indicadores de riesgo. El esquema de la Figura 4-1 ilustra el modelo utilizado, en el cual la información se concentra en una base de datos para su posterior análisis y uso.

El modelo de exposición aproximado requiere las siguientes definiciones:

(a) Caracterización geográfica y división política: el modelo se plantea mediante una categorización en las siguientes unidades:

- i. Provincias (unidades subnacionales)
- ii. Departamentos que conforman Provincias
- iii. Ciudades principales que conforman Departamentos
- iv. Los Departamentos a su vez estarían subdivididos en área rural y área urbana.

Nota: la nomenclatura puede cambiar de país en país pero en general se mantiene el carácter de división política.

(b) Para caracterizar las diferentes zonas urbanas se plantea una zonificación en regiones homogéneas en términos de características de la infraestructura, concentración de población, actividad económica, condiciones socioeconómicas, características topográficas e importancia institucional, entre otras.

(c) Igualmente, cuando es necesario se caracterizan las diferentes zonas rurales de los departamentos para lo cual se plantea una zonificación en regiones homogéneas en términos de características de uso, densidad de construcciones, concentración de población, actividad económica, características topográficas u otras variables útiles para el análisis.

Cuando el tipo de análisis lo requiere se utilizan zonas geográficas más detalladas por ejemplo para ciudades en las cuales se incluye en el análisis el nivel de localidad, de barrio o comuna.

4.1.2 Información general del país

Conformación de la base de datos para el análisis del riesgo

Los indicadores de exposición se desarrollan con el fin de representar la exposición física, económica y humana de un país o una ciudad en términos geográficos. Para esto se clasifican en las siguientes categorías principales:

- Construcciones de las principales ciudades del país.
- Infraestructura urbana relevante para las principales ciudades del país.
- Infraestructura relevante a nivel nacional.
- Construcciones a nivel rural (cuando sea relevante).

Adicionalmente la metodología permite incluir en forma complementaria otro tipo de elementos expuestos tales como cultivos, elementos bióticos o ambientales y en general cualquier tipo de elemento susceptible a sufrir daños por cuenta de fenómenos amenazantes. Los indicadores de exposición se desarrollan con la ayuda de una hoja electrónica de cálculo, la cual se anexa al presente informe. La hoja de cálculo en este caso es: **Modelo de exposición - Proxy.xls** y se presenta en el Anexo 3.

Descripción geográfica y división política del país

Argentina limita al norte con Bolivia y Paraguay, al oeste con Chile, al este limita con Brasil y Uruguay y al sureste con el Océano Atlántico Sur. Se encuentra organizado políticamente en 23 entidades subnacionales llamadas Provincias y una ciudad autónoma, Buenos Aires. La superficie total de Argentina es de 2,911,055 km² y su población es de 43,131,966 habitantes. La Figura 4-2 presenta la división política y distribución geográfica de la entidades subnacionales.

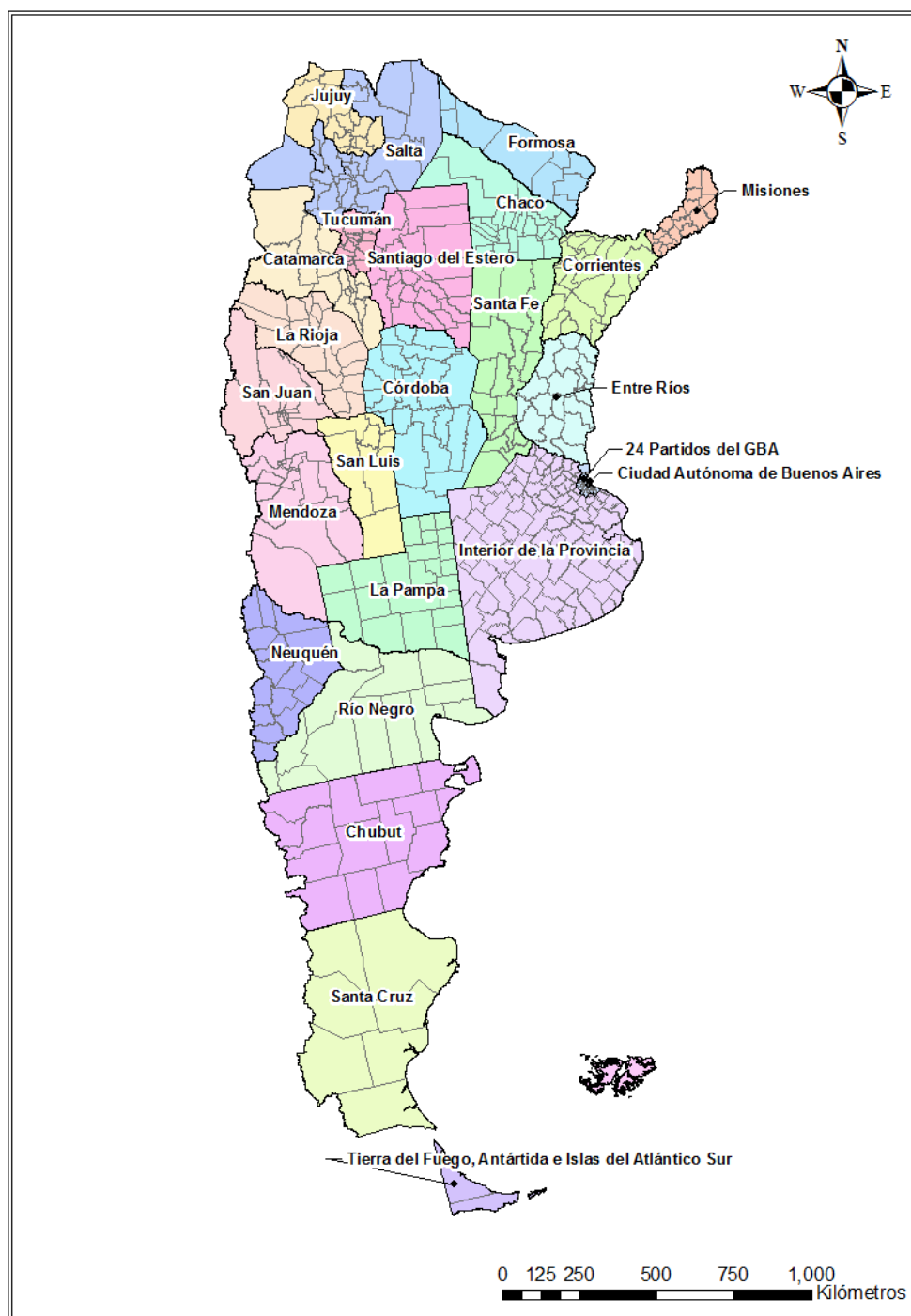


Figura 4-2
División política nacional principales entidades subnacionales

La información geográfica recopilada se organiza de acuerdo con la Tabla 4-1 en donde se especifican las unidades subnacionales presentes en el país junto con un código o identificador único. Por otro lado Tabla 4-2 presenta un listado de las ciudades más importantes y la entidad subnacional a la que pertenece (ver Anexo 3).

Tabla 4-1
Distribución de entidades subnacionales
(Muestra ilustrativa de los datos, ver Anexo 3)

ID	ID_Provincia	Provincia	ID_Departamento	Departamento
01001	01	24 Partidos del GBA	001	Almirante Brown
01002	01	24 Partidos del GBA	002	Avellaneda
01003	01	24 Partidos del GBA	003	Berazategui
01004	01	24 Partidos del GBA	004	Esteban Echeverría
01005	01	24 Partidos del GBA	005	Ezeiza
01006	01	24 Partidos del GBA	006	Florencio Varela
01007	01	24 Partidos del GBA	007	General San Martín
01008	01	24 Partidos del GBA	008	Hurlingham
01009	01	24 Partidos del GBA	009	Ituzaingó
01010	01	24 Partidos del GBA	010	José C. Paz
01011	01	24 Partidos del GBA	011	La Matanza
01012	01	24 Partidos del GBA	012	Lanús
01013	01	24 Partidos del GBA	013	Lomas de Zamora
01014	01	24 Partidos del GBA	014	Malvinas Argentinas
01015	01	24 Partidos del GBA	015	Merlo

Tabla 4-2
Características de las ciudades más importantes

ID Ciudad	Ciudad	ID_Provincia	ID_Departamento
1	Ciudad Autónoma de Buenos Aires	03	001
2	Cordoba	07	002
3	La Plata	02	055
4	Mar del Plata	02	047
5	Mendoza	14	001
6	Rosario	22	012
7	San Carlos de Bariloche	17	003

Distribución de la población

La población total del país es de 43,131,966 habitantes (proyectada a 2015, según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos de la República de Argentina), de la cual el 90.9% pertenece a población urbana (39,207,822 habitantes) y el 9.1% a población rural (3,924,144 habitantes). La población está compuesta por un 24.9% de niños y adolescentes (10,739,860 habitantes, 0-14 años), un 63.7% de jóvenes y adultos (27,475,062 habitantes, 15-64 años), y un 11.4% son mayores de 65 años (4,917,044 habitantes, personas de la tercera edad).

El 45.1% (19,435,245 habitantes) de la población es económicamente activa. De esta, el 2.7% pertenecen al área de agricultura, el 5.3% al área de industria y el 28.1% al área de servicios. Considerando los diferentes niveles de desarrollo de varios segmentos de la población, se establece una clasificación de acuerdo con el nivel de complejidad del desarrollo. Esta permite la diferenciación de varios índices usados en la formulación de los indicadores de complejidad tales como densidad de población urbana, precio por metro cuadrado, niveles de ocupación, tipos y costos de servicios públicos, etc.

4.1.3 Base de datos de construcciones

Metodología y alcance

Con el objeto de identificar el valor expuesto de construcciones en el país, se realizó un inventario lo más exhaustivo posible de los centros urbanos correspondientes a cada una de las entidades subnacionales; que en este caso son departamentos. Para el análisis, el parámetro que ofrece la mayor confiabilidad es la población oficial reportada en cada unidad de división política y administrativa. Los datos de población oficial y una serie de indicadores son usados para estimar el número y tipo de desarrollos localizados en cada uno de los centros urbanos. En consecuencia, la misma información de población es usada para establecer escenarios hipotéticos de ocupación para cada una de las edificaciones de las ciudades analizadas.

Los tipos de edificación se estiman según los sectores económicos presentes y las necesidades básicas de la población como son el servicio de salud y educación, entre otros. La composición (uso) y tamaño (m^2) de las construcciones se estima utilizando el censo de vivienda desagregado según los siguientes grupos de uso:

- (a) Residencial PB: capacidad económica baja (Res PB)
- (b) Residencial PM: capacidad económica media (Res PM)
- (c) Residencial PA: capacidad económica alta (Res PA)
- (d) Comercial (Com)
- (e) Industrial (Ind)
- (f) Salud privada (SalPri)

- (g) Educación privada (EduPri)
- (h) Salud pública (SalPub)
- (i) Educación pública (EduPub)
- (j) Gubernamentales (Gob)

Para la elaboración de este análisis es necesario estimar el área construida por habitante, los tipos de usos y los niveles de complejidad, el valor económico de cada metro cuadrado de desarrollo por tipo de uso y nivel de complejidad, y el nivel de ocupación por cada tipo de desarrollo en un escenario dado, expresado en términos de metros cuadrados de área construida por tipo de uso y nivel de complejidad.

En algunos casos y cuando no se cuenta con la información del censo de vivienda, la discretización por usos y tamaños de construcción se realiza de acuerdo con los valores típicos de los países de la región que tengan condiciones socioeconómicas y de desarrollo similares.

El análisis de exposición de construcciones en centros urbanos se realiza para un total de 23 Provincias y una ciudad autónoma que incluyen en general una población en áreas urbanas de más de 39 millones de habitantes.

Conformación de la base de datos de construcciones

Utilizando la información anterior se conforma la base de datos de áreas construidas, de valores expuestos y de ocupación representativa para cada uno de los grupos de uso y para cada uno de los departamentos, teniendo en cuenta la población urbana. Dicha información se presenta en forma resumida de Tabla 4-3 y Tabla 4-4.

Tabla 4-3
Distribución de áreas construidas por unidad subnacional y grupo de uso
(Muestra ilustrativa de los datos, ver Anexo 3)

ID_Provincia	Provincia	Departamento	ID_Provincia_Depto	m² construidos										
				ResPB	ResPM	ResPA	Com	Ind	SalPri	EduPri	SalPub	EduPub	Gob	Total
				(m²x10³)	(m²x10³)	(m²x10³)	(m²x10³)	(m²x10³)	(m²x10³)	(m²x10³)	(m²x10³)	(m²x10³)	(m²x10³)	(m²x10³)
01	24 Partidos del GBA	Almirante Brown	01001	650.83	5,293.4	2,386.37	3,542.9	1,827.8	14.5	626.8	3.6	775.3	252.8	15,374.3
01	24 Partidos del GBA	Avellaneda	01002	395.06	3,213.2	1,448.56	2,150.6	1,109.5	5.3	380.4	8.6	470.6	153.4	9,335.3
01	24 Partidos del GBA	Berazategui	01003	389.99	3,171.9	1,429.96	2,123.0	1,095.3	2.4	375.6	1.6	464.6	151.5	9,205.8
01	24 Partidos del GBA	Esteban Echeverría	01004	380.13	3,091.7	1,393.80	2,069.3	1,067.6	1.0	366.1	2.0	452.8	147.6	8,971.9
01	24 Partidos del GBA	Ezeiza	01005	173.19	1,408.6	698.52	1,178.5	608.0	0.4	173.7	0.7	206.3	84.1	4,531.9
01	24 Partidos del GBA	Florencio Varela	01006	533.19	4,336.6	1,955.04	2,902.6	1,497.4	1.0	513.5	1.3	635.2	207.1	12,583.0
01	24 Partidos del GBA	General San Martín	01007	474.44	3,858.8	1,739.62	2,582.7	1,332.4	4.0	456.9	5.3	565.2	184.3	11,203.6
01	24 Partidos del GBA	Hurlingham	01008	169.45	1,378.2	683.46	1,153.1	594.9	2.1	170.0	0.0	201.9	82.3	4,435.3
01	24 Partidos del GBA	Ituzaingó	01009	157.66	1,282.3	635.89	1,072.8	553.5	1.1	158.2	0.0	187.8	76.5	4,125.8
01	24 Partidos del GBA	José C. Paz	01010	259.41	2,109.8	1,046.27	1,765.2	910.7	2.5	260.2	1.0	309.0	125.9	6,790.0
01	24 Partidos del GBA	La Matanza	01011	2,292.11	18,642.5	8,404.39	12,477.7	6,437.3	14.6	2,207.3	5.4	2,730.5	890.2	54,101.9
01	24 Partidos del GBA	Lanús	01012	521.08	4,238.1	1,910.61	2,836.6	1,463.4	9.7	501.8	5.2	620.7	202.4	12,309.6
01	24 Partidos del GBA	Lomas de Zamora	01013	715.04	5,815.7	2,621.82	3,892.5	2,008.2	11.6	688.6	11.5	851.8	277.7	16,894.5
01	24 Partidos del GBA	Malvinas Argentinas	01014	385.65	3,136.6	1,414.04	2,099.4	1,083.1	1.4	371.4	0.9	459.4	149.8	9,101.5
01	24 Partidos del GBA	Merlo	01015	640.31	5,207.9	2,347.81	3,485.7	1,798.3	5.0	616.6	2.9	762.8	248.7	15,115.9
01	24 Partidos del GBA	Moreno	01016	561.05	4,563.2	2,057.19	3,054.2	1,575.7	1.8	540.3	1.1	668.4	217.9	13,240.9
01	24 Partidos del GBA	Morón	01017	361.52	2,940.4	1,325.57	1,968.0	1,015.3	10.6	348.1	5.9	430.7	140.4	8,546.5
01	24 Partidos del GBA	Quilmes	01018	704.26	5,728.0	2,582.27	3,833.8	1,977.9	16.1	678.2	2.8	839.0	273.5	16,635.7
01	24 Partidos del GBA	San Fernando	01019	152.86	1,243.3	616.53	1,040.2	536.6	0.7	153.3	1.5	182.1	74.2	4,001.2
01	24 Partidos del GBA	San Isidro	01020	264.46	2,151.0	1,066.67	1,799.6	928.4	3.6	265.3	2.0	315.0	128.4	6,924.5
01	24 Partidos del GBA	San Miguel	01021	262.66	2,136.3	1,059.40	1,787.3	922.1	1.7	263.5	2.6	312.9	127.5	6,876.0
01	24 Partidos del GBA	Tigre	01022	474.87	3,862.3	1,741.20	2,585.1	1,333.7	2.4	457.3	1.4	565.7	184.4	11,208.4
01	24 Partidos del GBA	Tres de Febrero	01023	386.77	3,145.7	1,418.14	2,105.5	1,086.2	4.9	372.5	2.6	460.7	150.2	9,133.2
01	24 Partidos del GBA	Vicente López	01024	242.73	1,974.2	979.03	1,651.7	852.1	4.0	243.5	2.8	289.2	117.8	6,357.2
02	Interior de la Provincia	Adolfo Alsina	02001	11.72	116.5	57.27	106.3	54.8	0.1	10.0	0.2	18.1	7.6	382.7
02	Interior de la Provincia	Adolfo Gonzales Chaves	02002	8.13	80.8	39.73	73.7	38.0	0.1	7.0	0.3	12.6	5.3	265.7
02	Interior de la Provincia	Alberti	02003	7.34	73.0	35.89	66.6	34.4	0.3	6.3	0.2	11.4	4.8	240.1
02	Interior de la Provincia	Arrecifes	02004	27.29	222.0	110.08	185.7	95.8	0.4	21.9	0.6	42.2	13.3	719.3
02	Interior de la Provincia	Ayacucho	02005	14.11	140.3	69.01	128.1	66.1	0.0	12.1	0.7	21.8	9.1	461.3
02	Interior de la Provincia	Azul	02006	60.10	488.8	242.42	409.0	211.0	0.6	48.2	1.3	92.9	29.2	1,583.6
Total				41,974	345,540	164,072	241,867	113,134	592	31,199	545	62,001	19,461	1,020,385
				1,020,385										

Tabla 4-4
Distribución de valores expuestos por unidad subnacional y grupo de uso
(Muestra ilustrativa de los datos, ver Anexo 3)

ID_Provincia	Provincia	Departamento	ID_Provincia_Depto	Valor construcciones										
				ResPB	ResPM	ResPA	Com	Ind	SalPri	EduPri	SalPub	EduPub	Gob	Total
				(US\$xx10 ⁶)	(US\$xx10 ⁶)	(US\$xx10 ⁶)	(US\$xx10 ⁶)	(US\$xx10 ⁶)	(US\$xx10 ⁶)	(US\$xx10 ⁶)	(US\$xx10 ⁶)	(US\$xx10 ⁶)	(US\$xx10 ⁶)	(US\$xx10 ⁶)
01	24 Partidos del GBA	Almirante Brown	01001	166.61	3,387.77	2,443.64	2,267.48	1,871.68	14.85	401.12	2.94	496.20	161.78	11,214.1
01	24 Partidos del GBA	Avellaneda	01002	101.14	2,056.42	1,483.32	1,376.39	1,136.14	5.46	243.49	7.05	301.20	98.20	6,808.8
01	24 Partidos del GBA	Berazategui	01003	99.84	2,030.03	1,464.28	1,358.73	1,121.55	2.46	240.36	1.33	297.34	96.94	6,712.9
01	24 Partidos del GBA	Esteban Echeverría	01004	97.31	1,978.68	1,427.25	1,324.36	1,093.19	0.98	234.28	1.60	289.81	94.49	6,542.0
01	24 Partidos del GBA	Ezeiza	01005	31.04	631.05	500.70	527.96	435.80	0.25	77.83	0.40	92.43	37.67	2,335.1
01	24 Partidos del GBA	Florencio Varela	01006	136.50	2,775.45	2,001.96	1,857.65	1,533.39	1.02	328.62	1.07	406.52	132.54	9,174.7
01	24 Partidos del GBA	General San Martín	01007	121.46	2,469.62	1,781.37	1,652.95	1,364.42	4.11	292.41	4.31	361.72	117.93	8,170.3
01	24 Partidos del GBA	Hurlingham	01008	30.37	617.44	489.90	516.57	426.40	1.53	76.15	0.00	90.44	36.86	2,285.7
01	24 Partidos del GBA	Ituzaingó	01009	28.25	574.47	455.81	480.62	396.73	0.80	70.85	0.00	84.14	34.29	2,126.0
01	24 Partidos del GBA	José C. Paz	01010	46.49	945.20	749.96	790.80	652.76	1.82	116.58	0.55	138.44	56.42	3,499.0
01	24 Partidos del GBA	La Matanza	01011	586.78	11,931.18	8,606.10	7,985.70	6,591.76	14.94	1,412.69	4.40	1,747.54	569.75	39,450.8
01	24 Partidos del GBA	Lanús	01012	133.40	2,712.37	1,956.46	1,815.43	1,498.54	9.91	321.15	4.29	397.28	129.52	8,978.4
01	24 Partidos del GBA	Lomas de Zamora	01013	183.05	3,722.03	2,684.74	2,491.21	2,056.36	11.87	440.70	9.46	545.16	177.74	12,322.3
01	24 Partidos del GBA	Malvinas Argentinas	01014	98.73	2,007.43	1,447.98	1,343.60	1,109.07	1.40	237.69	0.71	294.02	95.86	6,636.5
01	24 Partidos del GBA	Merlo	01015	163.92	3,333.03	2,404.15	2,230.84	1,841.44	5.09	394.64	2.37	488.18	159.16	11,022.8
01	24 Partidos del GBA	Moreno	01016	143.63	2,920.46	2,106.56	1,954.71	1,613.50	1.88	345.79	0.88	427.76	139.46	9,654.6
01	24 Partidos del GBA	Morón	01017	92.55	1,881.83	1,357.39	1,259.54	1,039.68	10.83	222.82	4.84	275.63	89.86	6,235.0
01	24 Partidos del GBA	Quilmes	01018	180.29	3,665.89	2,644.25	2,453.63	2,025.34	16.48	434.05	2.28	536.94	175.06	12,134.2
01	24 Partidos del GBA	San Fernando	01019	27.39	556.98	441.93	465.99	384.65	0.49	68.70	0.84	81.58	33.25	2,061.8
01	24 Partidos del GBA	San Isidro	01020	47.39	963.63	764.59	806.22	665.49	2.60	118.85	1.14	141.14	57.52	3,568.6
01	24 Partidos del GBA	San Miguel	01021	47.07	957.06	759.38	800.72	660.95	1.23	118.04	1.47	140.18	57.13	3,543.2
01	24 Partidos del GBA	Tigre	01022	121.57	2,471.86	1,782.98	1,654.45	1,365.66	2.44	292.68	1.19	362.05	118.04	8,172.9
01	24 Partidos del GBA	Tres de Febrero	01023	99.01	2,013.25	1,452.18	1,347.49	1,112.28	4.97	238.38	2.16	294.88	96.14	6,660.7
01	24 Partidos del GBA	Vicente López	01024	43.50	884.46	701.77	739.98	610.81	2.90	109.09	1.60	129.55	52.79	3,276.4
02	Interior de la Provincia	Adolfo Alsina	02001	1.50	37.27	29.32	34.01	28.08	0.06	3.21	0.10	5.80	2.43	141.8
02	Interior de la Provincia	Adolfo Gonzales Chaves	02002	1.04	25.85	20.34	23.60	19.48	0.06	2.23	0.14	4.02	1.68	98.4
02	Interior de la Provincia	Alberti	02003	0.94	23.35	18.37	21.31	17.59	0.16	2.01	0.08	3.63	1.52	89.0
02	Interior de la Provincia	Arrecifes	02004	4.89	99.45	78.91	83.20	68.68	0.28	9.81	0.37	18.91	5.94	370.4
02	Interior de la Provincia	Ayacucho	02005	1.81	44.90	35.33	40.98	33.83	0.00	3.87	0.30	6.98	2.92	170.9
02	Interior de la Provincia	Azul	02006	10.77	219.00	173.77	183.23	151.24	0.44	21.61	0.74	41.64	13.07	815.5
Total				8,910	182,494	137,390	125,573	94,917	510	16,799	355	32,481	9,949	609,378
				609,378										

4.1.4 Base de datos de infraestructura urbana

Metodología y alcance

Con el objeto de identificar el valor expuesto de infraestructura urbana en todo el país y utilizando el inventario de los centros urbanos correspondientes a cada una de las entidades subnacionales, se realizó una estimación de la cobertura de servicios públicos y valoración de las redes (acueducto, alcantarillado, comunicación), puentes, aeropuertos y puertos.

Las coberturas de servicios públicos e infraestructura de transporte, se estima a partir de información incluida en el censo de vivienda bajo las siguientes categorías:

- (a) Puentes urbanos
- (b) Aeropuertos
- (c) Puertos
- (d) Subestaciones de energía más redes anexas
- (e) Subestaciones de comunicaciones más antenas
- (f) Redes de acueducto y alcantarillado
- (g) Tanques y plantas de acueducto y alcantarillado
- (h) Redes de gas

En el caso de no contar con los datos del censo de vivienda la estimación se realiza a partir de valores típicos de los países de la región según el nivel de complejidad de la entidad subnacional, las densidades de población y nivel de cobertura de cada uno de estos servicios.

Conformación de la base de datos de infraestructura urbana

La información disponible permite consolidar la información relacionada con infraestructura de transporte y servicios públicos de centros urbanos para estimar los valores expuestos en cada uno de los sectores de análisis. La Tabla 4-5 y Tabla 4-6 presentan la información obtenida.

Tabla 4-5
Valores en exposición de sistema de transporte, de servicios públicos y redes
(Muestra ilustrativa de los datos, ver Anexo 3)

ID_Provincia	Provincia	Departamento	ID	Aeropuertos				Puertos			
				m² Const	Valor const	km Pistas	Valor pistas	m² Const	Valor const	m² muelle	Valor muelle
				(m²)	(US\$x10 ⁶)	(km)	(US\$x10 ⁶)	(m²)	(US\$x10 ⁶)	(m²)	(US\$x10 ⁶)
01	24 Partidos del GBA	Almirante Brown	01001	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
01	24 Partidos del GBA	Avellaneda	01002	0.00	0.00	0.00	0.00	13,500	13.50	146,840	440.52
01	24 Partidos del GBA	Berazategui	01003	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
01	24 Partidos del GBA	Esteban Echeverría	01004	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
01	24 Partidos del GBA	Ezeiza	01005	71,000.00	120.70	6.41	32.03	0	0.00	0	0.00
01	24 Partidos del GBA	Florencio Varela	01006	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
01	24 Partidos del GBA	General San Martín	01007	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
01	24 Partidos del GBA	Hurlingham	01008	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
01	24 Partidos del GBA	Ituzaingó	01009	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
01	24 Partidos del GBA	José C. Paz	01010	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
01	24 Partidos del GBA	La Matanza	01011	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
01	24 Partidos del GBA	Lanús	01012	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
01	24 Partidos del GBA	Lomas de Zamora	01013	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
01	24 Partidos del GBA	Malvinas Argentinas	01014	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
01	24 Partidos del GBA	Merlo	01015	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
01	24 Partidos del GBA	Moreno	01016	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
01	24 Partidos del GBA	Morón	01017	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
01	24 Partidos del GBA	Quilmes	01018	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
01	24 Partidos del GBA	San Fernando	01019	700.00	1.19	1.80	9.01	0	0.00	0	0.00
01	24 Partidos del GBA	San Isidro	01020	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
01	24 Partidos del GBA	San Miguel	01021	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
01	24 Partidos del GBA	Tigre	01022	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
01	24 Partidos del GBA	Tres de Febrero	01023	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
01	24 Partidos del GBA	Vicente López	01024	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
02	Interior de la Provincia	Adolfo Alsina	02001	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
02	Interior de la Provincia	Adolfo Gonzales Chaves	02002	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
02	Interior de la Provincia	Alberti	02003	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
02	Interior de la Provincia	Arrecifes	02004	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
02	Interior de la Provincia	Ayacucho	02005	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
02	Interior de la Provincia	Azul	02006	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
Total				241,728	411	145	934	112,913	98	669,612	1,698

Tabla 4-6
Valores en exposición de sistema de transporte, de servicios públicos y redes
(Muestra ilustrativa de los datos, ver Anexo 3)

ID_Provincia	Provincia	Departamento	ID	Subestaciones eléctricas	Subestaciones comunicación	Presas	Plantas y tanques	Redes		
				(US\$x10 ⁶)	(US\$x10 ⁶)	(US\$x10 ⁶)	(US\$x10 ⁶)	Acueducto	Alcantarillado	Gas
01	24 Partidos del GBA	Almirante Brown	01001	55.02	31.09	12.02	38.64	34.34	4.74	9.35
01	24 Partidos del GBA	Avellaneda	01002	33.44	20.89	14.63	47.01	41.79	11.97	6.87
01	24 Partidos del GBA	Berazategui	01003	33.01	17.41	13.71	44.06	39.16	11.88	5.70
01	24 Partidos del GBA	Esteban Echeverría	01004	32.16	17.80	7.31	23.49	20.88	3.40	5.55
01	24 Partidos del GBA	Ezeiza	01005	9.09	4.58	0.65	0.49	0.98	0.98	1.88
01	24 Partidos del GBA	Florencio Varela	01006	45.14	19.31	15.33	49.28	43.80	6.68	7.80
01	24 Partidos del GBA	General San Martín	01007	40.16	25.45	17.44	56.04	49.82	11.28	6.94
01	24 Partidos del GBA	Hurlingham	01008	8.97	5.37	1.31	0.98	1.96	0.64	1.86
01	24 Partidos del GBA	Ituzaingó	01009	8.34	5.43	0.48	0.36	0.72	0.45	1.73
01	24 Partidos del GBA	José C. Paz	01010	13.73	4.52	1.00	0.75	1.50	0.53	2.84
01	24 Partidos del GBA	La Matanza	01011	193.98	97.77	62.44	200.70	178.40	47.53	33.51
01	24 Partidos del GBA	Lanús	01012	44.11	28.06	19.33	62.14	55.24	8.86	7.62
01	24 Partidos del GBA	Lomas de Zamora	01013	60.53	33.40	26.02	83.65	74.36	10.09	10.46
01	24 Partidos del GBA	Malvinas Argentinas	01014	32.65	16.03	1.55	4.98	4.43	0.37	5.64
01	24 Partidos del GBA	Merlo	01015	54.12	26.47	10.98	35.29	31.37	5.99	9.35
01	24 Partidos del GBA	Moreno	01016	47.50	16.32	8.62	27.69	24.61	4.83	8.20
01	24 Partidos del GBA	Morón	01017	30.61	21.00	10.97	35.25	31.33	8.97	5.29
01	24 Partidos del GBA	Quilmes	01018	59.62	33.27	25.95	83.40	74.13	19.03	10.30
01	24 Partidos del GBA	San Fernando	01019	7.94	4.90	3.24	2.43	4.86	3.96	1.65
01	24 Partidos del GBA	San Isidro	01020	13.99	10.21	5.80	4.35	8.70	7.20	2.90
01	24 Partidos del GBA	San Miguel	01021	13.90	6.99	2.47	1.85	3.70	3.04	2.88
01	24 Partidos del GBA	Tigre	01022	39.62	21.35	11.21	36.05	32.04	3.66	6.84
01	24 Partidos del GBA	Tres de Febrero	01023	32.74	21.77	13.52	43.47	38.64	14.13	5.66
01	24 Partidos del GBA	Vicente López	01024	12.84	9.58	5.38	4.03	8.07	7.89	2.66
02	Interior de la Provincia	Adolfo Alsina	02001	0.08	0.03	0.00	0.06	0.11	0.05	0.04
02	Interior de la Provincia	Adolfo Gonzales Chaves	02002	0.05	0.02	0.00	0.04	0.08	0.04	0.03
02	Interior de la Provincia	Alberti	02003	0.05	0.02	0.00	0.03	0.07	0.06	0.03
02	Interior de la Provincia	Arrecifes	02004	1.31	0.52	0.52	0.39	0.78	0.52	0.27
02	Interior de la Provincia	Ayacucho	02005	0.11	0.04	0.00	0.08	0.15	0.13	0.06
02	Interior de la Provincia	Azul	02006	2.99	1.27	1.15	0.86	1.72	1.34	0.62
Total				2,571	1,279	940	2,196	2,242	806	403
				13,577						

4.1.5 Base de datos de infraestructura nacional

Metodología y alcance

Con el objeto de cuantificar el valor expuesto de infraestructura nacional se utilizó el inventario de entidades subnacionales junto con los centros poblados y tipos de servicios que disponen. Con base en esto se realizó una estimación de la cobertura de servicios y valoración de los componentes de infraestructura tales como hidroeléctricas, redes de interconexión nacional, líneas de transporte de hidrocarburos y redes viales nacionales.

La infraestructura nacional se clasifica en las siguientes categorías:

- (a) Vías red primaria
- (b) Vías red secundaria
- (c) Hidroeléctricas
- (d) Presas
- (e) Plantas térmicas
- (f) Subestaciones de energía más redes anexas
- (g) Subestaciones de comunicaciones más antenas
- (h) Subestaciones de combustible y gas más redes anexas

La asignación de valores sobre la infraestructura descrita anteriormente se realiza bajo el estimativo de cobertura de la población con los servicios relacionados a cada tipo de infraestructura, la producción energética del país, el número de líneas móviles y fijas y del nivel de hidrocarburos explotados. Los anteriores valores se ubican geográficamente respecto de la densidad de población y los centros de producción.

Conformación de la base de datos de infraestructura nacional

La información disponible permite consolidar la información relacionada con infraestructura nacional de transporte y servicios públicos para estimar los valores expuestos en cada uno de los sectores de análisis. La Tabla 4-7 y Tabla 4-8 presentan la información resultante.

Tabla 4-7
Valores de exposición de la red vial nacional
(Muestra ilustrativa de los datos, ver Anexo 3)

ID_Provincia	Provincia	Departamento	ID_Provincia_Depto	Red Primaria		Red Secundaria		Red Primaria		Red Secundaria	
				km de vía	Valor vías	km de vía	Valor vías	km puentes	Valor puentes	km puente	Valor puentes
				(km)	(Costo US\$ x 10 ⁶)	(km)	(Costo US\$ x 10 ⁶)	(km)	(Costo US\$ x 10 ⁶)	(km)	(Costo US\$ x 10 ⁶)
01	24 Partidos del GBA	Almirante Brown	01001	0.00	0.00	31.92	17.55	0.00	0.00	0.00	0.00
01	24 Partidos del GBA	Avellaneda	01002	15.09	13.58	13.25	7.29	0.00	0.00	0.00	0.00
01	24 Partidos del GBA	Berazategui	01003	31.55	28.39	37.77	20.78	0.00	0.00	0.00	0.00
01	24 Partidos del GBA	Esteban Echeverría	01004	0.12	0.11	16.81	9.25	0.00	0.00	0.00	0.00
01	24 Partidos del GBA	Ezeiza	01005	29.04	26.13	27.36	15.05	0.03	0.60	0.00	0.00
01	24 Partidos del GBA	Florencio Varela	01006	0.00	0.00	33.67	18.52	0.00	0.00	0.00	0.00
01	24 Partidos del GBA	General San Martín	01007	9.88	8.89	14.92	8.21	0.00	0.00	0.00	0.00
01	24 Partidos del GBA	Hurlingham	01008	8.72	7.85	9.91	5.45	0.06	1.20	0.00	0.00
01	24 Partidos del GBA	Ituzaingó	01009	11.18	10.06	3.72	2.05	0.12	2.40	0.00	0.00
01	24 Partidos del GBA	José C. Paz	01010	0.00	0.00	18.38	10.11	0.00	0.00	0.00	0.00
01	24 Partidos del GBA	La Matanza	01011	35.54	31.98	41.64	22.90	0.09	1.80	0.00	0.00
01	24 Partidos del GBA	Lanús	01012	0.00	0.00	4.90	2.69	0.00	0.00	0.00	0.00
01	24 Partidos del GBA	Lomas de Zamora	01013	0.00	0.00	22.32	12.28	0.00	0.00	0.00	0.00
01	24 Partidos del GBA	Malvinas Argentinas	01014	8.74	7.86	14.07	7.74	0.00	0.00	0.00	0.00
01	24 Partidos del GBA	Merlo	01015	0.00	0.00	30.03	16.52	0.00	0.00	0.00	0.00
01	24 Partidos del GBA	Moreno	01016	14.29	12.86	41.58	22.87	0.00	0.00	0.04	0.60
01	24 Partidos del GBA	Morón	01017	5.51	4.96	24.55	13.50	0.00	0.00	0.00	0.00
01	24 Partidos del GBA	Quilmes	01018	16.80	15.12	30.61	16.84	0.48	9.60	0.02	0.30
01	24 Partidos del GBA	San Fernando	01019	3.67	3.31	10.42	5.73	0.00	0.00	0.00	0.00
01	24 Partidos del GBA	San Isidro	01020	11.15	10.03	13.32	7.33	0.00	0.00	0.00	0.00
01	24 Partidos del GBA	San Miguel	01021	0.07	0.06	16.56	9.11	0.00	0.00	0.00	0.00
01	24 Partidos del GBA	Tigre	01022	9.87	8.88	47.02	25.86	0.00	0.00	0.00	0.00
01	24 Partidos del GBA	Tres de Febrero	01023	13.14	11.83	15.45	8.50	0.06	1.20	0.04	0.60
01	24 Partidos del GBA	Vicente López	01024	6.89	6.21	5.09	2.80	0.00	0.00	0.00	0.00
02	Interior de la Provincia	Adolfo Alsina	02001	6.15	5.53	123.31	67.82	0.00	0.00	0.02	0.30
02	Interior de la Provincia	Adolfo Gonzales Chaves	02002	37.76	33.98	43.66	24.01	0.00	0.00	0.00	0.00
02	Interior de la Provincia	Alberti	02003	24.50	22.05	11.32	6.22	0.03	0.60	0.00	0.00
02	Interior de la Provincia	Arrecifes	02004	27.40	24.66	91.27	50.20	0.06	1.20	0.08	1.20
02	Interior de la Provincia	Ayacucho	02005	0.00	0.00	282.93	155.61	0.00	0.00	0.02	0.30
02	Interior de la Provincia	Azul	02006	198.53	178.68	114.54	63.00	0.06	1.20	0.04	0.60
Total				36,290.86	32,661.77	31,878.63	17,533.25	28.17	563.40	15.88	238.20
				50,997							

Tabla 4-8
Valores de exposición de infraestructura nacional
(Muestra ilustrativa de los datos, ver Anexo 3)

ID_Provincia	Provincia	Departamento	ID	Generación energética				Distribución energética		Comunicaciones		Hidrocarburos	
				Hidroeléctricas		Plantas		Subestaciones	Redes	Líneas fijas	Líneas móviles	Derivados	Gas
				Presa	Casa de máquinas	Térmicas	Geotérmicas						
				(US\$ x 10 ⁶)	(US\$ x 10 ⁶)	(US\$ x 10 ⁶)	(US\$ x 10 ⁶)						
01	24 Partidos del GBA	Almirante Brown	01001	6.97	3.66	0.00	0.00	5.74	5.74	3.89	4.90	24.56	18.72
01	24 Partidos del GBA	Avellaneda	01002	242.57	127.35	0.00	0.00	3.48	3.48	2.61	2.93	44.31	13.75
01	24 Partidos del GBA	Berazategui	01003	0.00	0.00	0.00	0.00	3.44	3.44	2.18	2.95	41.20	11.41
01	24 Partidos del GBA	Esteban Echeverría	01004	0.00	0.00	0.00	0.00	3.35	3.35	2.23	2.89	44.21	11.12
01	24 Partidos del GBA	Ezeiza	01005	0.00	0.00	0.00	0.00	1.91	1.91	1.15	1.66	1.56	6.33
01	24 Partidos del GBA	Florencio Varela	01006	0.00	0.00	0.00	0.00	4.70	4.70	2.41	4.03	11.31	15.59
01	24 Partidos del GBA	General San Martín	01007	0.00	0.00	0.00	0.00	4.18	4.18	3.18	3.55	0.00	13.87
01	24 Partidos del GBA	Hurlingham	01008	0.00	0.00	0.00	0.00	1.87	1.87	1.34	1.60	0.00	6.19
01	24 Partidos del GBA	Ituzaingó	01009	0.00	0.00	0.00	0.00	1.74	1.74	1.36	1.52	0.00	5.76
01	24 Partidos del GBA	José C. Paz	01010	0.00	0.00	0.00	0.00	2.86	2.86	1.13	2.54	0.00	9.48
01	24 Partidos del GBA	La Matanza	01011	0.00	0.00	0.00	0.00	20.21	20.21	12.22	17.25	45.69	67.03
01	24 Partidos del GBA	Lanús	01012	6.97	3.66	0.00	0.00	4.60	4.60	3.51	3.82	23.85	15.24
01	24 Partidos del GBA	Lomas de Zamora	01013	0.00	0.00	0.00	0.00	6.31	6.31	4.17	5.31	19.21	20.91
01	24 Partidos del GBA	Malvinas Argentinas	01014	0.00	0.00	0.00	0.00	3.40	3.40	2.00	2.95	0.00	11.28
01	24 Partidos del GBA	Merlo	01015	0.00	0.00	0.00	0.00	5.65	5.65	3.31	4.85	28.60	18.73
01	24 Partidos del GBA	Moreno	01016	0.00	0.00	0.00	0.00	4.95	4.95	2.04	4.46	0.00	16.41
01	24 Partidos del GBA	Morón	01017	0.00	0.00	0.00	0.00	3.19	3.19	2.62	2.73	3.46	10.57
01	24 Partidos del GBA	Quilmes	01018	0.00	0.00	0.00	0.00	6.21	6.21	4.16	5.24	19.26	20.60
01	24 Partidos del GBA	San Fernando	01019	0.00	0.00	0.00	0.00	1.68	1.68	1.25	1.44	0.00	5.59
01	24 Partidos del GBA	San Isidro	01020	0.00	0.00	0.00	0.00	2.92	2.92	2.55	2.57	0.00	9.67
01	24 Partidos del GBA	San Miguel	01021	4.63	2.43	0.00	0.00	2.90	2.90	1.75	2.57	0.00	9.60
01	24 Partidos del GBA	Tigre	01022	0.00	0.00	0.00	0.00	4.19	4.19	2.71	3.69	0.00	13.89
01	24 Partidos del GBA	Tres de Febrero	01023	0.00	0.00	0.00	0.00	3.41	3.41	2.72	2.88	0.00	11.31
01	24 Partidos del GBA	Vicente López	01024	0.00	0.00	0.00	0.00	2.68	2.68	2.39	2.35	0.00	8.87
02	Interior de la Provincia	Adolfo Alsina	02001	8.37	4.39	0.00	0.00	0.17	0.17	0.08	0.15	0.00	0.57
02	Interior de la Provincia	Adolfo Gonzales Chaves	02002	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.12	0.06	0.11	92.39	0.40
02	Interior de la Provincia	Alberti	02003	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.11	0.05	0.09	0.00	0.36
02	Interior de la Provincia	Arrecifes	02004	5.58	2.93	0.00	0.00	0.30	0.30	0.14	0.27	0.00	1.00
02	Interior de la Provincia	Ayacucho	02005	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.21	0.09	0.18	0.00	0.69
02	Interior de la Provincia	Azul	02006	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.66	0.34	0.59	219.69	2.20
Total				5,568	2,923	1,835	0	421	421	230	370	10,671	1,072
				23,512									

4.1.6 Resumen general de indicadores de exposición

La información recopilada para cada una de las secciones explicadas anteriormente, se organiza y clasifica en una hoja de cálculo (Anexo 3) en la cual se presentan cada una de las bases de datos entidades subnacionales, población, construcciones e infraestructura urbana y nacional. En esta misma hoja de cálculo se presenta un resumen de los índices generales resultantes del país y de los valores en exposición para cada uno de los activos estimados. La Tabla 4-9 y Tabla 4-10 presentan un resumen de los valores finales resultantes de índices y de exposición física, económica y humana.

Tabla 4-9
Resumen de indicadores del modelo de activos: Indicadores proxy

Indicador	Unidad	Valor
Población total	Hab	43,131,966
Población urbana	Hab	39,198,471
Población rural	Hab	3,933,495
Salario mínimo mensual	US\$	597
PIB (2014)	US\$Billones	927
PIB per capita (2014)	US\$	22,100

Construcciones	Unidad	Valor	Unidad	Valor per capita
Área construida urbana	m ²	1,020,385 x10 ³	m ² /Hab	23.7
Densidad construcción urbana	m ² /m ² terreno urbano			-

Infraestructura	Unidad	Valor económico	Unidad	Valor económico per capita	Valor económico per capita / PIB per capita	Participación relativa
Construcciones privadas	US\$x10 ⁶	566,593	US\$/Hab	13,136	0.59	81.2%
Construcciones publicas	US\$x10 ⁶	42,785	US\$/Hab	992	0.04	6.1%
Infraestructura urbana	US\$x10 ⁶	13,577	US\$/Hab	315	0.01	1.9%
Infraestructura nacional	US\$x10 ⁶	74,508	US\$/Hab	1,727	0.08	10.7%
Total Infraestructura país	US\$x10 ⁶	697,464	US\$/Hab	16,170	2.79	100.0%

Tabla 4-10
Resumen de indicadores del modelo de activos: Valores expuestos

Grupos de uso	Área de construcción [m ² x10 ³]	Valor económico [US\$x10 ⁶]	Área de construcción / población del grupo de uso	
			Unidad	Valor
Residencial PB	41,974	8,910	m ² /Hab PB	4.3
Residencial PM	345,540	182,494	m ² /Hab PM	13.1
Residencial PA	164,072	137,390	m ² /Hab PA	23.1
Comercial	241,867	125,573	m ² /FL	20.0
Industrial	113,134	94,917	m ² /FL	50.0
Salud Privada	592	510	m ² /1000 Hab	13.7
Educación Privada	31,199	16,799	m ² /Est	4.3
Salud Pública	545	355	m ² /1000 Hab	12.6
Educación Pública	62,001	32,481	m ² /Est	8.6
Gobierno	19,461.5	9,949	m ² /EP	5.0
Total	1,020,385	609,378	m²/Hab urbano	26.0

Tabla 2-10
Resumen de indicadores del modelo de activos: Valores expuestos (continuación)

Sector	Cantidad		Cantidad per capita Urbano	Valor económico	Valor económico per capita Urbano	Valor económico / Cantidad	
	Unidad	Valor		[US\$ $\times 10^6$]	[US\$ / Hab]	Unidad	Valor
SubEst electricas	-	-	-	2,571	66	-	-
SubEst Comunicaciones	-	-	-	1,279	33	-	-
Presas abastecimiento	-	-	-	940	24	-	-
Plantas y tanques	-	-	-	2,196	56	-	-
Red Acueducto	-	-	-	2,242	57	-	-
Red Alcantarillado	-	-	-	806	21	-	-
Red Gas	-	-	-	403	10	-	-
Aeropuertos (Terminal)	m ²	241,728	6.2	411	10	US\$/m ²	1,700
Aeropuertos (Pistas)	km	145	0.0	934	24	US\$ $\times 10^6$ /km	6
Puertos (Bodegas)	m ²	112,913	2.9	98	3	US\$/m ²	872
Puertos (Muelle)	m ²	669,612	17.1	1,698	43	US\$/m ²	2,536
Puentes Urbanos	Und	0	0.0	0	0	US\$ $\times 10^6$ /und	0
Total				13,577	346		

Sector	Cantidad		Valor económico	Valor económico per capita nacional	Valor económico / Cantidad
	Unidad	Valor	[US\$ $\times 10^6$]	[US\$/Hab]	[US\$ $\times 10^6$ /km]
Red vial principal (Vias)	km	36,291	32,662	757	0.9
Red vial secundaria (Vias)	km	31,879	17,533	407	0.55
Red vial principal (Puentes)	km	28	563	13	20
Red vial secundaria (Puentes)	km	16	238	6	15
Hidroelectricas (Presas)	-	-	5,568	129	-
Hidroelectricas (Casas de Maquinas)	-	-	2,923	68	-
Plantas Térmicas	-	-	1,835	43	-
Plantas Geotérmicas	-	-	0	0	-
Distribución energética (Subestaciones)	-	-	421	10	-
Distribución energética (Redes)	-	-	421	10	-
Comunicaciones (Líneas Fijas)	-	-	230	5	-
Comunicaciones (Líneas Móviles)	-	-	370	8.6	-
Hidrocarburos Derivados	-	-	10,671	247	-
Hidrocarburos (Gas)	-	-	1,072	25	-
Total	-	-	74,508	1,727	-

4.1.7 Presentación gráfica del modelo de activos expuestos

Para comprender la distribución relativa de valores expuestos tanto geográficamente como por sectores económicos, del desarrollo o de uso se presentan a continuación una serie de gráficas representativas de los parámetros más importantes del modelo.

Edificaciones urbanas según área construida, valor por provincia y sector

La Figura 4-3 a la Figura 4-5 presentan la extensión en km², la población y la densidad poblacional (urbana, rural y total) para cada una de las 25 entidades analizadas.

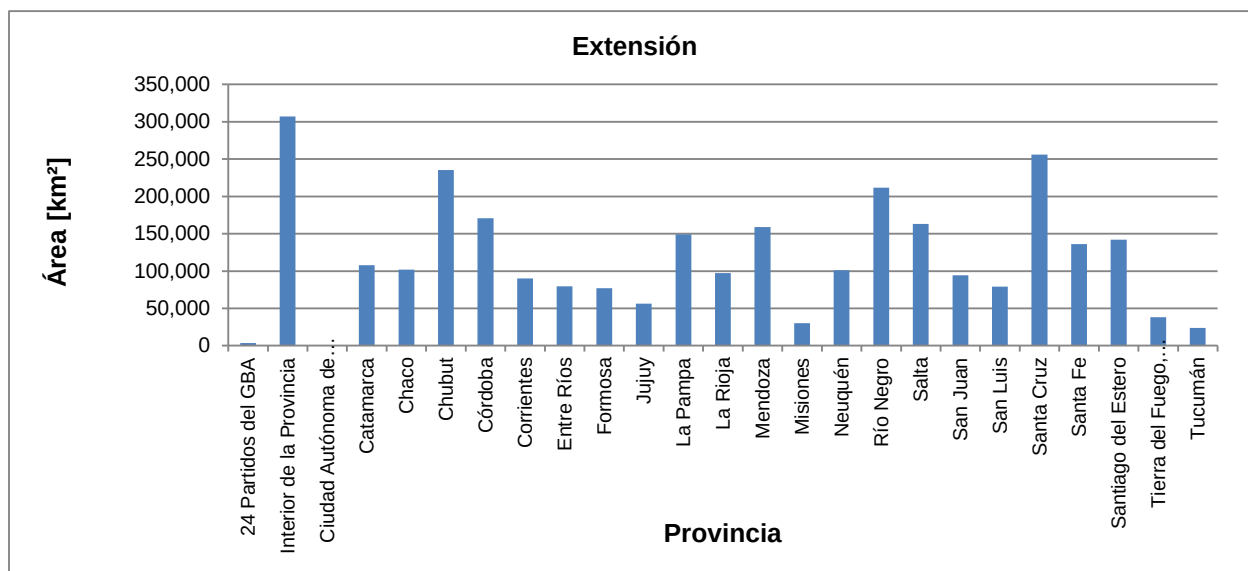


Figura 4-3
Extensión territorial

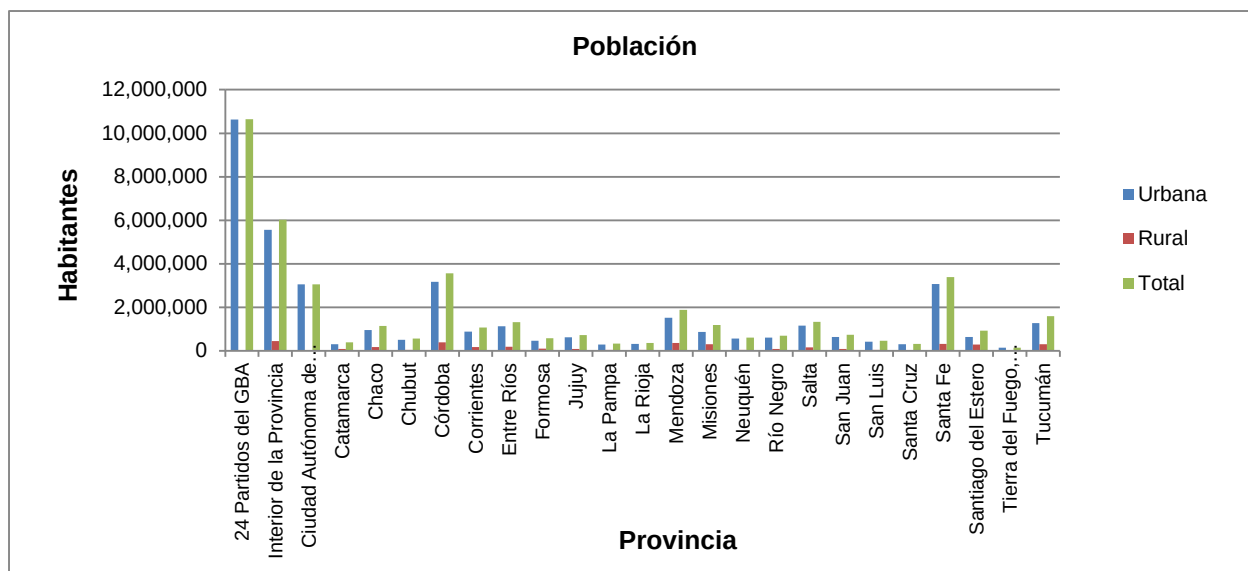


Figura 4-4
Población por provincia

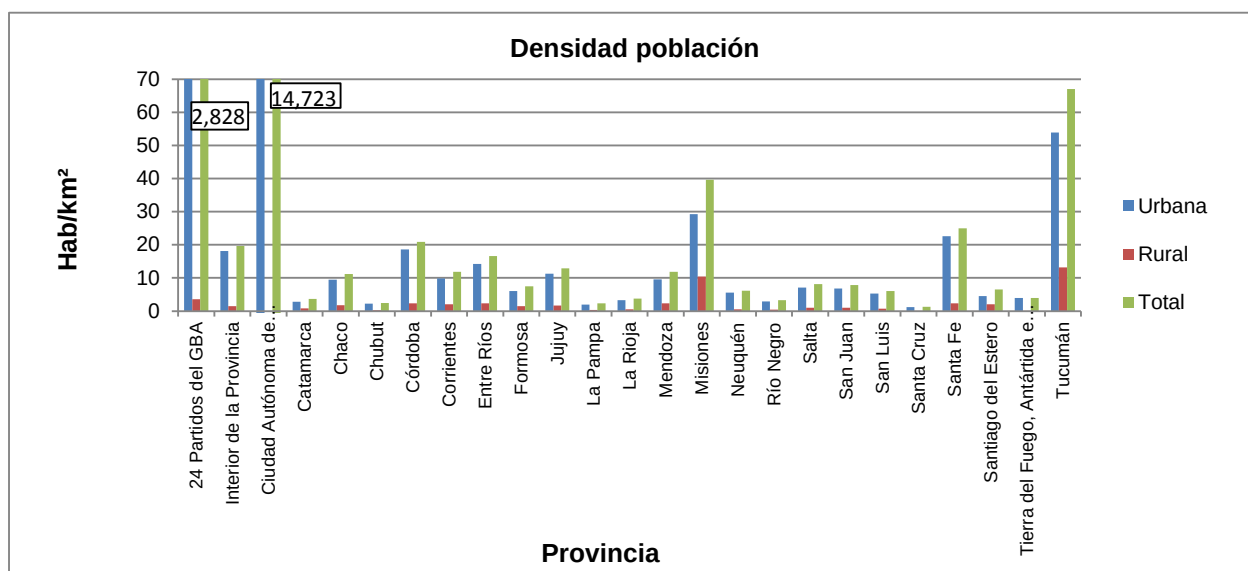


Figura 4-5
Densidad poblacional

La Figura 4-6 y la Figura 4-7 presentan los valores estimados de área de construcción urbana en m^2 y valor expuesto correspondiente para cada una de las provincias.

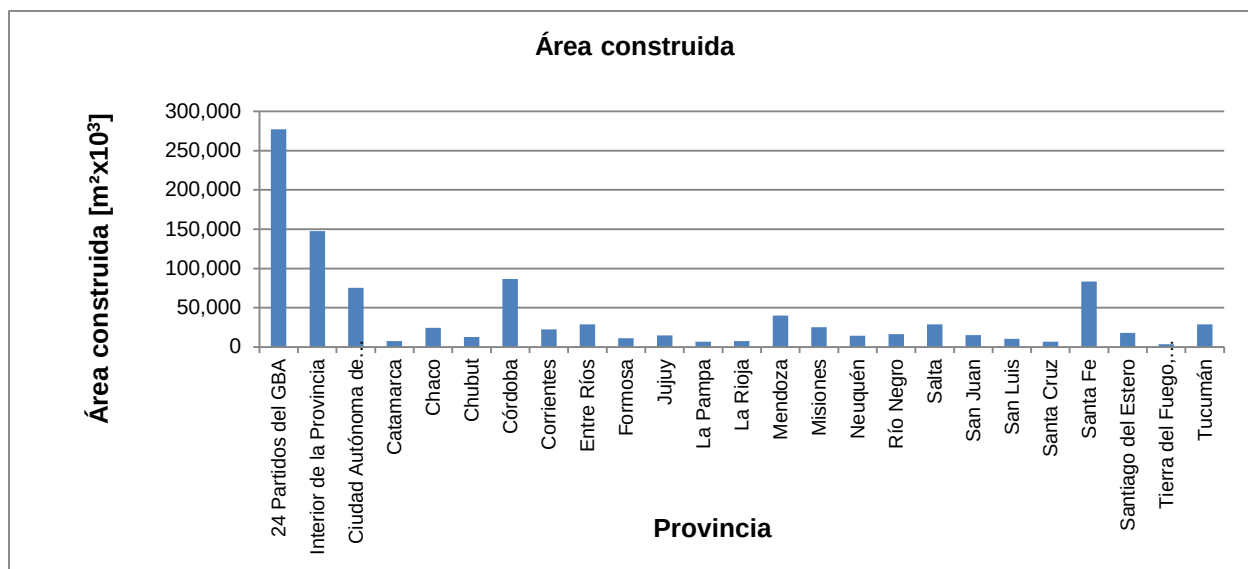


Figura 4-6
Área construida por provincia

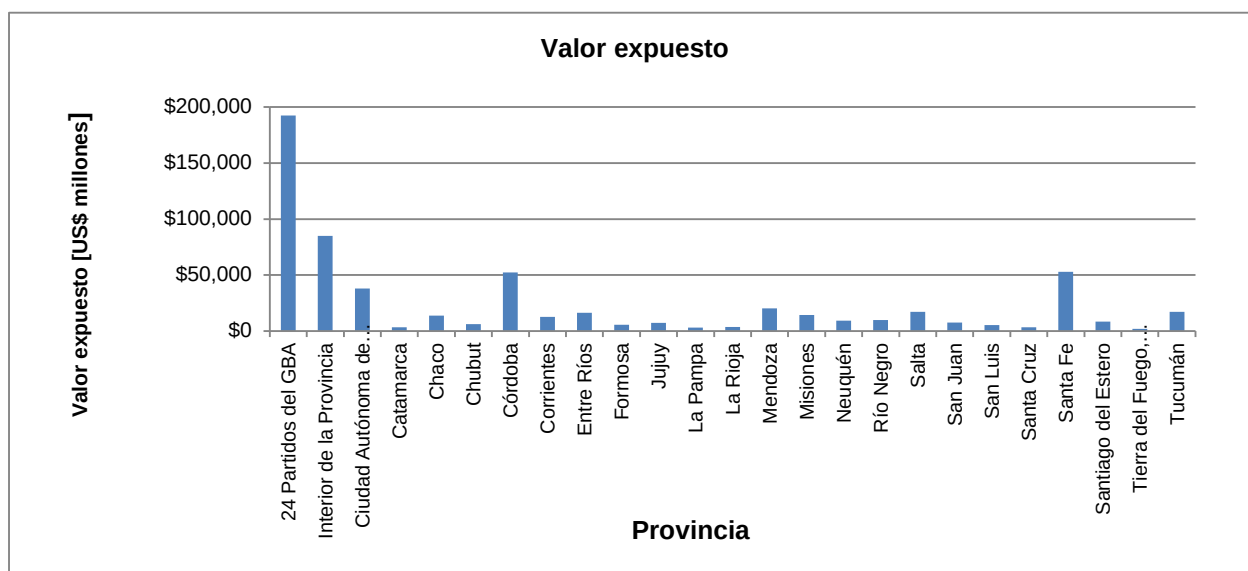


Figura 4-7
Valores expuestos de edificaciones regulares por provincia

Por otro lado la Figura 4-8 y Figura 4-9 presentan la información correspondiente a área construida aproximada y valores de exposición para cada uno de los sectores de uso.

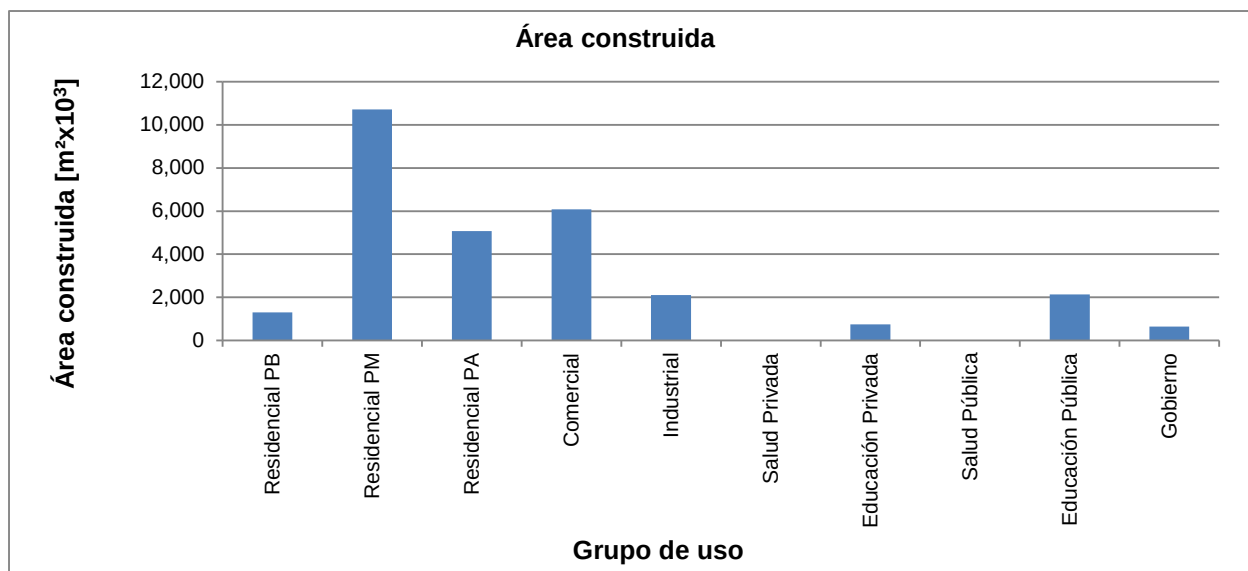


Figura 4-8
Área construida por sector de uso

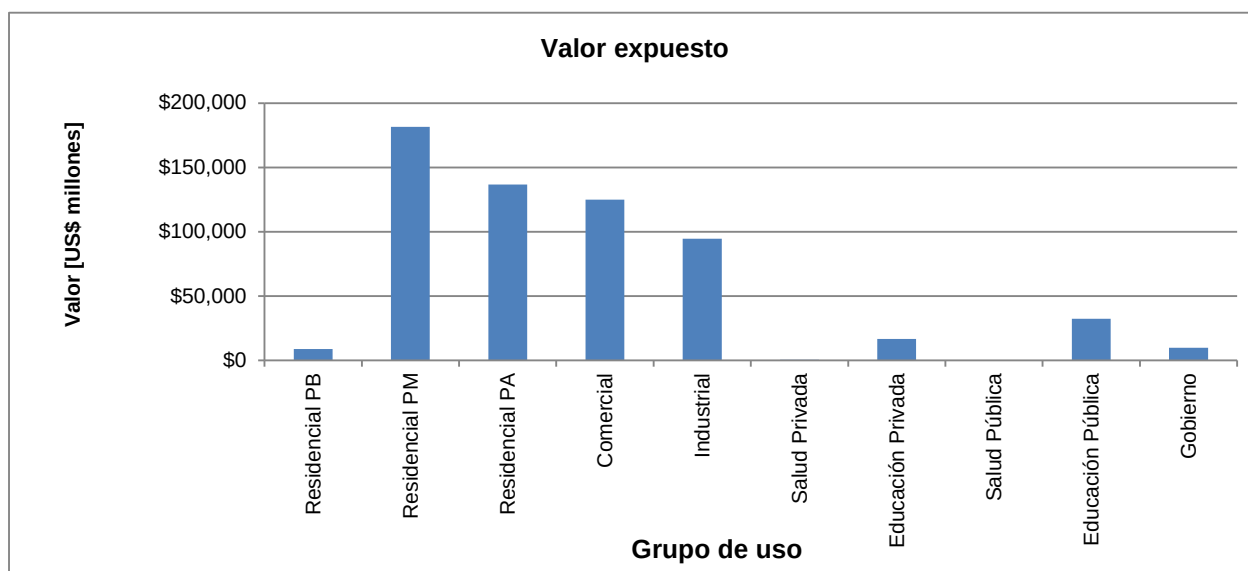


Figura 4-9
Valor expuesto por sector de uso

La información anterior se combina en gráficas de tres ejes (Figura 4-10 y Figura 4-11) en las cuales se presentan las áreas de construcción y los valores expuestos correspondientes estimados y discriminados de acuerdo con cada una de las provincias y con cada uno de los sectores de uso.

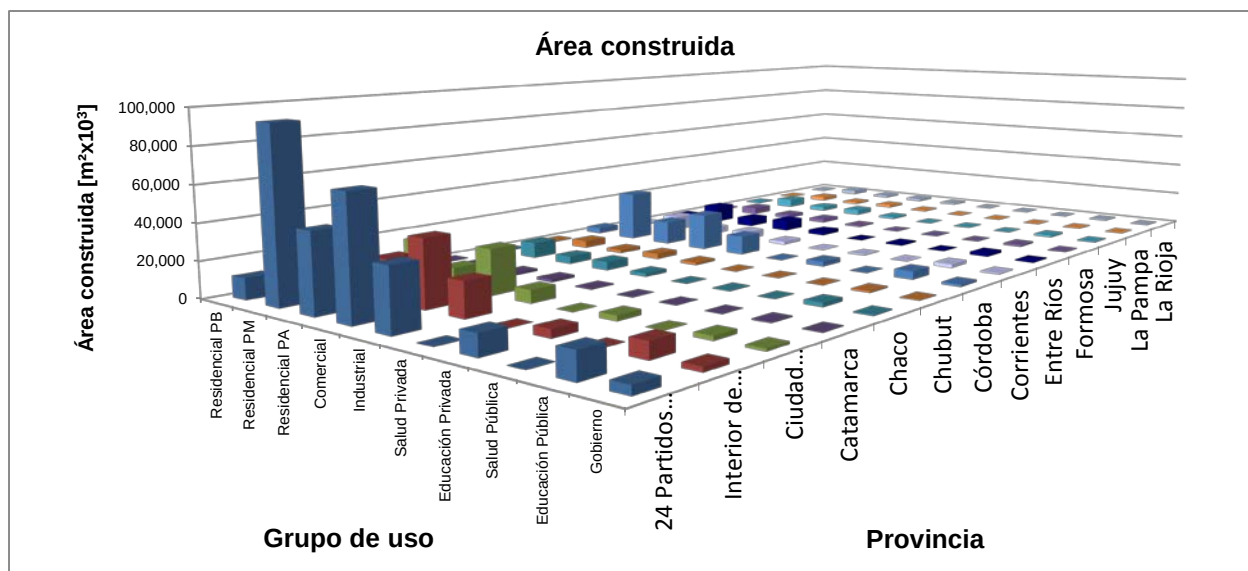


Figura 4-10
Área construida por provincia y sector de uso

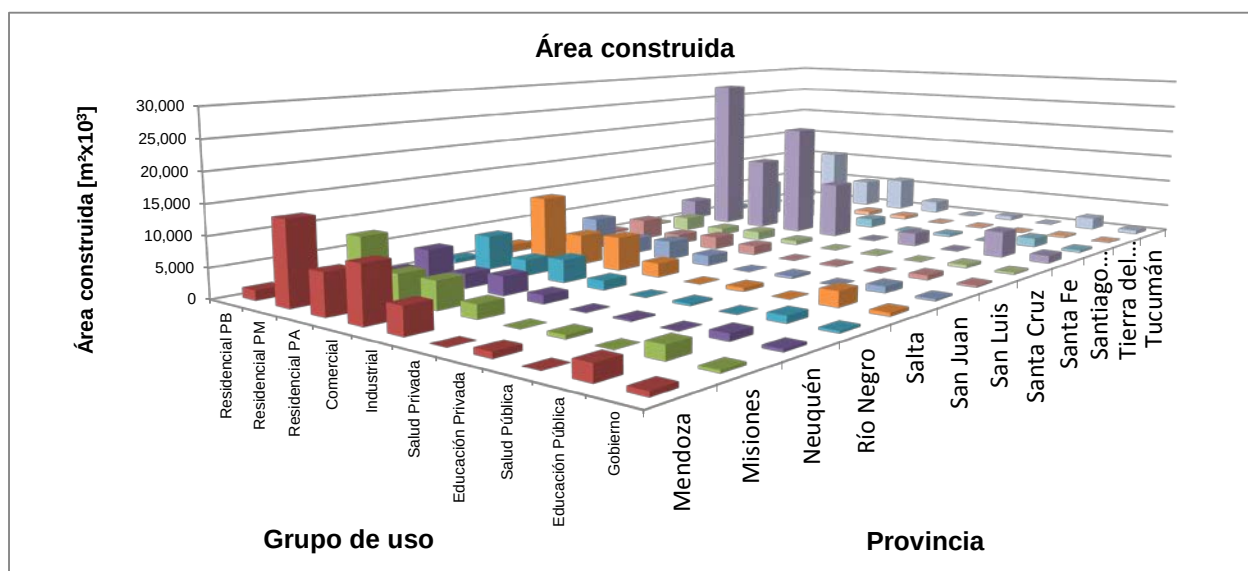


Figura 2-10
Área construida por provincia y sector de uso (continuación)

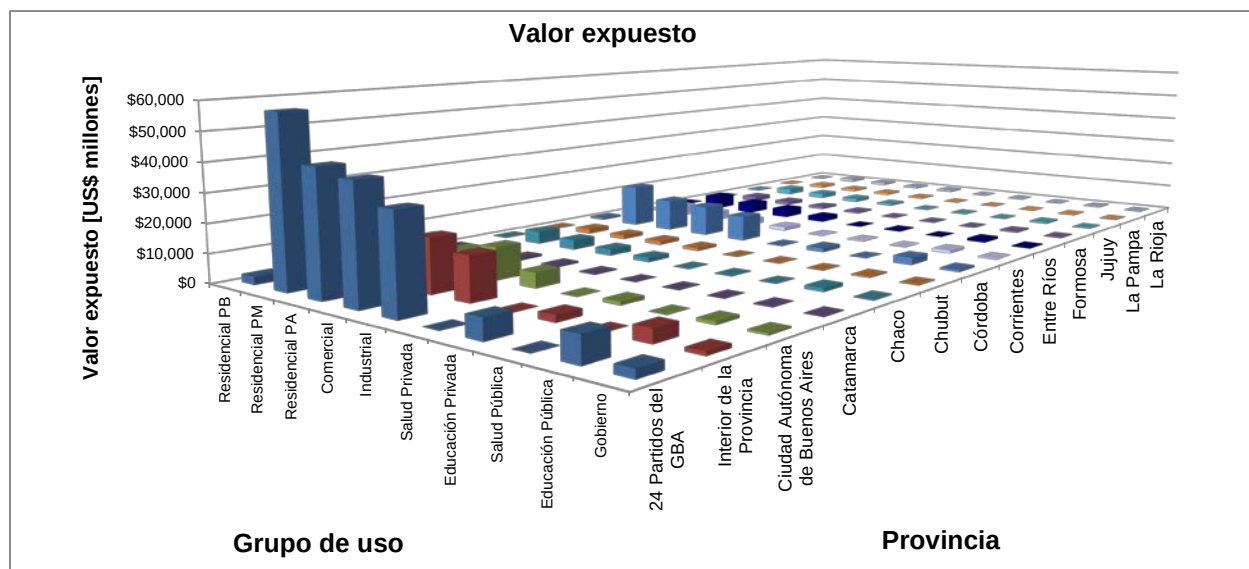


Figura 4-11
Valor expuesto por provincia y sector de uso

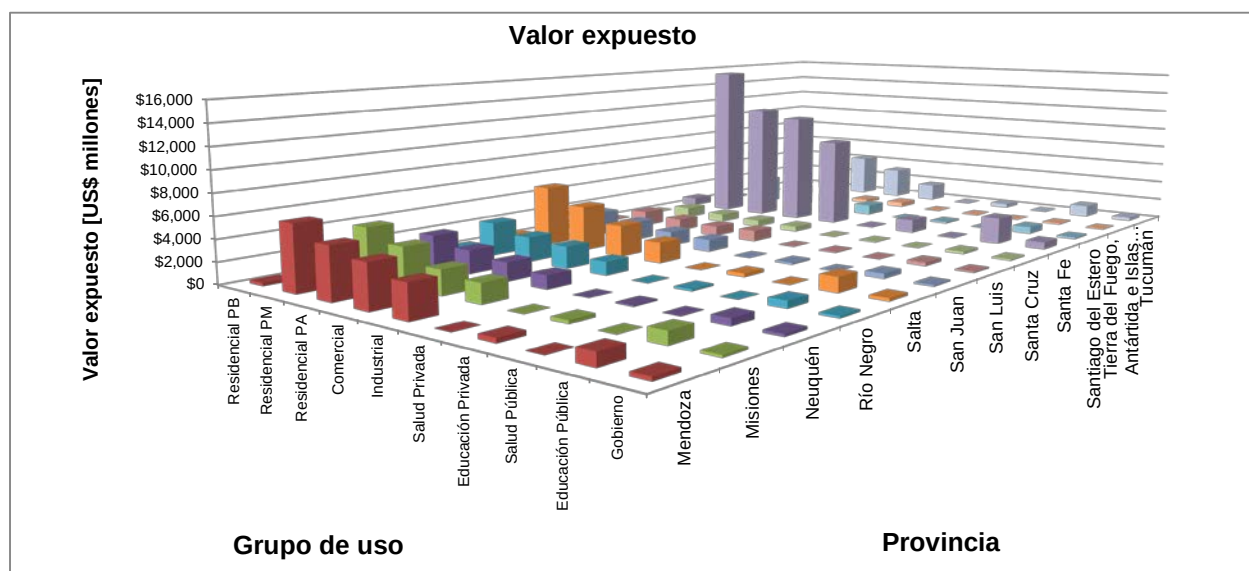


Figura 2-11
Valor expuesto por provincia y sector de uso (continuación)

Infraestructura urbana según valores por provincia y sector

La Figura 4-12 y Figura 4-13 presentan los valores expuestos estimados de la infraestructura urbana que incluye puentes, aeropuertos, puertos, sistema de distribución de energía, telecomunicaciones, sistemas de potabilización, distribución y tratamiento de aguas y sistema de distribución de gas. La información se presenta discriminada para cada una de las provincias y por sectores de uso.

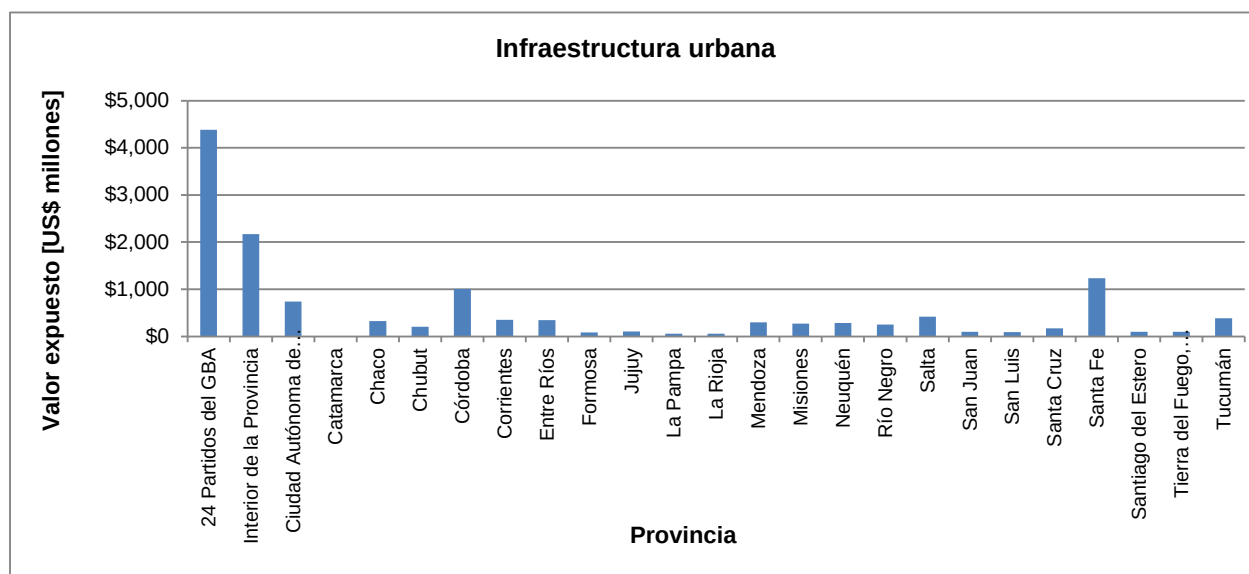


Figura 4-12
Valor expuesto en infraestructura urbana por provincia

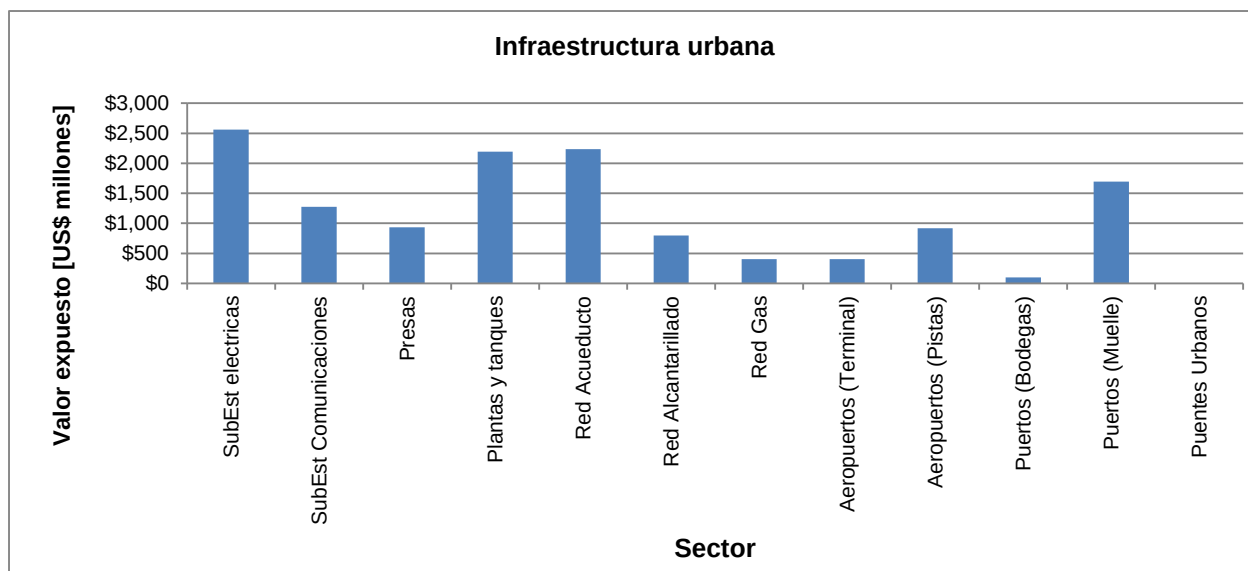


Figura 4-13
Valor expuesto en infraestructura urbana por sector

La Figura 4-14 muestra la información presentada anteriormente en una gráfica de tres dimensiones.

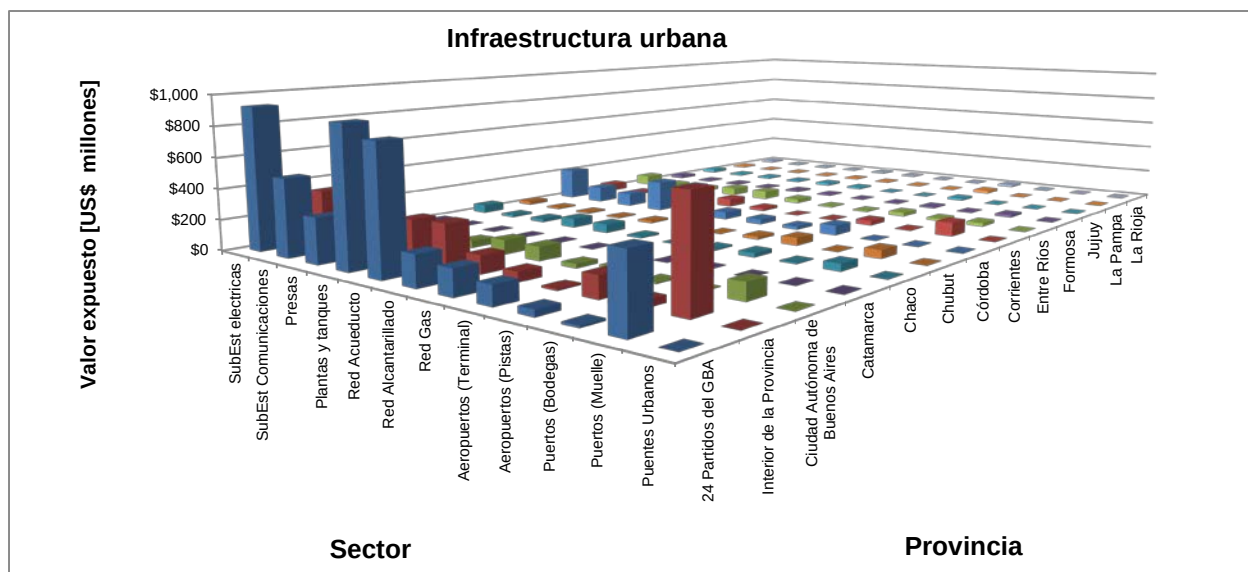


Figura 4-14
Valor expuesto en infraestructura urbana por provincia y sector

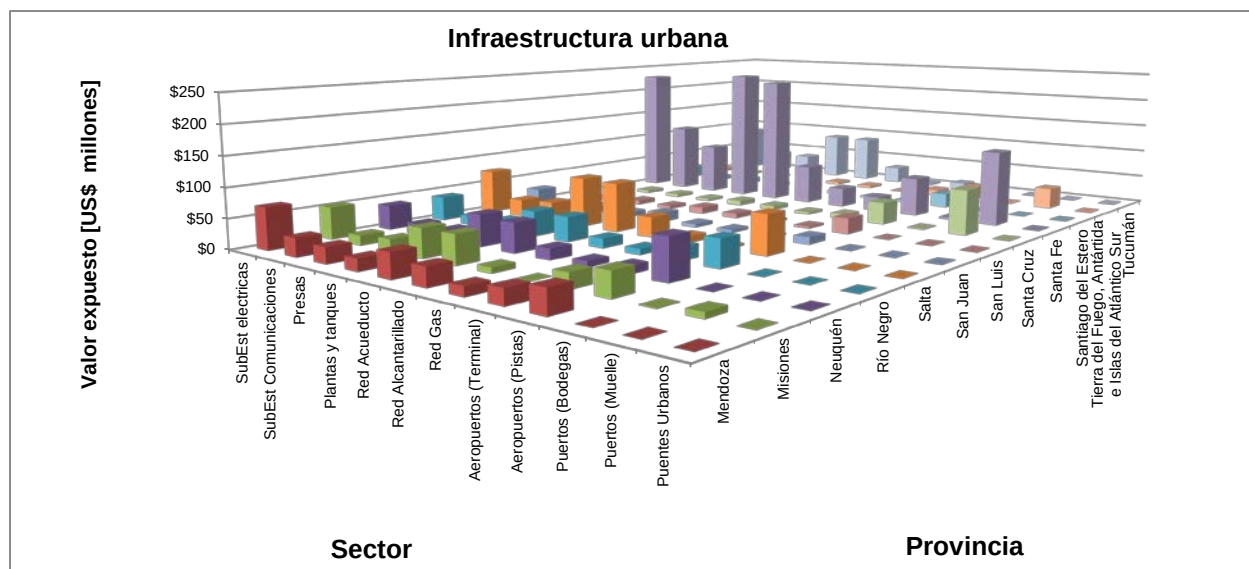


Figura 2-14
Valor expuesto en infraestructura urbana por provincia y sector (continuación)

Infraestructura nacional según valores por provincia y sector

La Figura 4-15 y Figura 4-16 presentan los valores expuestos estimados de la infraestructura nacional que incluye la red vial principal y secundaria incluyendo puentes, sistemas de generación de energía, presas, plantas térmicas, subestaciones de energía, subestaciones de telecomunicaciones, subestaciones y redes de distribución de gas natural y sistema de hidrocarburos. La información se presenta discriminada para cada una de las provincias y por sectores de uso.

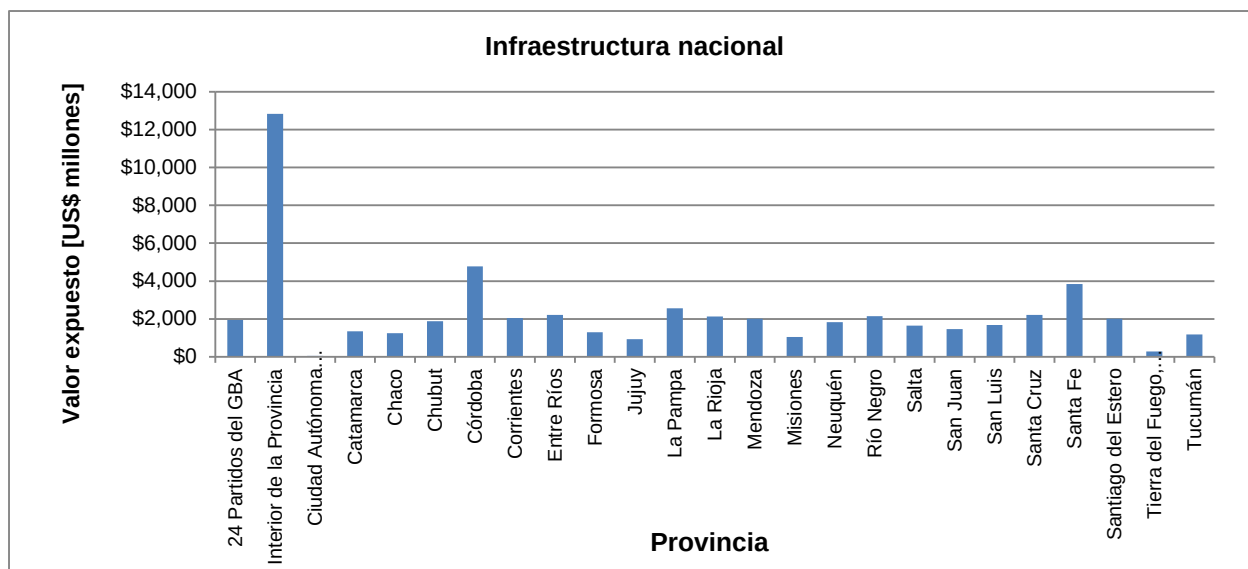


Figura 4-15
Valor expuesto en infraestructura nacional por provincia

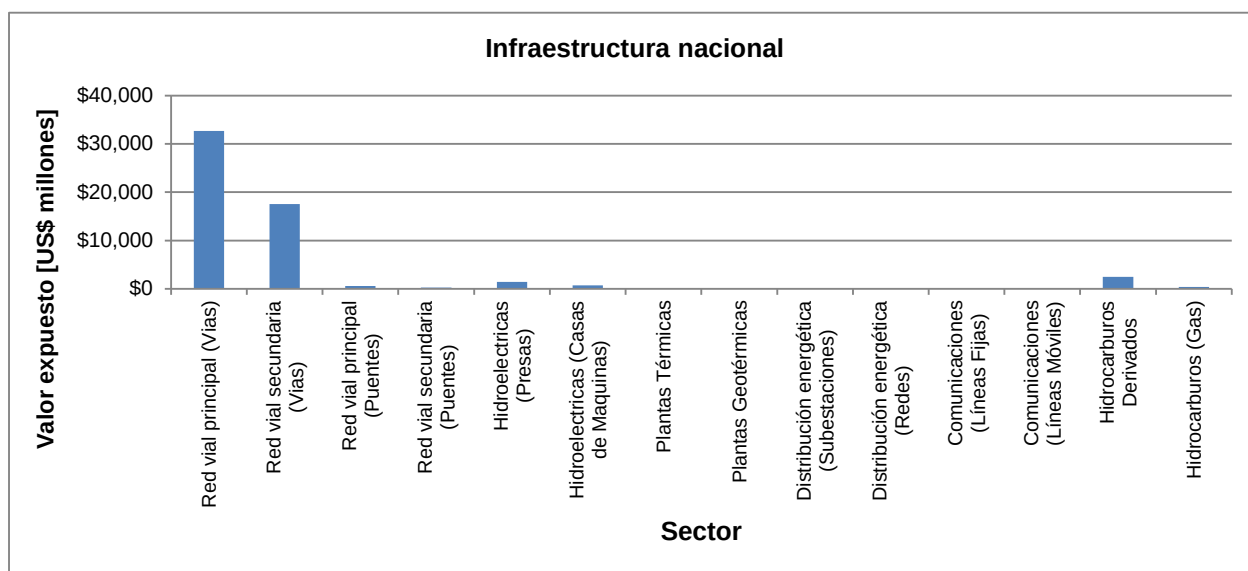


Figura 4-16
Valor expuesto en infraestructura nacional por sector

La Figura 4-17 resume la información anterior en una gráfica de tres ejes.

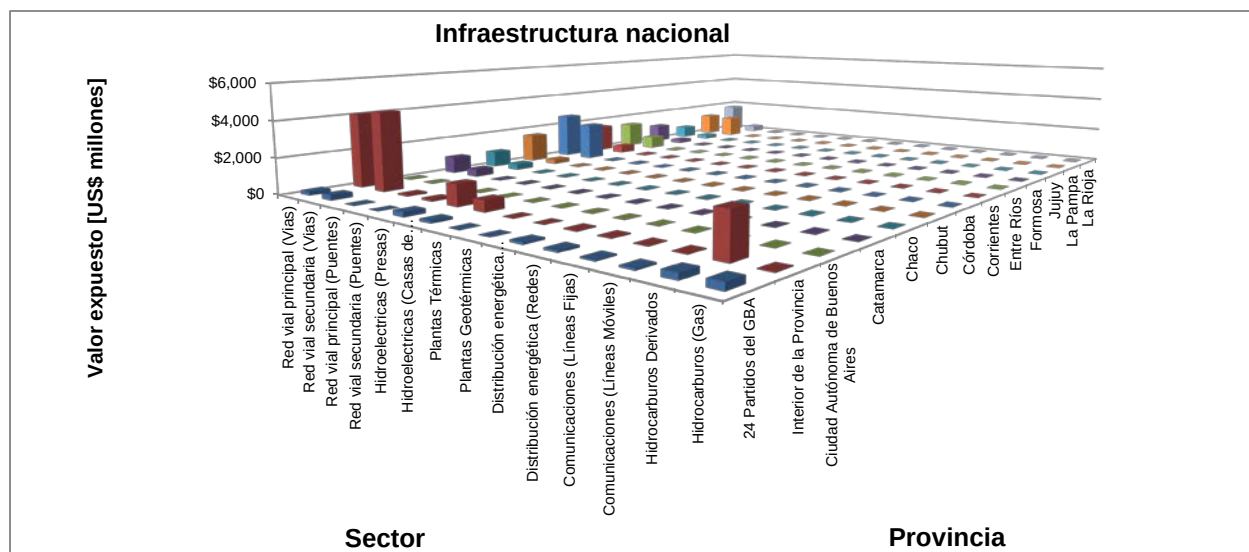


Figura 4-17
Valor expuesto en infraestructura nacional por provincia y sector

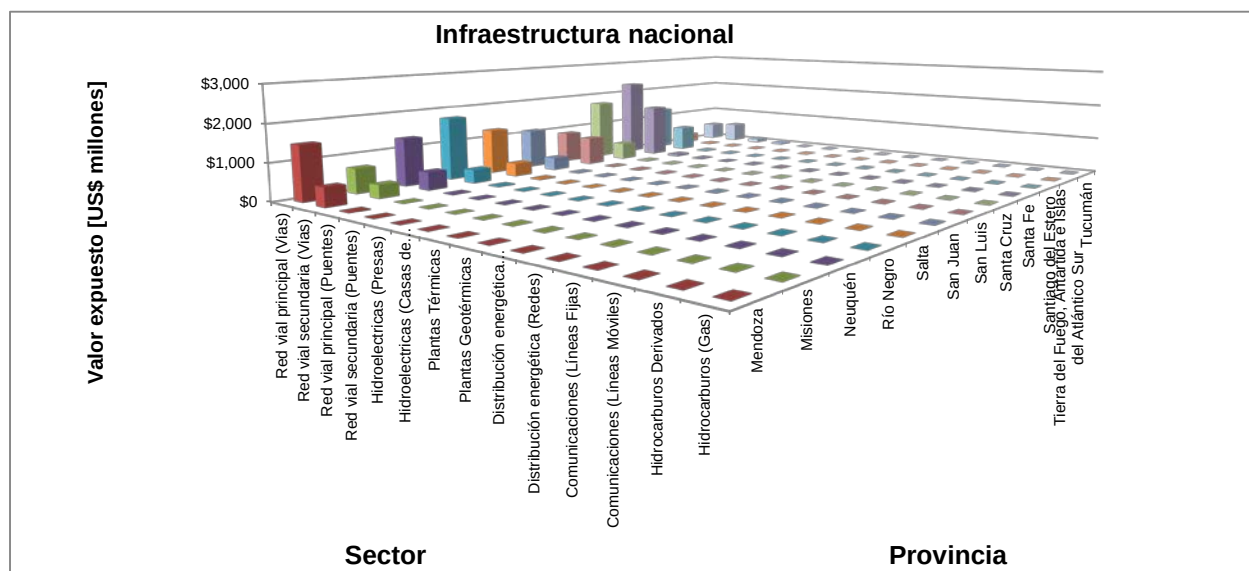


Figura 2-17
Valor expuesto en infraestructura nacional por provincia y sector (continuación)

Resumen de valores expuestos totales por provincias y sectores

La Figura 4-18 y Figura 4-19 presentan el resumen de los valores totales expuestos que resultan de sumar los valores de las edificaciones urbanas, la infraestructura urbana y la infraestructura nacional discriminados para cada una de las provincias y para cada uno de los sectores de uso.



Figura 4-18
Valor expuesto en infraestructura nacional por provincia

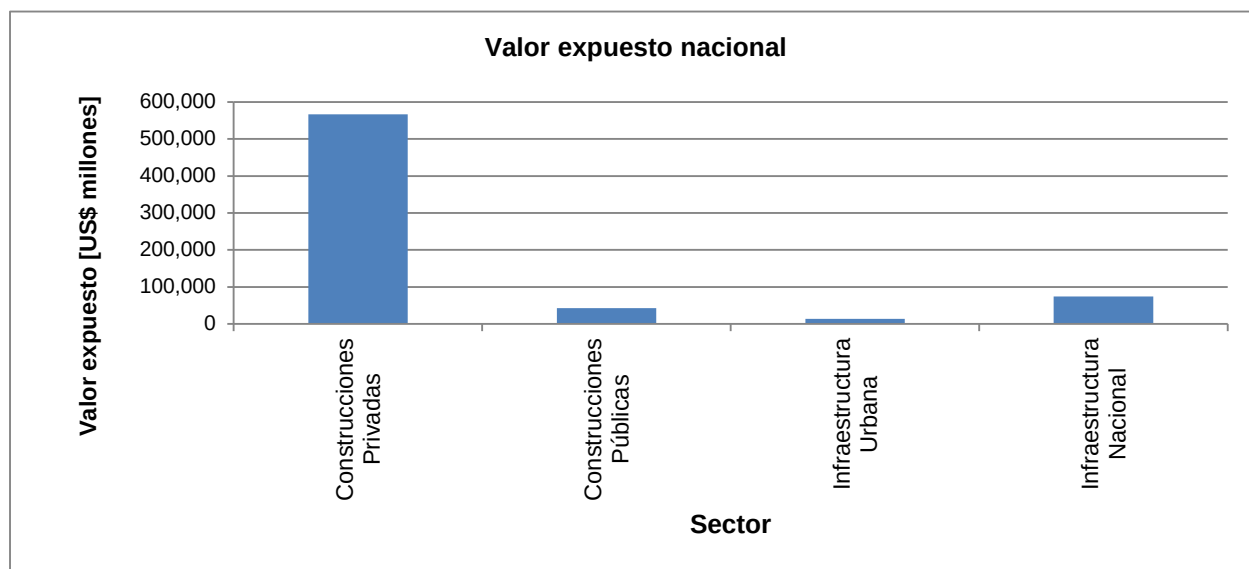


Figura 4-19
Valor total expuesto en infraestructura nacional por sectores

La Figura 4-20 muestra la información presentada anteriormente en una gráfica de tres dimensiones.

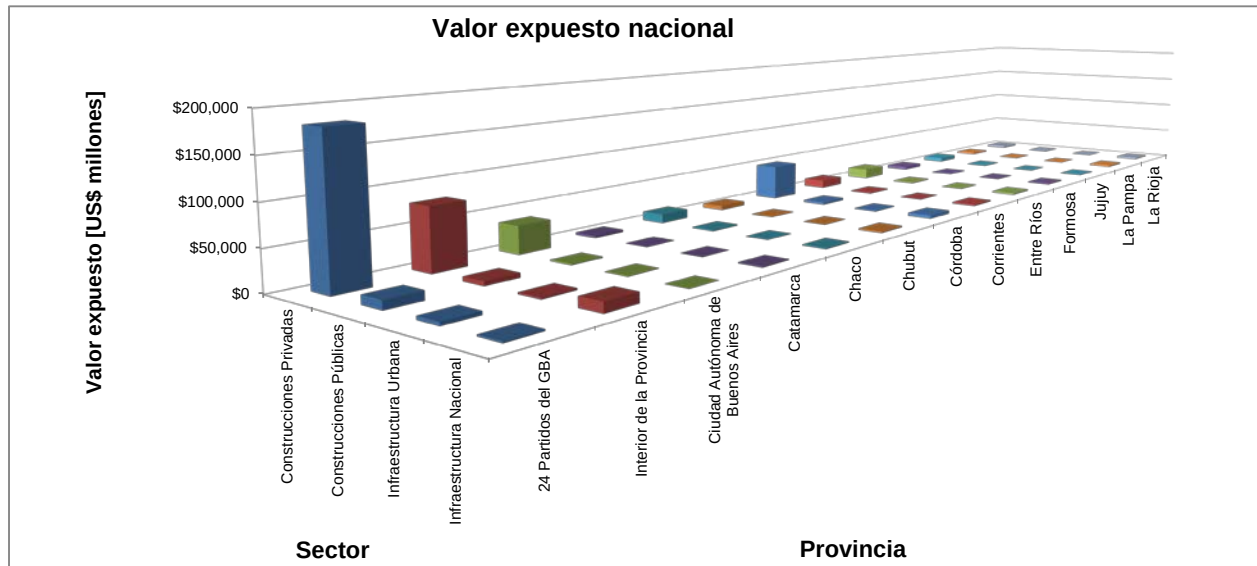


Figura 4-20

Valor total expuesto en infraestructura nacional por provincias y sectores



Figura 2-20

Valor total expuesto en infraestructura nacional por provincias y sectores (continuación)

Información en mapas descriptivos

La Figura 4-21 a la Figura 4-28 presentan mapas de información por provincia y departamento, para cada una de las siguientes variables: población, distribución de área construida y distribución del valor de exposición.

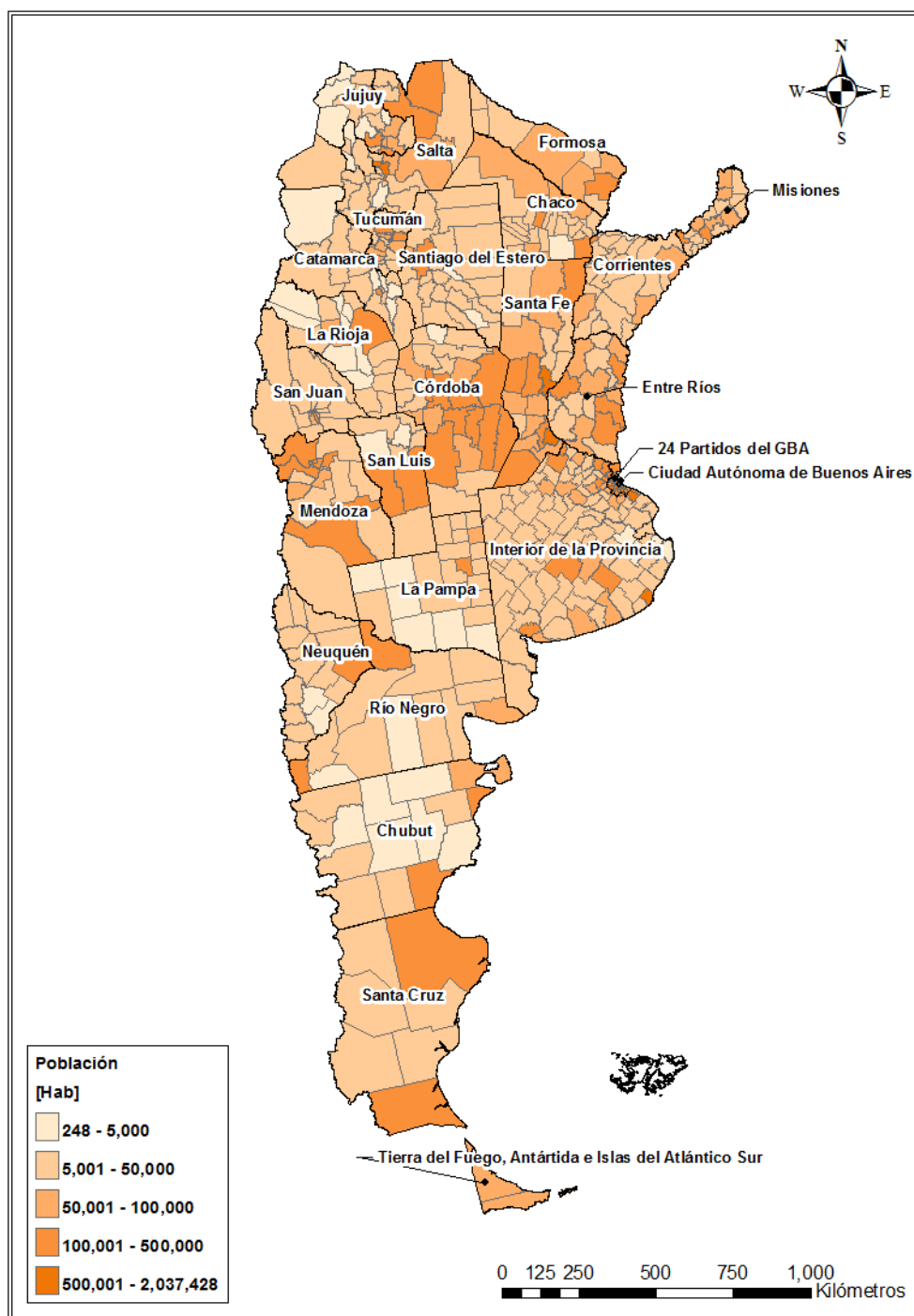


Figura 4-21
Distribución de población por departamento

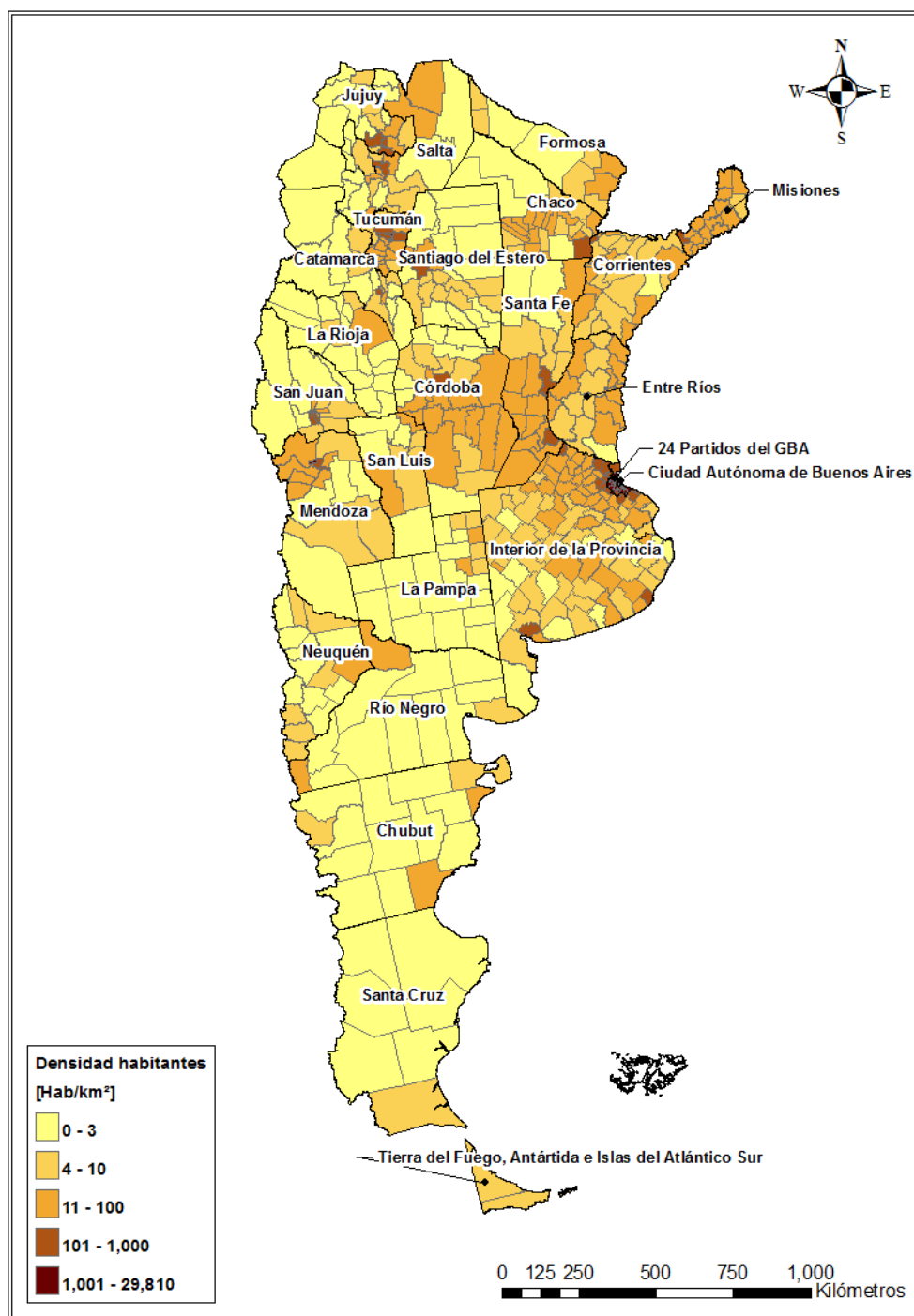


Figura 4-22
Densidad poblacional por departamento

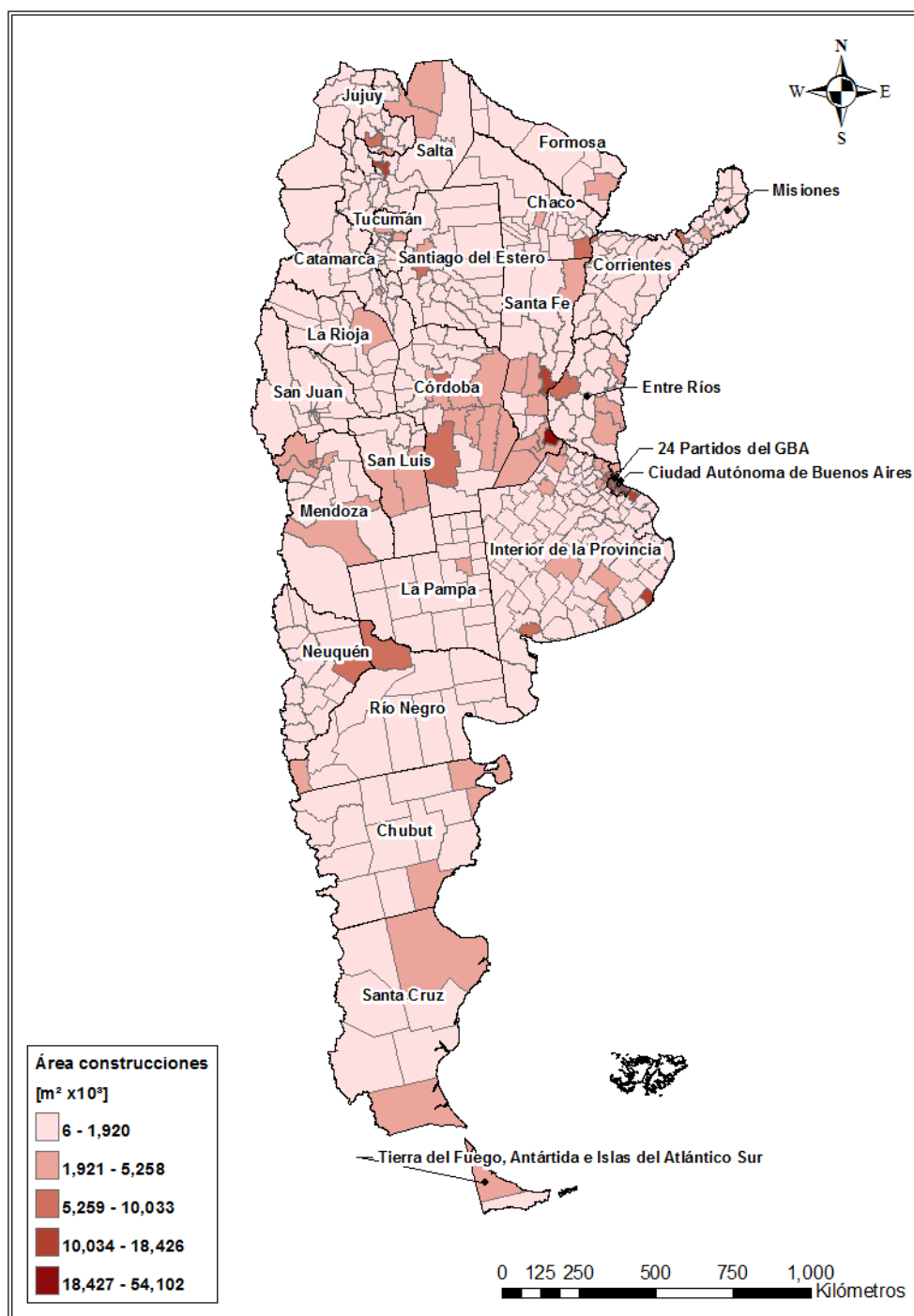


Figura 4-23
Distribución de área construida por departamento

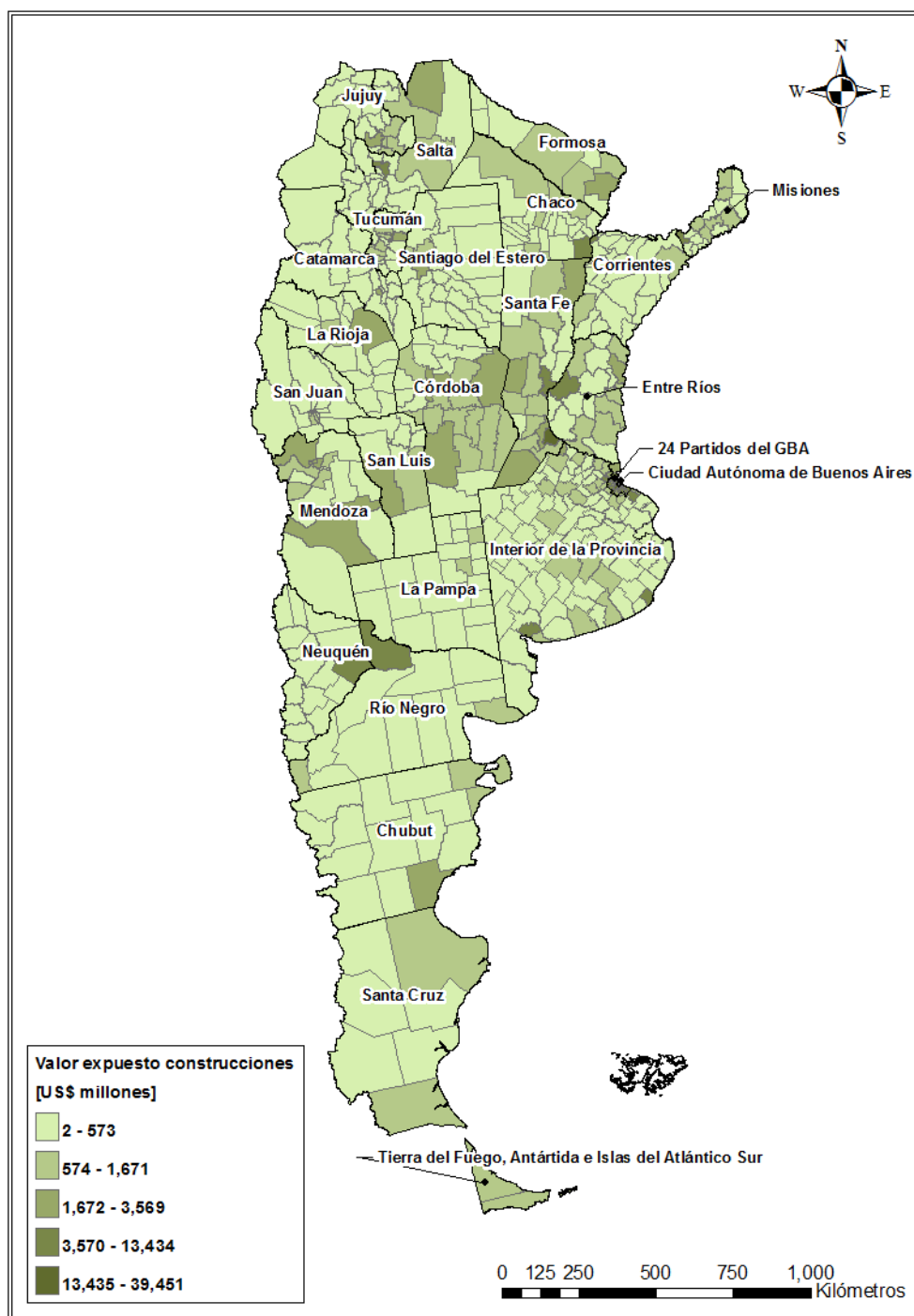


Figura 4-24
Distribución de valores expuestos en construcciones regulares por departamento

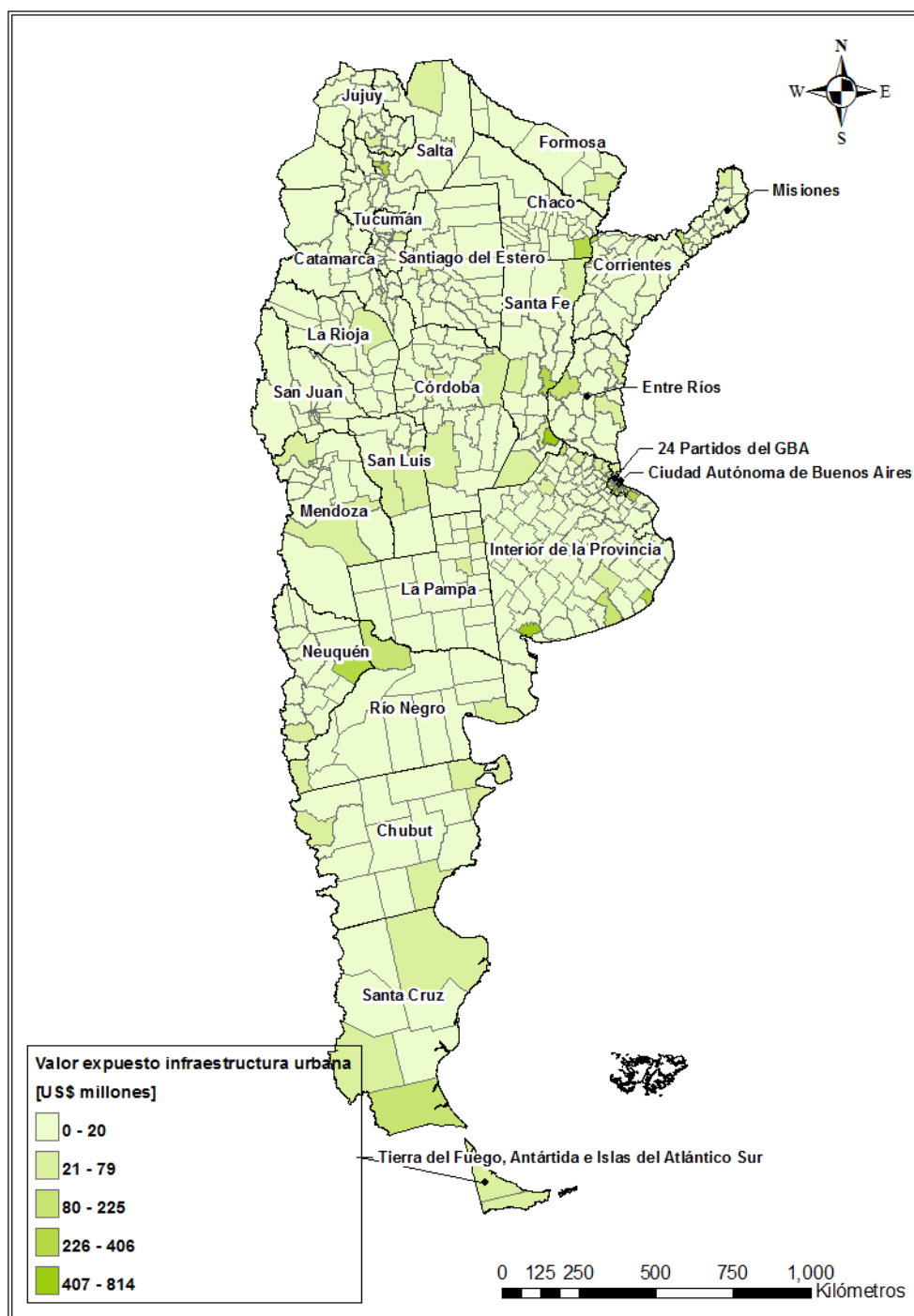


Figura 4-25
Distribución de valores expuestos en infraestructura urbana por departamento

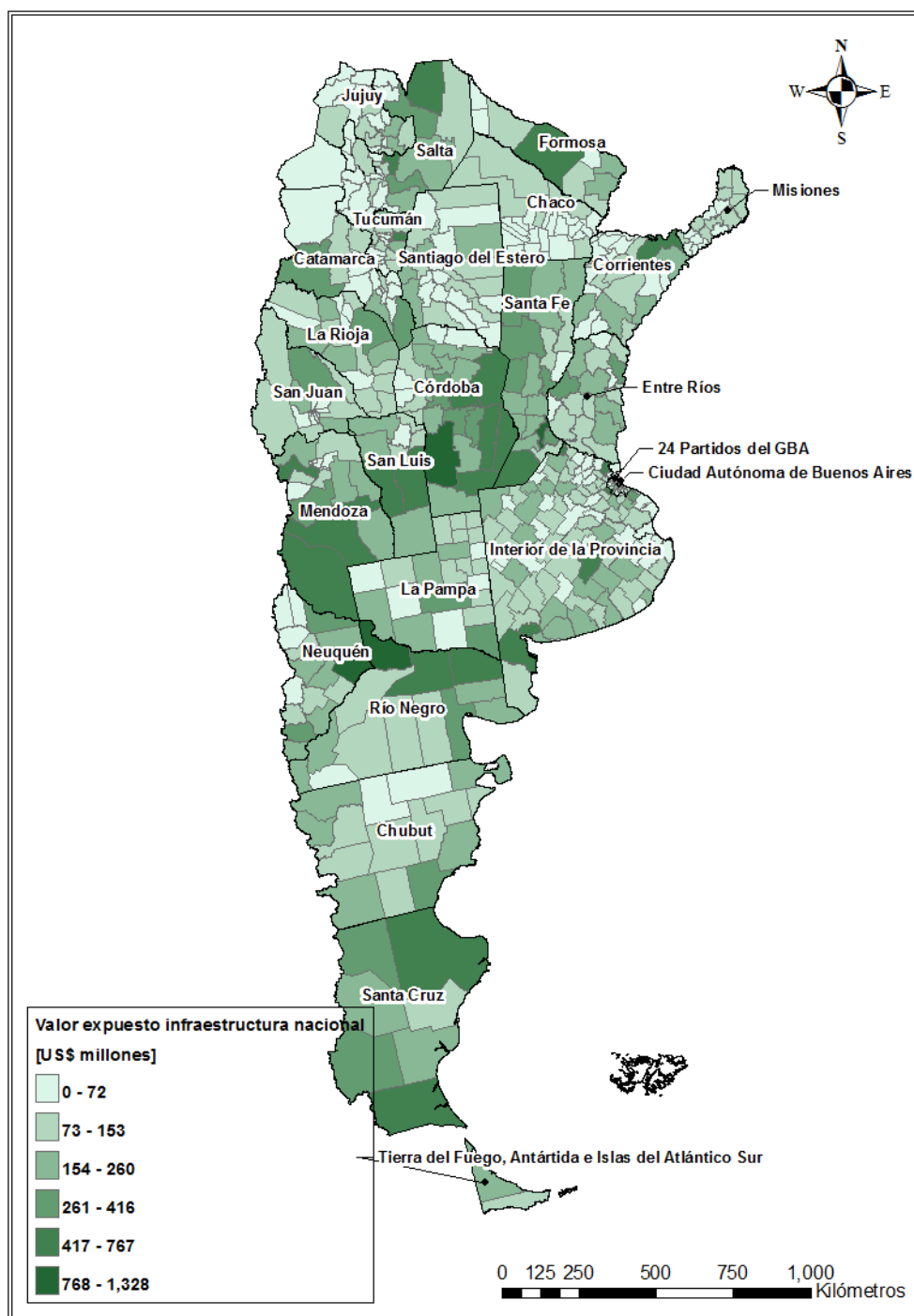


Figura 4-26
Distribución de valores expuestos en infraestructura nacional por departamento

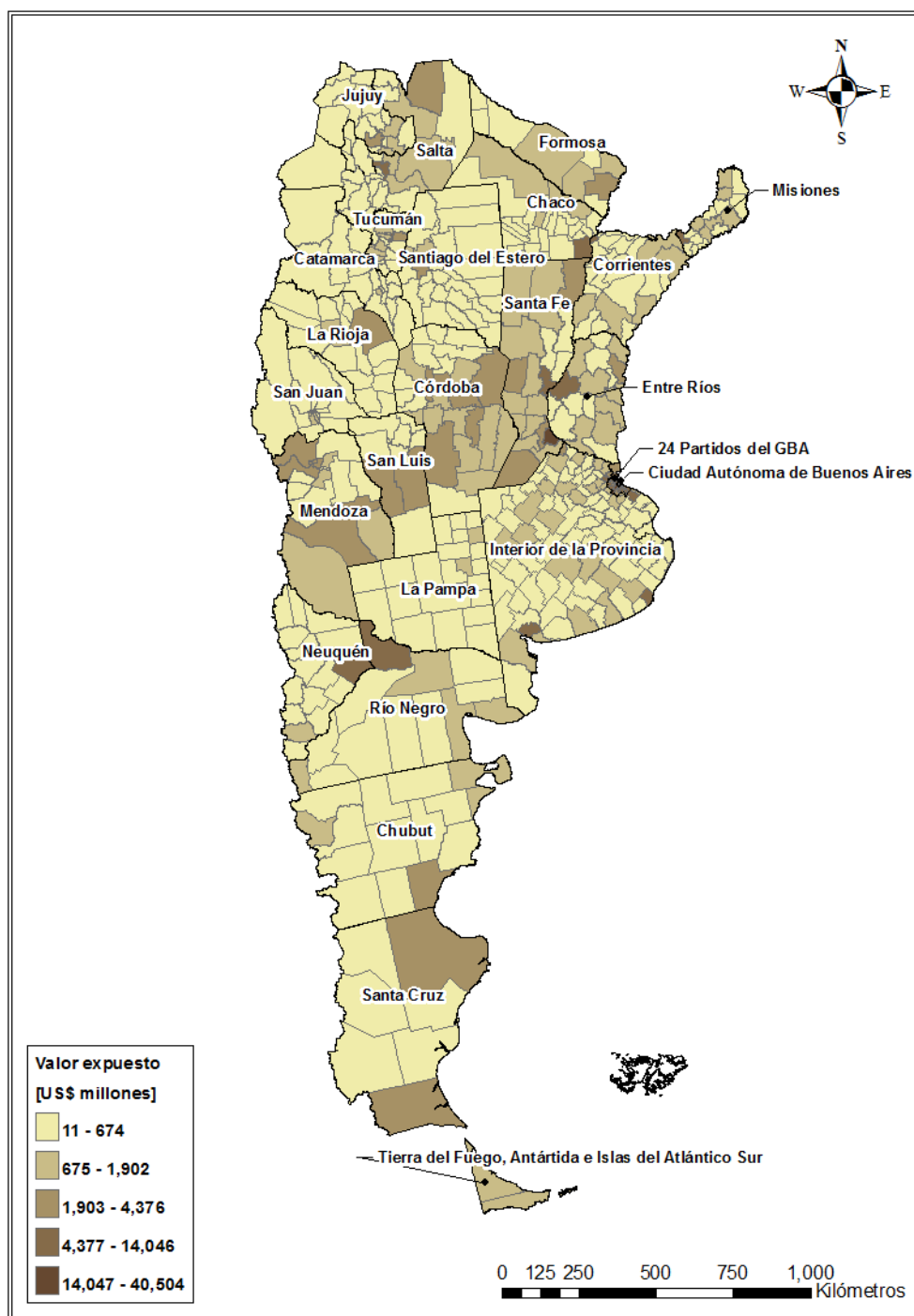


Figura 4-27
Distribución de valor expuesto total por departamento

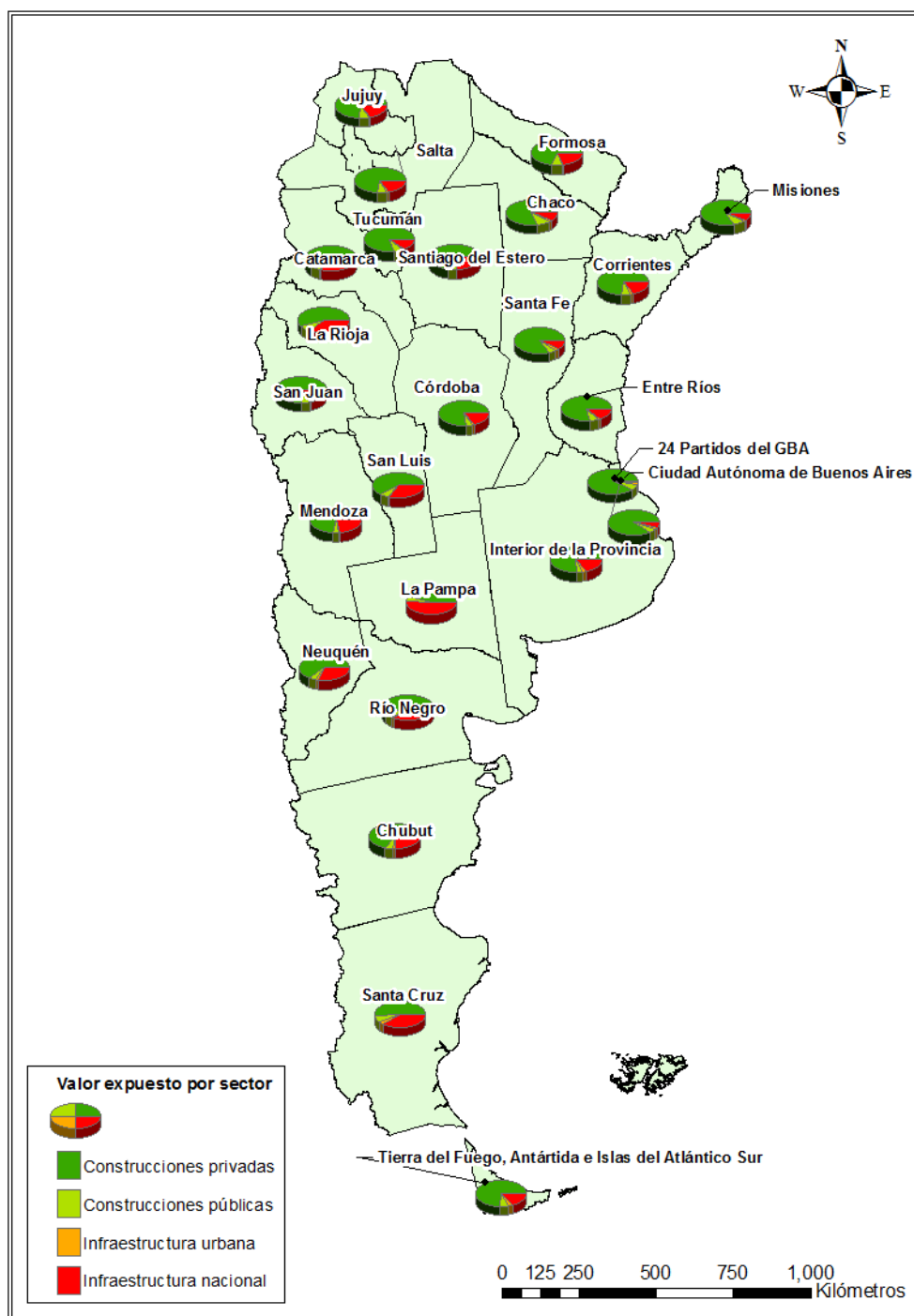


Figura 4-28
Distribución relativa de valores expuestos según sectores por provincia

4.2 Vulnerabilidad sísmica de activos

4.2.1 Aspectos generales

La vulnerabilidad sísmica es la relación entre cualquier medida de intensidad del fenómeno (aceleración, velocidad, desplazamiento o cualquier otra; la que mejor correlación presente) y el nivel de daño en el elemento físico expuesto a dicha intensidad sísmica. Por ejemplo para el caso de construcciones típicas de edificios de varios pisos, la intensidad sísmica que mejor se correlaciona con los daños esperados es la deriva o distorsión angular de entrepisos (relacionada con la deformación de la estructura ante las fuerzas sísmicas). Para otro tipo de construcciones como edificaciones menores en mampostería o adobe, se utiliza principalmente la aceleración máxima del terreno como parámetro de correlación con el daño. En otros casos como los sistemas de tuberías enterradas, resulta más conveniente utilizar como parámetro de intensidad como la velocidad máxima del terreno.

El procedimiento para la calificación de la vulnerabilidad sísmica de los diferentes elementos expuestos es el siguiente:

- (a) Tipificación de los tipos constructivos más representativos o predominantes en el conjunto de elementos expuestos, con base en la información existente y las opiniones y criterios aportados a nivel local.
- (b) Cálculo de las funciones de vulnerabilidad de los tipos constructivos característicos. Para este efecto se desarrollaron algunos modelos analíticos o se utilizaron algunas funciones aplicables ya publicadas según experiencias nacionales e internacionales previas.
- (c) Conformación de la base de datos de las construcciones y elementos principales que representan el inventario de activos de la nación.
- (d) Asignación de un tipo constructivo característico a cada uno de los elementos que conforman el inventario de activos expuestos y asignación de la función de vulnerabilidad correspondiente.

Una vez caracterizada la vulnerabilidad de cada uno de los elementos, se realiza el análisis de riesgo frente a la amenaza sísmica.

A continuación se presenta una descripción del tipo de funciones de vulnerabilidad que se utilizaron para diferentes elementos expuestos. Estas curvas están basadas en el comportamiento de componentes típicos equivalentes, obtenido de estudios previos o de análisis específicos de las condiciones de diseño y construcción de los elementos modelados.

4.2.2 Funciones de vulnerabilidad sísmica

Las edificaciones típicas de varios pisos incluyen construcciones de varios sistemas estructurales como son pórticos resistentes a momentos, sistemas combinados o duales, sistemas de edificaciones con muros estructurales, sistemas prefabricados y otros en general comparten la característica de que el daño principal que se puede llegar a presentar depende principalmente de la deformación relativa piso a piso. Las funciones de vulnerabilidad para estos tipos constructivos se representan gráficamente como *el porcentaje de daño vs. Deriva máxima de entrepiso de la edificación*.

Por otro lado, para sistemas constructivos tales como sistemas de muros estructurales de mampostería, construcciones menores en adobe, tapia y materiales locales, así como estructuras aisladas tales como muros de contención, tanques y similares, las funciones de vulnerabilidad que correlacionan de mejor manera son las basadas en parámetros como la aceleración máxima del terreno. En este caso las funciones de vulnerabilidad se representan de mejor manera como *el porcentaje de daño vs. Aceleración espectral máxima de la edificación*.

La generación de funciones de vulnerabilidad se realiza en el sistema ERN-Vulnerabilidad (ERN 2009), con base en la información disponible en <http://www.ecapra.org/>.

4.2.3 Funciones de vulnerabilidad para los elementos expuestos

El análisis requiere funciones de vulnerabilidad para cada uno de los tipos de elementos que componen el inventario de activos del país. Los tipos de elementos son los siguientes:

Construcciones urbanas y rurales típicas

- (a) Residencial PB: capacidad económica baja (Res PB)
- (b) Residencial PM: capacidad económica media (Res PM)
- (c) Residencial PA: capacidad económica alta (Res PA)
- (d) Comercial
- (e) Industrial (estructuras con una gran área construida)
- (f) Salud privada
- (g) Educación privada
- (h) Salud pública
- (i) Educación pública
- (j) Gubernamentales

Infraestructura urbana

- (a) Subestaciones de energía más redes anexas
- (b) Subestaciones de comunicaciones más antenas
- (c) Presas, tanques y plantas de acueducto y alcantarillado
- (d) Redes de acueducto, alcantarillado
- (e) Redes de gas
- (f) Aeropuertos
- (g) Puertos
- (h) Puentes urbanos

Infraestructura nacional

- (a) Vías Red primaria (vías y puentes)
- (b) Vías Red secundaria (vías y puentes)
- (c) Hidroeléctricas (presas y casas de máquinas)
- (d) Plantas térmicas y geotérmicas
- (e) Subestaciones de energía más redes anexas
- (f) Subestaciones de comunicaciones más antenas
- (g) Subestaciones de combustible y gas más redes anexas.

Las funciones de vulnerabilidad para cada uno de estos componentes se calculan utilizando el sistema ERN-Vulnerabilidad (ERN 2009). Las funciones se generan en términos de aceleración espectral o en términos de deriva estructural y luego se uniformizan todas en términos de aceleración espectral tal como se explicó anteriormente. Las curvas se modifican con factores que tienen en cuenta aspectos particulares de los tipos constructivos locales tales como calidad de materiales, estado general de las construcciones, prácticas de diseño y construcción típicas, y en general las características específicas de los tipos estructurales predominantes.

Las Figura 4-29 y Figura 4-30 presentan las funciones en términos de la aceleración espectral en cada caso.

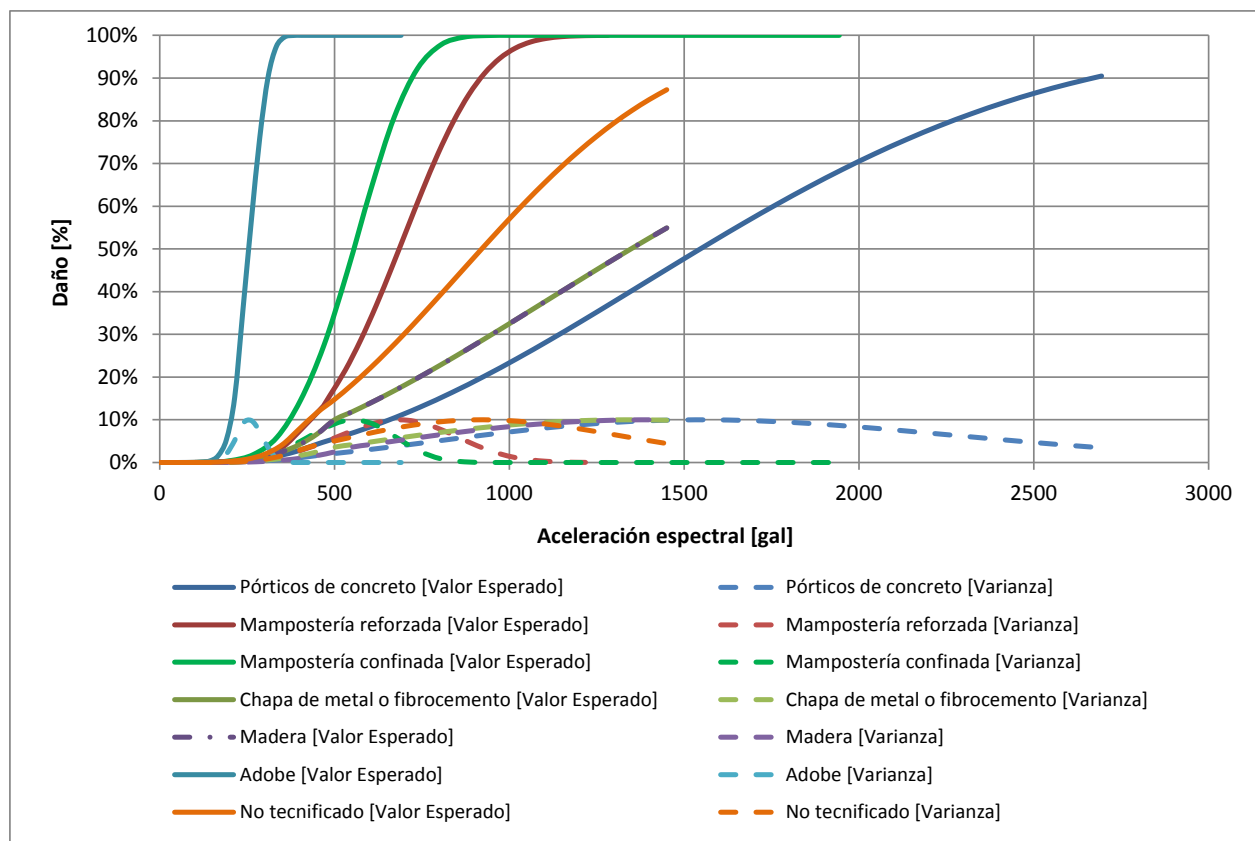


Figura 4-29
Funciones de vulnerabilidad (Función aceleración espectral) para construcciones

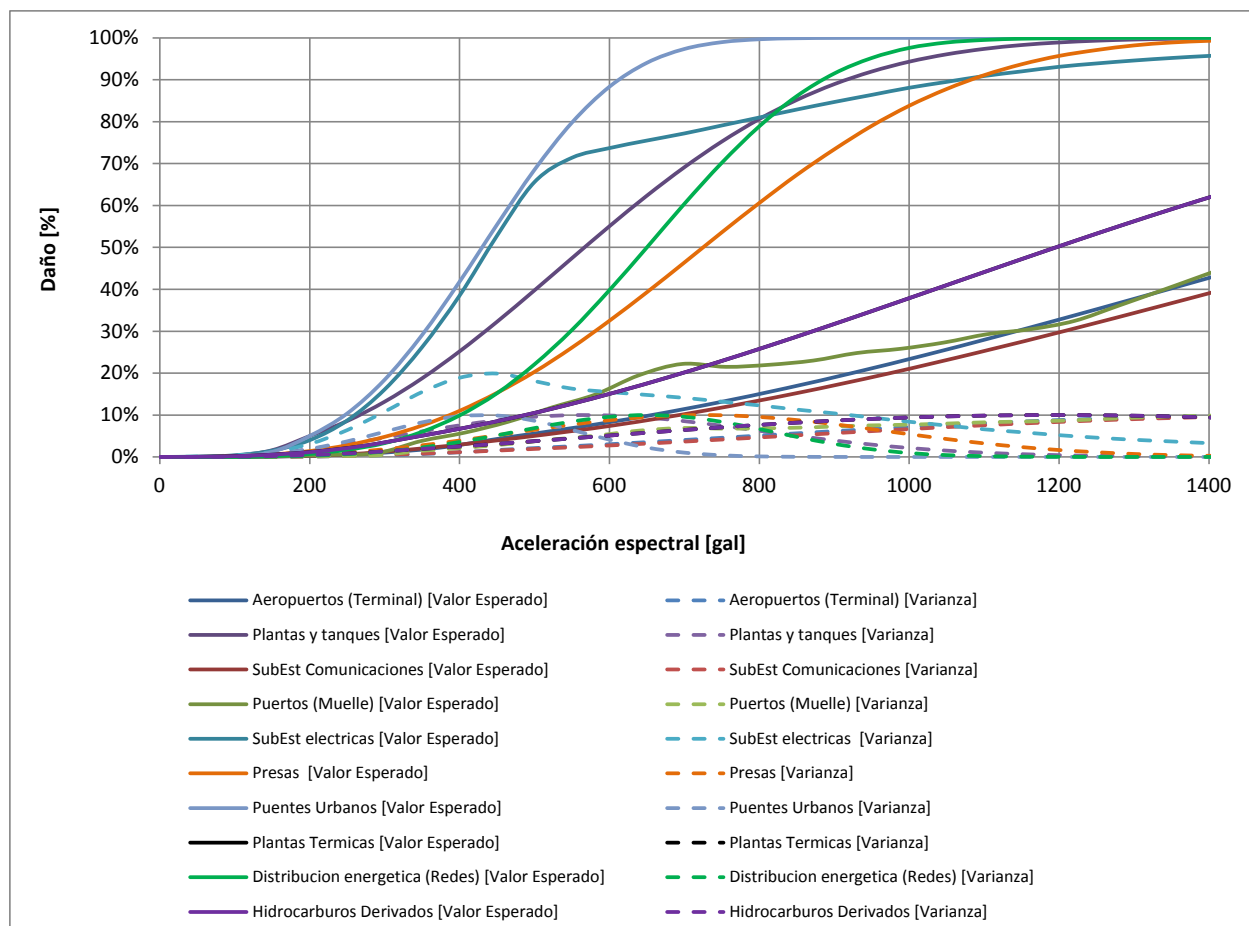


Figura 4-30
Funciones de vulnerabilidad (Función aceleración espectral) para infraestructura

Considerando que cada una de estas funciones está asociada a un tipo estructural característico la Tabla 4-11 resume los periodos estructurales representativos de cada tipo estructural, con base en lo cual se realiza la asignación de la intensidad sísmica correspondiente a utilizar en el análisis.

Tabla 4-11
Tipos de funciones de vulnerabilidad, tipo estructural y periodo de vibración

Función de vulnerabilidad		Periodo representativo
Construcciones	Pórticos de concreto	0.75 seg
	Mampostería reforzada	0.15 seg
	Mampostería confinada	0.15 seg
	Adobe	0.15 seg
	Madera	0.35 seg
	Chapa de metal o fibrocemento	0.35 seg
	No tecnificado	0.35
Infraestructura Urbana	Subestaciones Eléctricas	Amax
	Subestaciones Comunicación	0.75 seg
	Presas	Amax
	Plantas y Tanques	Amax
	Red Acueducto	Amax
	Red Alcantarillado	Amax
	Red Gas	Amax
	Aeropuertos (Terminal)	0.75 seg
	Puertos (Bodegas)	0.75 seg
	Puertos (Muelle)	0.4 seg
	Puentes Urbanos	Amax
Infraestructura Nacional	Red Vial Principal (Puentes)	Amax
	Red Vial Secundaria (Puentes)	Amax
	Hidroeléctricas (Presas)	Amax
	Hidroeléctricas (Casas de Maquinas)	0.56 seg
	Plantas Térmicas	0.86 seg
	Plantas Geotérmicas	0.86 seg
	Distribución energética (Subestaciones)	Amax
	Distribución energética (Redes)	Amax
	Comunicaciones (Líneas Fijas)	0.56 seg
	Comunicaciones (líneas Móviles)	0.56 seg
	Hidrocarburos Derivados	0.86 seg
	Hidrocarburos (Gas)	0.86 seg

En el vínculo <http://www.ecapra.org/es/> (wiki – vulnerabilidad) se presentan las funciones de vulnerabilidad utilizadas en los análisis y la explicación de los diferentes niveles de daño esperado en cada uno de los tipos estructurales característicos.

4.3 Evaluación del riesgo sísmico

4.3.1 Aspectos generales

Con base en los modelos de amenaza probabilistas propuestos y en el inventario y valoración de activos expuestos con sus funciones de vulnerabilidad correspondientes, se desarrolla un modelo de análisis de riesgo probabilista para el país.

Tal como se explicó anteriormente, el análisis probabilista del riesgo se plantea con base en una serie de escenarios de amenaza que representan de manera adecuada los efectos de cualquier evento de magnitud factible que se puede presentar en el área de influencia. Cada uno de estos escenarios tiene asociada una frecuencia o probabilidad de ocurrencia específica. El procedimiento de cálculo probabilista consiste en evaluar con métricas apropiadas, en este caso la pérdida económica, para cada uno de los activos expuestos, considerando cada uno de los escenarios de amenaza, y luego integrar en forma probabilista los resultados obtenidos utilizando las frecuencias de ocurrencia de cada escenario.

El riesgo sísmico ha sido calculado utilizando la plataforma CAPRA-GIS (ERN 2009). La metodología de cálculo se describe en el vínculo [http://www.ecapra.org/es/\(wiki – riesgo\)](http://www.ecapra.org/es/(wiki-riesgo)).

4.3.2 Pérdidas totales a nivel país

En primer lugar se presenta la Tabla 4-12 con la información consolidada a nivel de todo país como es el valor total expuesto, la pérdida anual esperada en valor y al millar (también conocida como prima técnica de riesgo) y valores indicativos de pérdida máxima probable para diferentes períodos de retorno.

Tabla 4-12
Resultados generales de PML

Resultados		
Valor Expuesto	US\$ x10 ⁶	\$697,464
Pérdida Anual Esperada	US\$ x10 ⁶	\$199
	‰	0.3
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	US\$ x10 ⁶	%
50	\$1,332	0.2%
100	\$2,004	0.3%
250	\$3,071	0.4%
500	\$4,108	0.6%
1000	\$5,381	0.8%

La Figura 4-31 presenta la curva de excedencia de pérdidas a nivel país por terremoto.

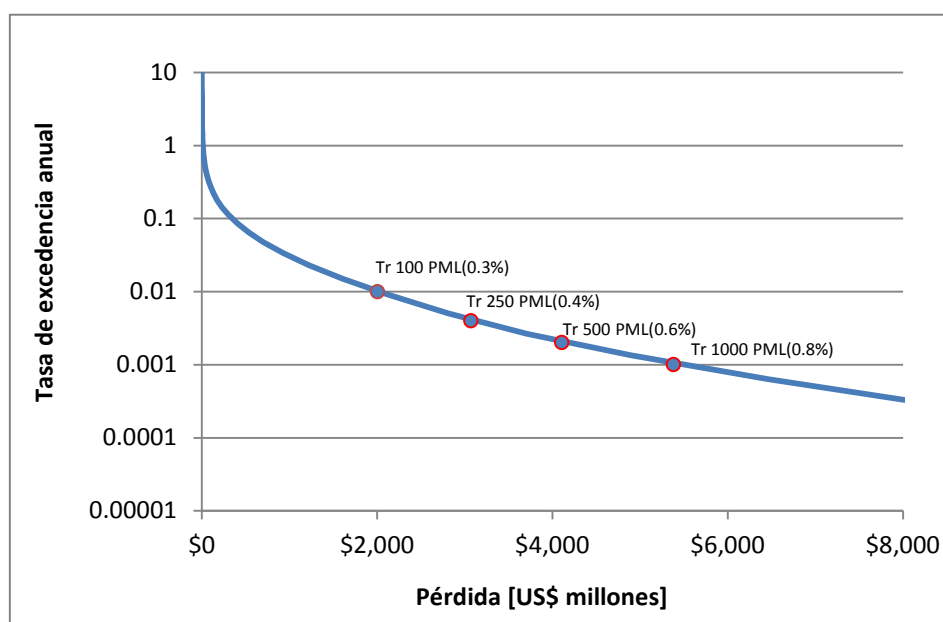


Figura 4-31
Excedencia de pérdidas por Terremoto

La Figura 4-32 presenta la curva de pérdida máxima probable en valor y en porcentaje para diferentes periodos de retorno. Paralelamente se presentan en la Figura 4-33 las curvas de probabilidad de excedencia de diferentes valores de PML en porcentaje para diferentes períodos de exposición, en particular 20, 50, 100 y 200 años.

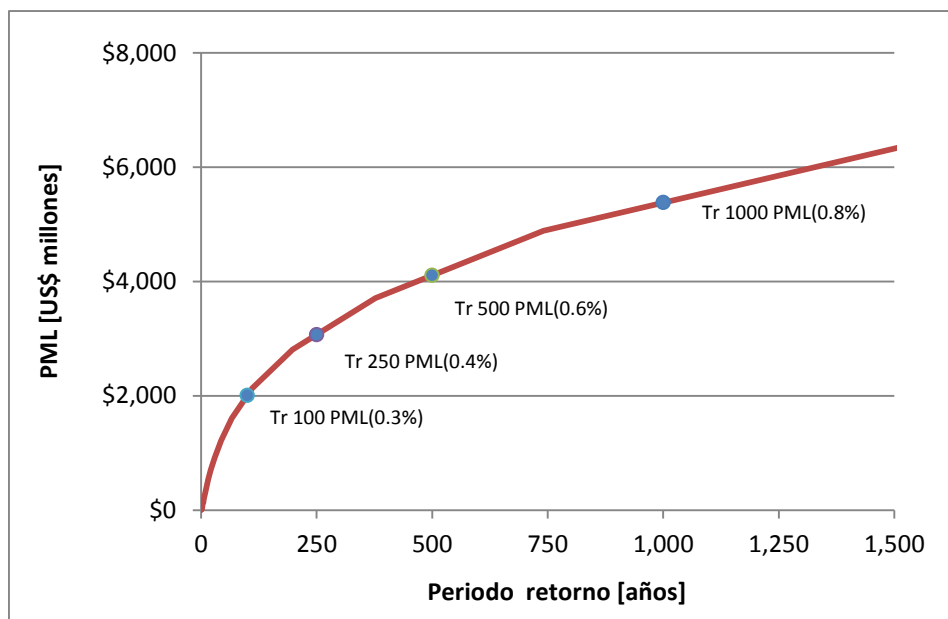


Figura 4-32
Curva de PML por Terremoto

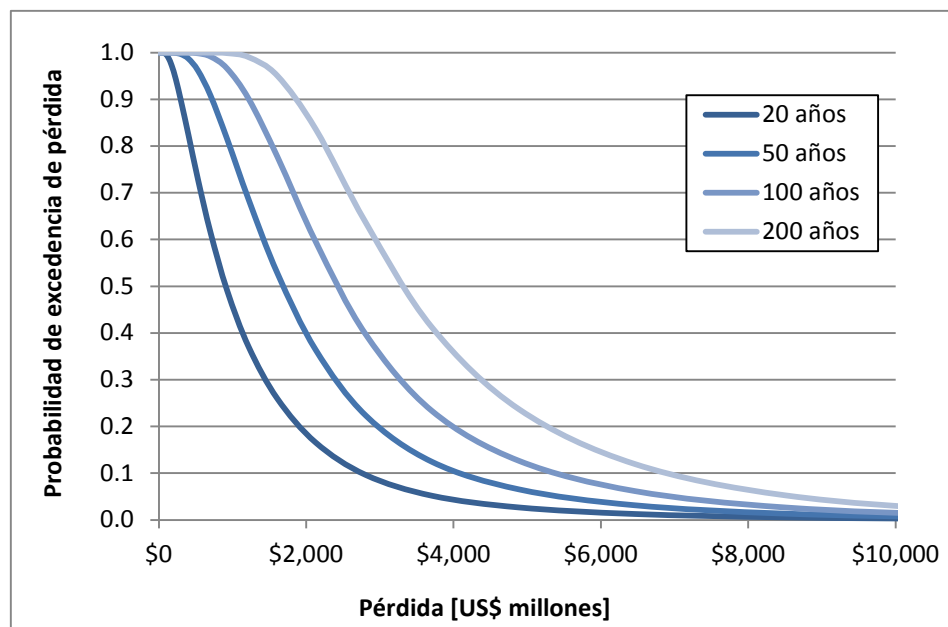


Figura 4-33
Curvas de probabilidad de excedencia de diferentes valores de PML, para diferentes tiempos de exposición

La Tabla 4-13 resume por su parte los escenarios críticos resultantes del análisis, es decir los escenarios que resultaron con las mayores pérdidas económicas esperadas.

Tabla 4-13
Escenarios críticos de análisis

N°	Escenario		Pérdida		Frecuencia	Per retorno escenario [años]
	Fuente	Magnitud	[US\$ x 10 ⁶]	%		
184082	La Cal-Divisadero_2	4.7	129	0.02%	3.18E-02	31
184106	La Cal-Divisadero_26	4.7	129	0.02%	1.84E-02	54
184130	La Cal-Divisadero_50	4.7	128	0.02%	1.80E-02	56
184086	La Cal-Divisadero_6	5.1	192	0.03%	1.08E-02	93
184110	La Cal-Divisadero_30	5.1	194	0.03%	6.14E-03	163

4.4 Concentración de riesgo sísmico

El análisis de concentración del riesgo se realiza a nivel de provincia y a nivel de los diferentes sectores de uso, para los sectores público y privado, así como para los principales componentes de la infraestructura nacional.

4.4.1 Comparación de pérdidas por provincia

Las pérdidas se evalúan por provincia como unidad geográfica de análisis. La Figura 4-34 presenta la comparación de valores expuestos por provincia.

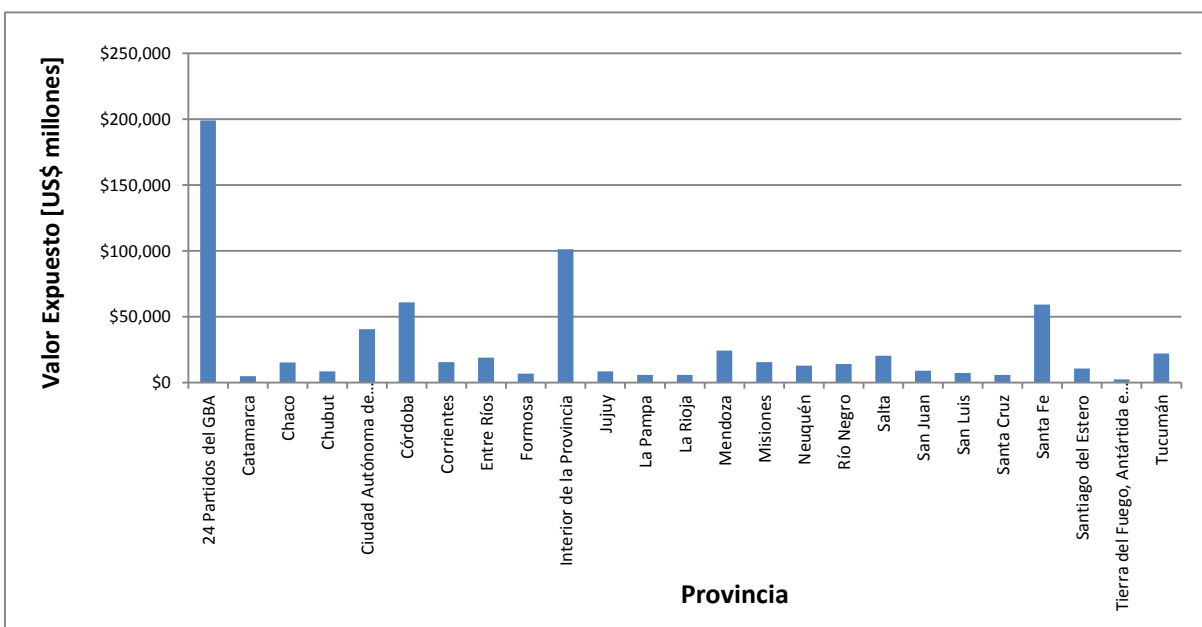


Figura 4-34
Valores expuestos por provincia

Para cada una de las provincias, se realiza en forma complementaria un análisis individual, que permite estimar el nivel de pérdida máxima probable y el nivel de primas individuales por provincia. En cada caso se presentan resultados correspondientes a:

- Tabla resumen de pérdida anual esperada (AAL) y pérdida máxima probable (PML).
- Curvas de tasa de excedencia de pérdidas y de PML con el período de retorno.
- Diagrama de barras con los valores de AAL en valor y al millar discriminados para cada uno de los sectores de uso.

La Figura 4-35 presenta un ejemplo del formato de presentación de los resultados individuales para cada una de las provincias. En el Anexo 1 se presentan los resultados individuales para las provincias restantes. Para la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y las provincias Formosa, Misiones y Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur no se presenta la figura de resultados individuales debido a que el resultado es igual a cero.

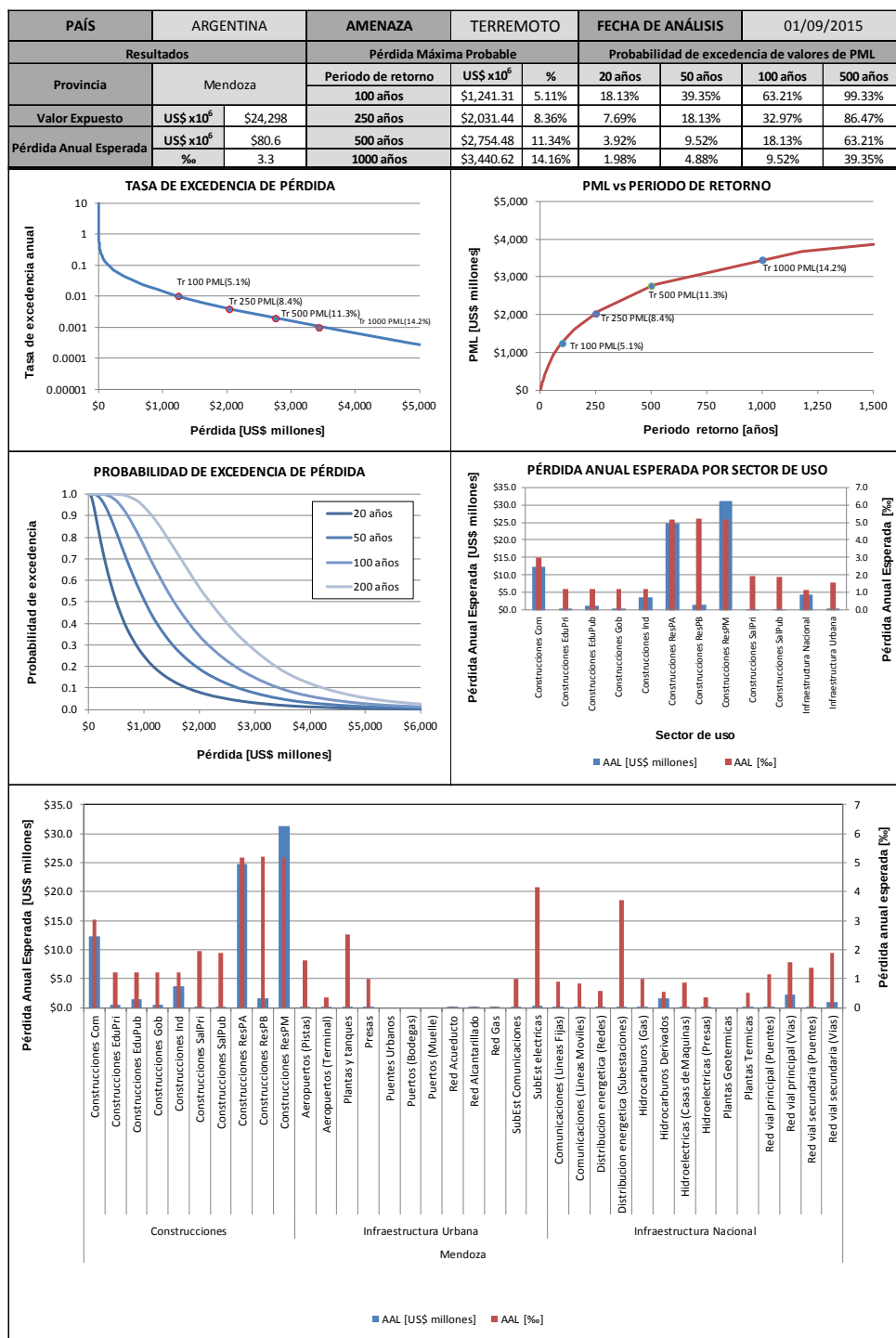


Figura 4-35
Ejemplo de resultados por terremoto para la provincia de Mendoza

La Figura 4-36 resume los valores de PML para periodos de retorno de 250, 500 y 1000 años para cada una de las provincias tanto en valor como en porcentaje.

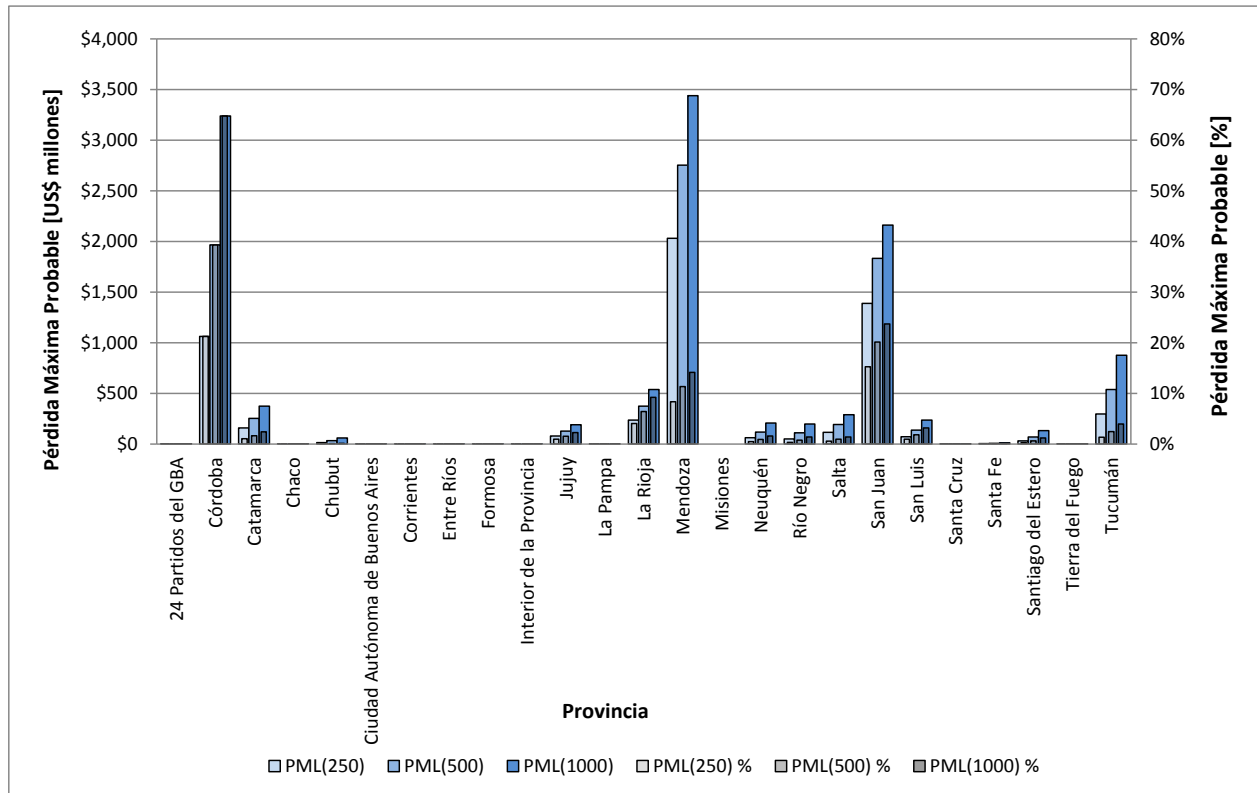


Figura 4-36
Valores de PML para diferentes periodos de retorno en cada provincia

Por otro lado la Figura 4-37 presenta los valores correspondientes de AAL tanto en valor como al millar y la Figura 4-38 muestra en el eje de la izquierda el valor expuesto por provincia y en el eje de la derecha su correspondiente pérdida anual esperada expresada al millar.

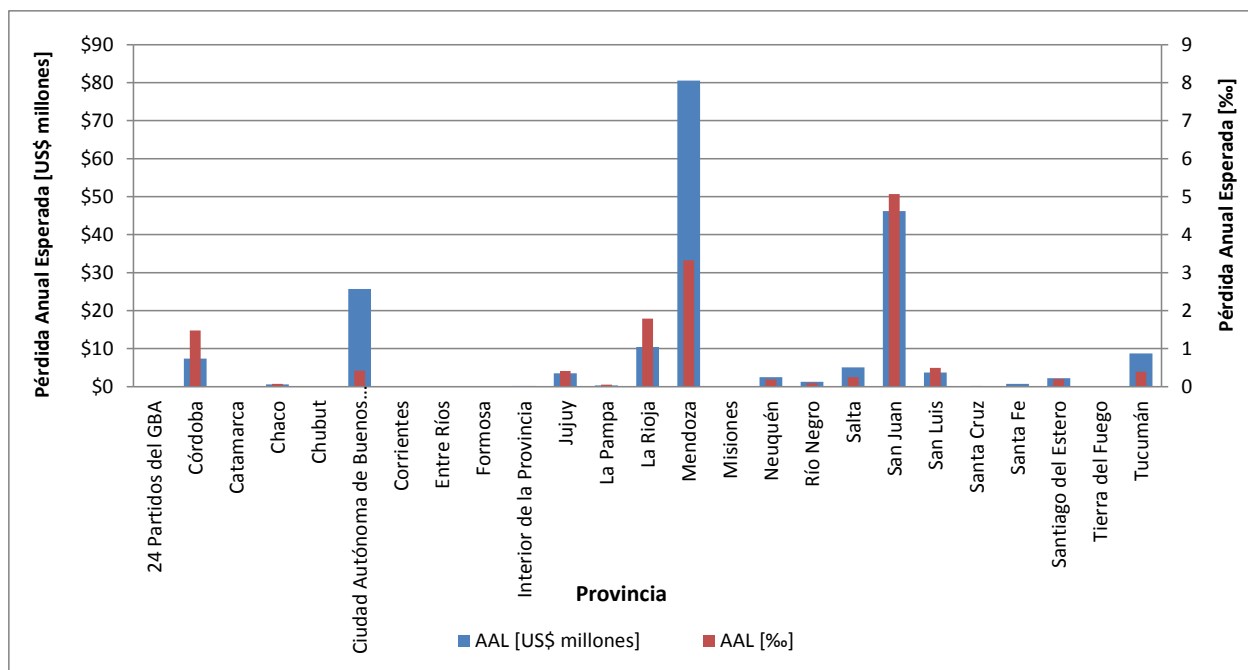


Figura 4-37
Valores de AAL por provincia

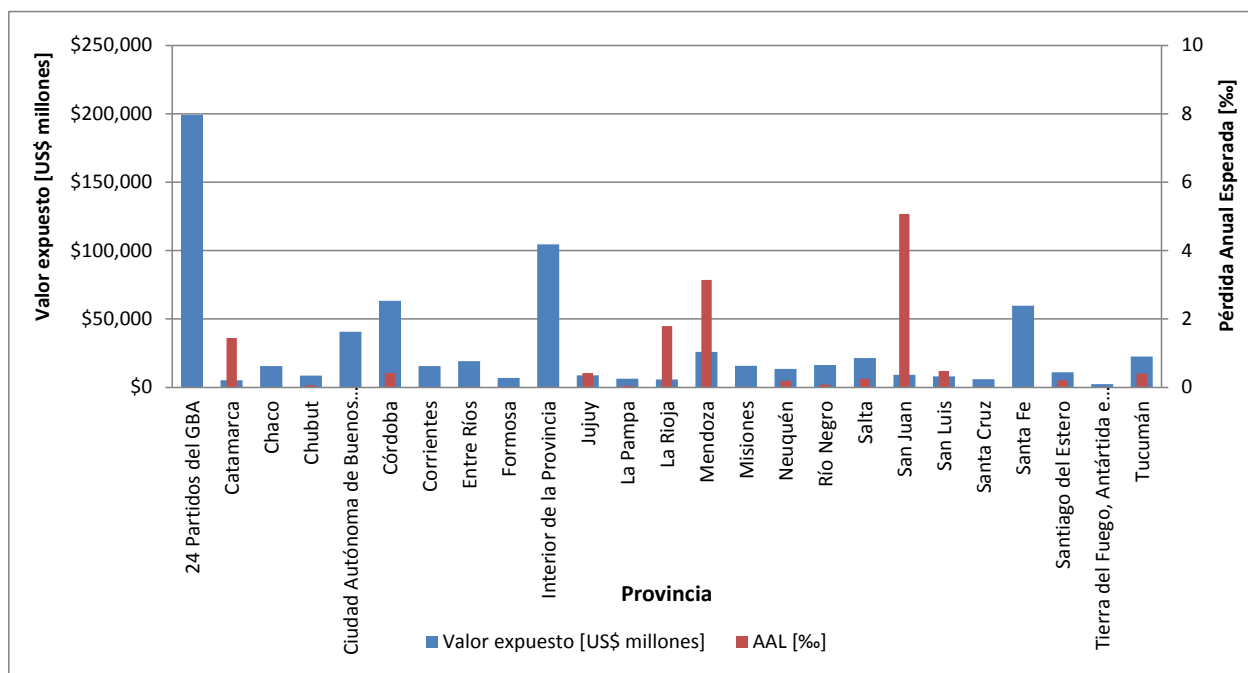


Figura 4-38
Valores expuestos por provincia y AAL al millar

En la Figura 4-39 se presenta el desglose de las pérdidas anuales esperadas por sectores para cada una de las provincias. Los sectores considerados son las construcciones urbanas, la infraestructura urbana y la infraestructura nacional asociada con cada provincia.

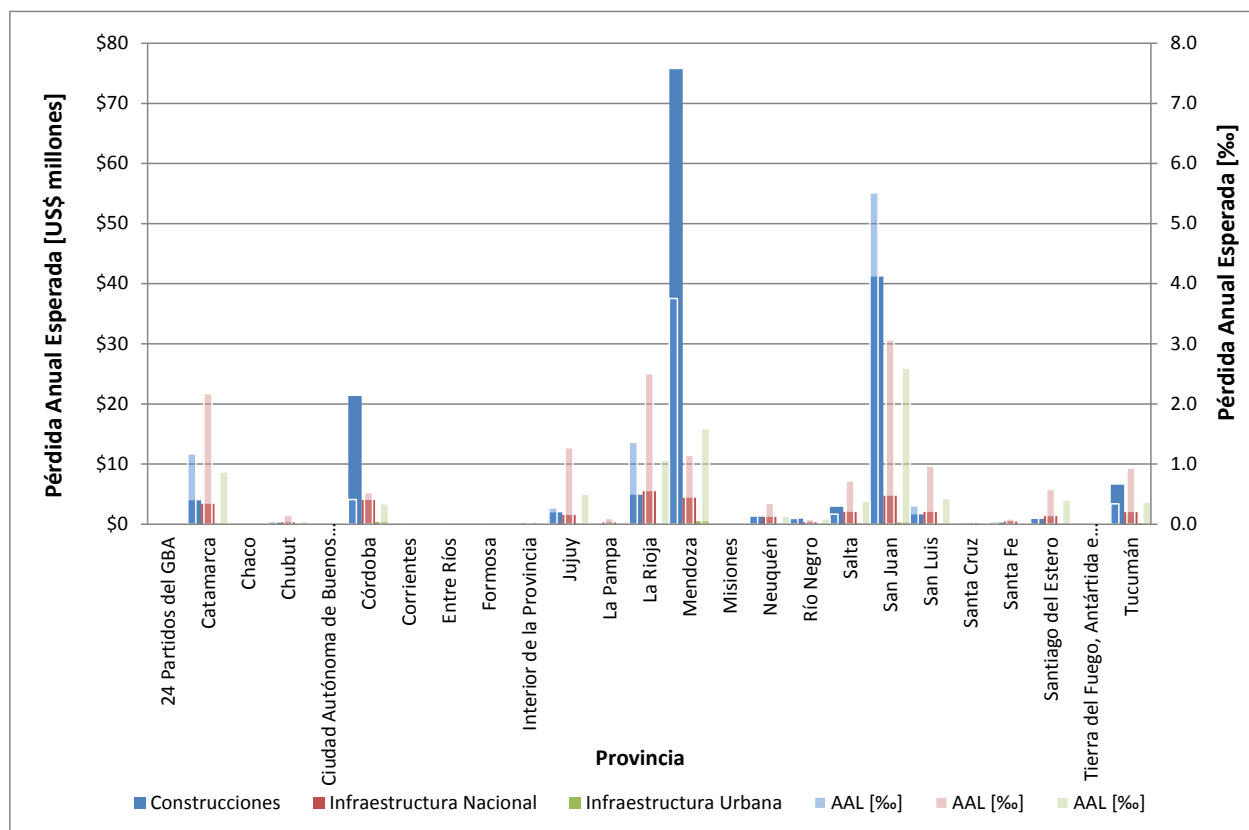


Figura 4-39
Valores de AAL por provincia para los diferentes sectores

Finalmente la Figura 4-40 y la Figura 4-41 presentan la distribución geográfica de la pérdida anual esperada en valor y al millar para cada uno de los departamentos. Por otro lado, la Figura 4-42 y la Figura 4-43 presentan la pérdida máxima probable en valor y en porcentaje para cada una de las provincias.

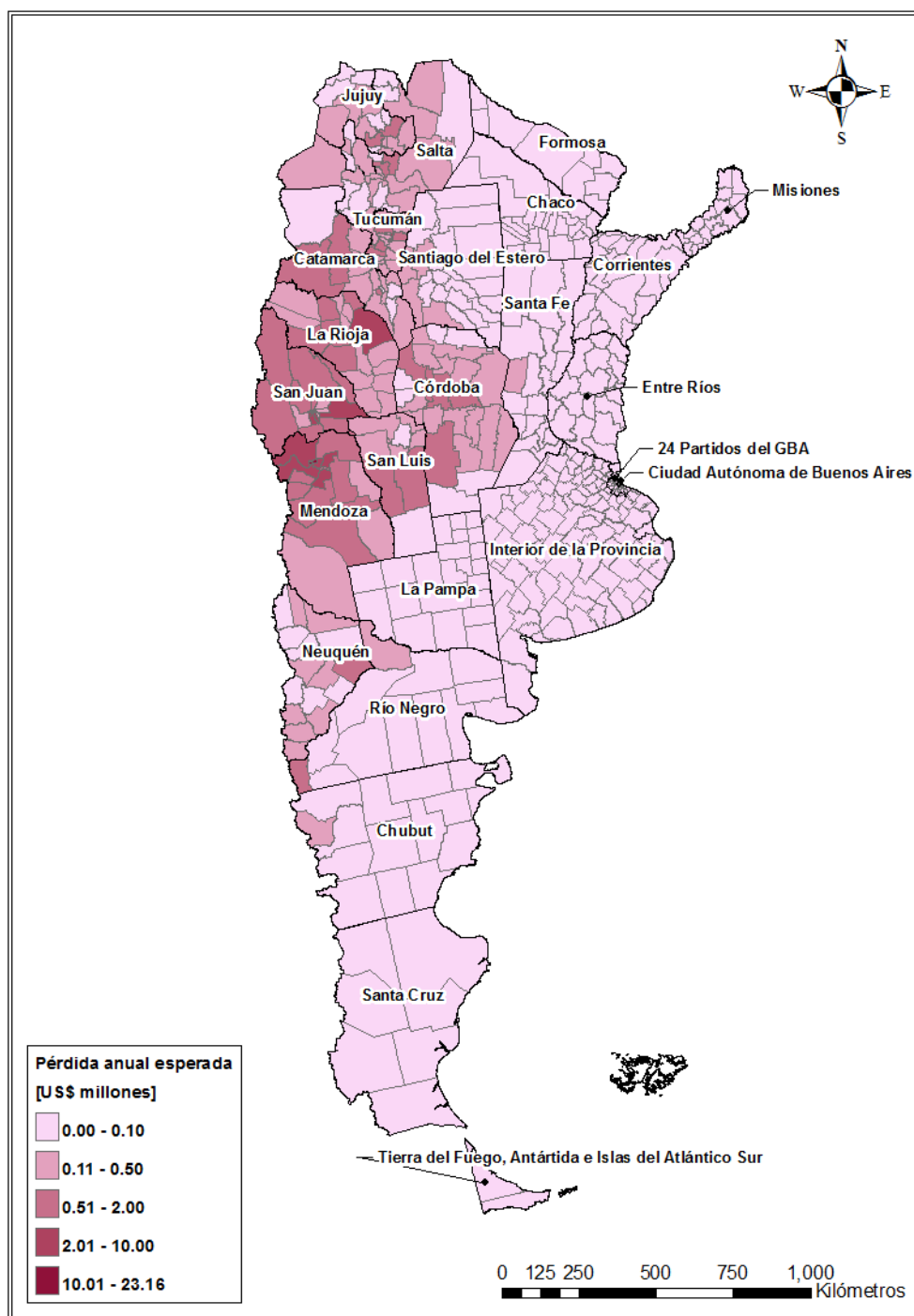


Figura 4-40
Distribución geográfica de AAL (valor) por departamento

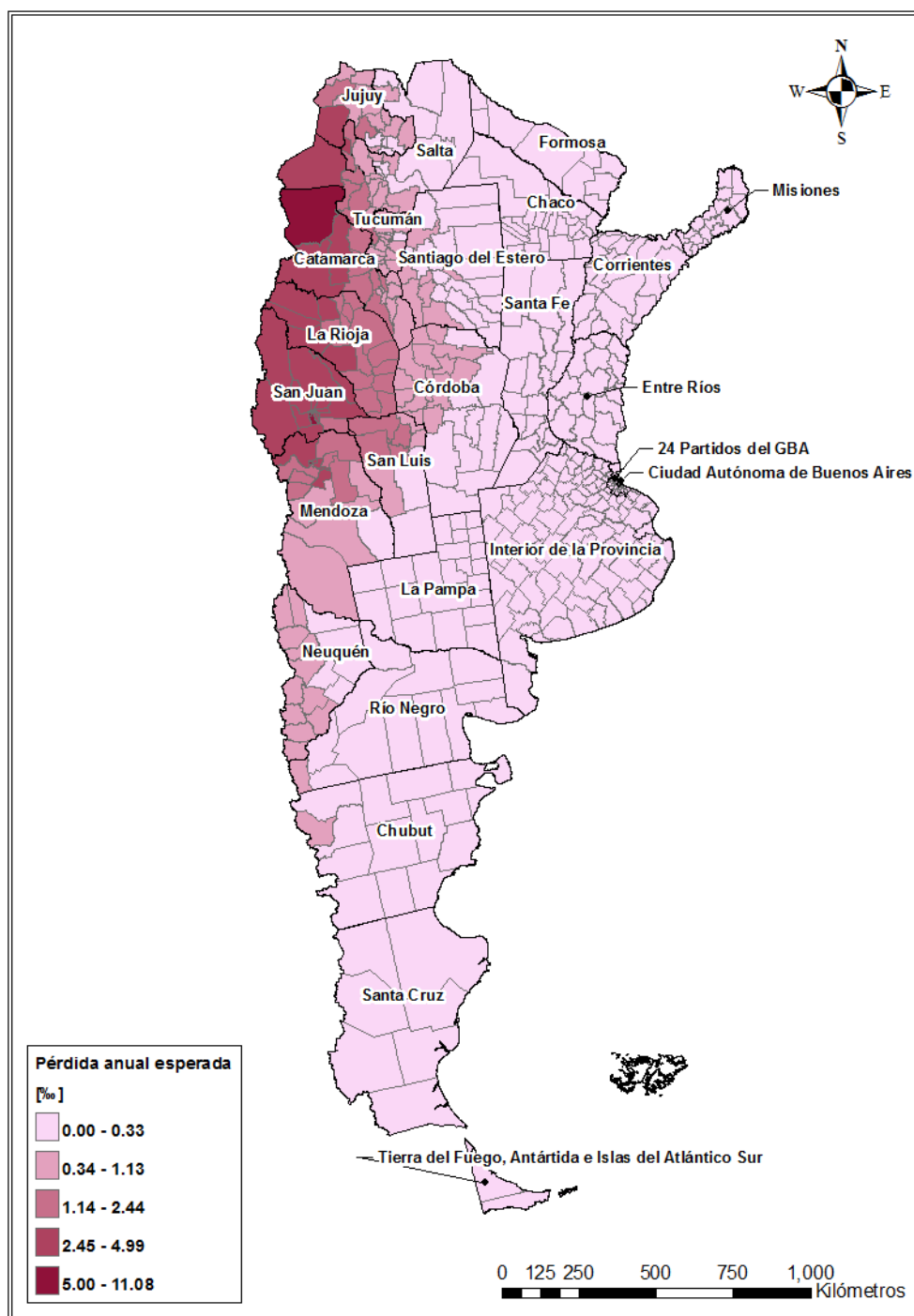


Figura 4-41
Distribución geográfica de AAL (‰) por departamento

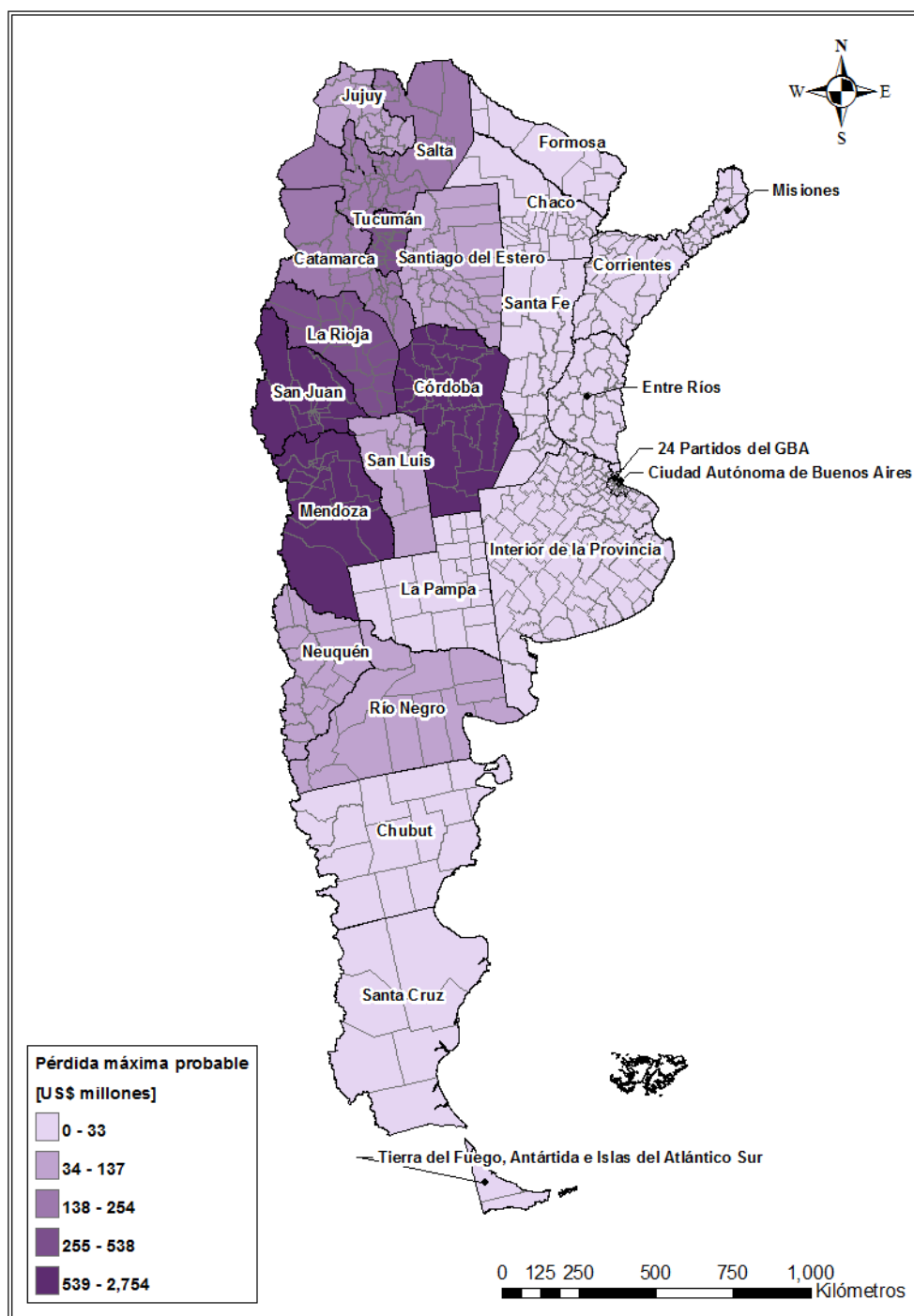


Figura 4-42
Distribución geográfica de PML (valor) por provincia

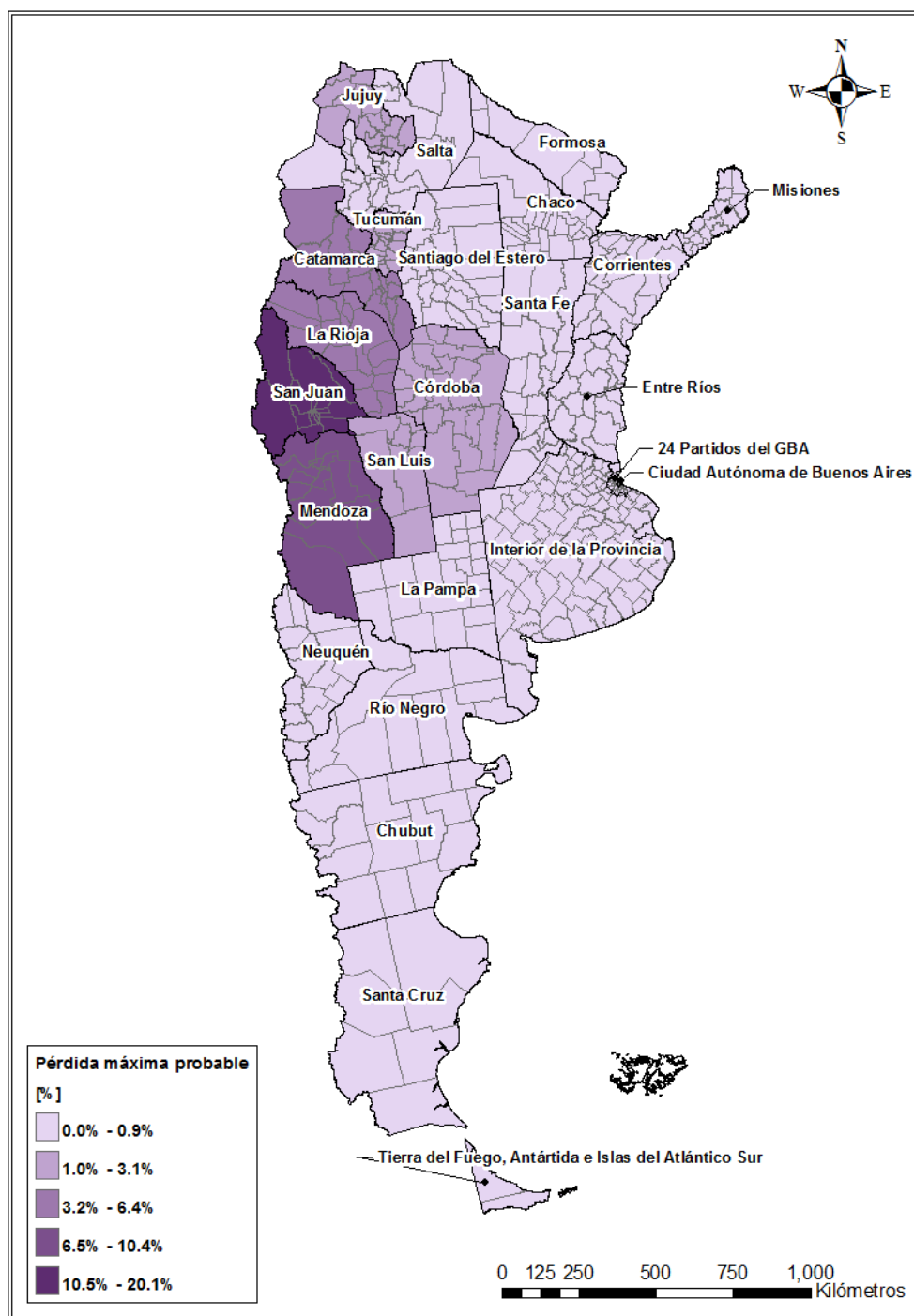


Figura 4-43
Distribución geográfica de PML (%) por provincia

4.4.2 Comparación de pérdidas por sector

La Figura 4-44 presenta la comparación de los valores relativos expuestos por sector a nivel del país.

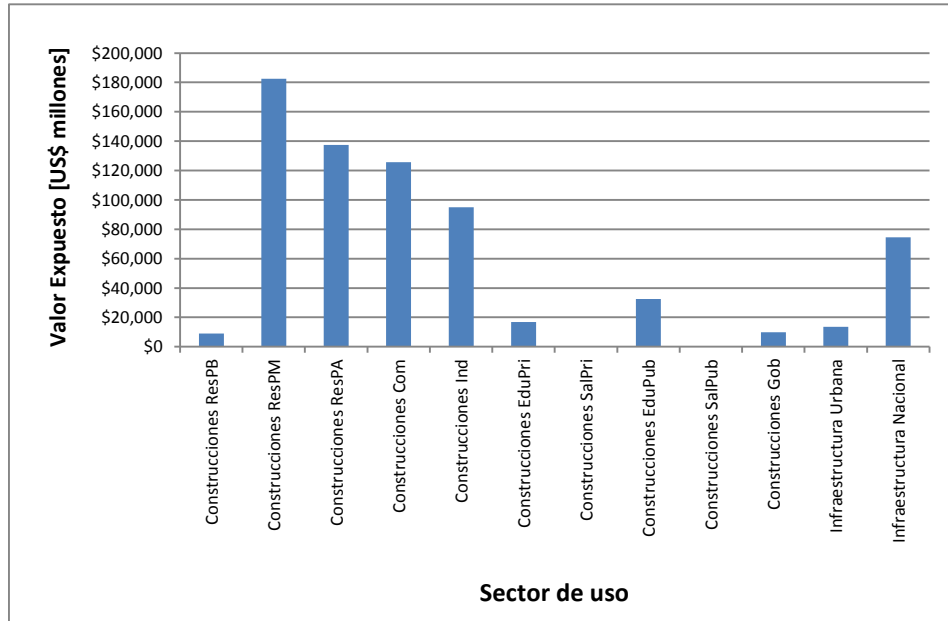


Figura 4-44

Valores expuestos por uso

La Figura 4-45 totaliza la pérdida anual esperada en valor y al millar para cada uno de los sectores de uso y para todo el país en forma agregada.

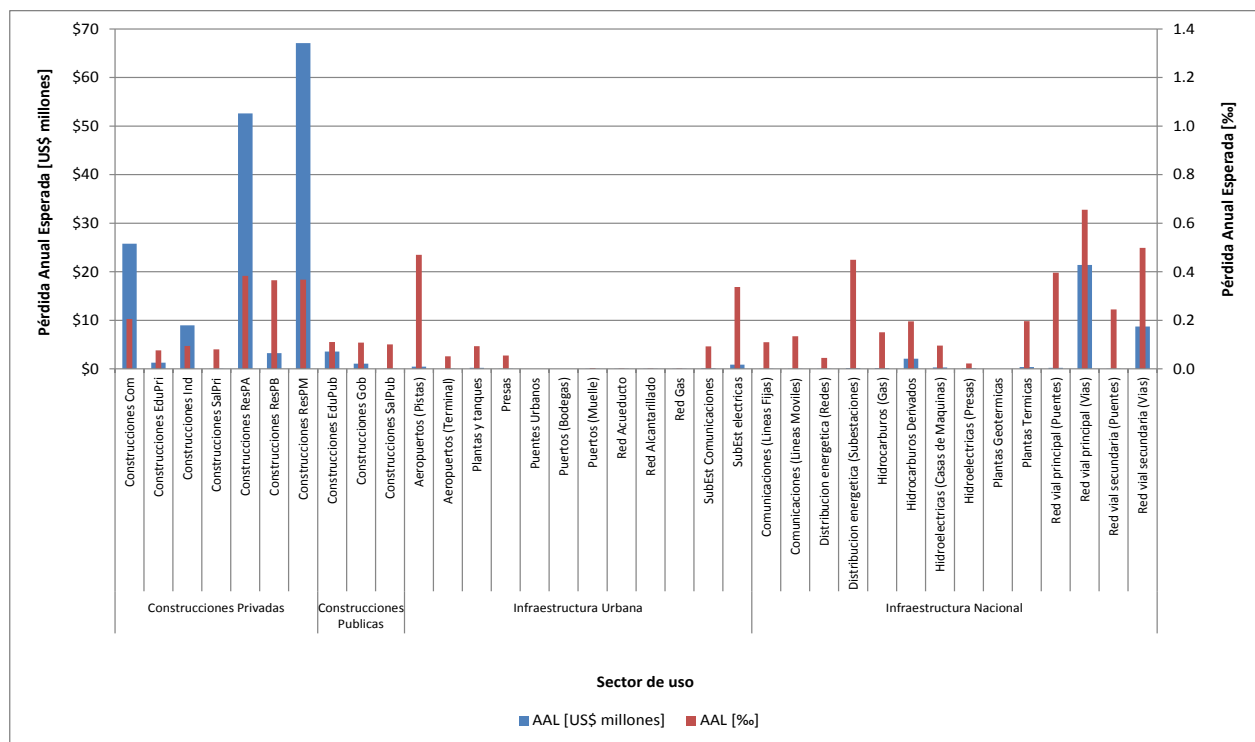


Figura 4-45
Valores de AAL por sectores

Por otro lado y en forma más resumida, la Figura 4-46 presenta los resultados equivalentes a la totalización de los resultados para los tres sectores de uso principales que corresponden a construcciones urbanas, infraestructura urbana e infraestructura nacional.

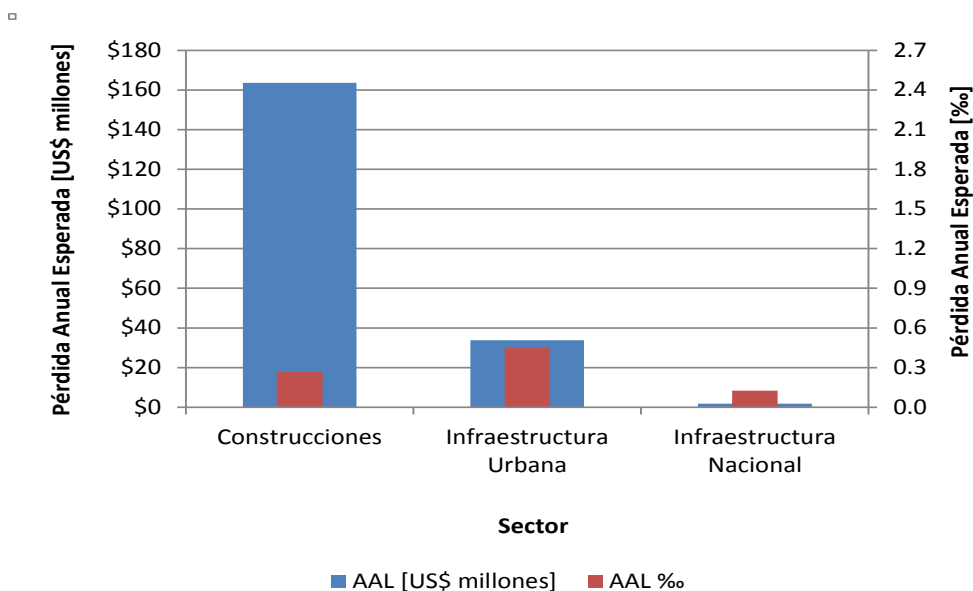


Figura 4-46
Resumen de distribución de AAL por Sectores

4.4.3 Pérdida máxima probable para sectores público y privado

Para evaluar la pérdida máxima probable para los sectores público y privado es necesario realizar análisis para cada uno de los portafolios que se desee analizar, ya que los resultados de este tipo de análisis dependen de la distribución geográfica relativa de los valores expuestos.

El sector público incluye las construcciones urbanas públicas (salud, educación –cuando son del Estado– y gubernamentales) así como toda la infraestructura. Por su parte el sector privado incluye únicamente las construcciones residenciales, comerciales, industriales y las construcciones respectivas del sector salud y educación.

La Figura 4-47 presenta los valores expuestos a nivel de sector público y privado en el país.

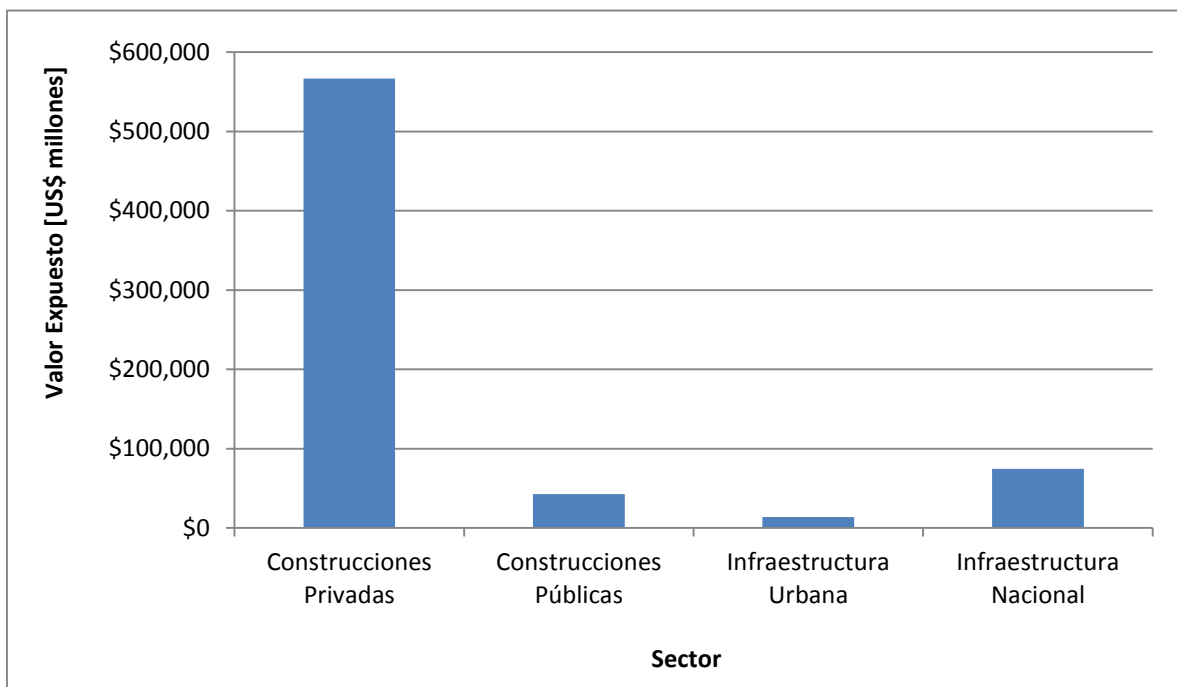


Figura 4-47
Valores expuestos por sectores

La Figura 4-48 y Figura 4-49 presentan la curva de PML para cada uno de estos sectores.

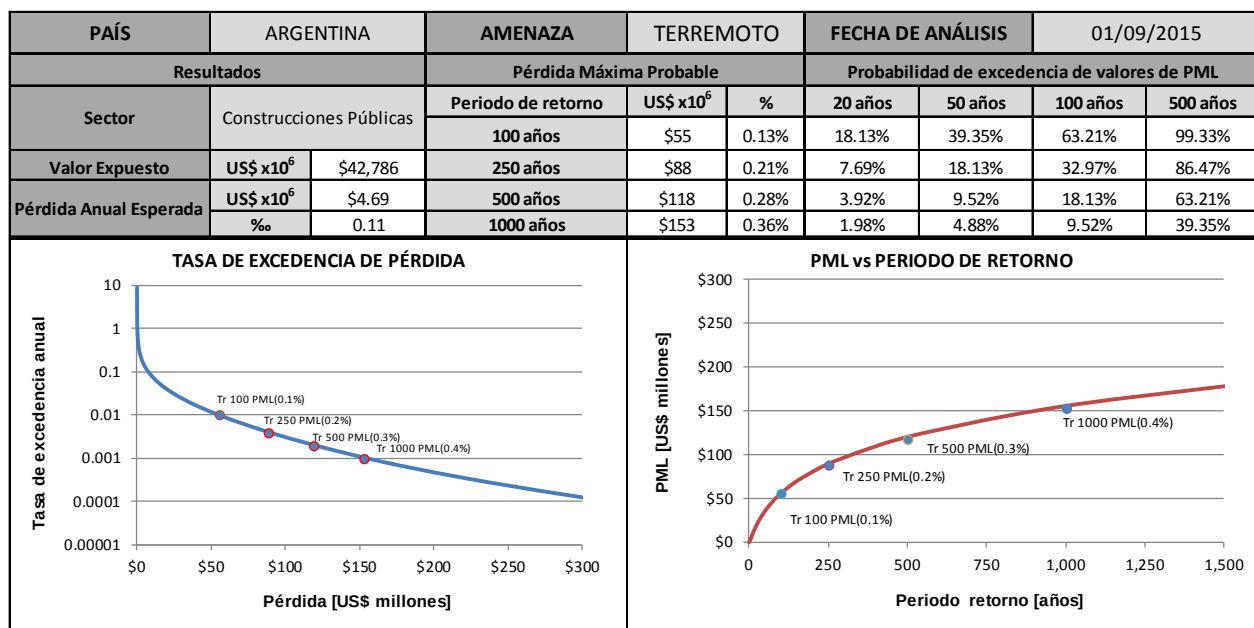


Figura 4-48
Curva de excedencia de pérdidas y de PML para construcciones públicas

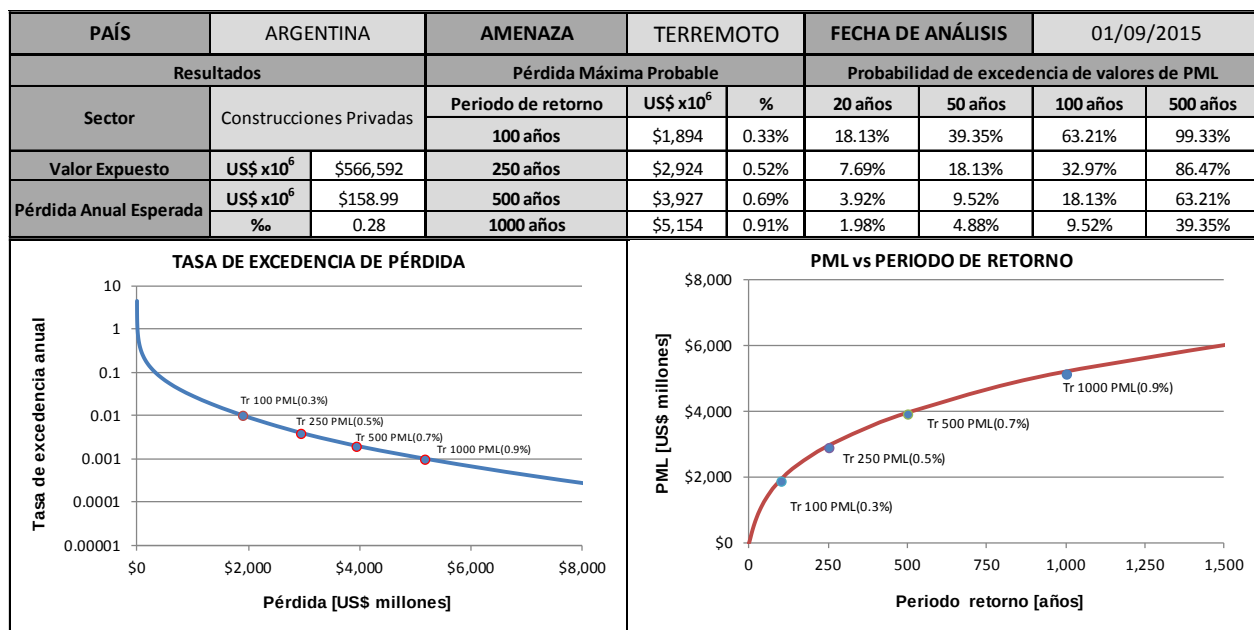


Figura 4-49
Curva de excedencia de pérdidas y de para construcciones privadas

4.4.4 Pérdida máxima probable para infraestructura nacional

Un análisis similar al anterior se realiza para el sector de infraestructura nacional teniendo en cuenta que se han podido realizar análisis individuales para:

- Generación y distribución de energía
- Comunicaciones
- Transportes (vías y puentes)
- Hidrocarburos

Para cada uno de estos sectores se presentan los resultados de curvas de PML vs. Periodo de retorno y resultados globales de AAL en valor y al millar. La Figura 4-50, Figura 4-51, Figura 4-52 y Figura 4-53 resumen estos resultados. En el Anexo 2 se presentan los resultados para los demás sectores.

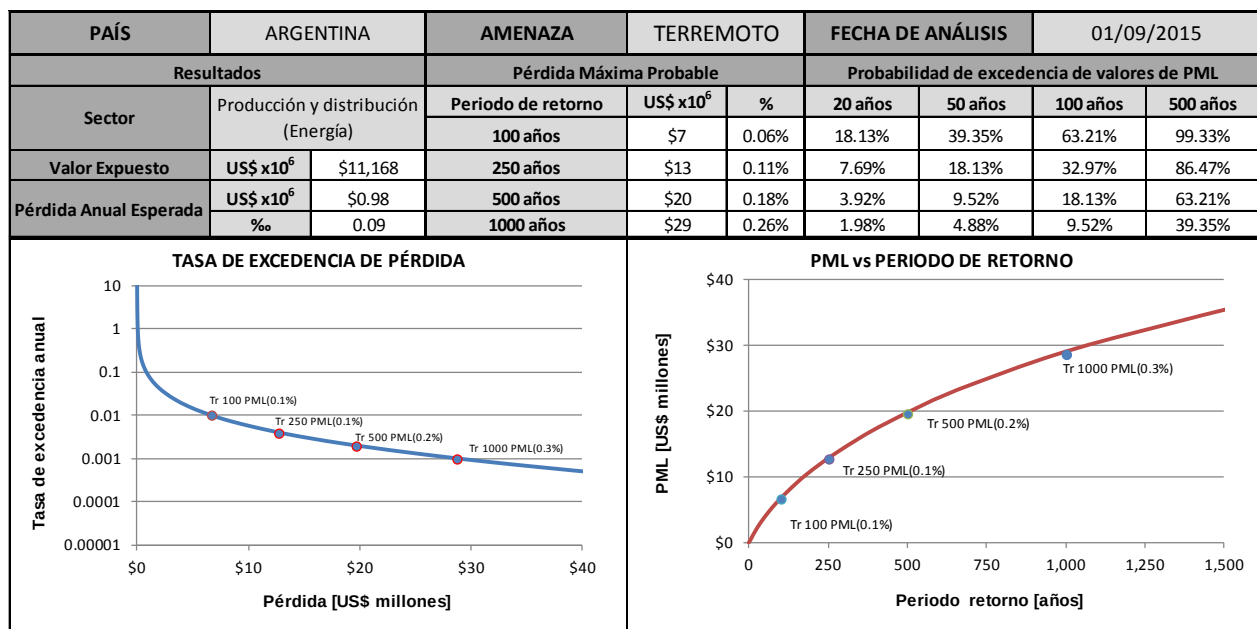


Figura 4-50
Curva de excedencia de pérdidas y de PML para el sector energía

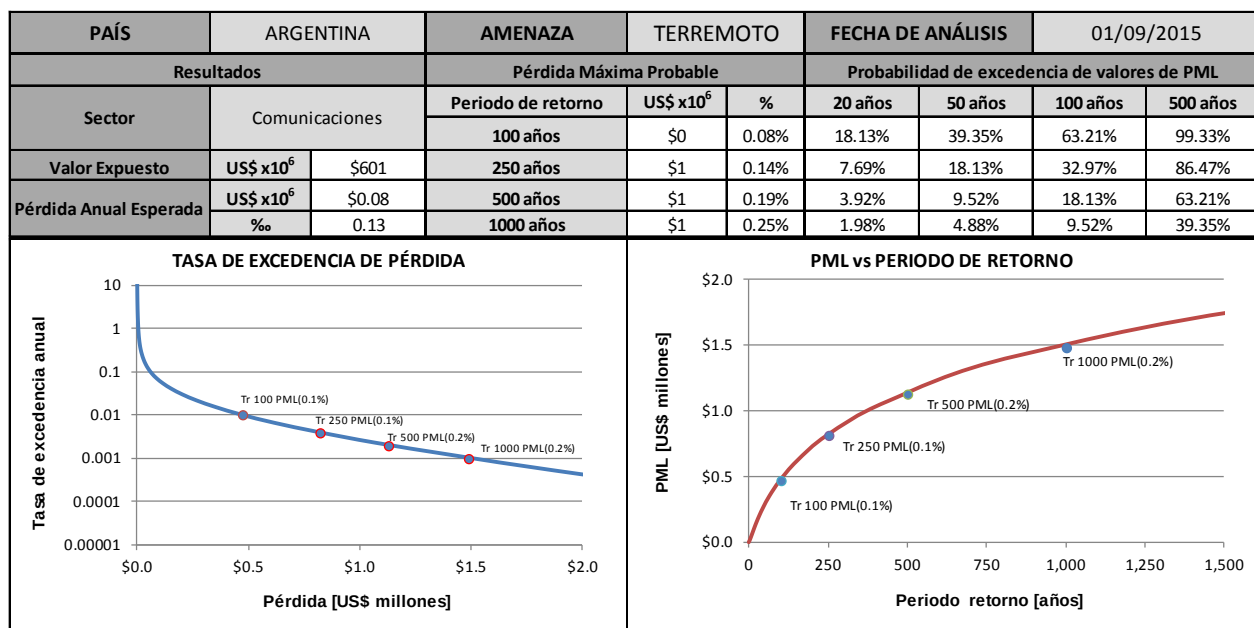


Figura 4-51
Curva de excedencia de pérdidas y de PML para el sector comunicaciones

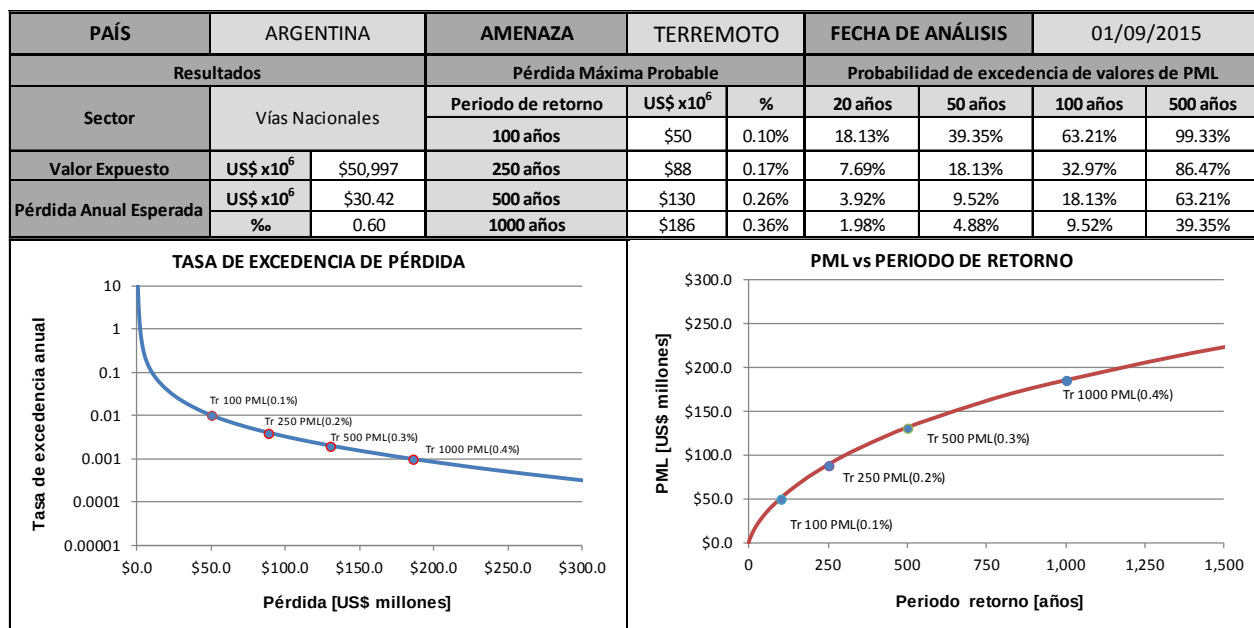


Figura 4-52
Curva de excedencia de pérdidas y de PML por terremoto para el sector de vías

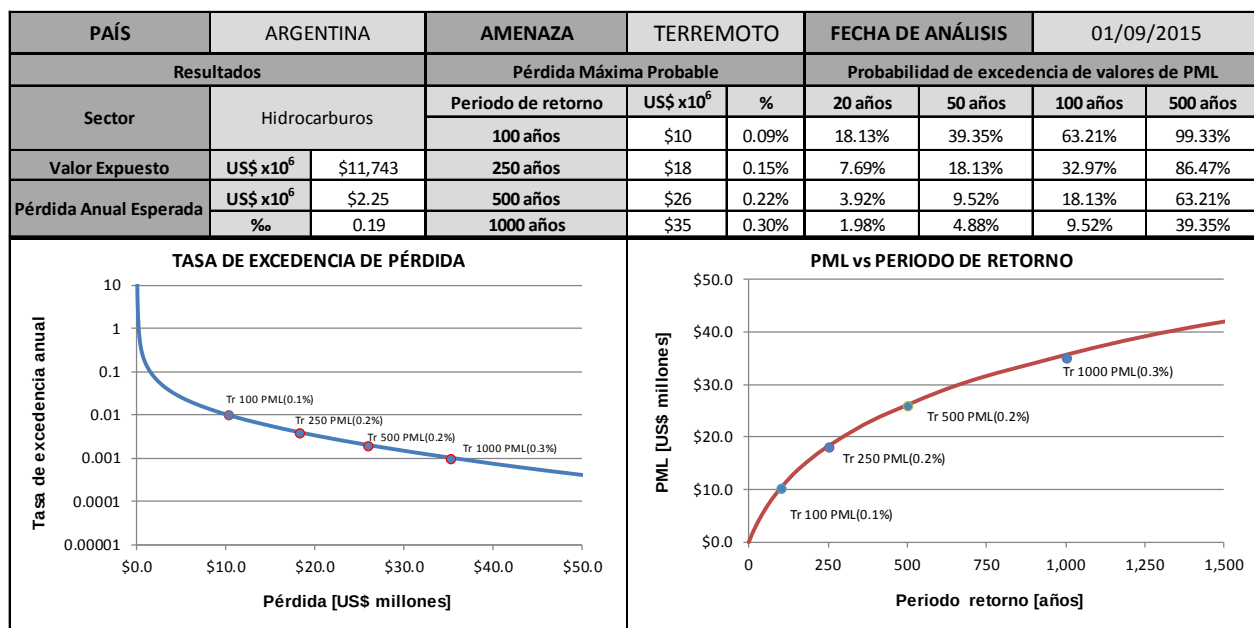


Figura 4-53
Curva de excedencia de pérdidas y de PML para el sector hidrocarburos

5 Referencias

AIS (Asociación de Ingeniería Sísmica), FOREC (Fondo de Reconstrucción del Eje Cafetero), DPAE (Dirección de Prevención y Atención de Emergencias), Yamin L, Cardona O, Merlano S, Blandón C, Mejía L, Arango J, Gómez C. (2005). *Manual de Construcción, Evaluación y Rehabilitación Sismo resistente de Viviendas de Mampostería*, Bogotá, Colombia. 2005

ATC (1985). *"Earthquake Damage Evaluation Data for California"* - ATC-13. Applied Technology Council, Redwood City, CA.

Boore, D.M. (1983). *Stochastic simulation of high-frequency ground motion based on seismological models of radiated spectra*, Bull. Seism. Soc. Am. 73, 1865-1884

Bozzoni, F., Corigliano, M., Lai, C. G., Salazar, W., Scandella, L., Zuccolo, E., Robertson, R. (2011). *Probabilistic Seismic Hazard Assessment at the Eastern Caribbean Islands*. Bulletin of the Seismological Society of America, 101(5), 2499-2521. Doi: 10.1785/0120100208.

CUBiC (1985). *Caribbean Uniform Building Code*. Georgetown, Guyana: Caribbean Community Secretariat.

Earthquake Spectra, Special Issue (2010). *Haiti Earthquake 2010*. Volume 27, number S1, October 2011.

ERN-AL (2010a). CAPRA: *Comprehensive Approach for Probabilistic Risk Assessment*. The World Bank, IDB, UN-ISDR, CEPREDENAC. Informe ERN-CAPRA-T1-3 - Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales. Available at: www.ecapra.org

ERN-AL (2010b). CAPRA -*Caracterización, Clasificación y Valoración de Elementos Expuestos*. Informe ERN-CAPRA-T2.1. <http://www.ecapra.org>.

ERN-AL (2010c). CAPRA - *ERN-Vulnerabilidad V1.0*. Evaluación de Riesgos Naturales ERN – América Latina. <http://www.ecapra.org>.

ERN-AL (2010d). CAPRA - *Informe ERN-CAPRA-T1-3 - Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales*. Evaluación de Riesgos Naturales – América Latina. <http://www.ecapra.org>.

ERN-AL (2010e). CAPRA - *Metodología de Análisis Probabilista de Riesgos*. Informe ERN-CAPRA-T3.2. Evaluación de Riesgos Naturales – América Latina. <http://www.ecapra.org>.

ERN-AL (2010f). CAPRA - *Plataforma para la Evaluación Probabilista de Riesgo CAPRA-GIS*. Evaluación de Riesgos Naturales – América Latina. <http://www.ecapra.org>.

FEMA (2003). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model HAZUS-MH MR3 Technical Manual*. Federal Emergency Management Agency.

FEMA. (2006). *Multi-hazard loss estimation methodology, HAZUS-MH MR2 technical manual*. Washington D.C., United States of America: Federal Emergency Management Agency and National Institute of Building Sciences.

FEMA (2011a). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model HAZUS-MH 2.1 Technical Manual*. Federal Emergency Management Agency.

FEMA (2011b). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology Flood Model HAZUS-MH 2.1 Technical Manual*. Federal Emergency Management Agency.

FEMA (2011c). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology Hurricane Model HAZUS-MH 2.1 Technical Manual*. Federal Emergency Management Agency.

García L, Yamin L., (1994). *A Review Of Masonry Construction In Colombia*. American Concrete Institute, ACI, SP 147.

Granger, K (2008). *Seismic risk assessment for Trinidad and Tobago – Direct economic loss for Port of Spain and San Fernando* (Graduate thesis), Imperial College of London, Department of Civil and Environmental Engineering.

IDEA (2005). *Sistema de indicadores para la gestión del riesgo de desastre: Informe técnico principal*. Programa BID/IDEA de Indicadores para la Gestión de Riesgos, Universidad Nacional de Colombia, Manizales. En: <http://idea.unalmzl.edu.co>.

IDEA (2009). *Sistema de indicadores para la gestión del riesgo de desastre: Informe técnico principal*. Programa BID/IDEA de Indicadores para la Gestión de Riesgos, Universidad Nacional de Colombia, Manizales. En: <http://idea.unalmzl.edu.co>.

International Code Council - ICC (2000), *International Building Code (IBC)*.

Meli R, Svetlana B, Yamin L, Astroza M, Boen T, Crisafulli F, Dai J, Farsi M, Hart T, Mebarki A, Moghadam A, Quiun D, Tomazevic M. (2010). *Seismic Design Guide for Low Rise Confined Masonry Buildings - World housing Encyclopedia*, EERI & IAEE, Confined masonry Network, World Housing Encyclopedia, EERI, IAEE, RMS. Washington DC, USA.

Miranda, E. (1999). *Approximate Seismic Lateral Deformation Demands in Multistory Buildings* Journal of Structural Engineering, 125(4), 417–425. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:4(417).

NORSAR et. al. Proyecto regional RESIS II – Evaluación de la Amenaza sísmica en Centroamérica. 2008.

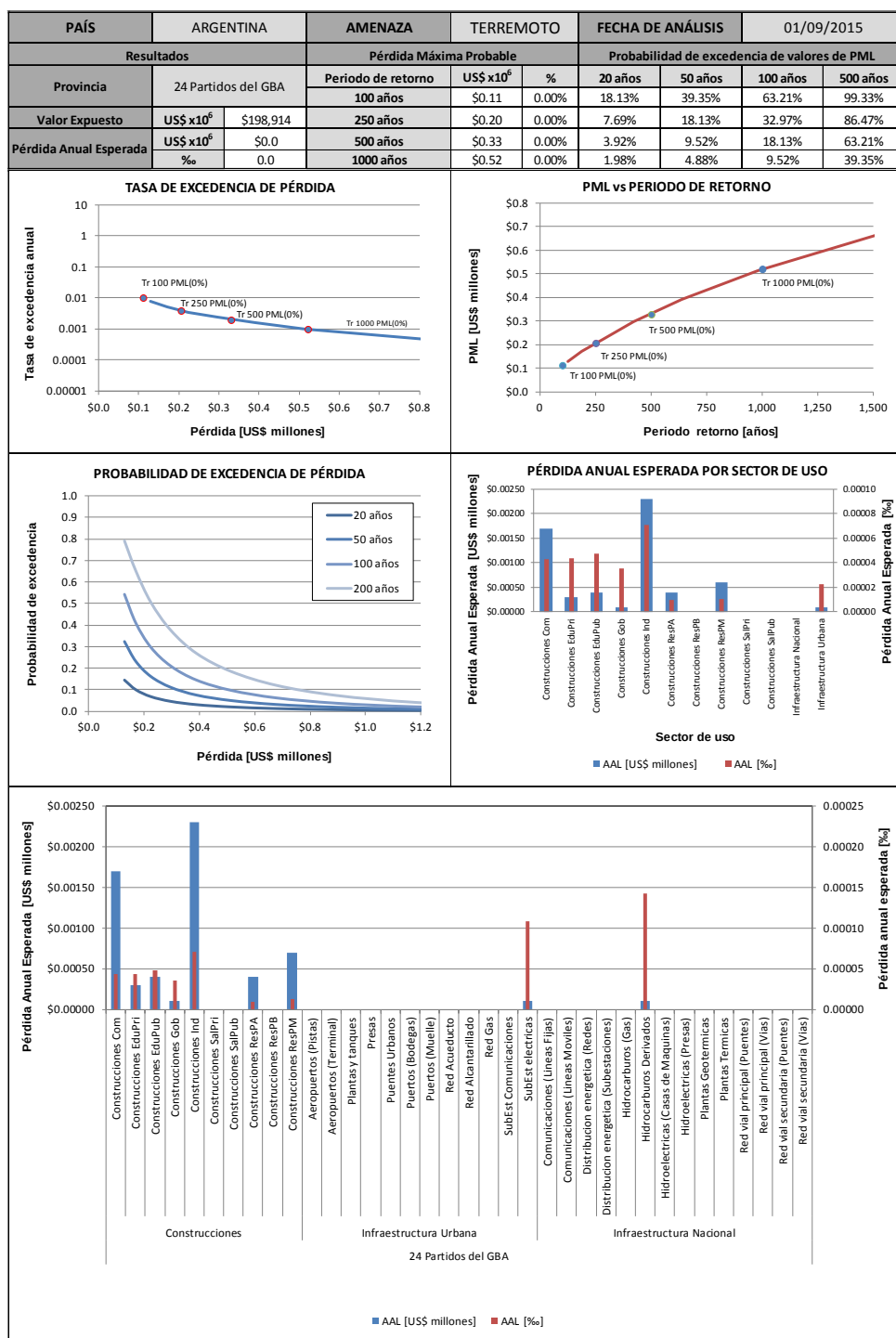
Ordaz, M. G. (2000). *Metodología para la evaluación del riesgo sísmico enfocada a la gerencia de seguros para terremoto*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Yamin, L., Hurtado, A., Barbat, A., Bernal, G., Cardona, O. (2012). *Earthquake Vulnerability Assessment of Buildings for Catastrophic Risk Analysis in Urban Area*. 15th World Conference Earthquake Engineering, paper 2364, 15WCEE, Lisboa, Portugal.

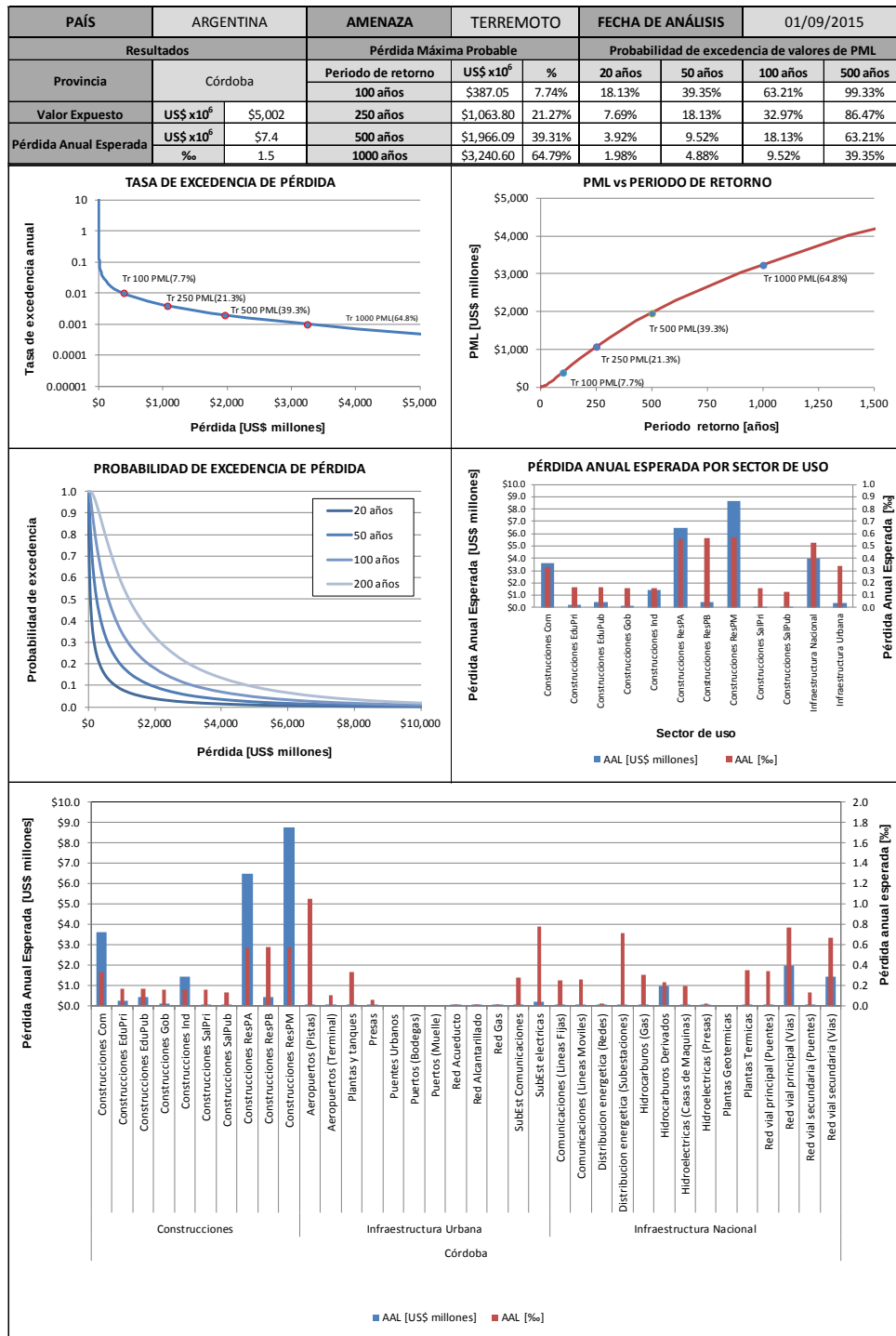
Yamin, L. (1994), *Comportamiento Sísmico de Muros de Mampostería Confinada*, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS, Boletín Técnico No.45, Bogotá, Colombia.

Anexo 1
Resultados por entidades subnacionales

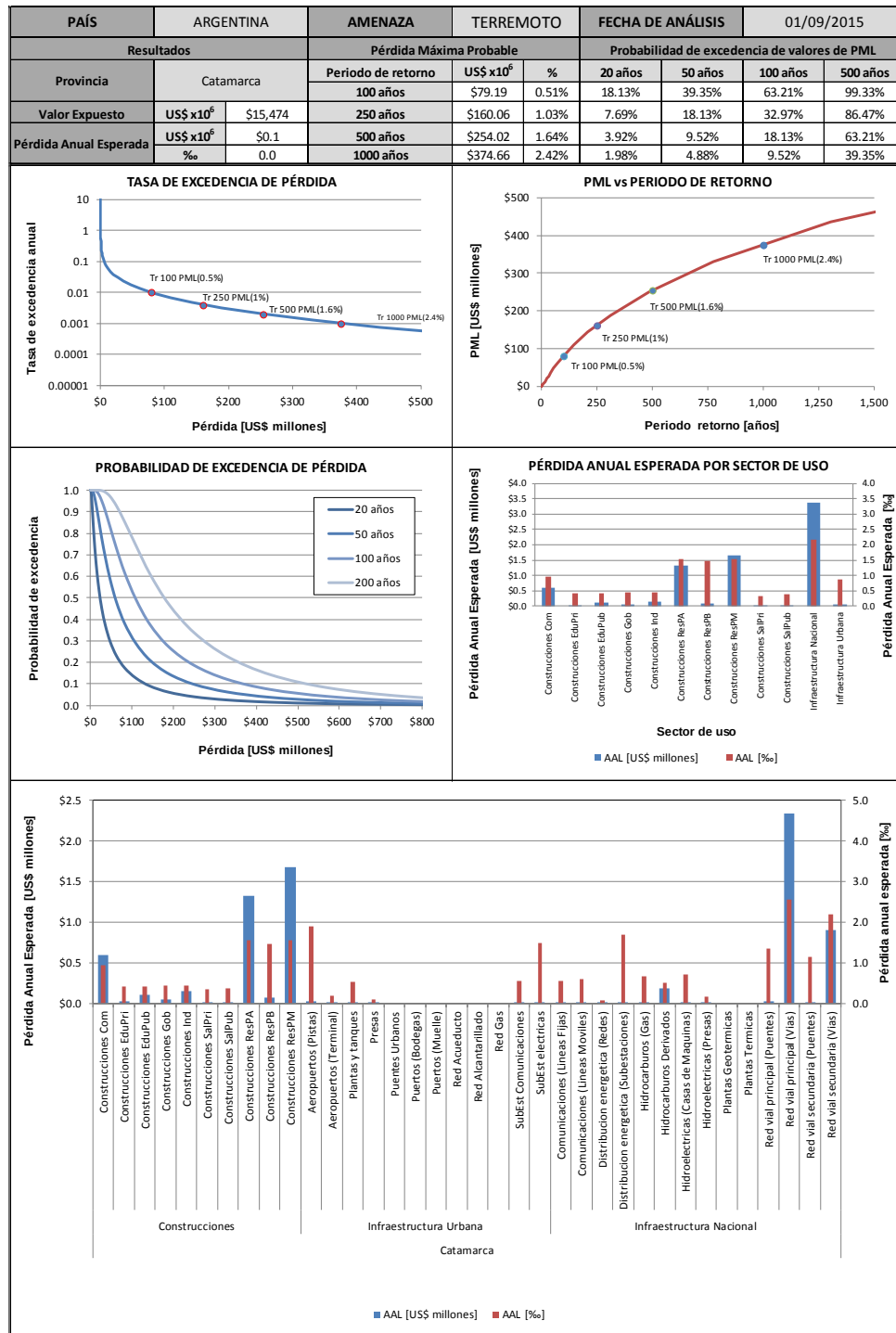
A1- 1 Resultados de Terremoto para los 24 partidos del Gran Buenos Aires



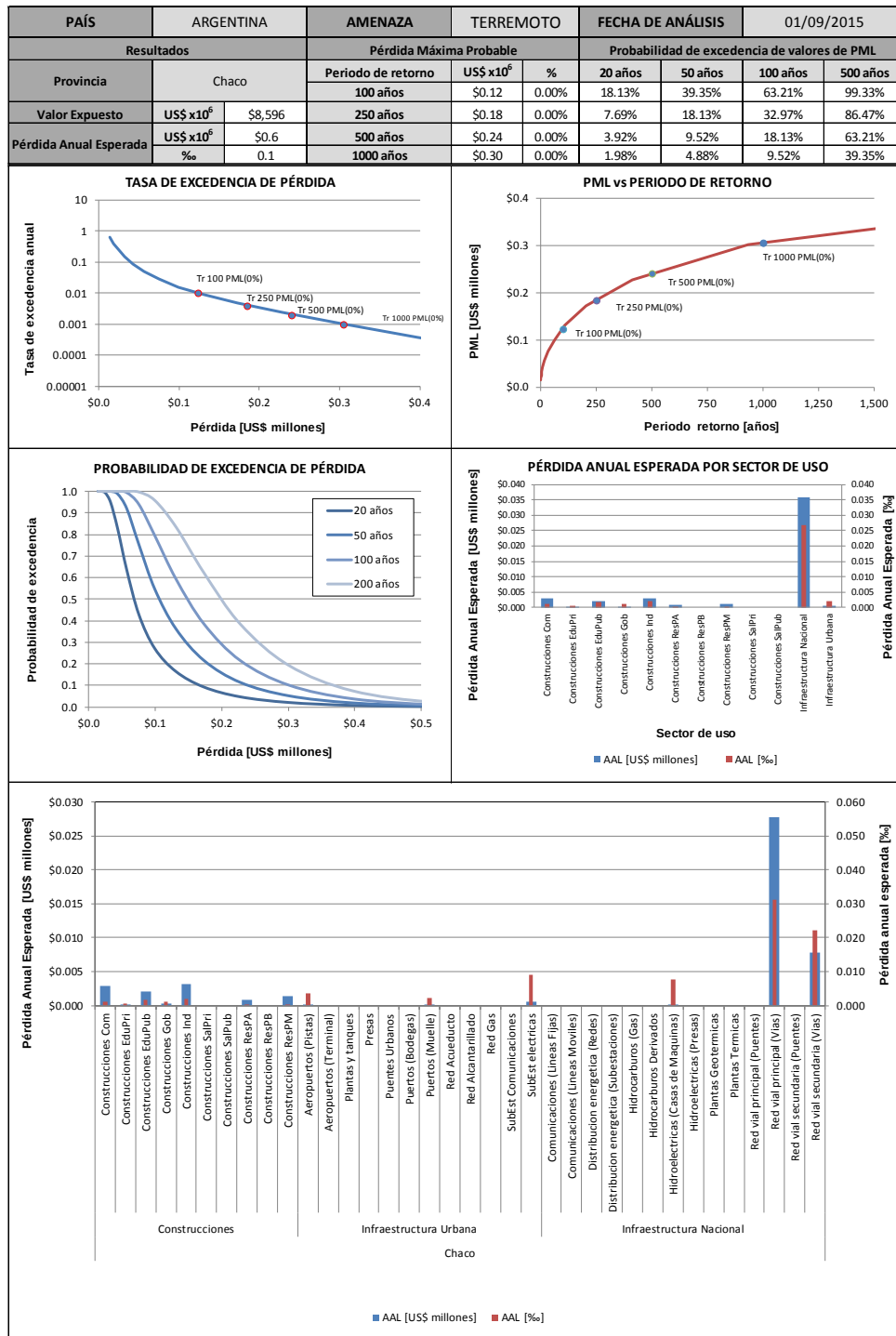
A1- 2 Resultados de Terremoto para Córdoba



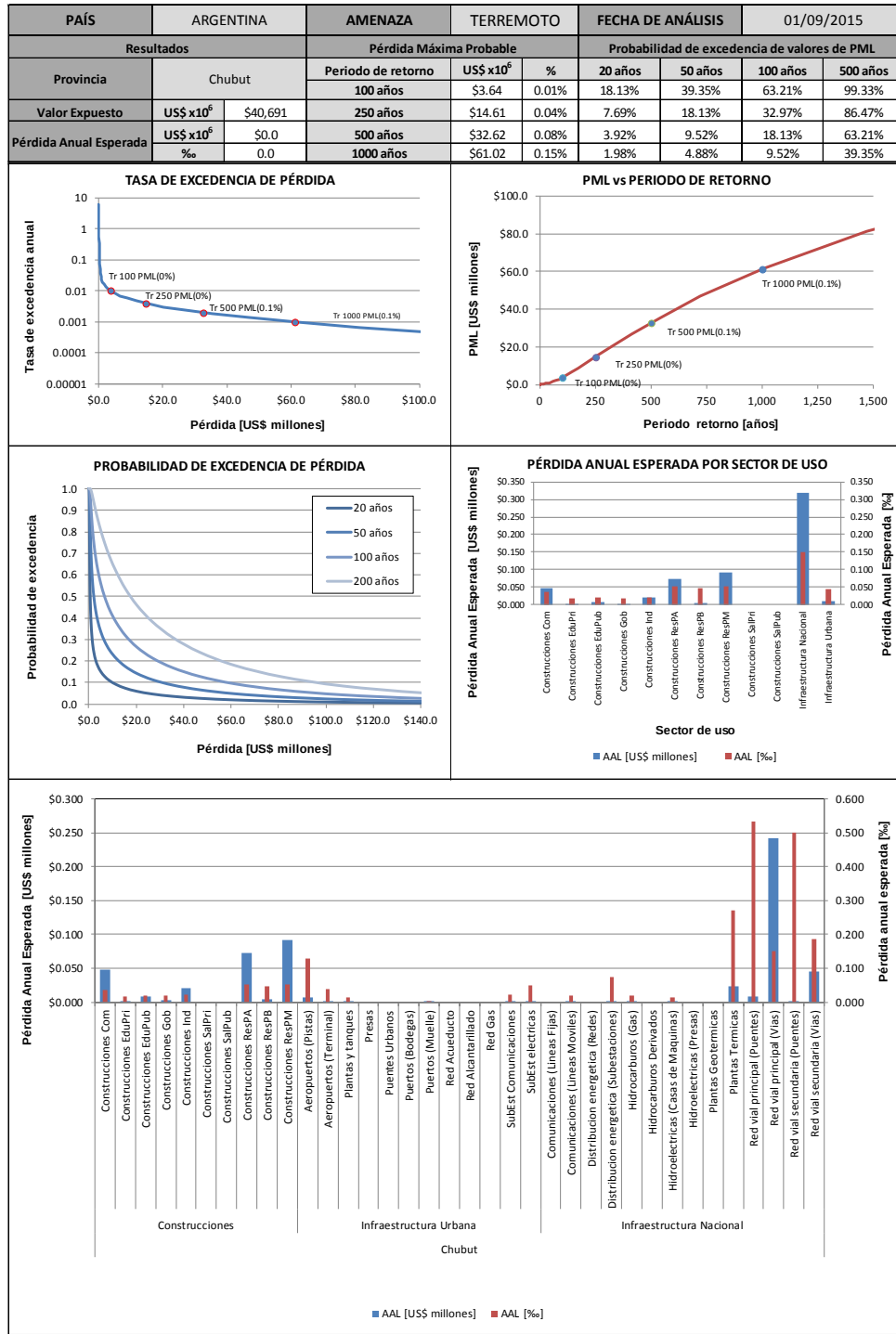
A1- 3 Resultados de Terremoto para Catamarca



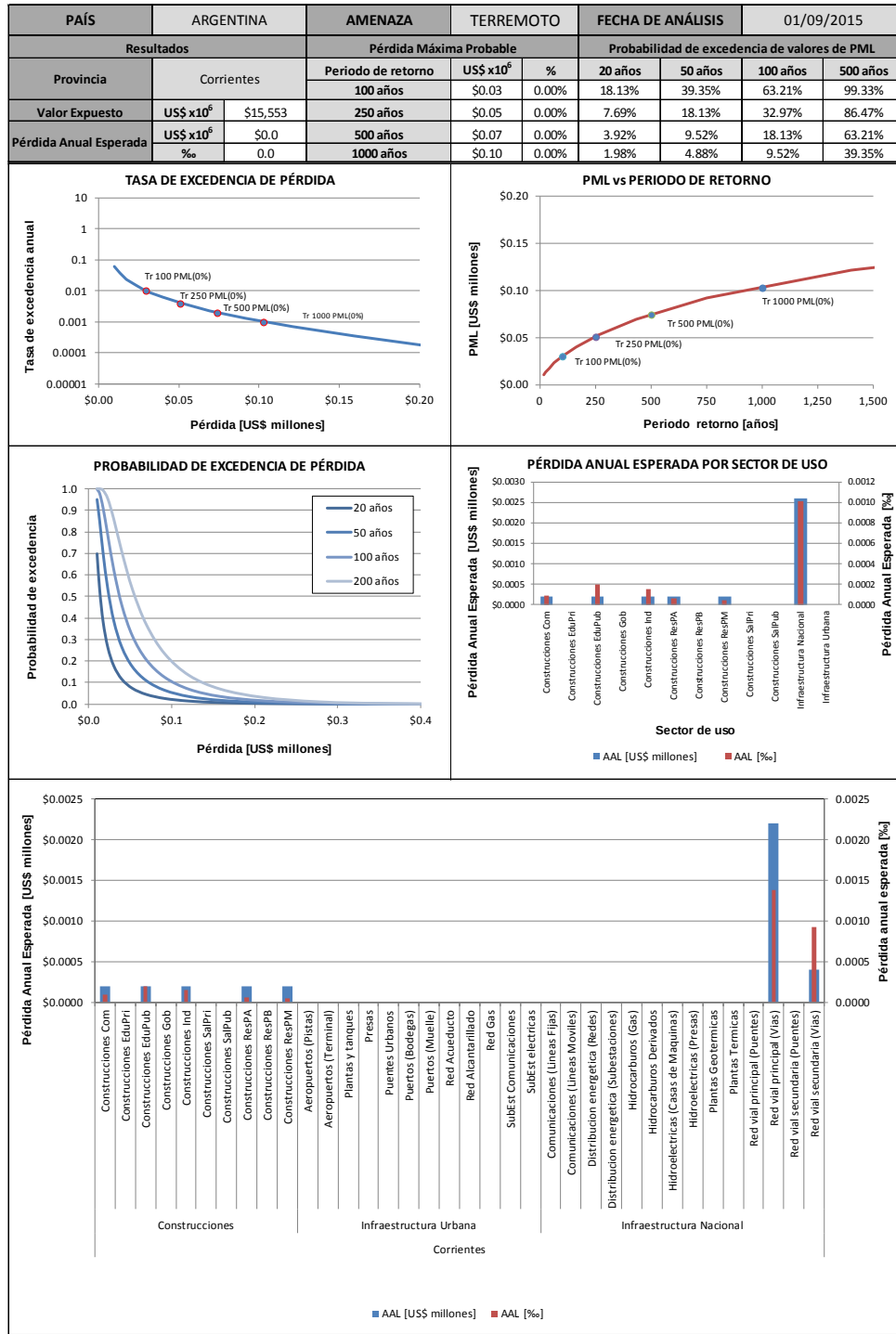
A1- 4 Resultados de Terremoto para Chaco



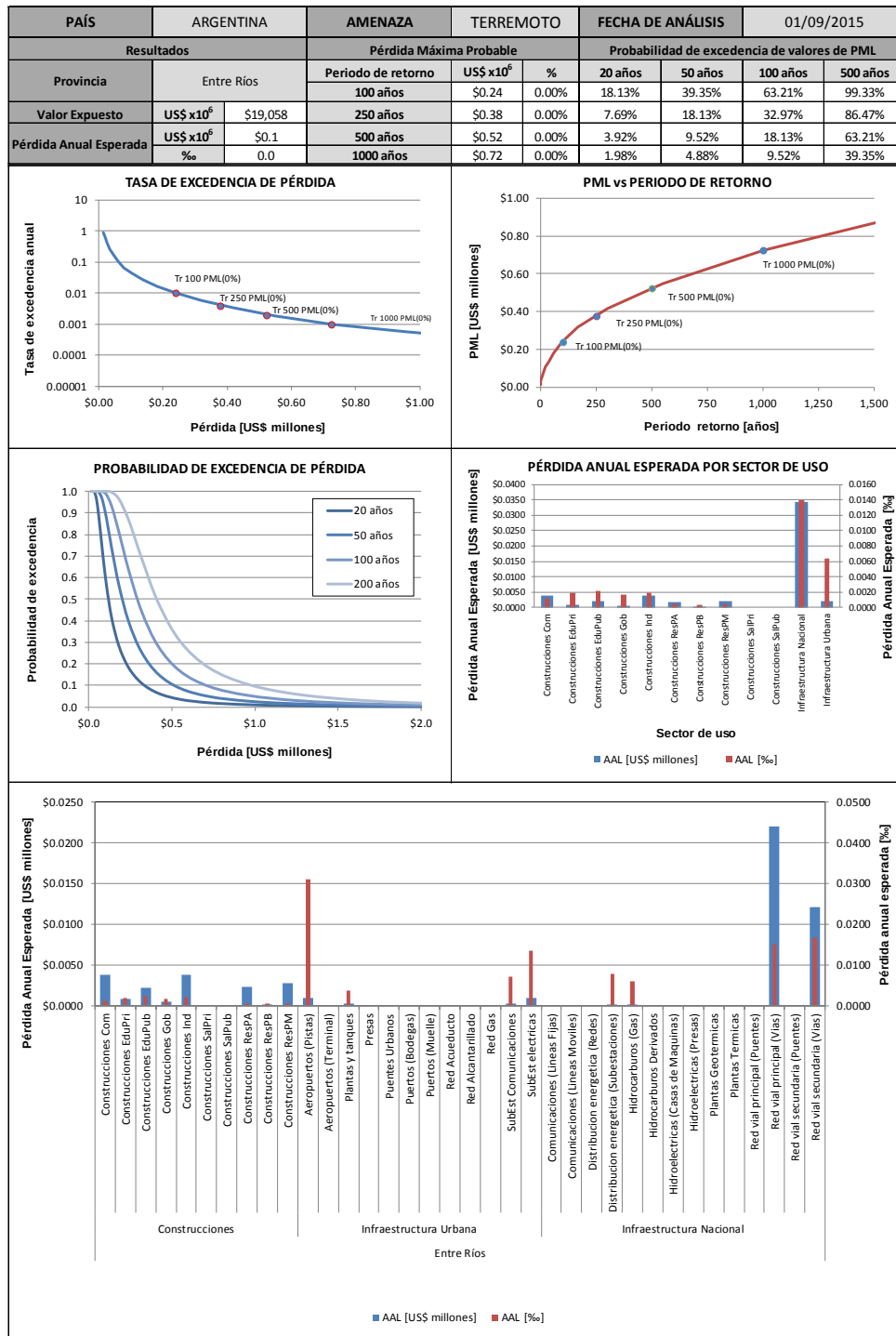
A1- 5 Resultados de Terremoto para Chubut



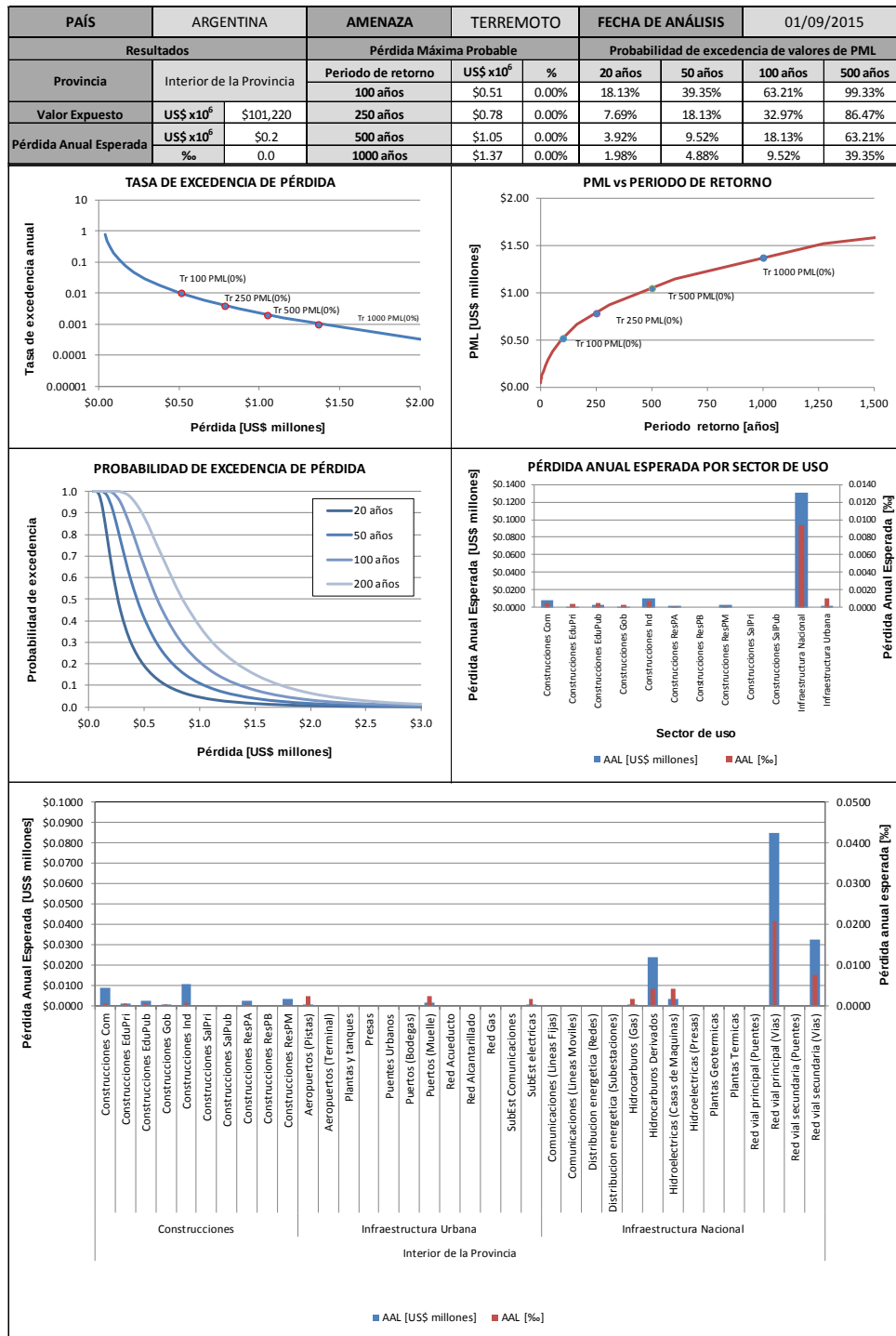
A1- 6 Resultados de Terremoto para Corrientes



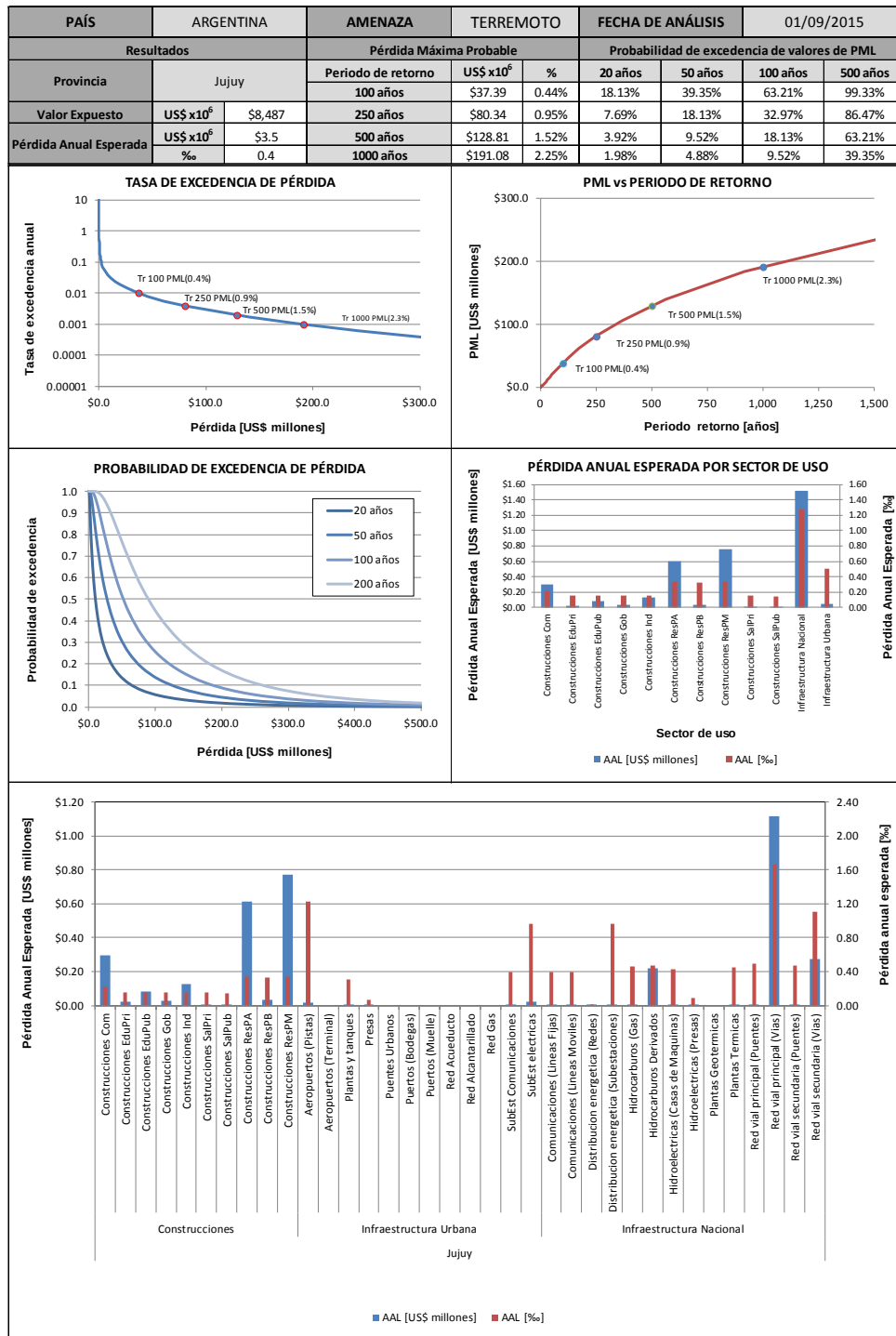
A1- 7 Resultados de Terremoto para Entre Ríos



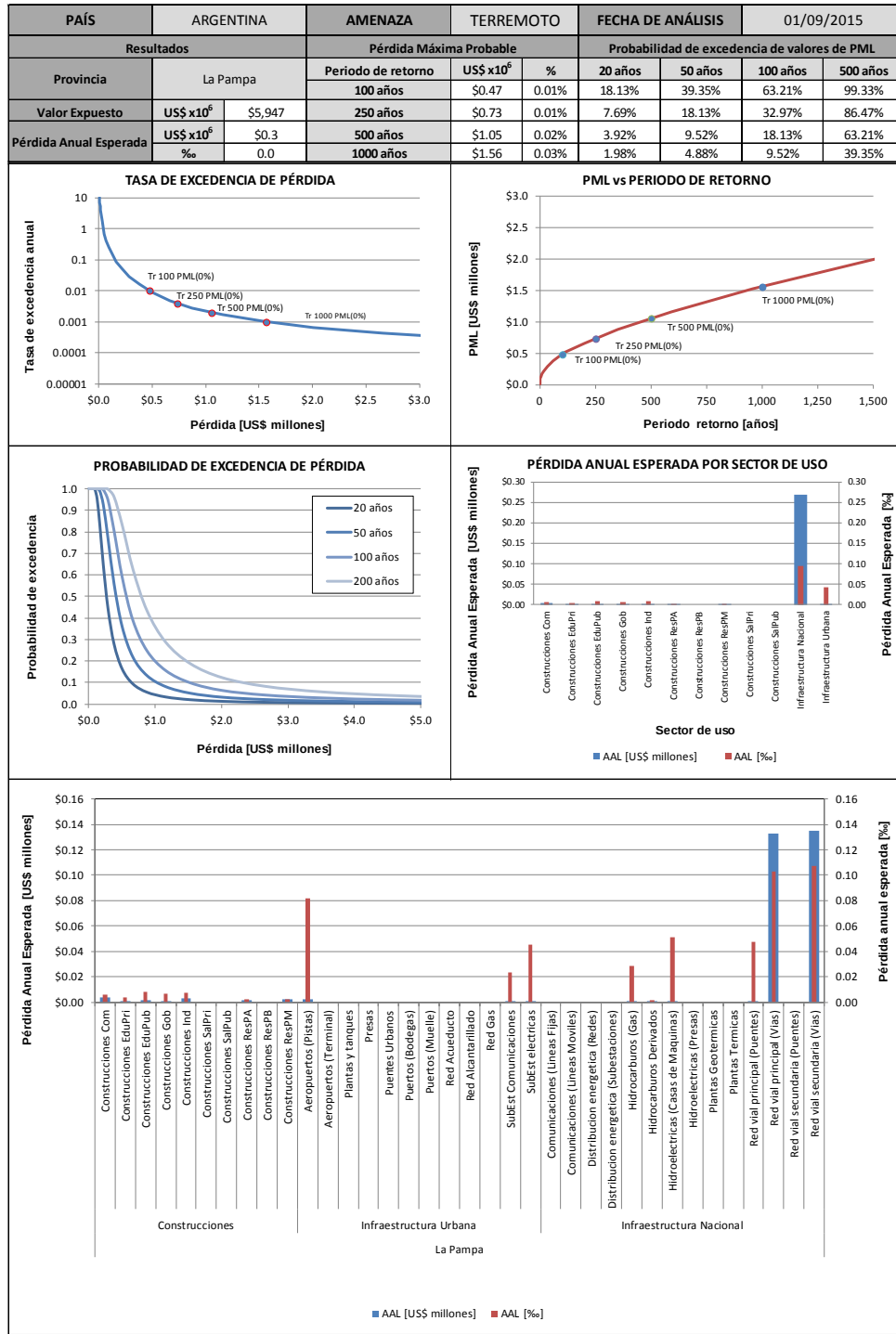
A1- 8 Resultados de Terremoto para el Interior de la Provincia



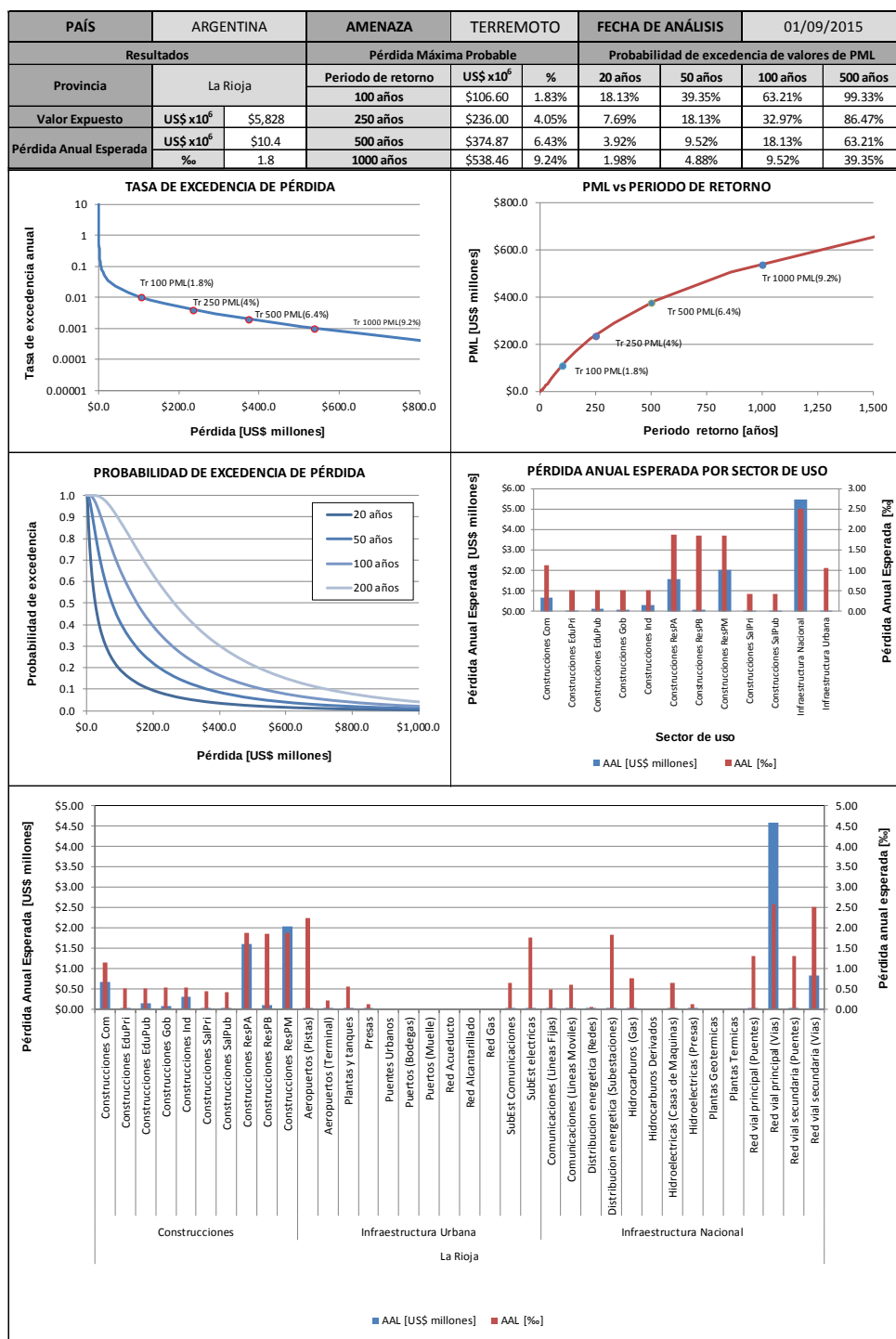
A1- 9 Resultados de Terremoto para Jujuy



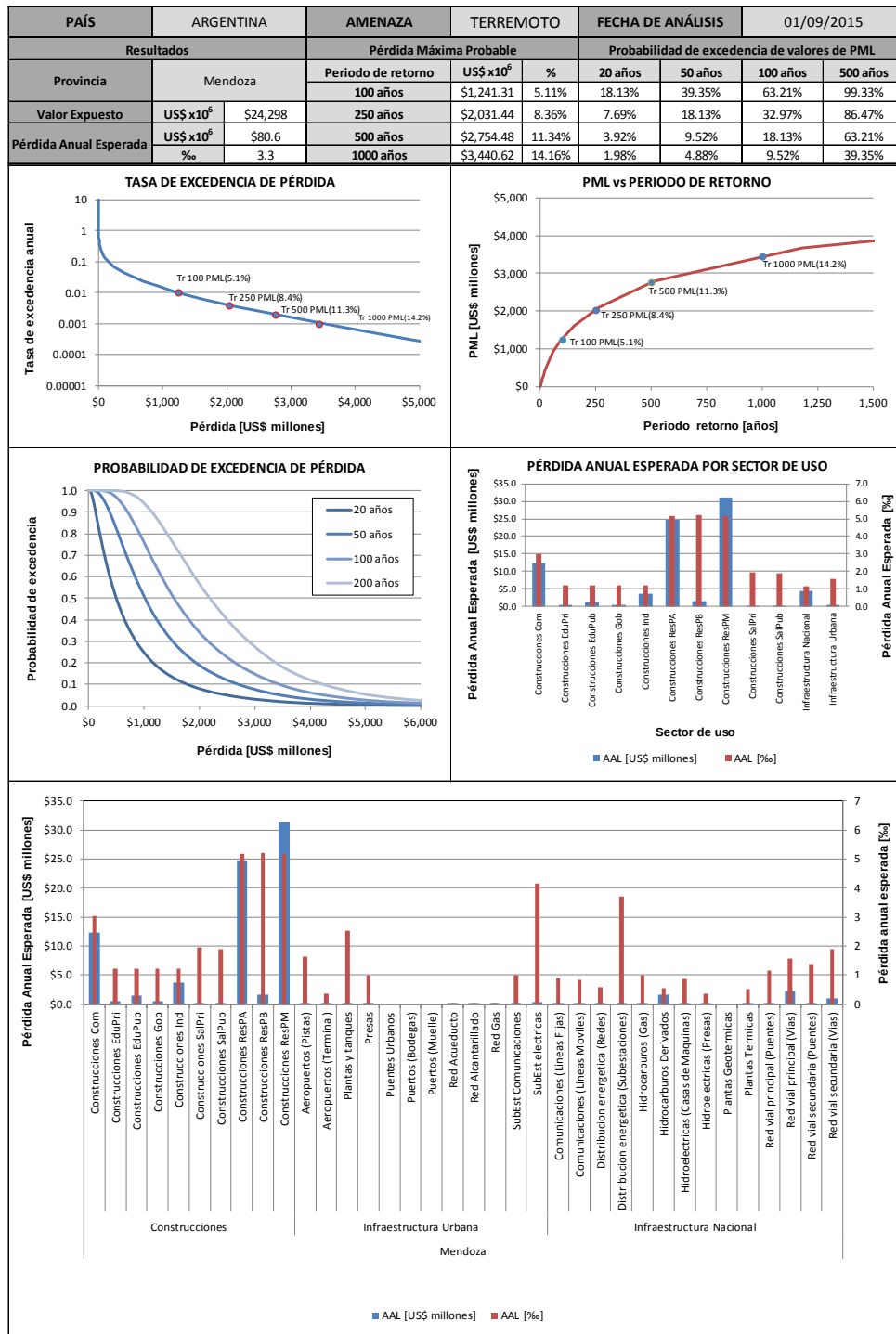
A1- 10 Resultados de Terremoto para La Pampa



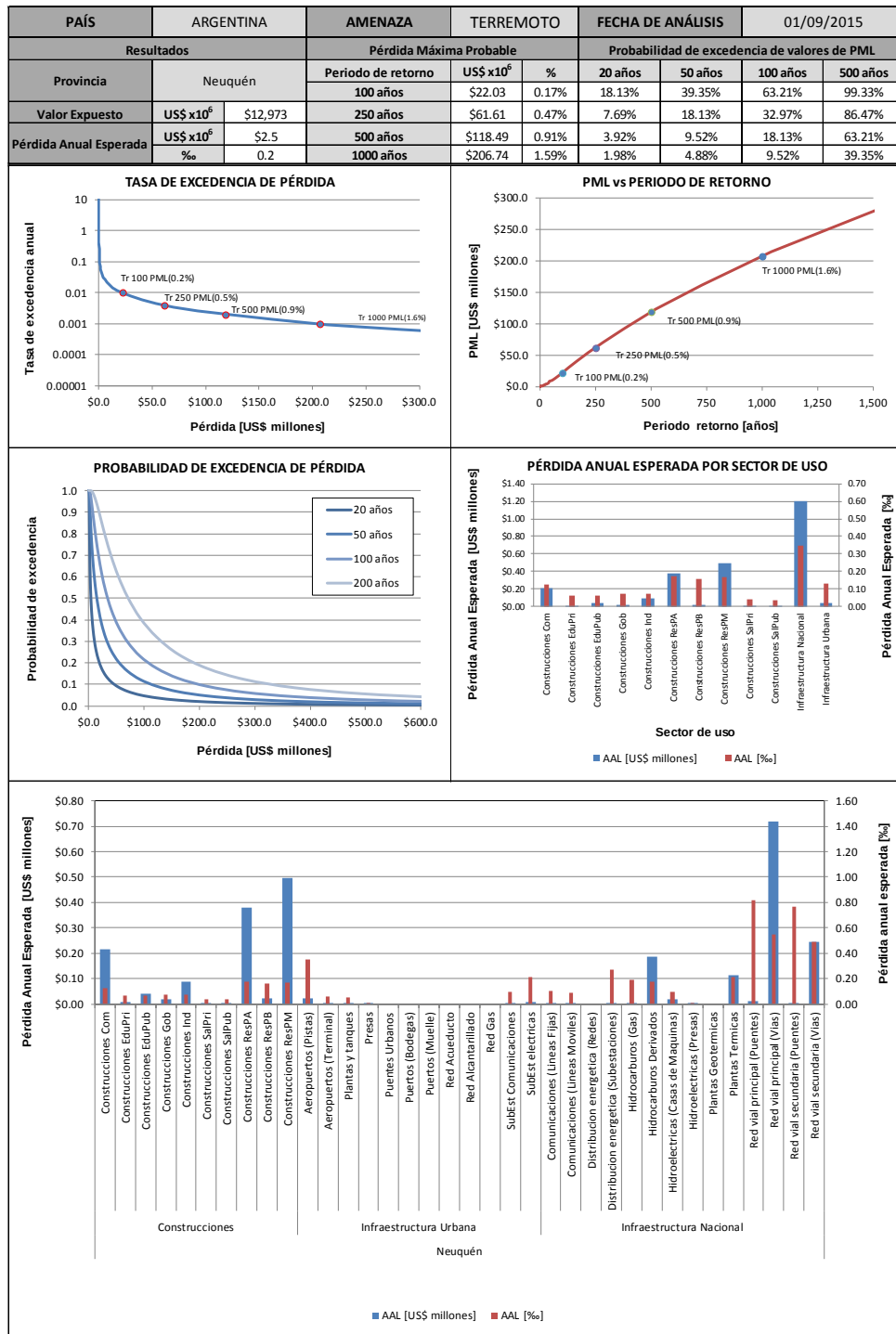
A1- 11 Resultados de Terremoto para La Rioja



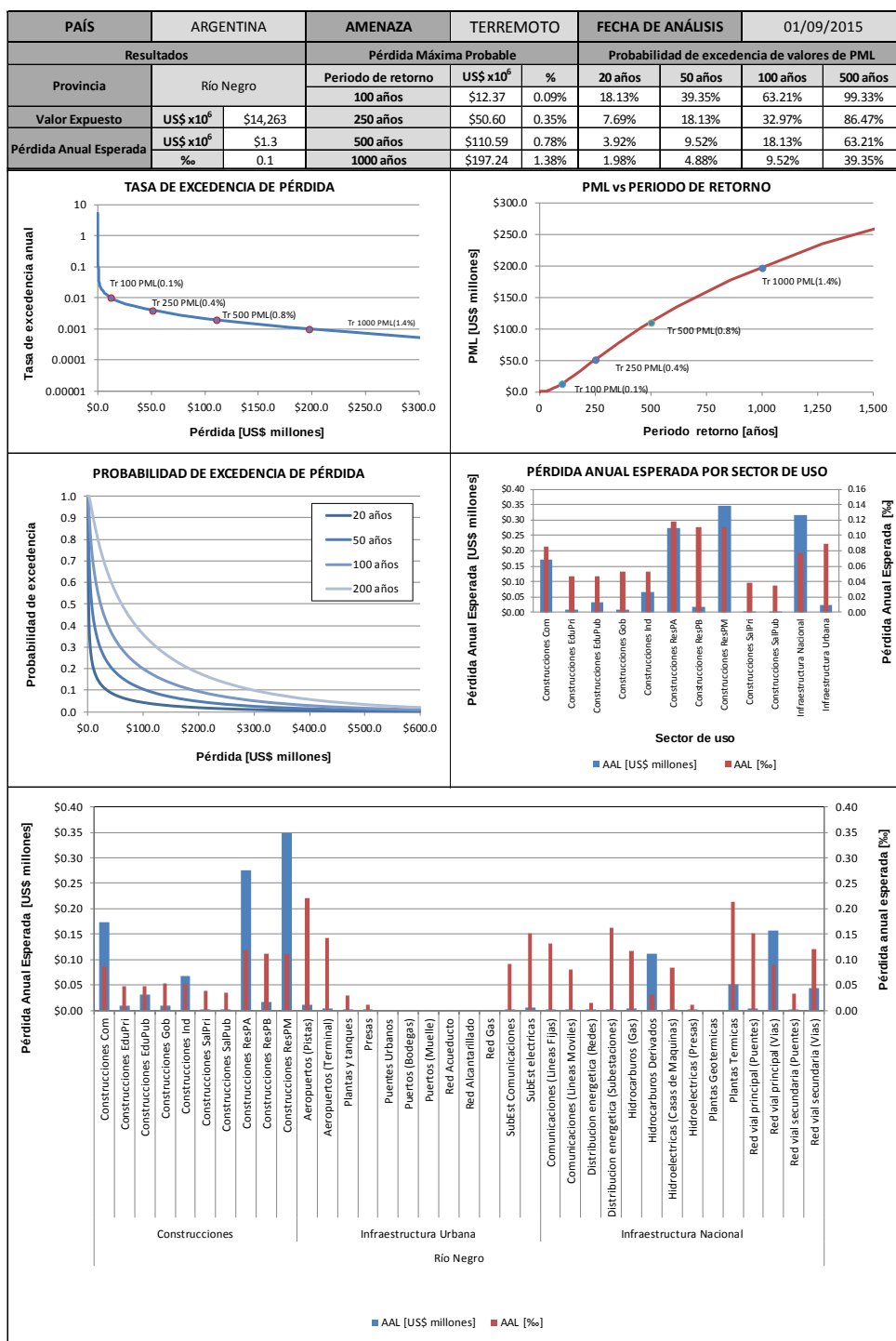
A1- 12 Resultados de Terremoto para Mendoza



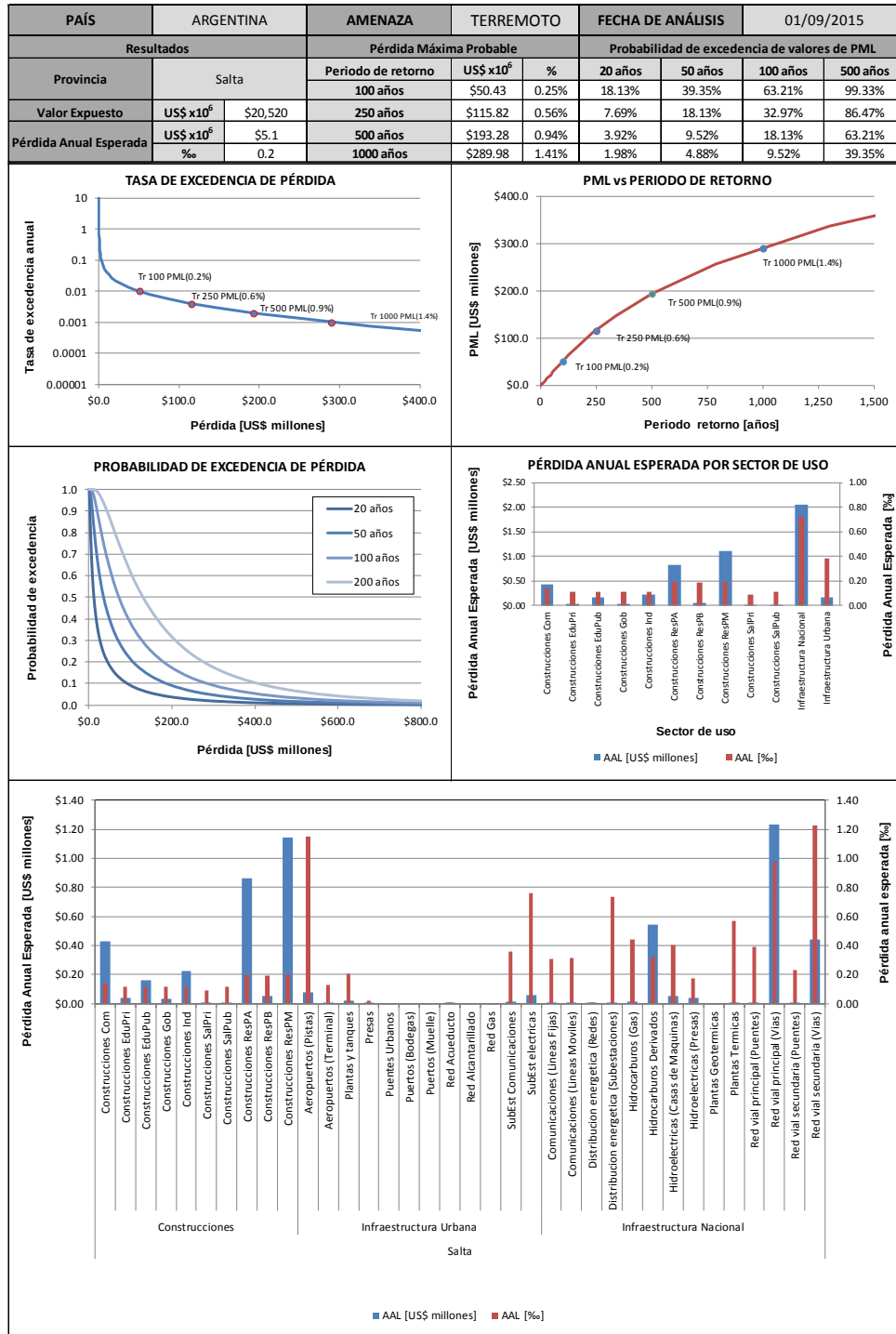
A1- 13 Resultados de Terremoto para Neuquén



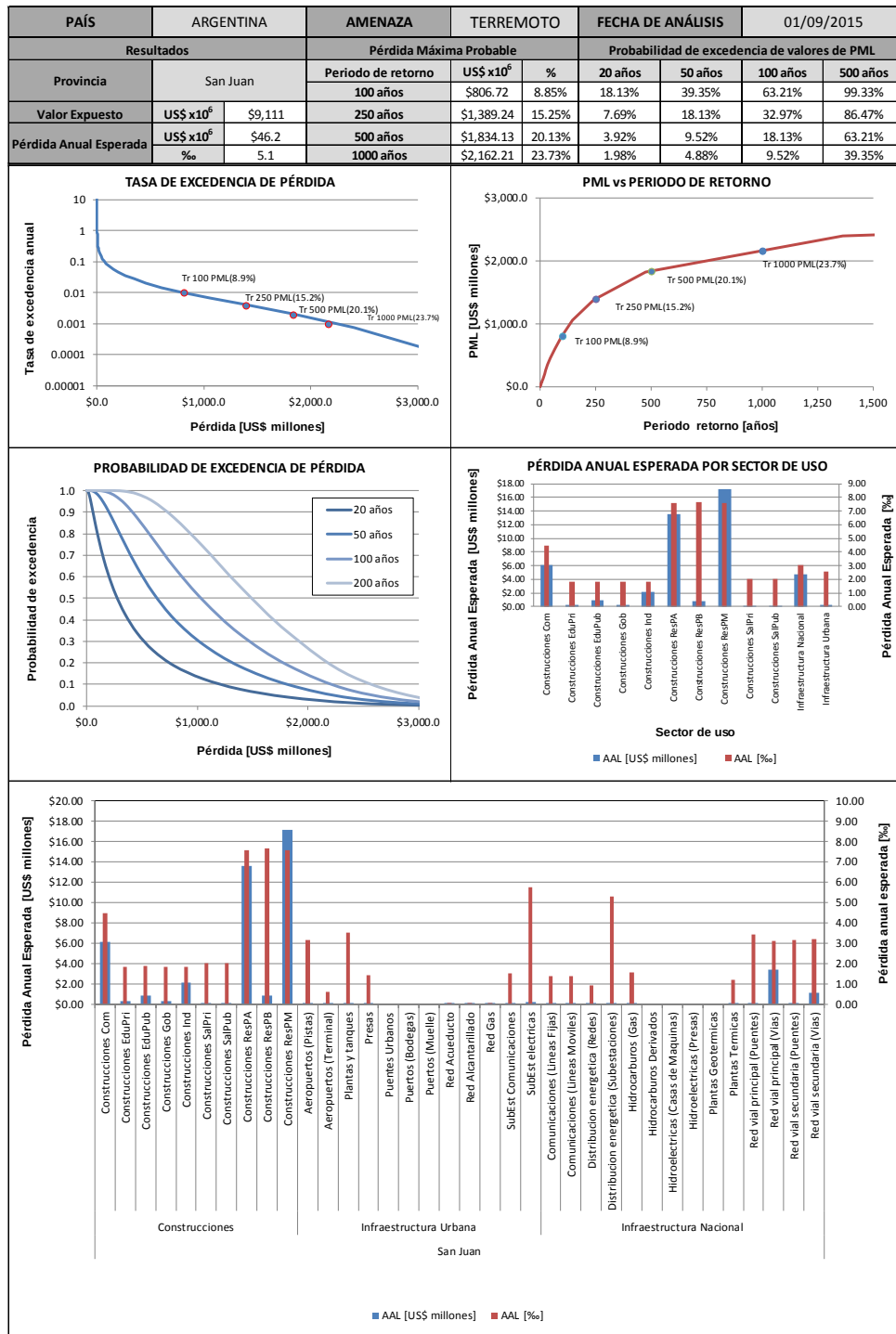
A1- 14 Resultado de Terremoto para Río Negro



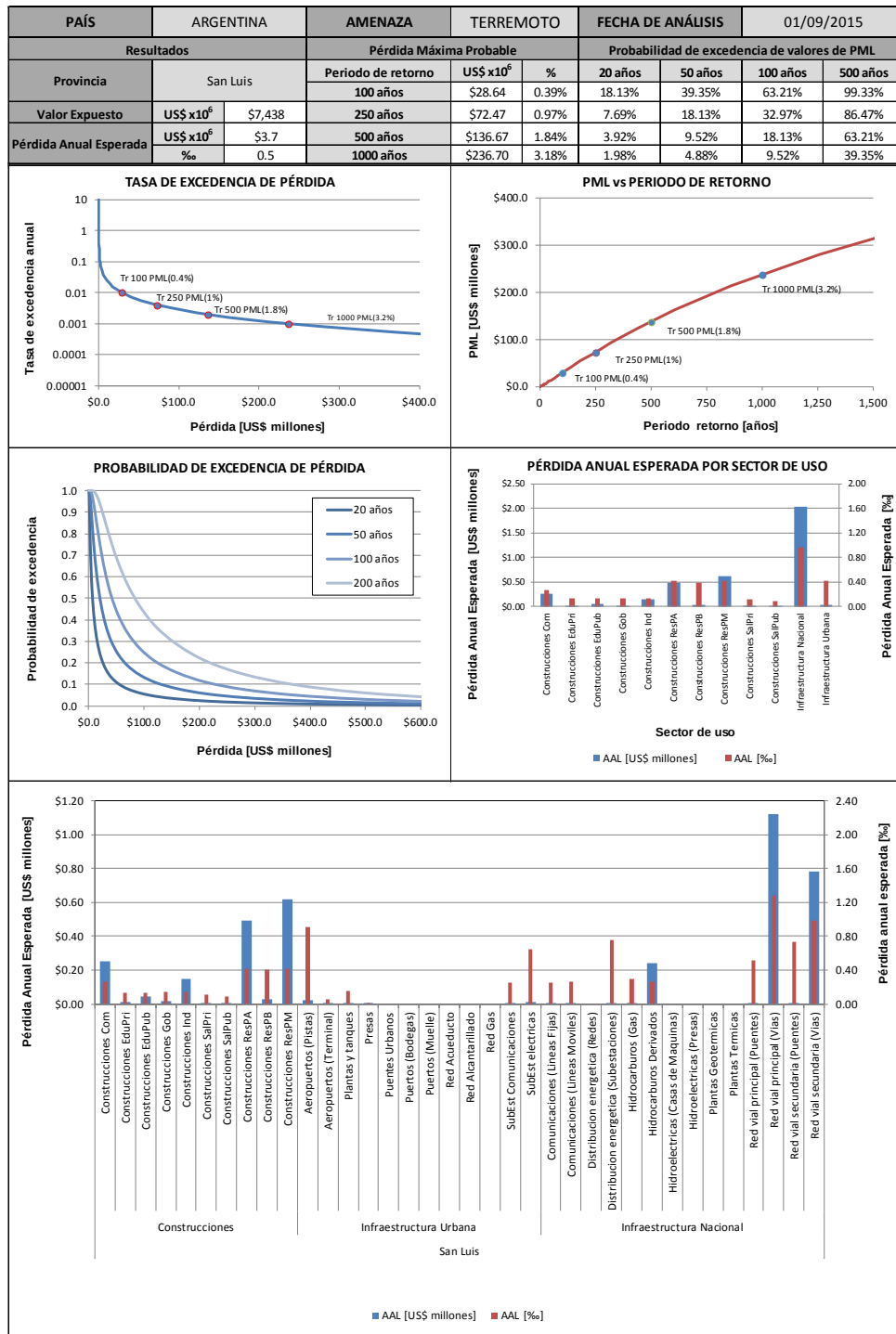
A1- 15 Resultados de Terremoto para Salta



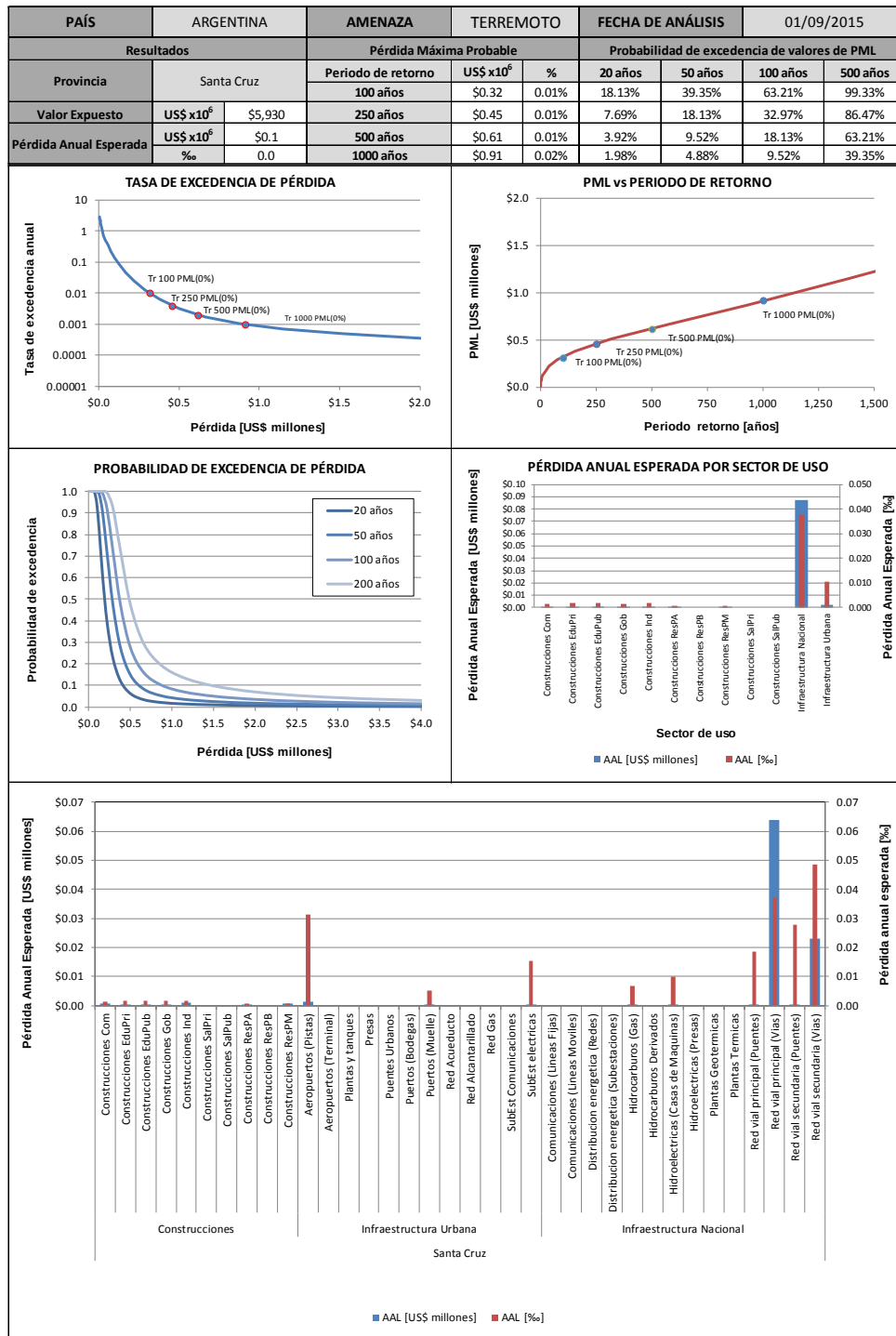
A1- 16 Resultados de Terremoto para San Juan



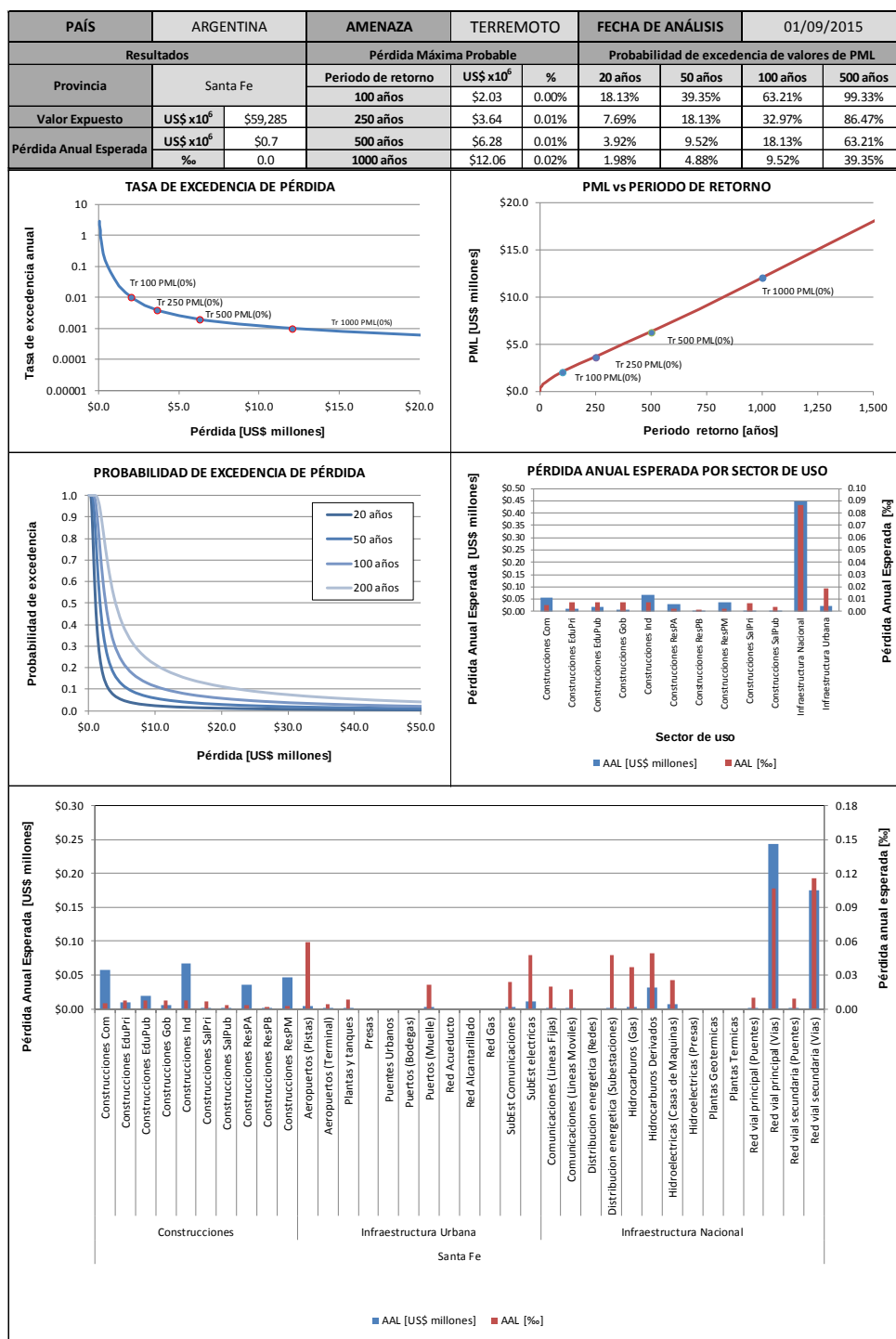
A1- 17 Resultados de Terremoto para San Luis



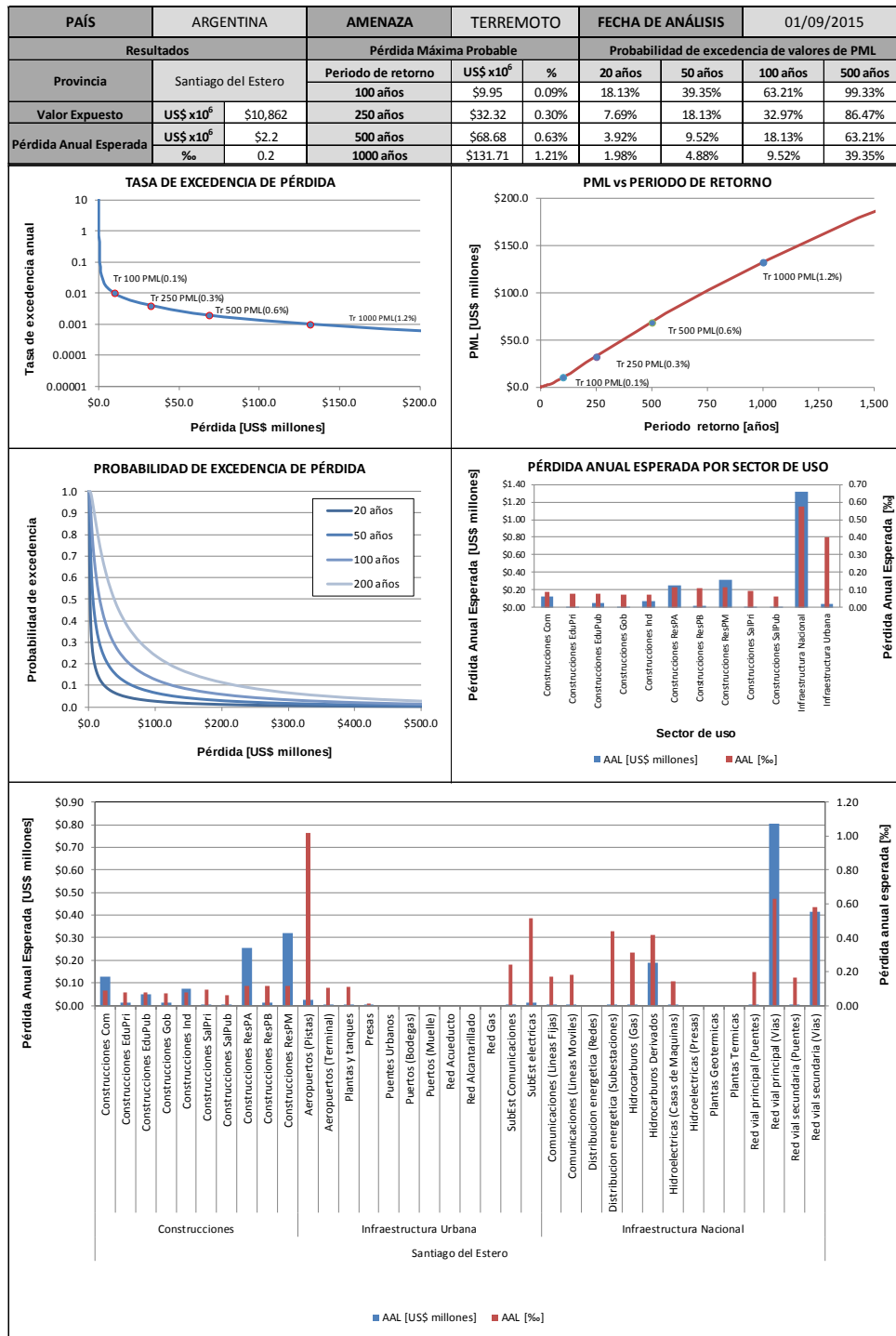
A1- 18 Resultados de Terremoto para Santa Cruz



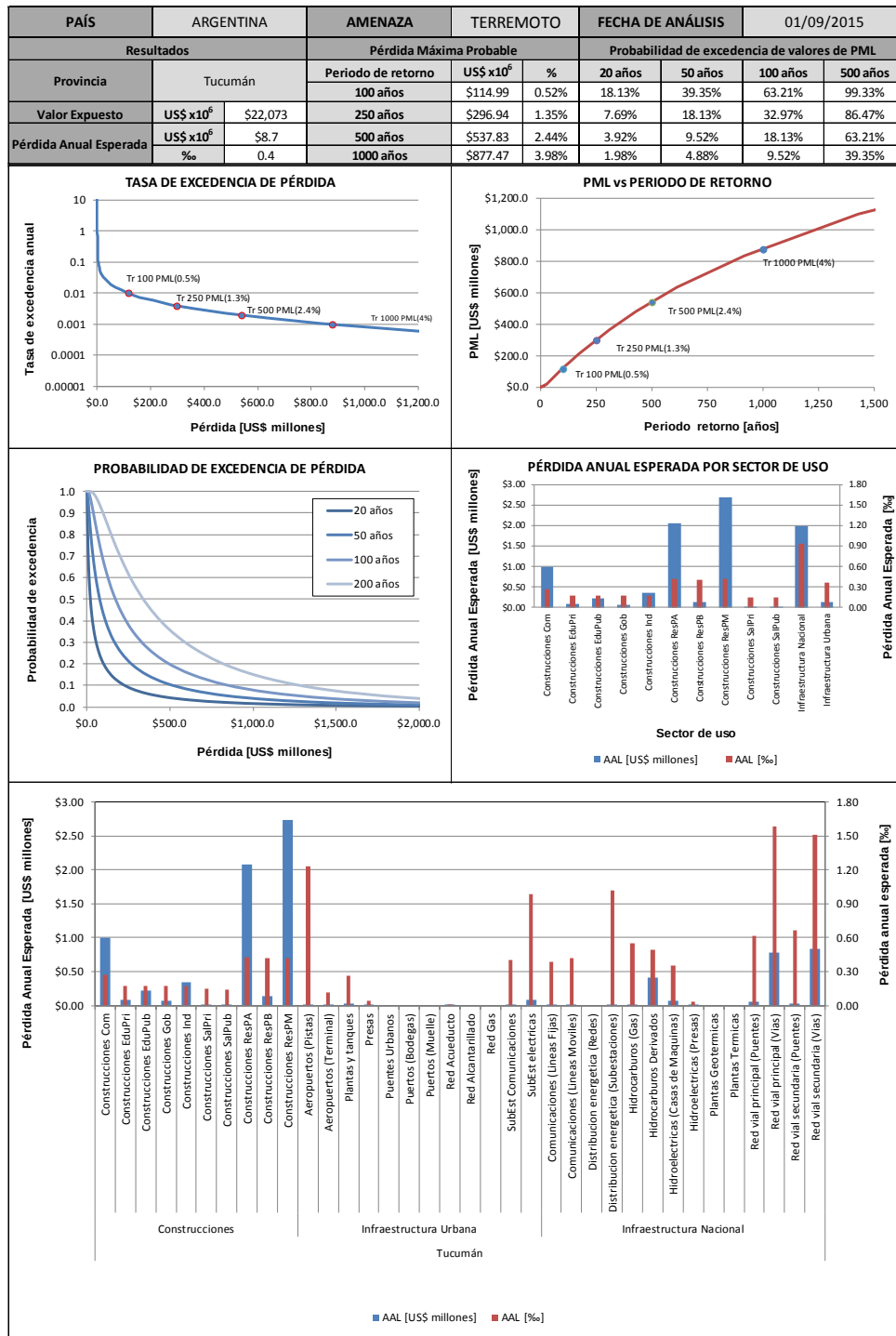
A1- 19 Resultados de Terremoto para Santa Fe



A1- 20 Resultados de Terremoto para Santiago del Estero



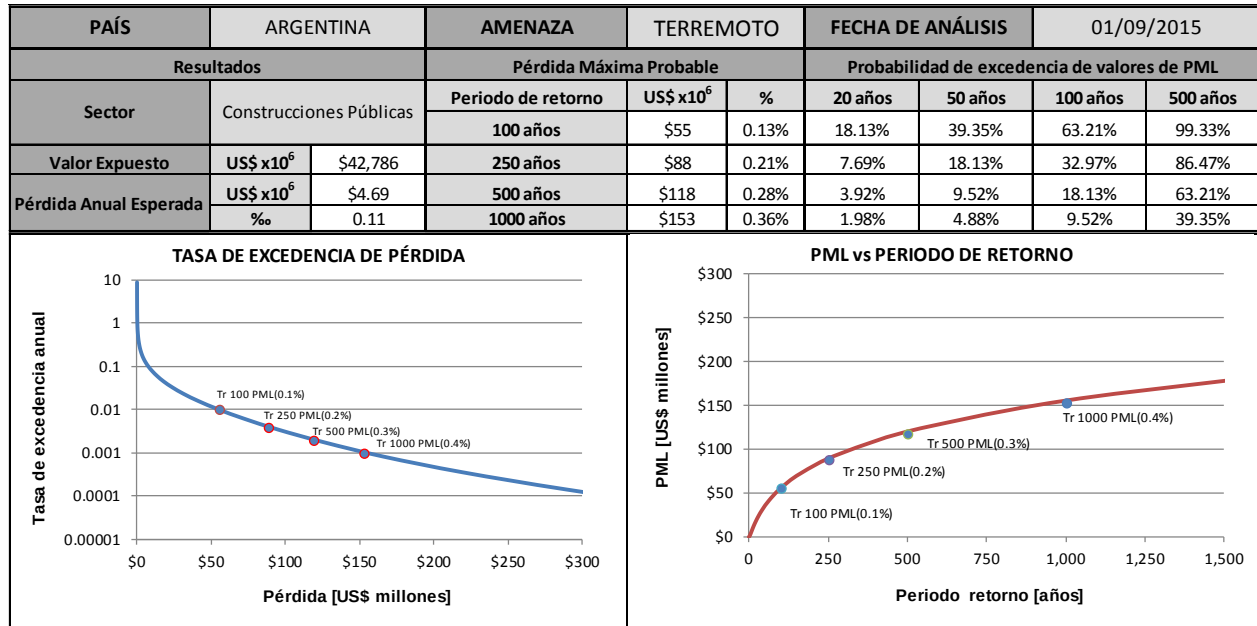
A1- 21 Resultados de Terremoto para Tucumán



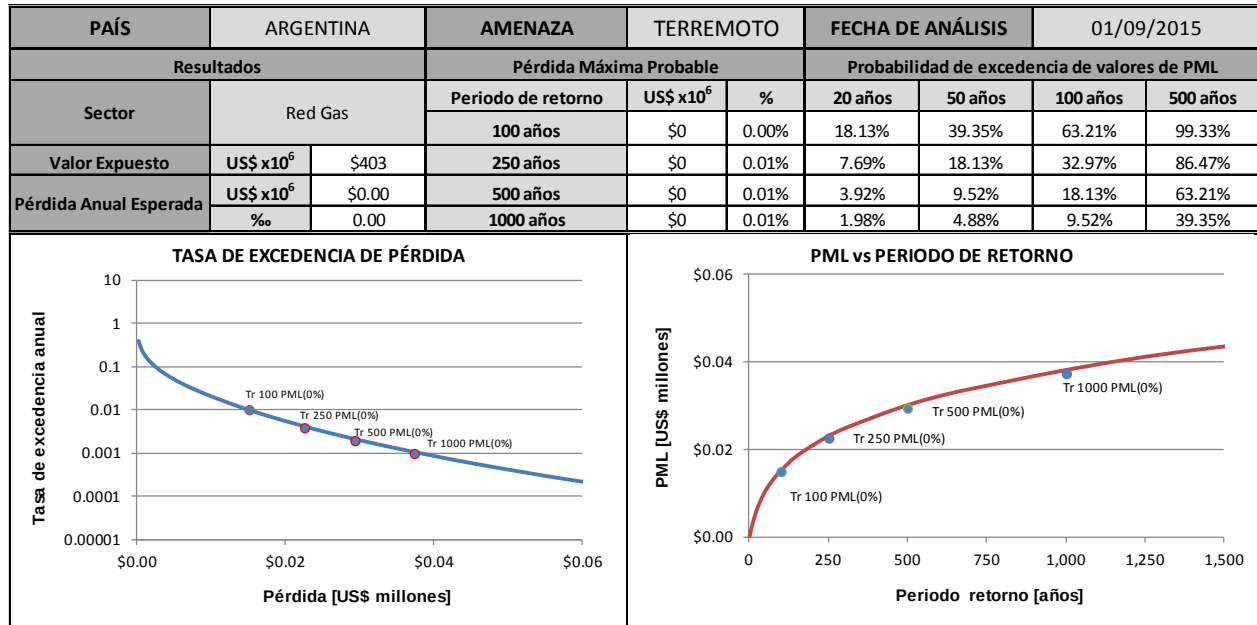
Anexo 2

Resultados por Sectores

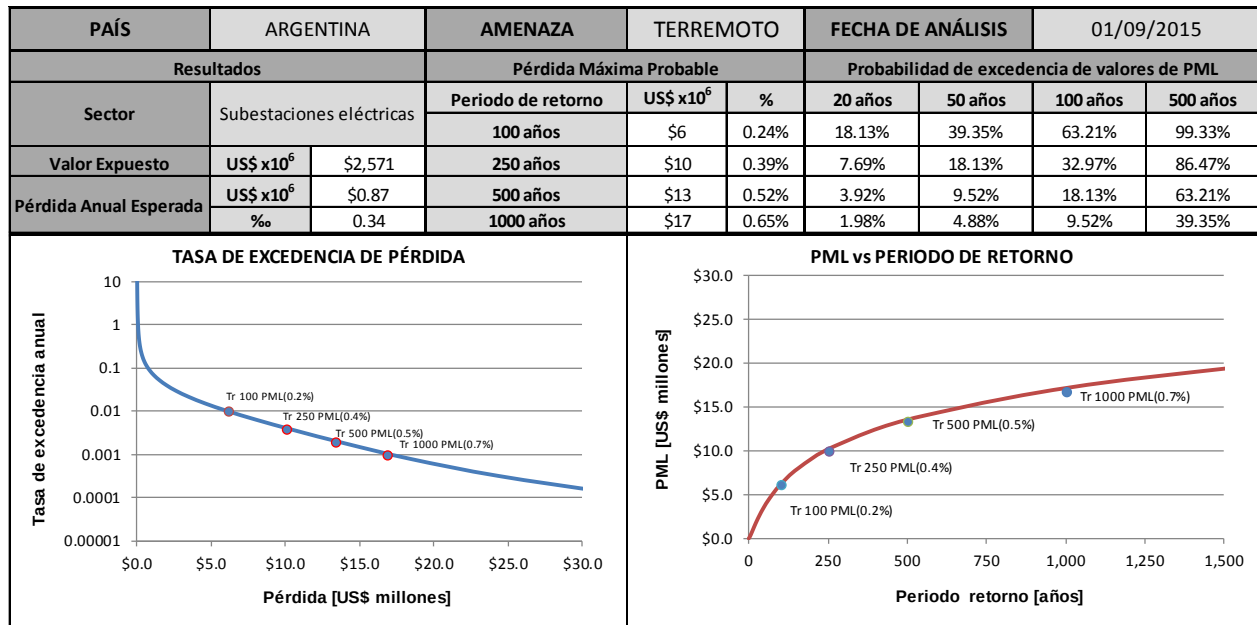
A2- 1 Tasa de excedencia y PML de terremoto para el sector construcciones públicas



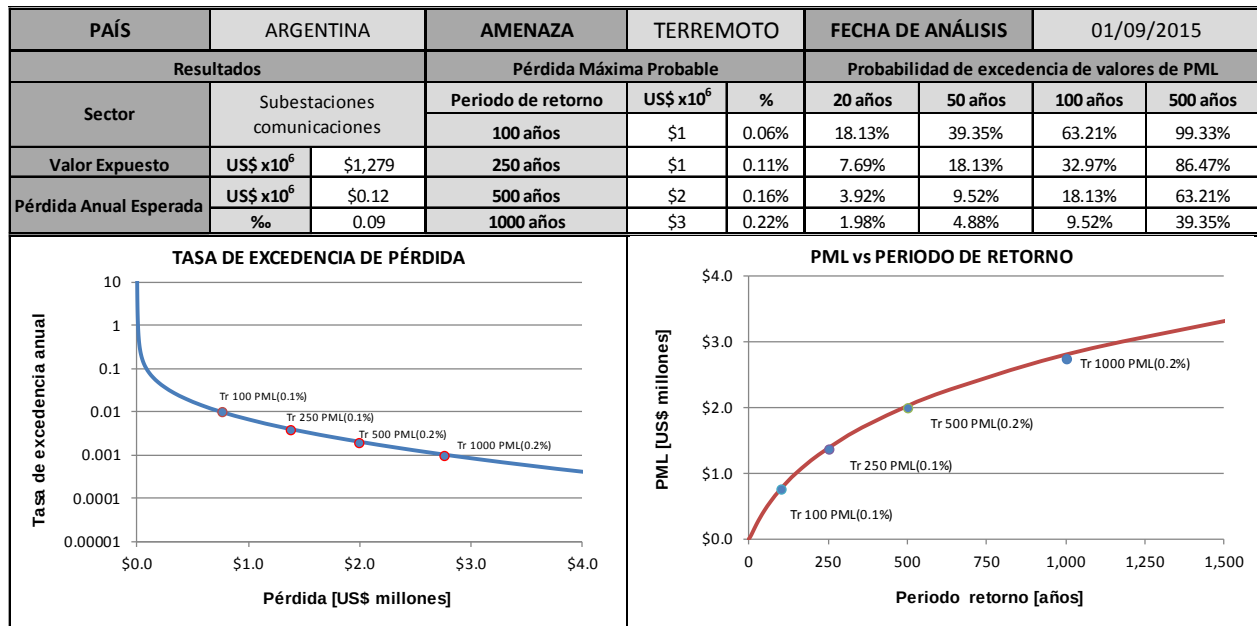
A2- 2 Tasa de excedencia y PML de terremoto para el sector gas



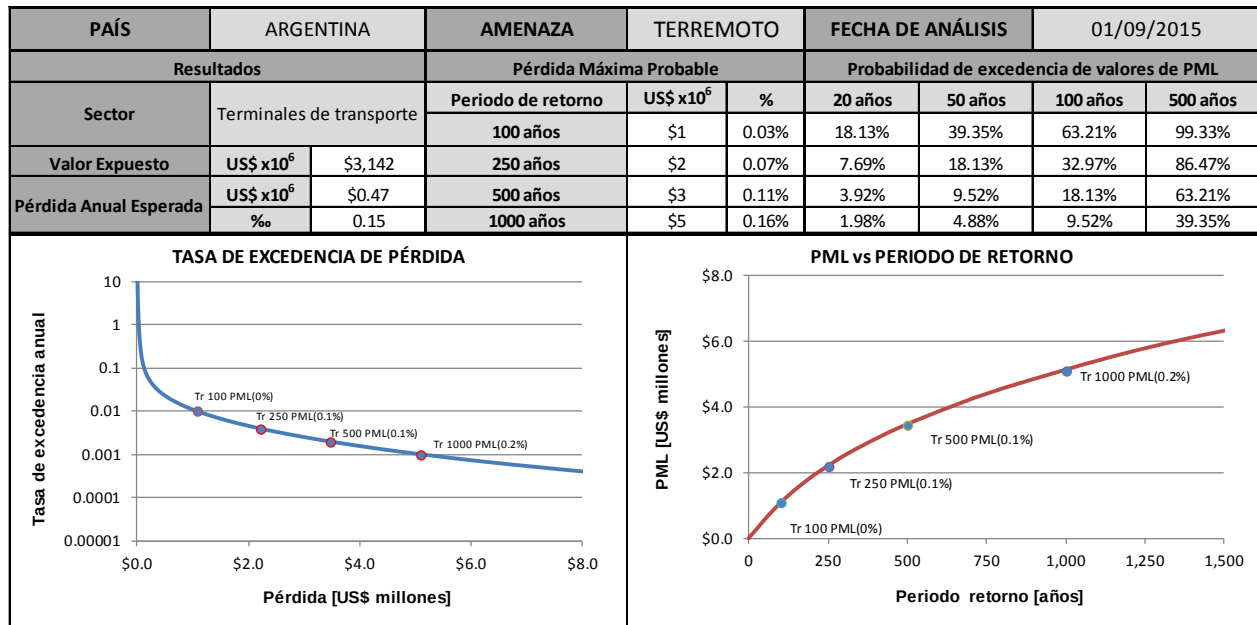
A2- 3 Tasa de excedencia y PML de terremoto para el sector subestaciones eléctricas



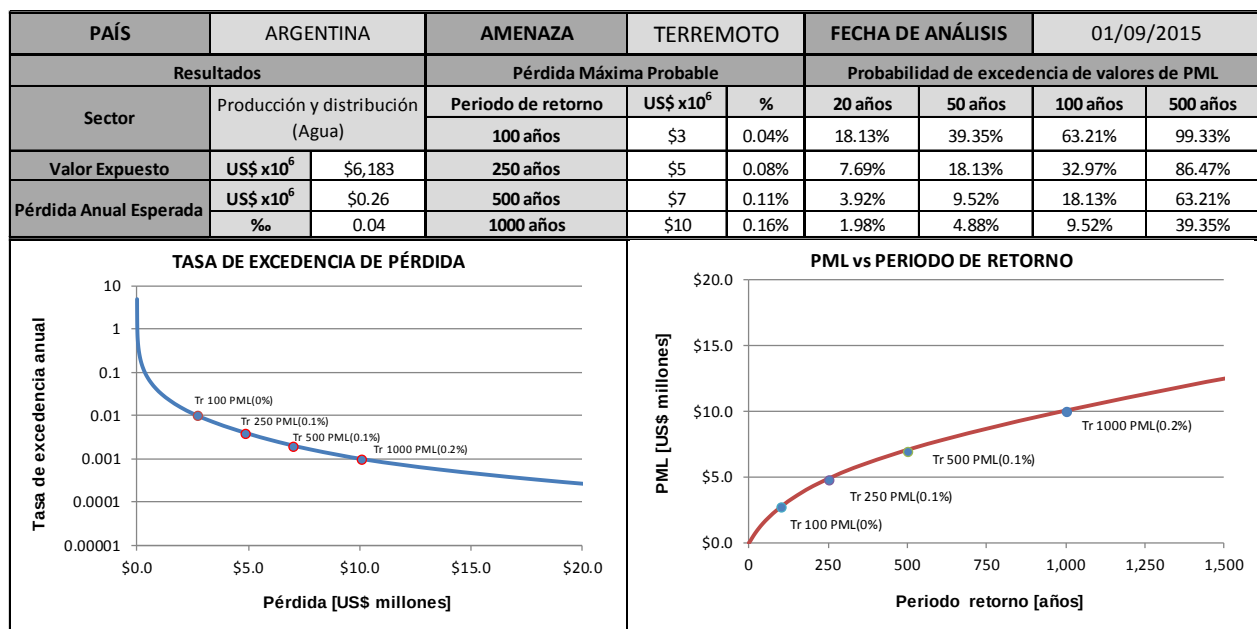
A2- 4 Tasa de excedencia y PML de terremoto para el sector subestaciones comunicación



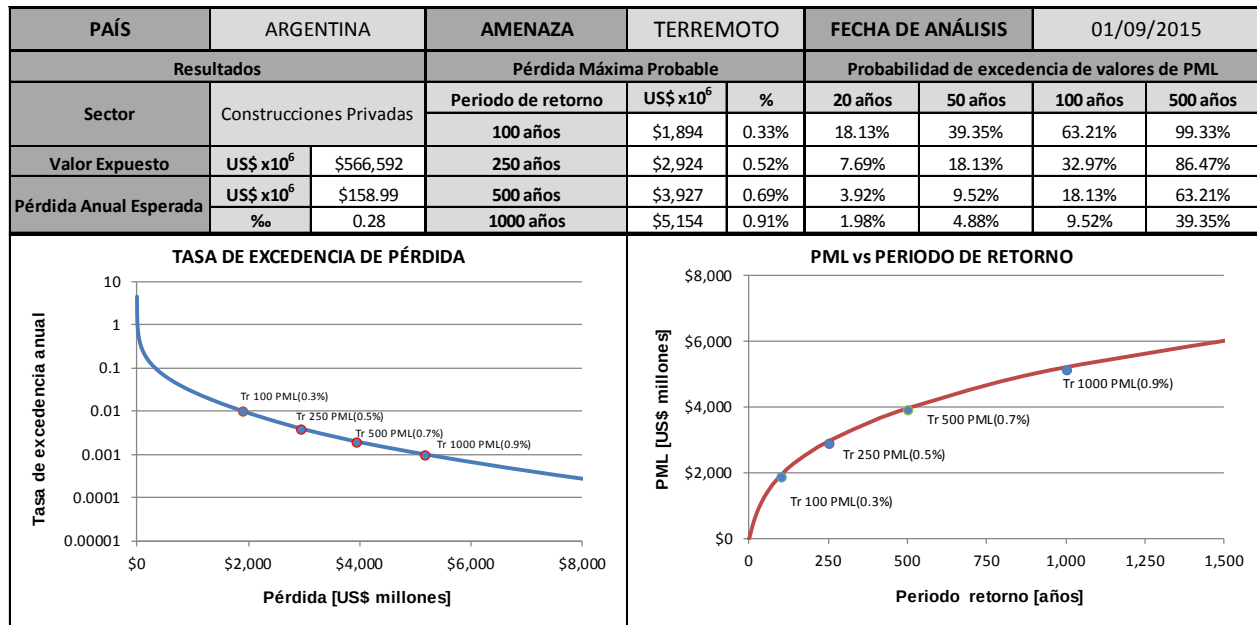
A2- 5 Tasa de excedencia y PML de terremoto para el sector terminales de transporte



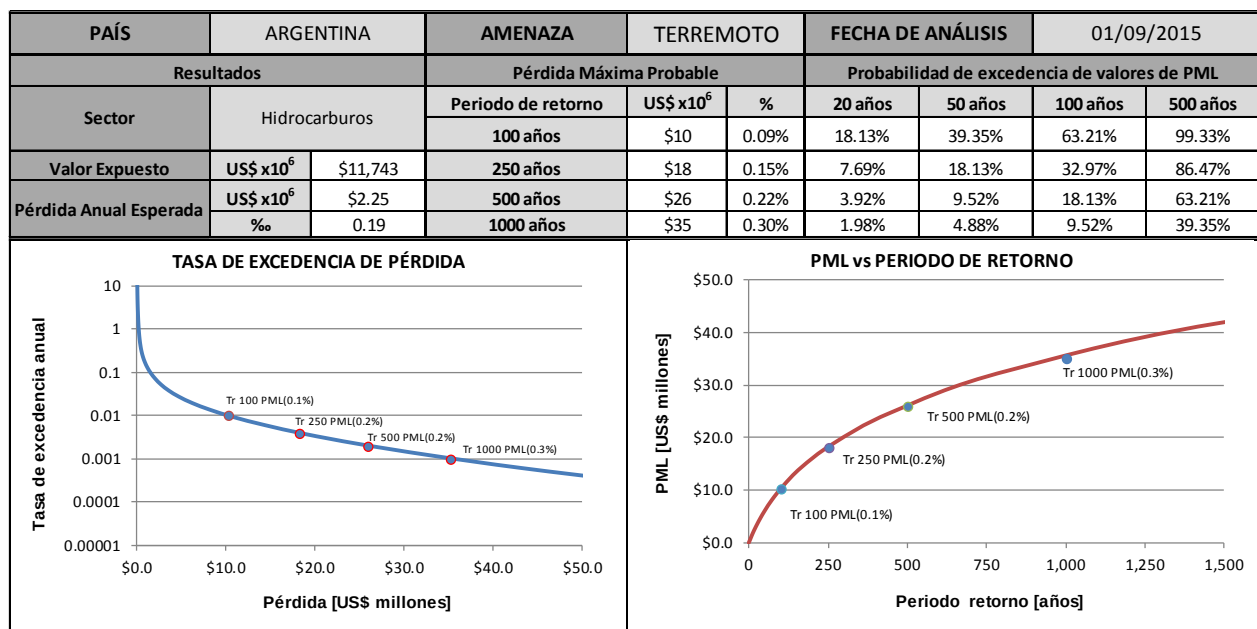
A2- 6 Tasa de excedencia y PML de terremoto para el sector producción y distribución (Agua)



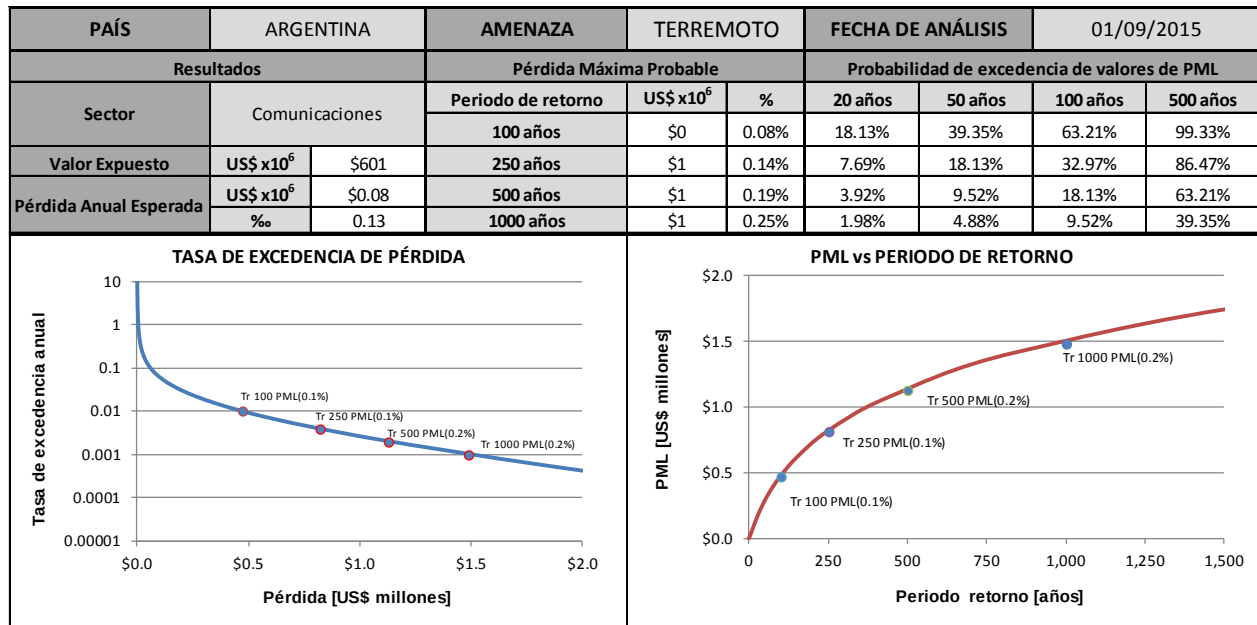
A2- 7 Tasa de excedencia y PML de terremoto para el sector construcciones privadas



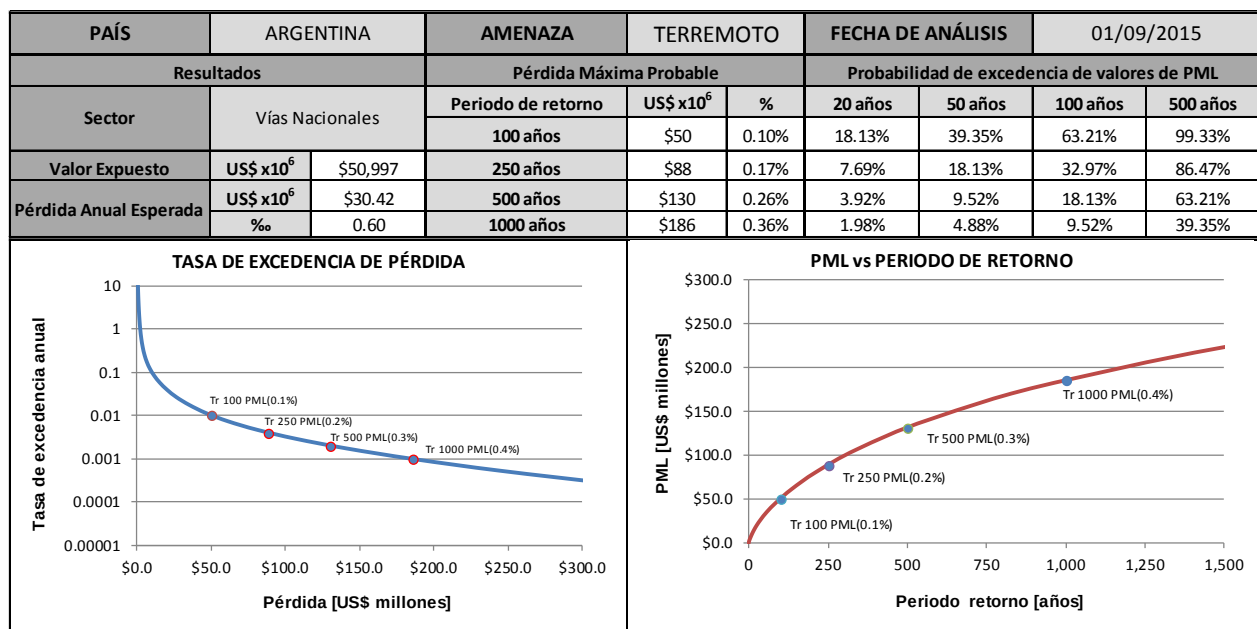
A2- 8 Tasa de excedencia y PML de terremoto para el sector hidrocarburos



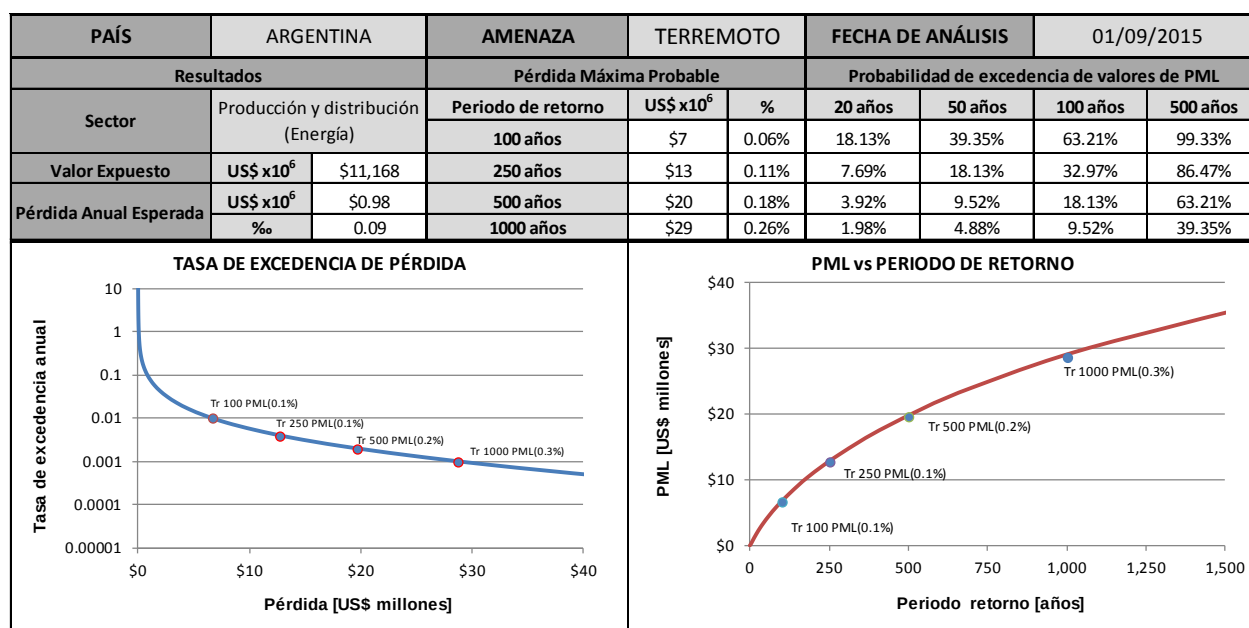
A2- 9 Tasa de excedencia y PML de terremoto para el sector comunicaciones



A2- 10 Tasa de excedencia y PML de terremoto para el sector vías nacionales



A2- 11 Tasa de excedencia y PML de terremoto para el sector producción y distribución (Energía)



Evaluación de la Amenaza por Incendios Forestales

Tabla de contenido

1	Introducción	1
2	Definiciones	1
3	Procedimiento de análisis.....	2
4	Evaluación de la Amenaza	7
4.1	Susceptibilidad de la cobertura vegetal a los incendios	7
4.1.1	Generación del mapa de tipo de combustibles	9
4.1.2	Generación del mapa de duración de combustibles.....	12
4.1.3	Generación del mapa de carga de combustibles.....	14
4.1.4	Generación del mapa de susceptibilidad de la vegetación a incendios	16
4.2	Factores climáticos	18
4.2.1	Incorporación de variables climáticas	18
4.3	Factor del relieve	21
4.3.1	Incorporación de información de pendientes en la evaluación de la amenaza.....	21
4.4	Accesibilidad	25
4.4.1	Análisis y evaluación de la accesibilidad	25
4.5	Obtención del mapa de amenaza por incendios forestales	28
5	Referencias	30

1 Introducción

Uno de los riesgos recurrentes que afectan los entornos naturales y antrópicos son los incendios de la cobertura vegetal, los cuales en general presentan origen antrópico y una recurrencia alta que afecta la cobertura vegetal y puede causar efectos adversos como la pérdida de biodiversidad, erosión, desertificación, reducción del recurso hídrico, colmatación de embalses, inundaciones, etc.

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM de Colombia, desarrolló en 2010 un protocolo para la realización de mapas de zonificación de amenaza frente a incendios de la cobertura vegetal a escala 1:100.000 con el fin de ofrecer una herramienta que permita realizar análisis estandarizados.

En el presente documento se documenta la aplicación de la metodología del IDEAM (2011) al territorio argentino, para obtener el mapa de amenaza por incendios forestales del país.

2 Definiciones

Incendio de la cobertura vegetal

Se define como el fuego que se propaga sin control sobre la cobertura vegetal, cuya quema no estaba prevista.

Amenaza

Peligro latente que representa la posible manifestación de un fenómeno particular (en este caso, un incendio de la cobertura vegetal), de origen natural, socio-natural o antropogénico, en un territorio particular, que puede producir efectos adversos en las personas, la producción, la infraestructura, los bienes y servicios y el ambiente.

Es un factor de riesgo sobre un elemento o grupo de elementos expuestos (vegetación), que se expresa como la probabilidad de que un evento (incendio) se presente con una cierta intensidad, en un sitio específico y en un tiempo definido.

Susceptibilidad de la vegetación frente a los incendios de la cobertura vegetal

Características intrínsecas de la vegetación y los ecosistemas (carga de combustibles, disposición y combustibilidad), que le brindan cierto grado de probabilidad de incendiarse, propagar y mantener el fuego. Hace parte de la amenaza.

3 Procedimiento de análisis

El procedimiento propuesto por el IDEAM (2011) se fundamenta en la evaluación de cada uno de los componentes de la amenaza, a través de una metodología paramétrica, con enfoque espacial, basada en la ponderación y calificación secuencial de los diversos factores mediante un Sistema de Información Geográfica.

El proceso metodológico general se esquematiza a en la Figura 3-1. Se debe contar con información como mínimo de la cobertura vegetal, series históricas de precipitación y temperatura, topografía, red vial y si es posible, un inventario de incendios previos ocurridos en el área.

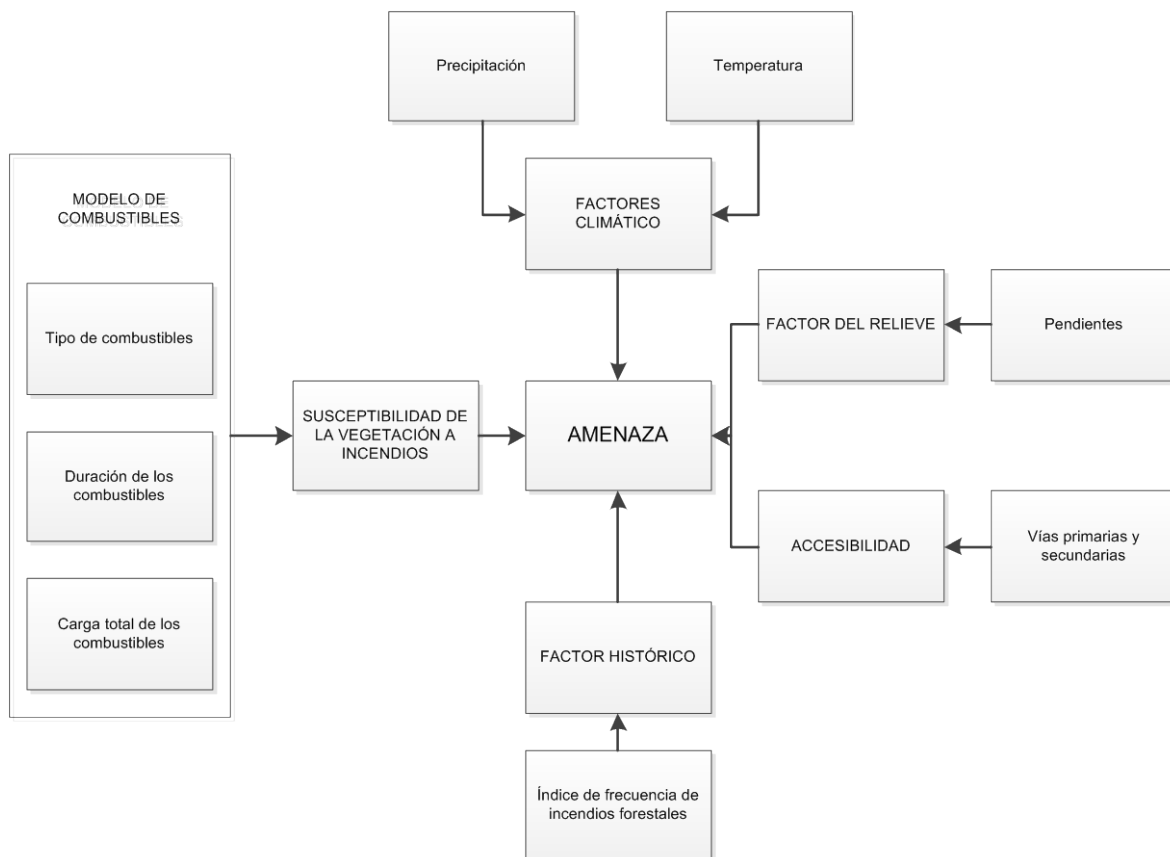


Figura 3-1
Interrelación entre factores de Amenaza frente a incendios forestales

Etapas preparatoria

Esta etapa tiene por objeto la generación o elaboración de la cartografía base del área de estudio. La información involucrada en el análisis (tanto requerida como a calcular) se sintetiza en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1
Información involucrada en la evaluación de amenaza por incendios forestales

Información	Descripción
Mapa de límites político administrativos	Límites oficiales del área de estudio. Cartografía a escala 1:250000, 1:100000 o 1:50000 según sea el caso
Mapa de centros poblados	Ubicación espacial de centros poblados urbanos y rurales y distribución de viviendas rurales para la cartografía 1:50000
Mapa de la red vial	Cartografía de vías primarias, secundarias y terciarias, dependiendo de la escala de análisis
Topografía	Curvas de nivel, representadas cada 100 o 50 m según la escala del análisis o modelo digital de elevaciones
Mapa de cobertura y uso actual de la tierra, según clasificación CORINE LAND COVER	Cartografía de la cobertura y uso actual de la tierra según la clasificación Corine Land Cover hasta el tercer nivel para escalas 1:250000 y 1:100000 y el cuarto o quinto nivel para escalas 1:50000. Esta cartografía es indispensable para la generación del mapa de susceptibilidad de la vegetación
Precipitación media anual multianual	Mapa de isoyetas de precipitación media anual multianual en mm
Temperatura media anual multianual	Mapa de isotermas de temperatura media anual multianual en grados centígrados
Mapa de frecuencia de incendios forestales y de la cobertura vegetal	Cartografía generada a partir de la información estadística georeferenciada sobre incendios forestales según las bases de datos de diferentes entidades relacionadas con la temática en el país.
Mapa de pendientes	Mapa obtenido a partir del procesamiento (generación del Modelo digital del terreno), del mapa de curvas de nivel
Mapa de tipo de combustibles vegetales	Mapa obtenido a partir de la reclasificación del mapa de uso y cobertura de la tierra según el Sistema Corine Land Cover
Mapa de duración de combustibles vegetales	Mapa obtenido a partir de la reclasificación del mapa de uso y cobertura de la tierra según el Sistema Corine Land Cover
Mapa de carga total de combustibles vegetales	Mapa obtenido a partir de la reclasificación del mapa de uso y cobertura de la tierra según el Sistema Corine Land Cover
Mapa de susceptibilidad de combustibles vegetales	Mapa obtenido a partir de la suma ponderada de las variables normalizadas de los mapas de Tipo, Duración y Carga Total de combustibles.
Mapa de accesibilidad	Mapa obtenido a partir de la generación de buffers (áreas de influencia) sobre las vías (Mapa vial). Los Buffers son de 250 m para vías primarias, 100 m para vías secundarias y 50 m para vías terciarias.
Mapa de amenaza de incendios forestales y de la cobertura vegetal	Mapa obtenido a partir de la suma ponderada de las variables normalizadas de los mapas de Susceptibilidad de la vegetación; Precipitación media anual multianual; Temperatura media anual multianual; Pendientes; Accesibilidad

Normalización de las variables

Dentro del proceso de cálculo puede presentarse un cambio en la naturaleza de los datos; por ejemplo, diferentes intervalos de pendiente deben reclasificarse mediante valores numéricos asociados a un nivel de amenaza específico (bajo, medio, alto, etc), por lo cual deberá pasarse de una escala nominal categórica a otra de naturaleza ordinal o viceversa. Adicionalmente, la integración de las variables en un índice único requiere que se pondere cada una en función de la importancia en la explicación de la ocurrencia del incendio.

Dado que se requiere elaborar síntesis parciales de los factores asociados a la amenaza, es necesario utilizar procedimientos cualitativos basados en ponderaciones realizadas por expertos. La opinión de los expertos se ordena mediante la construcción de jerarquías, el establecimiento de prioridades y el análisis matemático de la consistencia lógica de las ponderaciones, empleando un análisis multicriterio (Barredo, 1996), con el fin de disminuir la subjetividad al calificar y ponderar cada una de las variables.

Debido a la diferencia de escalas entre variables, es necesario estandarizarlas antes de combinarlas para que puedan combinarse. Si se considera que todos los factores dentro del análisis son de índole continua y adquieren características de grupos difusos, con vaguedad en la definición de los límites y rangos, para poder recategorizarlos y clasificarlos adecuadamente, se requiere una normalización.

El criterio utilizado se basa en la teoría de lógica difusa:

$$\text{Factor normalizado} = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde

X_i es el valor del factor en cada punto sobre el territorio

$X_{\min}$ es el valor mínimo del factor en el área de estudio

$X_{\max}$ es el valor máximo del factor en el área de estudio

Una vez normalizadas las variables y los factores, se agrupan bajo una distribución de frecuencias en 5 rangos, generando el tamaño de cada rango a partir de la amplitud de los valores generados mediante la siguiente formulación:

$$\text{Amplitud del rango} = (\max - \min) / n \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde

max es el valor normalizado máximo presentado por el factor en el área de estudio

min es el valor normalizado mínimo presentado por el factor en el área de estudio

n es el número total de datos de cada factor.

Los rangos así obtenidos se califican de manera categórica según los siguientes rangos:

1: Muy bajo
2: Bajo
3: Moderado
4: Alto
5: Muy alto

Ponderación de las variables

Una vez obtenidos los mapas de variables normalizados, se desarrolla un sistema de ponderación de las mismas, basado en la consulta a expertos, considerando que no todas las variables tienen la misma importancia dentro del proceso de generación de incendios forestales, por ello cada factor debe asumir un peso relativo, lo cual hará que ciertas variables incidan en mayor o menor medida sobre el resultado.

El procedimiento de ponderación utilizado se basa en el desarrollo del matemático Thomas Saaty, quien formaliza la comprensión intuitiva de problemas complejos mediante la construcción de un Modelo Jerárquico (AHP – Proceso Analítico Jerárquico), para permitir a los agentes decisores (en este caso los expertos consultados) estructurar el problema en forma visual, mediante la construcción de un modelo. El AHP permite de manera eficiente organizar la información, descomponerla y analizarla por partes, visualizar los efectos de cambios en los niveles y sintetizarla. El fundamento es dar valores numéricos a los juicios dados por las personas, logrando medir cómo contribuye cada elemento de la jerarquía al nivel inmediatamente superior del cual se desprende, para lo cual se utilizan escalas de razón en términos de preferencia, importancia o probabilidad, a partir de una escala numérica como se muestra en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Juicios de valor utilizados en el Proceso Analítico Jerárquico

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Sumamente	Muy fuertemente	Fuertemente	Moderadamente	Igualmente	Moderadamente	Fuertemente	Muy fuertemente	Sumamente
Menos importante				Igual importancia	Muy importante			

Los expertos deben ponderar cada una de las variables involucradas en el análisis, según el grado de importancia; es decir, se deben dar una serie de pesos al comparar cada par de variables.

Para el ejercicio realizado en Colombia fueron consultados tanto expertos nacionales como internacionales, dando como resultado la siguiente ecuación de relación. De aplicar ésta, no sería necesario desarrollar el procedimiento AHP completo.

$$\text{Amenaza} = \text{Susceptibilidad de la vegetación} \times (0.17) + \text{Precipitación} \times (0.25) + \text{Temperatura} \times (0.25) + \text{Pendientes} \times (0.03) + \text{Frecuencia} \times (0.05) + \text{Accesibilidad} \times (0.03) \text{ (Ec. 11)}$$

4 Evaluación de la Amenaza

4.1 Susceptibilidad de la cobertura vegetal a los incendios

La susceptibilidad de la cobertura vegetal se analiza mediante la identificación y valoración de la condición pirogénica de la vegetación, según lo propuesto en el modelo de combustibles desarrollado para Colombia por Páramo (2007).

El modelo de combustibles representa la condición pirogénica de la vegetación, aspecto clave en la evaluación del comportamiento de los ecosistemas frente al fuego, tanto en el inicio de un incendio, como en la modelación del comportamiento del fuego, en caso de presentarse eventos de esta índole.

El modelo de combustibles desarrollado se estructuró mediante una clasificación jerárquica, conformada por los siguientes factores:

Tipo de combustible vegetal predominante por bioma y ecosistema: tipo de cobertura vegetal y biotipo dominante.

Duración del tipo de combustible dominante: duración en horas de cada tipo de combustible, definidos en horas de ignición (1 hr, 10 hr, 100 hr).

Carga total de combustibles: caracterización cualitativa dependiente de la correlación de la altura en metros, cobertura en valores porcentuales, biomasa aérea en Ton/ha y humedad media de la vegetación obtenida a través de una distribución cualitativa de los rangos obtenidos a partir del índice de vegetación NDII. Este último nivel define el modelo de combustible para una determinada unidad de vegetación.

A continuación se presentan detalladamente los pasos seguidos para la generación del modelo de susceptibilidad de la cobertura vegetal a incendios forestales.

Como punto de partida se utiliza el mapa de Coberturas del suelo disponible en la Base de Datos Geográfica del Instituto Geográfico Nacional IGN (<http://www.ign.gob.ar/sig>) (IGN, 2015). Si bien el mapa no sigue estrictamente la clasificación Corine Land Cover, es posible asimilar la descripción de las diferentes coberturas por similitud a clases equivalentes. La Figura 4-1 presenta el mapa de cobertura vegetal para Argentina, y la Figura 4-2 la descripción de cada una de las clases incluidas, las cuales pueden ser asimilables a la escala Corine Land Cover.

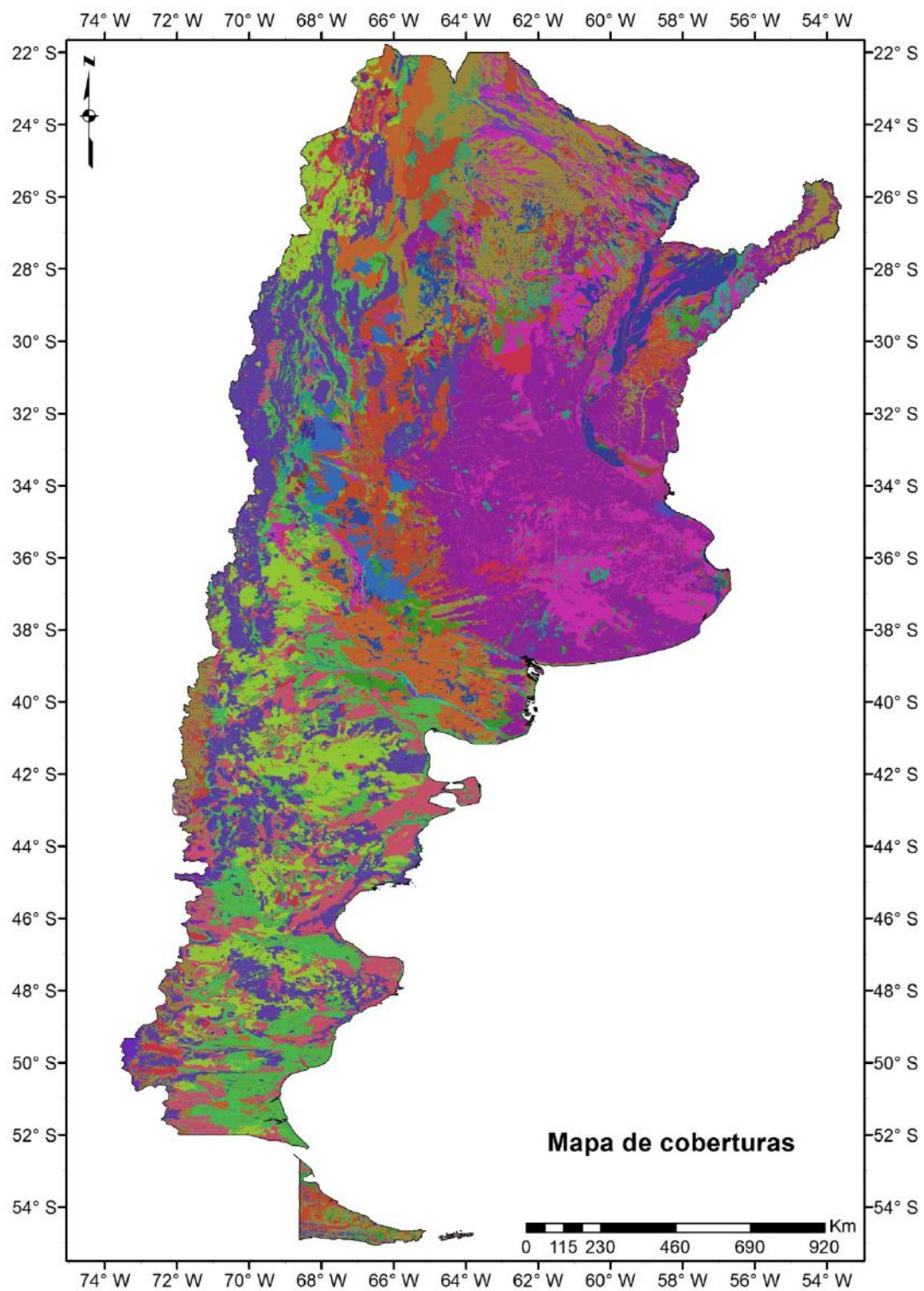


Figura 4-1
Mapa de Cobertura vegetal disponible (<http://www.ign.gob.ar/sig>)

Descripción de cobertura

	AFLORAMIENTO ROCOSO CON SUELO TURBOSO.		HUAYO O GUAYO.
	AFLORAMIENTO ROCOSO.		MALEZAL TIPO CORRENTINO.
	ARENAL CON RÍO Y CANTO REDONDO.		MALUR, VEGA.
	ARENAL.		MEDANO, DUNA.
	BARRIAL, BARRIZAL, GUADAL.		MORENA CON SUELO TURBOSO.
	BAÑADOS.		NEVRO O HIELO PERISTENTE, VENTISQUERO, GLACIAR, MORENA.
	BOSQUE ARTIFICIAL.		PAJONAL, JUNCAL, MALEZAL, MATORRAL Y JARILLAL.
	BOSQUE EN GALERÍA.		PALEOCAUCE O CAUCE ABANDONADO.
	BOSQUE QUEMADO.		PALMAR.
	BOSQUE, SELVA, FORESTA, PARQUE NATURAL INTRANSITABLE.		PARQUE INDUSTRIAL.
	BOSQUE, SELVA, FORESTA, PARQUE NATURAL TRANSITABLE.		PASTO TOXICO.
	CANGREJAL.		PEDEREGAL.
	CAÑADAS.		PLANTA URBANA.
	CAÑAVERAL NATURAL.		PLANTACIONES PERENNES.
	CENTRAL HIDROELÉCTRICA.		PLAYA DE ARENA.
	CENTRAL NUCLEAR.		PLAYA DE GRAVA O CANTO REDONDO.
	CIENAGA, TREMEDAL, TEMBLADERAL, EMBALSADO, TURBAL, MENUCO.		PLAYA DE PIEDRA O RES TINGA.
	CONIFERAS.		RAJADURAL.
	CORDONES O ACUMULACIONES DE CONCHILLAS.		RIOS DE PIEDRA.
	CUMBRE ROCOSA.		SUELO TURBOSO DE MALVINAS.
	ESCORIAL.		TACURUZAL.
	ESPEJO DE AGUA.		USO DE TIERRA MIXTO (16 + 25).
	ESTEROS.		VEGETACION LEÑOSA.
	HOYAL.		ZONA DESMONTADA.

Figura 4-2
Tipos de cobertura disponibles

4.1.1 Generación del mapa de tipo de combustibles

A partir del mapa de cobertura vegetal, se genera una reclasificación mediante la interpretación de los tipos de cobertura, según los tipos de combustibles dominantes, generándose para cada uno de ellos un valor de calificación de acuerdo con la Tabla 4-2, y se asignan calificativos de amenaza de acuerdo con la Tabla 4-3.

Tabla 4-1
Reclasificación de las coberturas por tipo de combustible

Tipo de Cobertura (Corine Land Cover Nivel 3)	Tipo de combustible predominante
3.3.2. Afloramientos rocosos	No combustibles
3.1.1. Bosque denso	Arbustos
3.1.3. Bosque fragmentado	Árboles
3.1.4. Bosque de galería y ripario	Árboles
3.2.2. Arbustal	Arbustos
5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	No combustibles
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Pastos/hierbas
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	Pastos/hierbas
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	Pastos/hierbas
2.4.1. Mosaico de cultivos	Hierbas
2.3.3. Pastos enmalezados	Pastos
2.3.1. Pastos limpios	Pastos
3.2.1. Herbazal	Hierbas
3.3.5. Zonas glaciares y nivales	No combustibles

Tabla 4-2
Calificación de amenaza para cada tipo de combustible

Tipo de combustibles	Categoría de amenaza	Calificación
Árboles	Baja	2
Árboles y arbustos	Moderada	3
Arbustos	Alta	4
Hierbas	Alta	4
Pastos/hierbas	Muy alta	5
Pastos	Muy alta	5
No combustibles	Muy baja	1
Áreas urbanas	Muy baja	1

El mapa obtenido aplicando los criterios anteriores se presenta en la Figura 4-3.

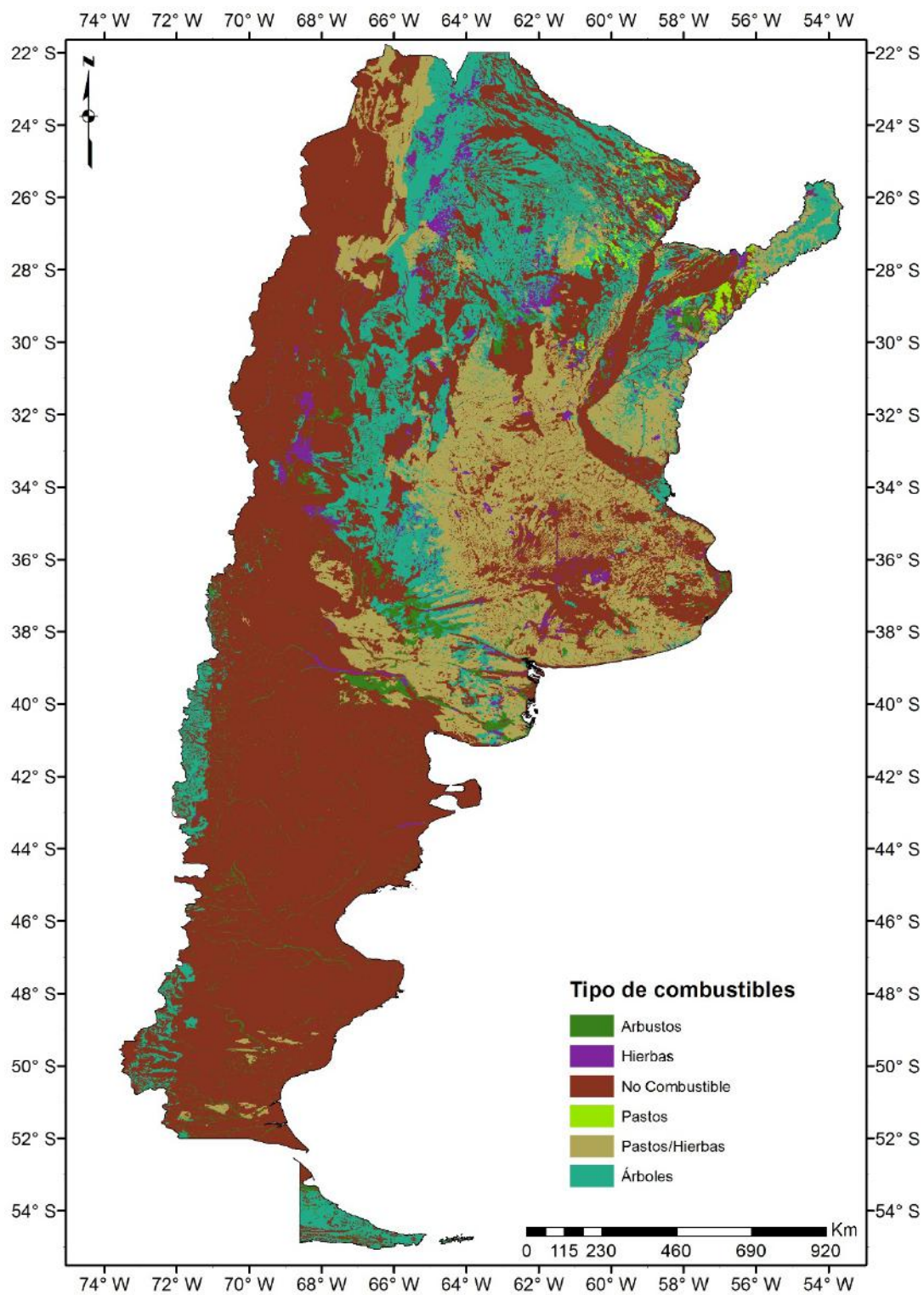


Figura 4-3
Mapa de tipo de combustibles

4.1.2 Generación del mapa de duración de combustibles

A partir del mapa de cobertura vegetal, se genera una reclasificación mediante la interpretación de los tipos de cobertura, asignando de acuerdo a las coberturas predominantes una calificación según la duración de los combustibles, como se muestra en la Tabla 4-3. A continuación se asigna una calificación según el nivel de amenaza por duración de combustibles de acuerdo con la Tabla 4-4.

Tabla 4-3
Reclasificación de las coberturas por duración del combustible

Tipo de Cobertura (Corine Land Cover Nivel 3)	Duración del combustible predominante
3.3.2. Afloramientos rocosos	No combustibles
3.1.1. Bosque denso	10 horas
3.1.3. Bosque fragmentado	100 horas
3.1.4. Bosque de galería y ripario	100 horas
3.2.2. Arbustal	100 horas
5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	No combustibles
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	1 hora
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	1 hora
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	1 hora
2.4.1. Mosaico de cultivos	10 horas
2.3.3. Pastos enmalezados	1 hora
2.3.1. Pastos limpios	1 hora
3.2.1. Herbazal	10 horas
3.3.5. Zonas glaciares y nivales	No combustibles

Tabla 4-4
Calificación de amenaza para cada duración de combustible

Duración de los combustibles	Categoría de amenaza	Calificación
No combustibles	Muy baja	1
Áreas urbanas	Muy baja	1
100 horas (predominio de árboles)	Baja	2
10 horas (predominio de arbustos y hierbas)	Moderada	3
1 hora (predominio de pastos)	Alta	4

El mapa de duración de combustible para Argentina se presenta en la Figura 4-4.

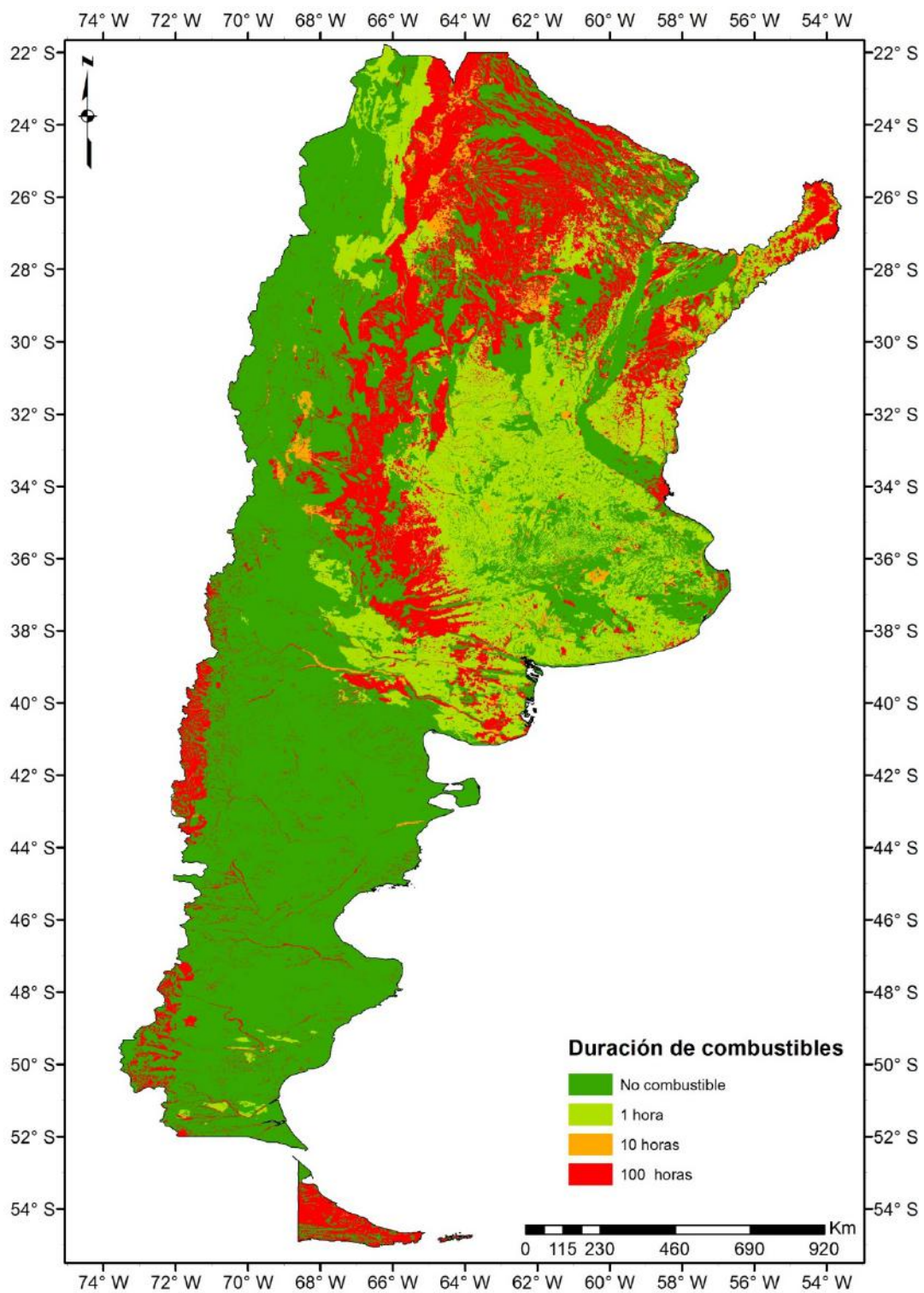


Figura 4-4
Mapa de duración de combustible

4.1.3 Generación del mapa de carga de combustibles

A partir del mapa de cobertura vegetal y de información específica que se tenga sobre la biomasa de los diferentes tipos de cobertura (expresada en toneladas por hectárea), es posible generar una reclasificación de los tipos de cobertura, asignando de acuerdo a las coberturas predominantes y a su contenido de biomasa (carga de combustibles) valores de carga total de combustible. Los valores de referencia para la reclasificación se presentan en la Tabla 4-5 y los calificativos de amenaza en la Tabla 4-6.

Tabla 4-5
Reclasificación de las coberturas por carga de combustible

Tipo de Cobertura (Corine Land Cover Nivel 3)	Carga total (biomasa) de combustibles
3.3.2. Afloramientos rocosos	No combustibles
3.1.1. Bosque denso	Moderada (50-100 ton/ha)
3.1.3. Bosque fragmentado	Muy alta (más de 100 ton/ha)
3.1.4. Bosque de galería y ripario	Muy alta (más de 100 ton/ha)
3.2.2. Arbustal	Muy alta (más de 100 ton/ha)
5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	No combustibles
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Moderada (50-100 ton/ha)
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	Moderada (50-100 ton/ha)
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	Moderada (50-100 ton/ha)
2.4.1. Mosaico de cultivos	Baja (1-50 ton/ha)
2.3.3. Pastos enmalezados	Baja (1-50 ton/ha)
2.3.1. Pastos limpios	Baja (1-50 ton/ha)
3.2.1. Herbazal	Baja (1-50 ton/ha)
3.3.5. Zonas glaciares y nivales	No combustibles

Tabla 4-6
Calificación de amenaza para cada carga de combustible

Carga total de los combustibles	Categoría de amenaza	Calificación
No combustibles	Muy baja	1
Áreas urbanas (menos de 1 Ton/ha)	Muy baja	1
Baja (1-50 Ton/ha)	Baja	2
Moderada (50-100 Ton/ha)	Moderada	3
Muy alta (más de 100 Ton/ha)	Alta	4

El mapa obtenido para la carga total de combustibles en el territorio argentino se presenta en la Figura 4-5.

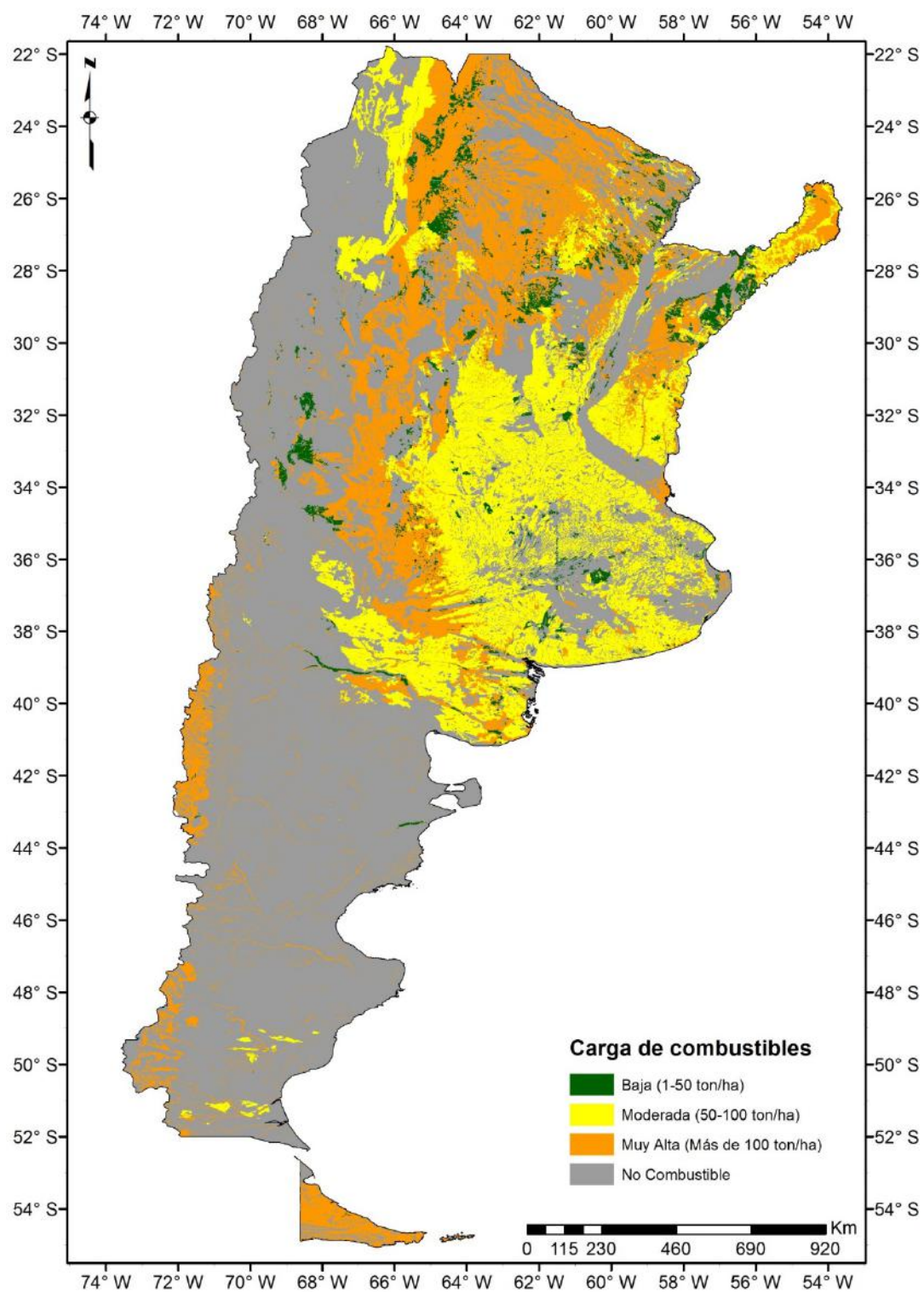


Figura 4-5
Mapa de carga de combustibles

4.1.4 Generación del mapa de susceptibilidad de la vegetación a incendios

Una vez generados los mapas de tipo, duración y carga de combustibles (Figura 4-3, Figura 4-4 y Figura 4-5), y asignadas las respectivas calificaciones (Tabla 4-2, Tabla 4-4 y Tabla 4-6), se procede a la realización del producto entre cada ellos (álgebra de mapas); el resultado obtenido se agrupa posteriormente en 5 categorías mediante una distribución de frecuencias, y a cada grupo se le asigna una calificación que varía entre susceptibilidad muy baja (rango menor) a susceptibilidad muy alta (rango mayor), mediante la siguiente ecuación:

$$SUSC = CAL(tc) + CAL(dc) + CAL(ct) \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

SUSC: Susceptibilidad de la vegetación (susceptibilidad bruta)

CAL(tc): Calificación por tipo de combustible

CAL(dc): Calificación de la duración de los combustibles

CAL(ct): Calificación de la carga total de combustibles

El mapa producto de este proceso se presenta en la Figura 4-6, dividido en 5 clases de susceptibilidad.

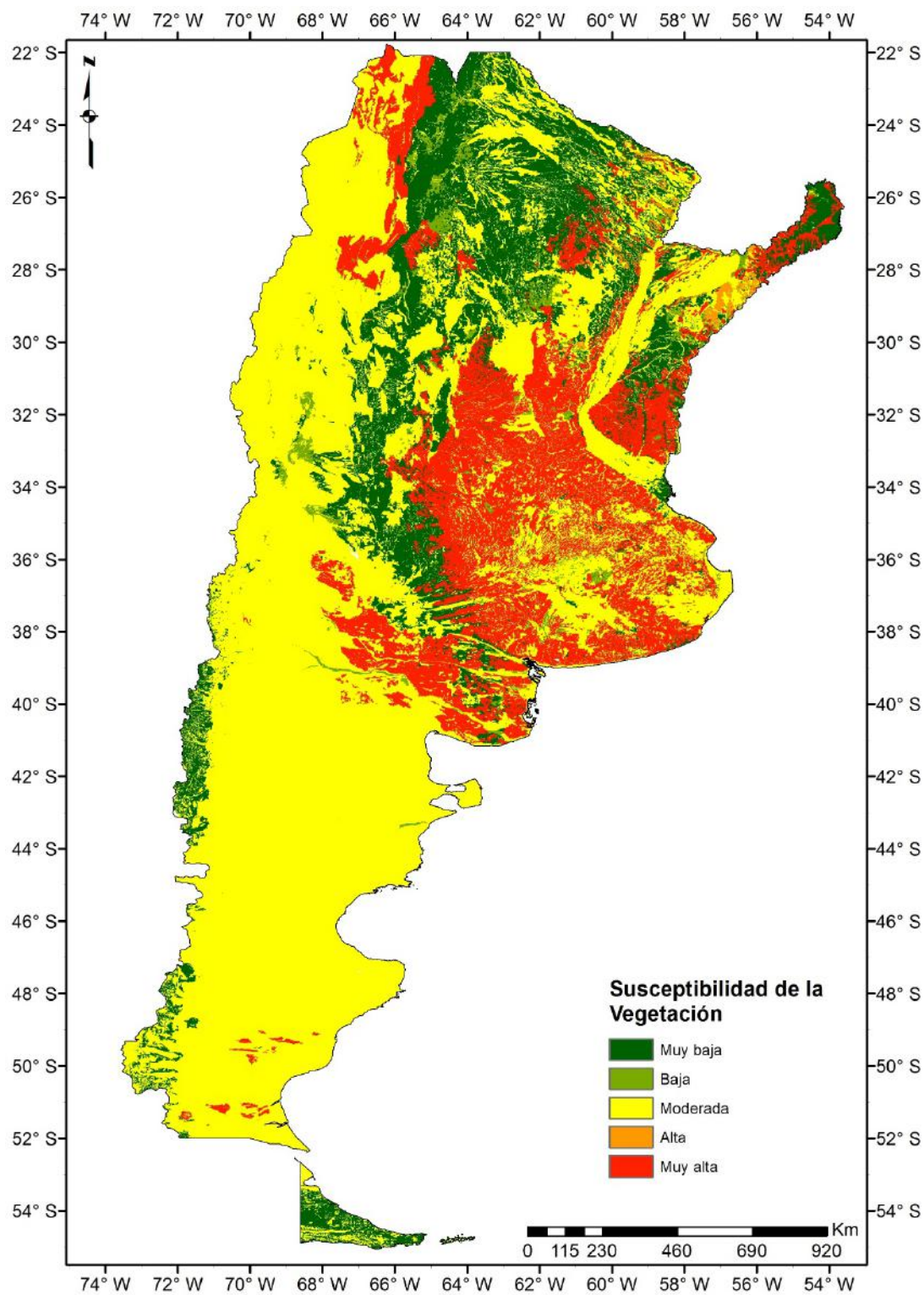


Figura 4-6
Mapa de susceptibilidad de la vegetación a incendios forestales

4.2 Factores climáticos

El clima es uno de los factores de fundamental importancia en la generación y la propagación de los incendios forestales ya que determina la duración y la severidad de las estaciones secas y calurosas en un área geográfica determinada, lo cual influye directamente sobre la humedad y la cantidad de combustible presente, pues la humedad hace que la vegetación sea más o menos resistente a la afectación del fuego, lo que conlleva a que exista una mayor disponibilidad de combustible de fácil ignición y con mayor probabilidad de ser afectado por el fuego, razones que posicionan las condiciones climáticas como factor de utilización indispensable para la evaluación de la amenaza.

Los factores climáticos de mayor influencia en la generación y propagación de incendios forestales y que se consideran en esta propuesta, son la temperatura media anual multianual y la precipitación media anual multianual.

Teniendo en cuenta que la susceptibilidad de la vegetación se ve afectada por factores externos de tipo climático que están íntimamente ligados a ella, generando variaciones intrínsecas de sus cualidades, principalmente en lo que hace referencia a la humedad contenida en los tejidos vegetales (influida directamente por la precipitación, humedad del suelo y temperatura ambiental), se considera necesario generar una calificación de la susceptibilidad bajo las condiciones normales de precipitación y temperatura imperantes en el país.

4.2.1 Incorporación de variables climáticas

Para ello, se efectúa un procedimiento similar al de la calificación de la susceptibilidad, para generar los mapas de las variables climáticas a partir de la información de precipitación y temperatura.

En este caso particular, se utilizó la información pluviométrica y de temperatura disponible en <http://www.worldclim.org/>, la cual es producto de un análisis con resolución de 30 arc s (aproximadamente 1km), considerando valores mensuales obtenidos de diferentes fuentes desde 1950. Mayores detalles y una explicación específica sobre los algoritmos y métodos de interpolación y corrección de datos pueden encontrarse en Hijmans et al (2005).

En la página web referida aparece la información climática de Argentina dividida en cuatro planchas de 30 x 30 grados. Específicamente se han utilizado las cuadrículas 33, 34, 43 y 44, las cuales contienen valores de precipitación y temperatura mensual dividida en 48 mallas diferentes para cada variable. Esta información se ha procesado en el software ArcGis para obtener un solo mapa consolidado de Precipitación media anual multianual (Figura 4-7) y otro de temperatura media anual multianual para el país (Figura 4-8).

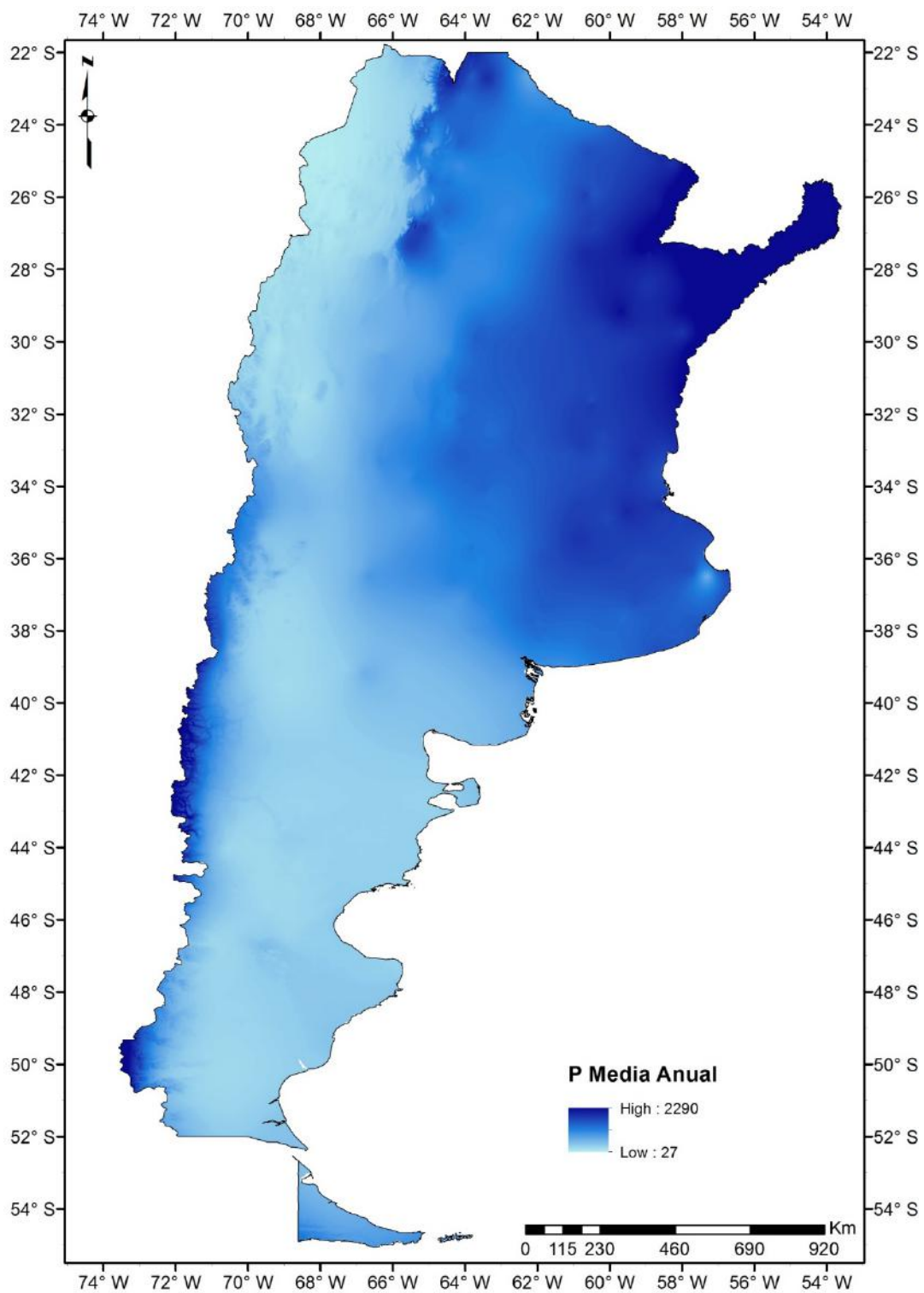


Figura 4-7
Mapa de precipitación media anual multianual

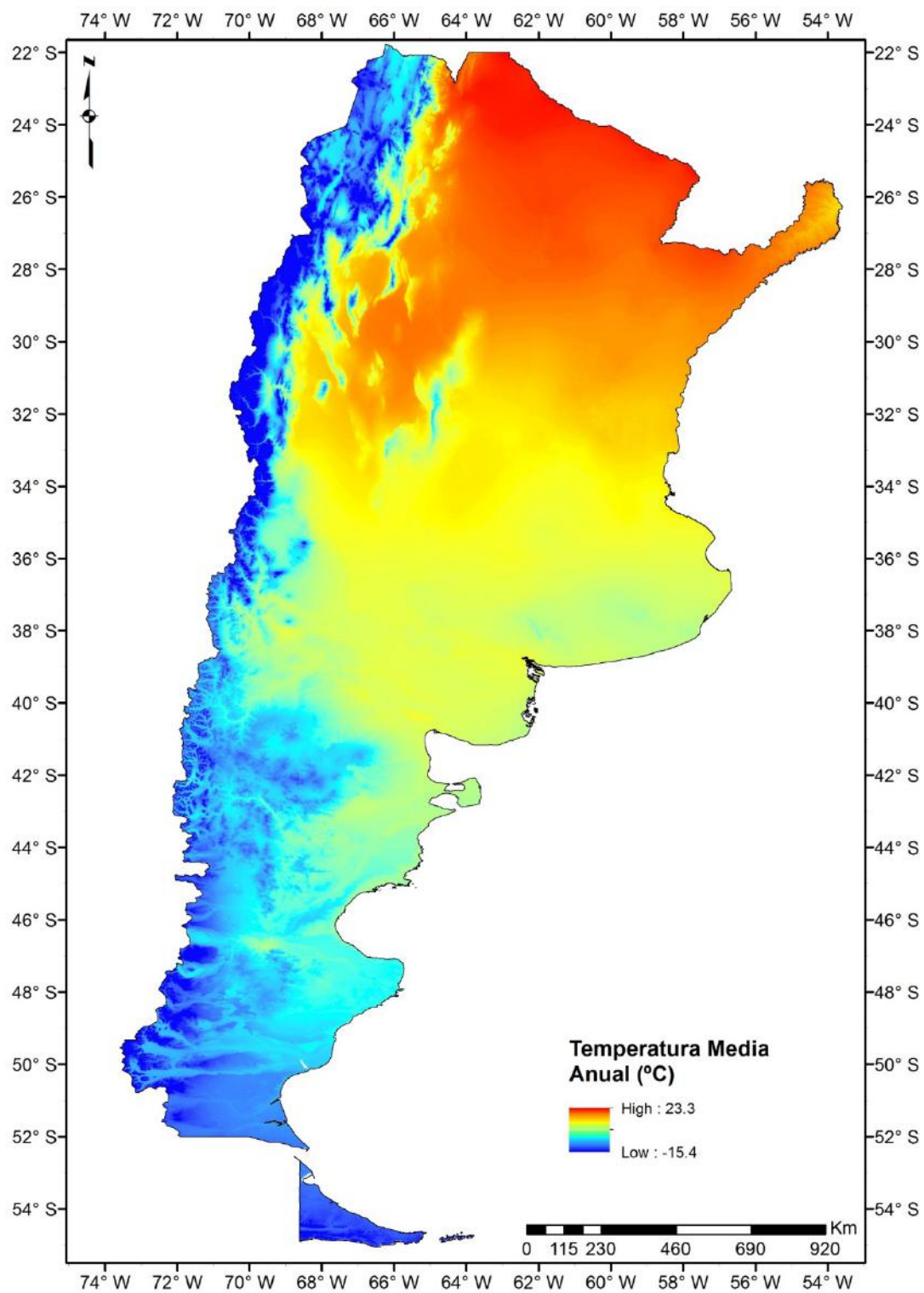


Figura 4-8
Mapa de temperature media annual multianual

Según los rangos de valores de cada una de las variables climáticas, se asignan calificativos del nivel de amenaza. La Tabla 4-7 presenta los valores asociados a la amenaza por precipitación, y la Tabla 4-8 los coeficientes utilizados para la temperatura.

Tabla 4-7
Calificación de amenaza por precipitación

Precipitación media anual (mm)	Categoría de amenaza	Calificación
Árido (0-500)	Muy baja	1
Pluvial (>7000)	Muy baja	1
Muy húmedo (3000-7000)	Moderada	2
Húmedo (2000-3000)	Moderada	3
Seco (1000-2000)	Alta	4
Muy seco (500-1000)	Muy alta	5

Tabla 4-8
Calificación de amenaza por temperatura

Temperatura media anual (°C)	Categoría de amenaza	Calificación
Nival (<1.5)	Muy baja	1
Extremadamente frío (1.5-6)	Muy baja	1
Muy frío (6-12)	Moderada	2
Frío (12-18)	Moderada	3
Templado (18-24)	Alta	4
Cálido (>24)	Muy alta	5

4.3 Factor del relieve

La propagación del fuego aumenta con el ángulo que ofrece la superficie; la propagación a favor de la pendiente es rápida y peligrosa. Los incendios no ocurren al azar, sino que son más frecuentes en ciertas posiciones topográficas.

Con el propósito de incorporar este factor en la evaluación de la amenaza, es pertinente elaborar un mapa de pendientes a partir de la elaboración de un modelo digital del terreno.

4.3.1 Incorporación de información de pendientes en la evaluación de la amenaza

Se ha elaborado un modelo de elevaciones del país con la información disponible a partir del proyecto ASTER Global Digital Elevation Model V002, de la NASA y el Gobierno del Japón (NASA, 2015). Para realizar este proceso se han descargado 724 cuadrículas con la información topográfica del país a una resolución aproximada de 30 metros. Tales mallas se han combinado y corregido para obtener el modelo digital de elevaciones del país que se presenta en la Figura 4-9.

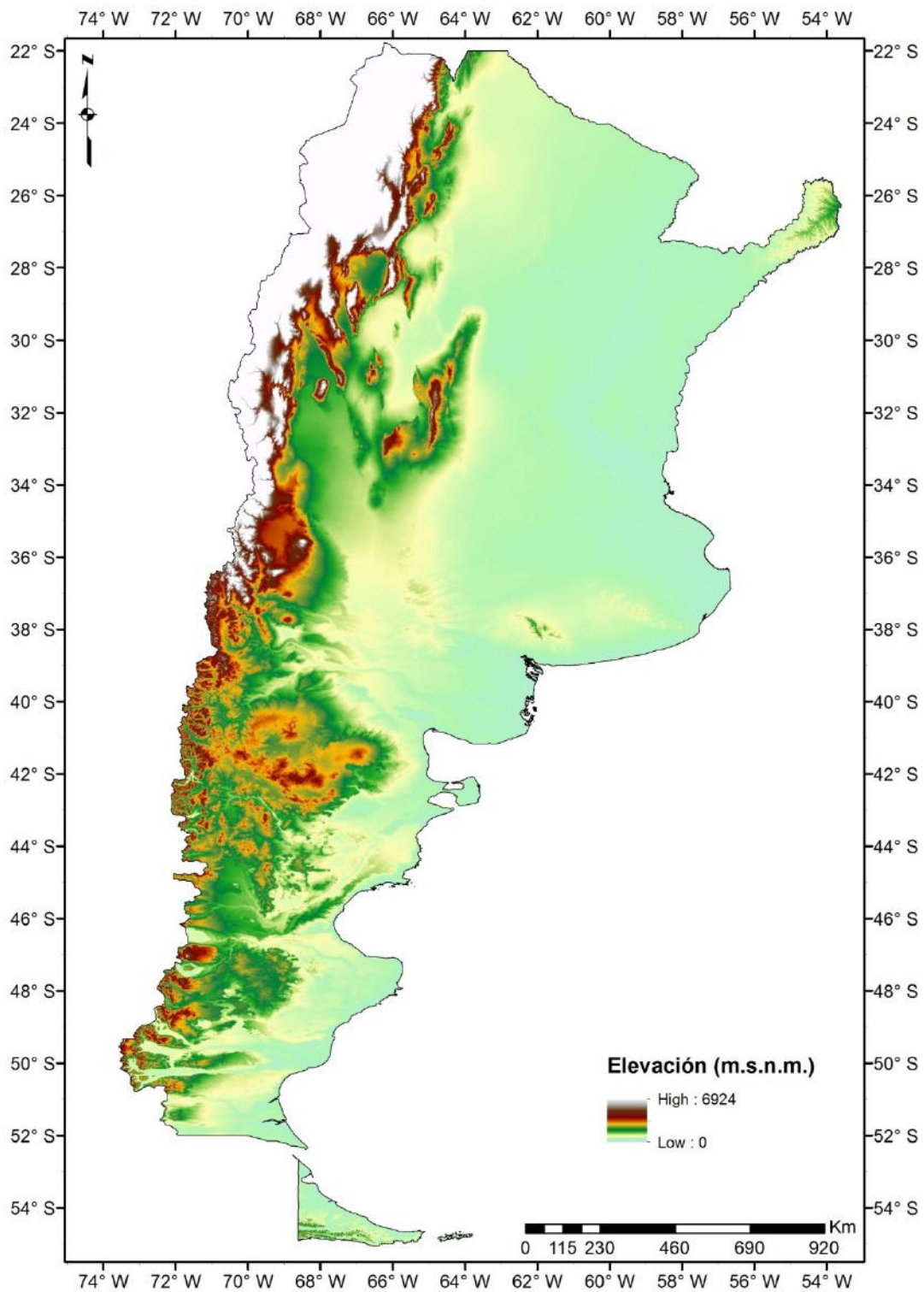


Figura 4-9
Mapa de elevaciones calculado

A partir del Modelo Digital de Elevaciones calculado, se interpola un mapa de pendientes en porcentaje, el cual se reclasifica y se le asigna una clasificación según la Tabla 4-9.

Tabla 4-9
Calificativos de amenaza por pendiente

Pendiente media (%)	Categoría de amenaza	Calificación
0-7	Muy baja	1
7-12	Baja	1
12-25	Moderada	2
25-75	Alta	3
>75	Muy alta	4

El mapa de amenaza por factor relieve obtenido se presenta en la Figura 4-10.

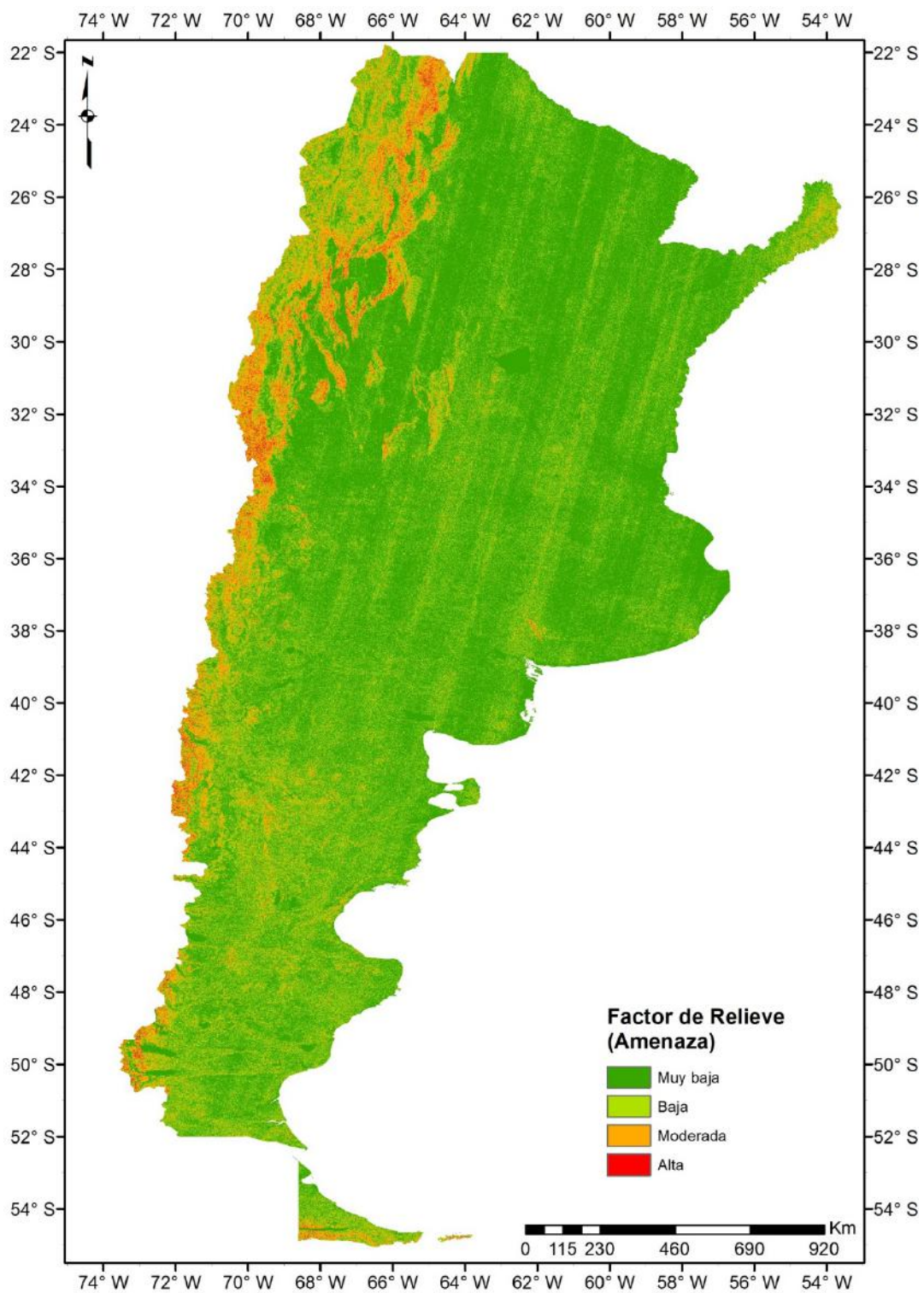


Figura 4-10
Mapa de amenaza por factor relieve

4.4 Accesibilidad

Expresada como la densidad vial, este factor se considera parte de la amenaza, debido a que es fundamental en la generación de la probabilidad de que la población pueda llegar a las áreas forestales y generar focos de incendio.

4.4.1 Análisis y evaluación de la accesibilidad

Para este proceso, se debe realizar a partir del mapa vial (vías principales y secundarias), la generación de 4 zonas buffer cada una de 500 m de grosor; una vez generados los buffers, se procede a su calificación para la generación de las amenazas que se pueden presentar sobre la cobertura por efecto de la mayor o menor posibilidad de acceso que se tenga sobre ellas, de acuerdo a los criterios presentados en la Tabla 4-10.

Tabla 4-10
Calificación de amenaza por accesibilidad

Distancia a la vía (Grosor del buffer en m)	Categoría de amenaza	Calificación
0-500	Muy alta	5
500-1000	Alta	4
1000-1500	Moderada	3
1500-2000	Baja	2
>2000	Muy baja	1

El mapa para este análisis (Figura 4-11) se obtuvo de la Base de Datos Geográfica del Instituto Geográfico Nacional IGN (<http://www.ign.gob.ar/sig>) (IGN, 2015).

El mapa de amenaza por accesibilidad resultante de la ponderación se presenta en la Figura 4-12.

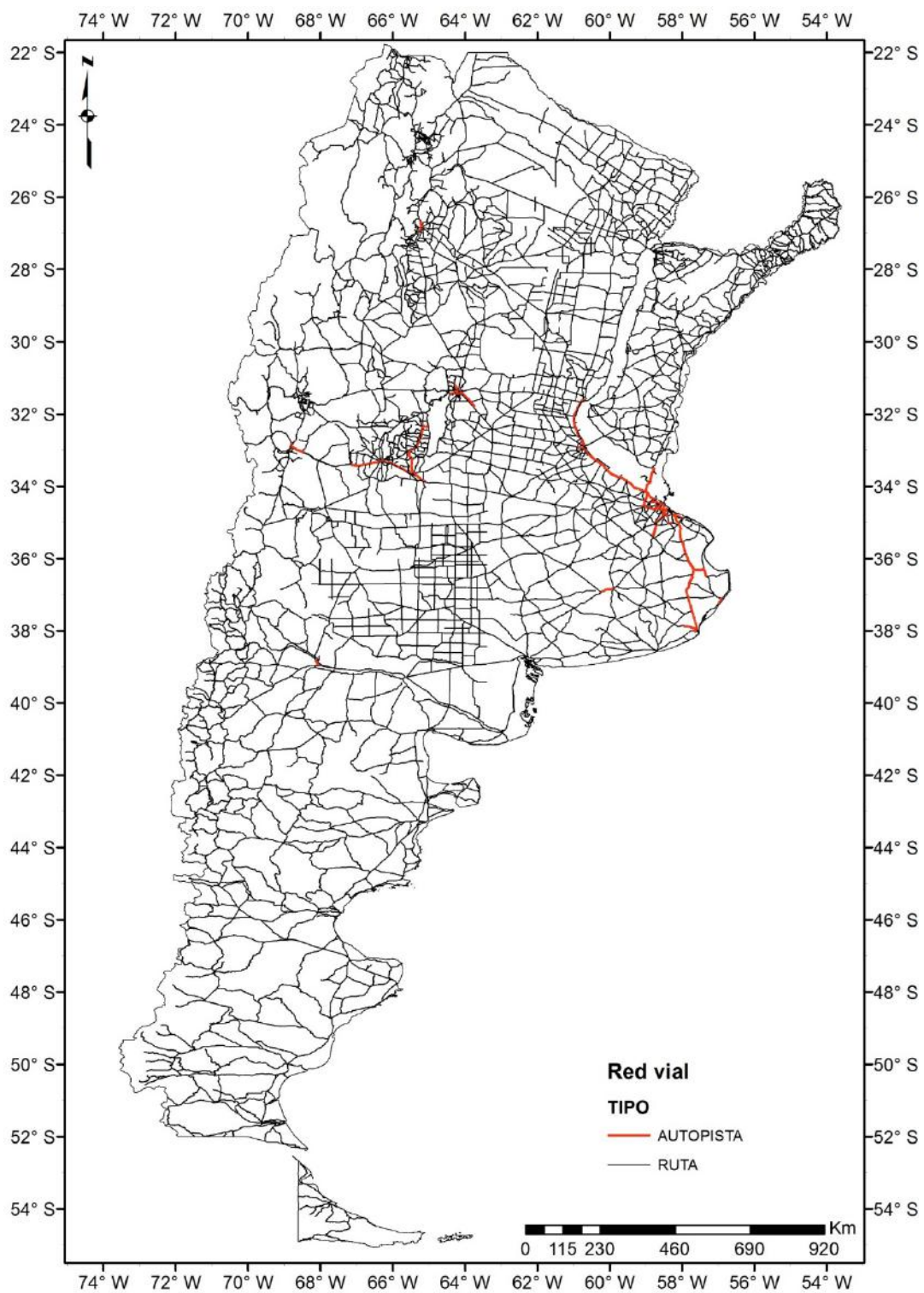


Figura 4-11
Mapa de la red vial principal

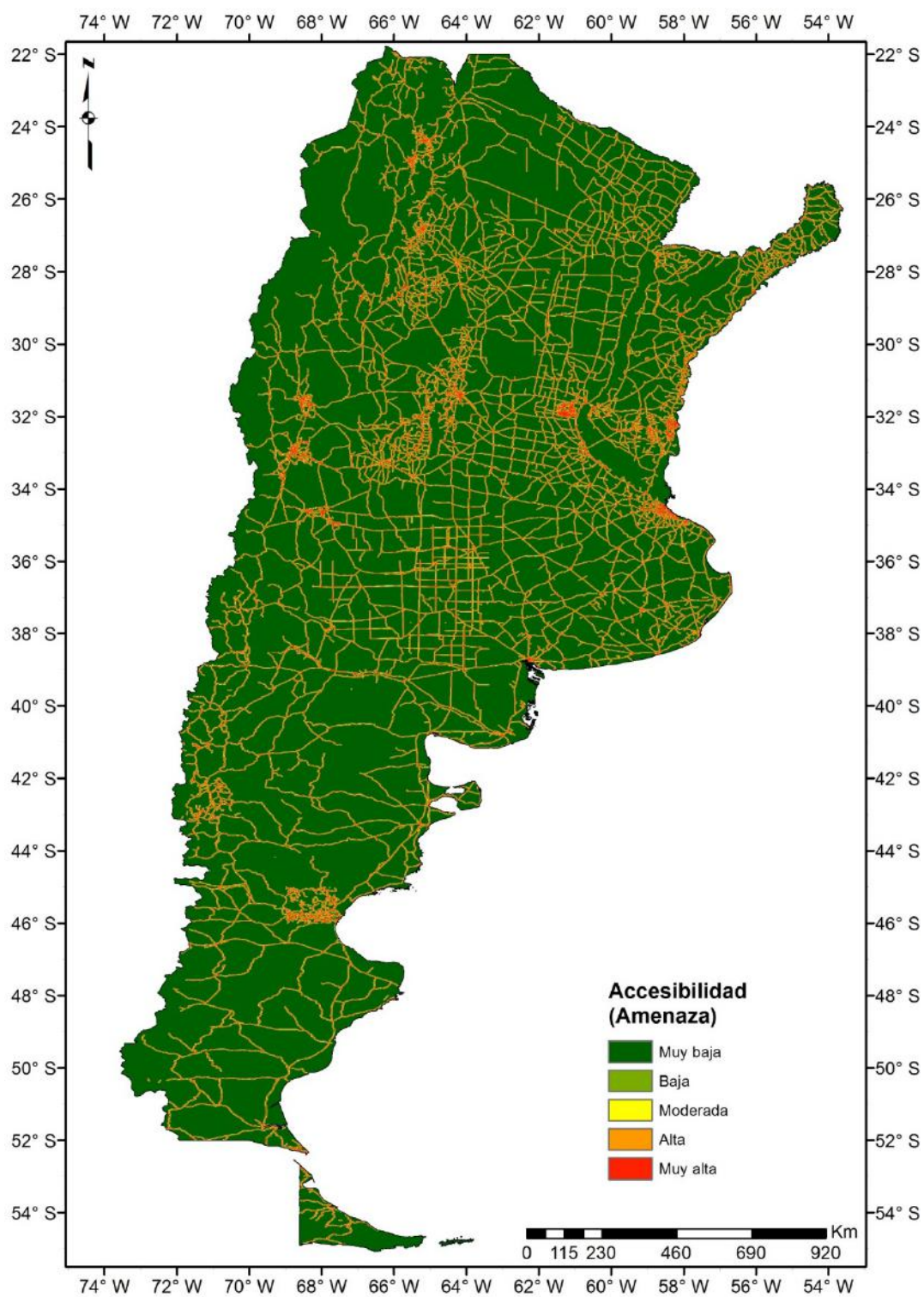


Figura 4-12
Mapa de amenaza por accesibilidad

4.5 Obtención del mapa de amenaza por incendios forestales

Con la información generada durante los pasos 1 al 8 mediante procesos de álgebra de mapas se genera una suma ponderada la cual equivale a la amenaza total por incendios forestales.

$$\text{Amenaza} = \text{susceptibilidad de la vegetación} \times (0.17) + \text{precipitación} \times (0.25) + \text{temperatura} \times (0.25) + \text{pendientes} \times (0.03) + \text{frecuencia} \times (0.05) + \text{accesibilidad} \times (0.03) \quad (\text{Ec. 13})$$

Una vez realizada la respectiva suma ponderada, se procede a realizar una distribución de frecuencias en 5 rangos para así llegar a categorizar el grado de amenaza entre muy baja (rango menor) a muy alta (rango mayor), considerando las categorías intermedias de baja, moderada y alta, respectivamente, dando como resultado el mapa de amenaza por incendios forestales presentado en la Figura 4-13.

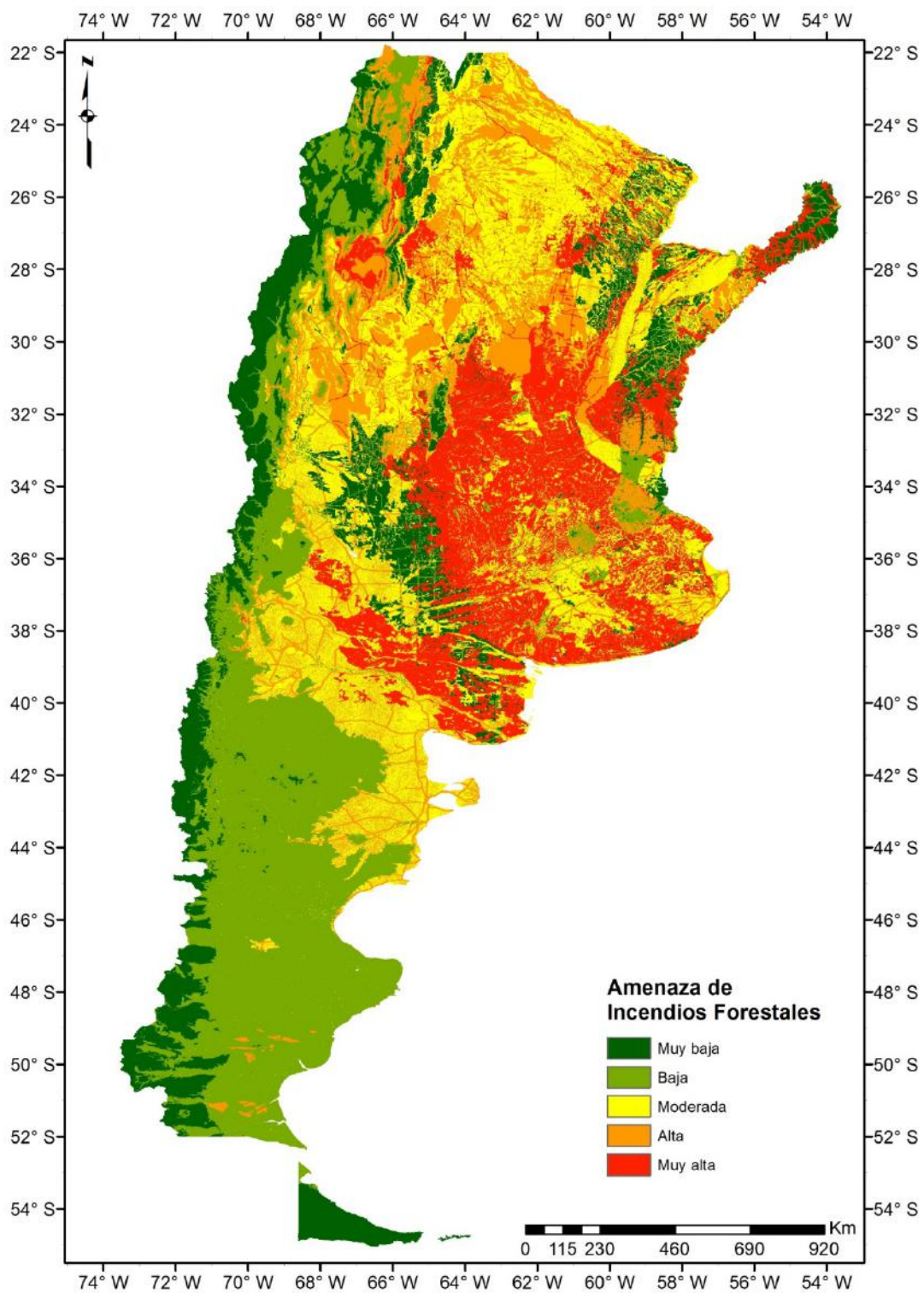


Figura 4-13
Mapa de amenaza por incendios forestales

5 Referencias

Hijmans, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones and A. Jarvis, (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.

IDEAM (2011). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal - Escala 1:100.000 Bogotá, D. C., 2011. 109 pag.

IGN (2015). Instituto Geográfico Nacional República Argentina. Base de Datos Geográfica. <http://www.ign.gob.ar/sig> Acceso en febrero de 2015.

NASA (2015). ASTER Global Digital Elevation Model V002. <http://reverb.echo.nasa.gov/> Acceso en febrero de 2015.

Páramo, G.E. (2007). Análisis, Diagnóstico y Elaboración del mapa de susceptibilidad a los incendios de la Cobertura Vegetal en Colombia. Contrato de Consultoría No. 2062372 (MAVDT-FONADE). Informe Final.

Evaluación de la Amenaza Volcánica

Tabla de contenidos

1	Introducción.....	1
1.1	Principales productos volcánicos a considerar	2
1.1.1	Caída de cenizas	2
1.1.2	Flujos Piroclásticos.....	2
1.1.3	Lahares o flujos de lodo	3
1.1.4	Flujos de lava.....	3
1.2	Magnitud de las erupciones	3
2	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS PROBABILISTA DE LA AMENAZA VOLCÁNICA	5
2.1	Descripción de la metodología	5
2.2	Simulación de las erupciones.....	6
3	MODELOS DE DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTOS VOLCÁNICOS	8
3.1	Modelo de evaluación de caída de cenizas	8
3.1.1	Modelo de advección-difusión	8
3.2	Implementación de las metodologías de cálculo	11
4	Amenaza por Caída de Ceniza del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle	12
4.1	Topografía del área de estudio.....	14
4.2	Puntos de emisión	14
4.3	Viento	15
4.4	Granulometría	18
4.5	Tasas de excedencia.....	19
4.6	Intensidad de las erupciones	20
5	Elementos Expuestos	21
5.1	Villa La Angostura	21
5.1.1	Procedimiento para asignar sistema estructural	21
5.1.2	Valoración de elementos expuestos	23
5.2	San Carlos de Bariloche.....	24
5.2.1	Geometría de manzanas.....	24
5.2.2	Categoría Socio-económica.....	24
5.2.3	Densidad.....	24
5.2.4	Número de pisos.....	25
5.2.5	Uso.....	25
5.2.6	Procedimiento para asignar sistema estructural	26

5.2.7	Valoración de elementos expuestos	27
6	Vulnerabilidad	29
7	Resultados de la evaluación del riesgo por caída de ceniza	31
7.1	Dirección del Viento 315° Este	31
7.1.1	Escenario 12	31
7.1.2	Escenario 60	35
7.2	Dirección del Viento 330° Este	39
7.2.1	Escenario 8	39
7.2.2	Escenario 12	43
8	Conclusiones.....	48
9	Referencias	49
10	Anexos.....	52

Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación de cenizas según su tamaño.....	2
Tabla 2. Índice de explosividad volcánica VEI.....	4
Tabla 3. Resumen de eventos de erupción e índices de explosividad volcánica (VEI)	12
Tabla 4. Distribución de repeticiones según rango de velocidad promedio de viento para la estación Bariloche 2010-2014.	17
Tabla 5. Tasa de excedencia según intensidad de la erupción para el CVPCC.	19
Tabla 6. Altura media y desviación estándar de la columna eruptiva según intensidad de la erupción para el CVPCC.	20
Tabla 7. Distribución de sistema estructural por clasificación socioeconómica, uso de suelo y número de pisos Villa La Angostura	23
Tabla 8. Número y porcentaje de edificaciones por sistema estructural en censo y en base de datos Villa La Angostura	23
Tabla 9. Índices de ajuste para definir valor de reposición según uso y categoría socioeconómica.	24
Tabla 10. Clasificación socioeconómica según tipo de manzanas homogéneas según Matossian (2010).	24
Tabla 11. Definición de distribución de usos en manzanas homogéneas en San Carlos de Bariloche	25
Tabla 12. Distribución de sistema estructural por clasificación socioeconómica, uso de suelo y número de pisos Bariloche	27
Tabla 13. Número y porcentaje de edificaciones por sistema estructural en censo y en base de datos Bariloche	27
Tabla 14. Índices de ajuste para definir valor de reposición según uso y categoría socioeconómica.	28
Tabla 15. Resumen de resultados para escenarios de mayores pérdidas por dirección del viento.	31

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación del Complejo Volcánico Puyehue con respecto a Villa La Angostura y San Carlos de Bariloche.	1
Figura 2. Malla de topografía del Complejo Volcánico Puyehue – Cordón Caulle.....	14
Figura 3. Localización de Puntos de Emisión en el Complejo Volcánico Puyehue Cordón-Caulle	15
Figura 4. Localización de estaciones meteorológicas cercanas al Complejo Volcánico	16
Figura 5. Rosa de los vientos. Información 2010-2014. Frecuencia y velocidad.	16
Figura 6. Perfil de Viento direcciones Oeste-Noroeste y Noroeste para estación Bariloche	18
Figura 7. Curva granulométrica de material emitido por el CVPCC.	19
Figura 8. Resultados Censo 2010 para materiales en Provincia de Neuquen	22
Figura 9. Resultados Censo 2010 para materiales en Provincia de Río Negro	26
Figura 10. Curvas de vulnerabilidad para amenaza de caída de ceniza, según material y altura de la edificación.	30
Figura 11. Pluma de ceniza para escenario 12 de VEI = 5 y dirección de viento 315°	32
Figura 12. Pluma de ceniza para escenario 12 de VEI = 5 y dirección de viento 315° - Detalle ciudades	32
Figura 13. Resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para San Carlos de Bariloche – Es12 DV315	33
Figura 14. Resultados de PAE relativa a su valor expuesto para Bariloche – Es12 DV315.....	34
Figura 15. Resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para Villa La Angostura – Es12 DV315	34
Figura 16. Resultados de PAE relativa a su valor expuesto para Villa La Angostura – Es12 DV315	35
Figura 17. Pluma de ceniza para escenario 60 de VEI = 5 y dirección de viento 315°	36
Figura 18. Pluma de ceniza para escenario 60 de VEI = 5 y dirección de viento 315° - Detalle ciudades	36
Figura 19. Resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para San Carlos de Bariloche – Es60 DV315	37
Figura 20. Resultados de PAE relativa a su valor expuesto para Bariloche – Es60 DV315.....	38
Figura 21. Resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para Villa La Angostura – Es60 DV315	38
Figura 22. Resultados de PAE relativa a su valor expuesto para Villa La Angostura – Es60 DV315	39
Figura 23. Pluma de ceniza para escenario 8 de VEI = 5 y dirección de viento 330°	40

Figura 24. Pluma de ceniza para escenario 8 de VEI = 5 y dirección de viento 330° - Detalle ciudades	40
Figura 25. Resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para San Carlos de Bariloche – Es8 DV330	41
Figura 26. Resultados de PAE relativa a su valor expuesto para Bariloche – Es8 DV330.....	42
Figura 27. Resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para Villa La Angostura – Es8 DV330	42
Figura 28. Resultados de PAE relativa a su valor expuesto para Villa La Angostura – Es8 DV330	43
Figura 29. Pluma de ceniza para escenario 12 de VEI = 5 y dirección de viento 330°	44
Figura 30. Pluma de ceniza para escenario 12 de VEI = 5 y dirección de viento 330° - Detalle ciudades	44
Figura 31. Resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para San Carlos de Bariloche – Es12 DV330	45
Figura 32. Resultados de PAE relativa a su valor expuesto para Bariloche – Es12 DV330.....	46
Figura 33. Resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para Villa La Angostura – Es12 DV330	46
Figura 34. Resultados de PAE relativa a su valor expuesto para Villa La Angostura – Es12 DV330	47

1 Introducción

Los volcanes constituyen el único proceso que comunica la superficie de la tierra con los niveles profundos de la corteza terrestre; es decir, son el único medio para la observación y el estudio de los materiales líticos de origen magmático, que constituyen aproximadamente el 80 % de la corteza sólida. En la profundidad del manto terrestre, el magma bajo presión asciende, creando cámaras magmáticas dentro o por debajo de la corteza. Las grietas en las rocas de la corteza proporcionan una salida para la intensa presión con lo cual se conforma una erupción con diversos materiales como vapor de agua, humo, gases, cenizas, rocas y lava, los cuales son lanzados a la atmósfera en el proceso.

Un gran número de volcanes se encuentran en el centro y sur de Chile, muy cercano a la frontera con Argentina, sobre la Cordillera de Los Andes. En esta zona se ubica el Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle (CVPCC), un conjunto de centros emisores coalescentes pleistocenoholocenos, alineados en dirección Noroeste-Sureste. El CVPCC es considerado el campo volcánico más voluminoso al sur de la Región de Maule en Chile, y es el segundo mayor campo geotérmico de los Andes del Sur.

El estudio de la amenaza volcánica, que se presenta en este documento, se centrará en los efectos de la caída de ceniza de erupciones del CVPCC puedan generar en territorio Argentino, particularmente en las poblaciones de Villa La Angostura y San Carlos de Bariloche.

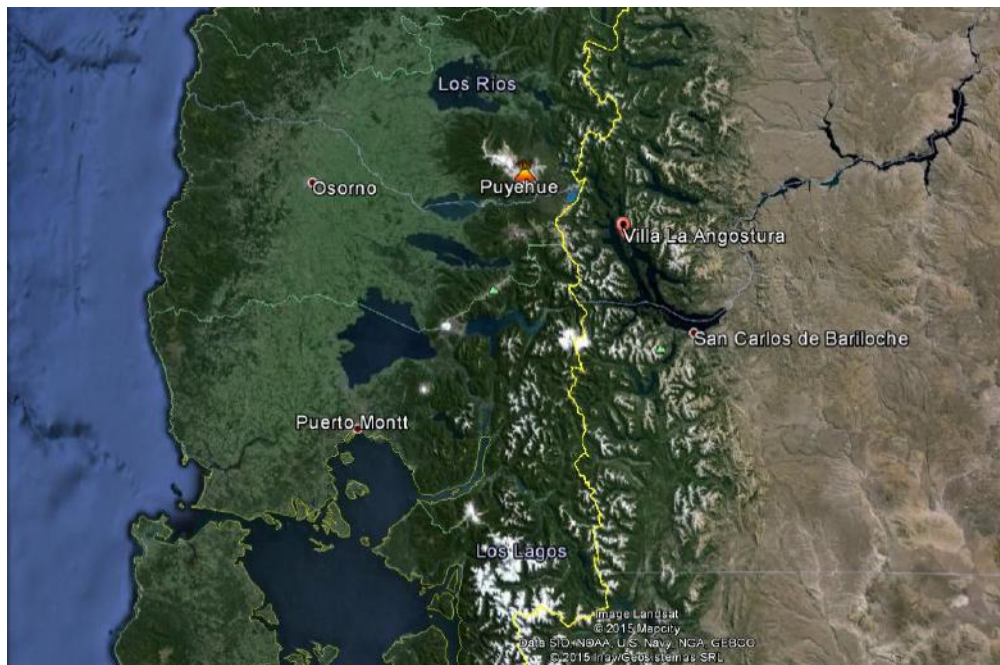


Figura 1. Ubicación del Complejo Volcánico Puyehue con respecto a Villa La Angostura y San Carlos de Bariloche.

1.1 Principales productos volcánicos a considerar

Respecto a la actividad volcánica, se presentan diversos procesos eruptivos de potencial impacto en las zonas cercanas a los centros de emisión. Los principales procesos son la caída de cenizas frías (ash/tephra), flujos piroclásticos, flujo de escombros fríos o lahares y, en menor medida, flujos de lava. A continuación se presenta una breve descripción de estos procesos.

La caída de ceniza, el producto volcánico que alcanza mayores distancias del centro de emisión, es el mayor interés para evaluar la amenaza del Complejo Volcánico Puyehue Cordón Caulle en las poblaciones argentinas de Villa La Angostura y San Carlos de Bariloche.

1.1.1 Caída de cenizas

Este proceso se desarrolla por la expulsión a la atmósfera de fragmentos de material magmático (conocidos como tephra o piroclastos), impulsados por los gases ascendentes producidos durante las erupciones volcánicas. Esta masa de material es transportada grandes distancias, dependiendo del viento predominante, y dispersada por la turbulencia atmosférica sobre grandes áreas, generando efectos adversos en zonas distantes del evento eruptivo. A causa del enfriamiento y condensación de la masa de material, éste se deposita por acción de la gravedad sobre grandes extensiones de tierra, generando pérdidas en propiedades y bienes de infraestructura expuesta, cultivos, fuentes de agua y produciendo en algunos casos problemas de salud pública.

Las cenizas son material volcánico fragmentado y se clasifican según su tamaño como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de cenizas según su tamaño

Tamaño (mm)	Clasificación
> 64	<i>Bloques</i> : forma angular a subangular <i>Bombas</i> : forma suave, a manera de bala
64 – 2	<i>Lapilli</i>
< 2	<i>Ceniza</i>

1.1.2 Flujos Piroclásticos

Los flujos piroclásticos están compuestos de material granular y gases eruptivos de elevada temperatura acumulados durante el proceso eruptivo en la columna de erupción, que por su alta densidad colapsa desplazándose ladera abajo por el edificio volcánico, alcanzando velocidades de flujo importantes, por lo cual es uno de los procesos eruptivos más destructivos que puedan llegar a generarse. Su curso es guiado generalmente por la topografía y puede alcanzar velocidades de hasta 200 m/s y temperaturas de cientos de grados centígrados.

1.1.3 Lahares o flujos de lodo

Los lahares son grandes flujos de agua, lodos, piedras y biomasa de diferentes tamaños que se mueven sobre las laderas de volcanes o cuencas de ríos. Estos pueden variar en tamaño, dependiendo de las condiciones del sitio en las que se producen. Los grandes lahares se desplazan a una velocidad considerable y alcanzan distancias importantes, afectando grandes extensiones de territorio y generando efectos masivamente destructivos.

Los lahares pueden iniciarse por la acción eruptiva o térmica de un volcán a causa del deshielo rápido de cumbres cubiertas por nieve, la expulsión súbita de cuerpos de agua (e.g lagunas) ubicados en cráteres, lluvias intensas, actividad volcánica y freato-magmática. Este tipo de eventos generalmente sucede en estratovolcanes, que por su estructura de costados empinados, poco consolidados, conforman el escenario perfecto para la generación de un lahar.

1.1.4 Flujos de lava

Los flujos de lava son corrientes de roca fundida que dependiendo de la composición química y gases disueltos puede variar de viscosidad, y consecuentemente de velocidad y distancia cubierta por el flujo. Los principales factores que afectan la velocidad de los flujos de lava y las distancias que cubren dependen principalmente de las características del material expulsado, aunque también intervienen factores como la tasa de expulsión, pendiente topográfica y accidentes del terreno en el que es vertida la lava, y la forma o estructura del edificio volcánico. Por ejemplo, en los lugares en donde las erupciones se caracterizan por ser periódicas y muy viscosas, los flujos de lava no alcanzan mayores distancias y terminan acumulándose en capas para formar domos. Al igual que los flujos piroclásticos, los flujos de lava generan una destrucción casi total a lo largo del cauce de la corriente de flujo, pues las elevadas temperaturas incineran cualquier elemento que se encuentre en la trayectoria, destruyendo incluso el mismo terreno el cual puede durar mucho tiempo en recuperarse.

La intrusión de los flujos de lava en depósitos de nieve o hielo puede generar lahares de gran magnitud, o la intrusión en depósitos de agua superficial puede generar, por la ebullición violenta, explosiones con desprendimientos de roca fundida.

1.2 Magnitud de las erupciones

En 1982 Newhall y Self integraron tanto mediciones cuantitativas (volumen de masa expulsada, altura de la columna de humo) como cualitativas de erupciones, para proponer el índice de explosividad volcánica VEI (del inglés Volcanic Explosivity Index). Este índice se compone de ocho clases asociadas a diferentes órdenes de magnitud del volumen total de material expulsado. Cada valor del VEI indica un incremento en un factor de 10 al volumen total expulsado respecto al valor anterior. En la Tabla 2 se describen cada uno de los niveles del índice planteado a la vez que se cita un ejemplo para cada uno de ellos.

En el desarrollo de este estudio, se usará el VEI como medida de la magnitud de las erupciones del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle.

Tabla 2. Índice de explosividad volcánica VEI

VEI	Volumen (m³)	Altura columna de humo (km)	Tipo de Erupción	Recurrencia	Ejemplo
1	1x10 ⁶	0.1-1	Haw/Stromboliana	Diaria	Stromboli
2	1x10 ⁷	1-5	Strom/Vulcaniana	Semanal	Galeras, 1992
3	1x10 ⁸	3-15	Vulcaniana	Anual	Ruiz, 1985
4	1x10 ⁹	10-25	Vulc/Pliniana	Decenios	Galunggung, 1982
5	1x10 ¹⁰	>25	Pliniana	Siglos	St. Helens, 1981
6	1x10 ¹¹	>25 km	Plin/Ultra-Pliniana	Siglos	Krakatau, 1883
7	1x10 ¹²	>25 km	Ultra-Pliniana	1.000 años	Tambora, 1815
8	>1x10 ¹²	>25 km	Ultra-Pliniana	10.000 años	Toba (73,000 AC)

2 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS PROBABILISTA DE LA AMENAZA VOLCÁNICA

La evaluación de la amenaza volcánica se ha convertido en una actividad continua para las agencias y servicios geológicos en países donde la actividad volcánica es permanente. La mayoría de las evaluaciones de amenaza son realizadas por expertos vulcanólogos, como resultado de la solicitud de las agencias de manejo de desastres, y la mayoría se utilizan para elaborar los planes de emergencia asociados a cada volcán activo.

La inclusión de aspectos cuantitativos en la evaluación de la amenaza volcánica se inició hace apenas una década y los análisis probabilistas completos de la amenaza volcánica sólo existen para unos pocos volcanes alrededor del mundo (Young et al. 1998, Young & Sparks 1998)

Los estudios integrales de amenaza volcánica son escasos debido principalmente a la insuficiencia de información. Adicionalmente, la mayoría de los análisis de amenaza volcánica se han llevado a cabo con un enfoque orientado principalmente hacia la planificación del ordenamiento territorial, dejando de lado la evaluación de sus efectos, es decir, la evaluación de pérdida de vidas y pérdidas económicas, que permitan el desarrollo de estrategias de gestión del riesgo asociadas a la protección financiera y a la reducción de la vulnerabilidad. (Young & Sparks, 1998 y Young et al, 1998).

La evaluación de la amenaza volcánica en Argentina, para fines de su implementación dentro de la plataforma CAPRA, debe seguir un enfoque de análisis probabilista. Pocos trabajos se han realizado en el mundo siguiendo una perspectiva de análisis probabilista. Se destaca el trabajo Jenkins et. al. (2012), en el cual se realizó un primer acercamiento a la evaluación probabilista por medio de la cuantificación de la probabilidad de ocurrencia de erupciones en 190 volcanes del sureste asiático.

En este documento se presenta un enfoque innovador, el cual permite obtener una representación completamente probabilista de la amenaza volcánica y que es compatible con la metodología de análisis de riesgo implementada en CAPRA.

2.1 Descripción de la metodología

La metodología adoptada para la evaluación de la amenaza se resume en los siguientes pasos:

1. Localización geográfica de los centros de emisión del volcán: teniendo en cuenta la morfología del edificio volcánico, se definen los lugares específicos o centros de emisión en los cuales puede iniciarse la expulsión de material. En caso que la información disponible lo permita, es posible definir una función de probabilidad de apertura de los diferentes sitios identificados.
2. Definición de la recurrencia de las erupciones a partir de información histórica: utilizando el catálogo de erupciones conocidas, se definen las tasas de excedencia de valores específicos del VEI.
3. Caracterización de la intensidad de las erupciones en función de VEI: a partir de la información recopilada sobre las erupciones históricas en el volcán, se define la intensidad

de una erupción en un volcán particular, en función del VEI. Esta definición de intensidad es particular para cada volcán, y debe definirse para los productos que el volcán puede generar.

4. Modelación de distribución de productos volcánicos: se evalúa cada escenario a partir de su magnitud en términos del VEI, e intensidad en términos de los parámetros propios de cada modelo de distribución. El cálculo de distribución genera zonas de afectación e intensidad local específica para la magnitud seleccionada. Se consideran cuatro tipos de productos: caída de ceniza, flujos piroclásticos, lahares y flujos de lava. Para el caso del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle se limita el análisis a caída de ceniza.

El análisis probabilista está basado en la simulación de erupciones posibles de acuerdo con las características del volcán. Cada erupción se caracteriza con una frecuencia anual de ocurrencia particular. Debe definirse la localización de los puntos de emisión y la intensidad de cada erupción. Esta última se define como una variable aleatoria cuyos momentos de probabilidad dependen del VEI de la erupción simulada. Adicionalmente deben determinarse las tasas de excedencia para cada valor de VEI incluido en el análisis.

En esta metodología la amenaza volcánica se representa por medio de un conjunto de escenarios estocásticos. Cada escenario corresponde a la amenaza asociada a la ocurrencia de una de las erupciones simuladas. Se emplea esta representación con el fin de determinar de manera integral todas las posibles erupciones que pueden ocurrir en un determinado volcán, y sus efectos en términos de amenaza. Estos escenarios tienen las siguientes características:

1. Son *mutuamente excluyentes*, lo cual significa que cada escenario representa la amenaza asociada a una erupción particular con una frecuencia de ocurrencia específica, que no puede ocurrir con una frecuencia diferente. En otras palabras, los escenarios no pueden ocurrir simultáneamente.
2. Son *colectivamente exhaustivos*, lo cual significa que, en conjunto, representan de manera integral la amenaza volcánica en la zona de análisis. Es decir que en el conjunto completo de escenarios se encuentran todas las maneras como la amenaza puede manifestarse en el territorio.
3. Tienen *probabilidad temporal*, dada en términos de una frecuencia anual de ocurrencia para todo el escenario.
4. Tienen *probabilidad espacial*, dada en términos de la distribución geográfica de los momentos de probabilidad de las medidas de intensidad calculadas para cada punto de análisis.

2.2 Simulación de las erupciones

El conjunto de escenarios se construye a partir de simulaciones de erupciones posibles en el volcán de análisis. Las erupciones se simulan en función de las características generales del volcán y su historia eruptiva. Con esta información se definen tasas de excedencia para diferentes

valores de VEI, las cuales indican el número de veces en un año que la magnitud de las erupciones iguala o excede un VEI determinado.

Cada VEI se relaciona adicionalmente con parámetros de intensidad de las erupciones, en función del producto volcánico para el cual se esté calculando la amenaza. Se asume que estos parámetros de intensidad son variables aleatorias con distribución Normal, por lo cual se definen en términos de su valor esperado y desviación estándar.

En seguida se recorren todos los valores de VEI contenidos en el modelo particular del volcán de análisis y se simulan valores de intensidad de la erupción a partir de su función de densidad de probabilidad. En cada punto de emisión se simulan erupciones de la manera descrita y se calcula la amenaza, para cada erupción, por medio de los modelos de distribución de productos. Una vez terminadas las simulaciones, se calculan momentos de probabilidad de las medidas de intensidad de cada producto, en cada punto de la región de análisis delimitada por el modelo digital de elevación empleado. El resultado final, para cada erupción, son dos mallas de igual tamaño y resolución que contienen el valor esperado y la varianza de la amenaza calculada en cada punto, valores con los cuales es posible construir la distribución de probabilidad asociada a cada producto volcánico, en cada ubicación. Para todos los productos considerados, se asume que sus medidas de intensidad local son variables aleatorias con distribución Gamma.

La frecuencia anual de ocurrencia de un escenario cualquiera, F_E , se calcula de la siguiente manera:

$$F_E = \nu(VEI) \cdot S_V \quad (1)$$

en donde $\nu(VEI)$ es la tasa anual de excedencia de VEI y S_V es la susceptibilidad de apertura del punto de emisión.

3 MODELOS DE DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTOS VOLCÁNICOS

Para el Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle se seleccionó el modelo de advección-difusión para la evaluación amenaza por caída de cenizas, dentro de un marco probabilista. Este modelo se utilizó con el fin caracterizar la amenaza mediante intensidades relacionables con los daños y el comportamiento de la infraestructura expuesta, de manera tal que sean aplicables en los posteriores análisis de riesgo. En esta sección se presenta una descripción detallada de la metodología seleccionada.

3.1 Modelo de evaluación de caída de cenizas

En la actualidad existen dos enfoques metodológicos para el cálculo del transporte y sedimentación de cenizas volcánicas. Estos se conocen como el método de *advección-difusión* y el método del *seguimiento de partículas*.

El modelo de advección-difusión plantea la solución a la ecuación de difusión de partículas, estimando la acumulación de partículas en el suelo, por medio de la solución de ecuaciones de transporte y sedimentación. En general es utilizado para la prevención de emergencias y desarrollo de planes de reducción de desastres.

Por otra parte, el modelo de seguimiento de partículas predice la ubicación de la nube de cenizas volcánicas en cualquier tiempo y lugar. Su implementación requiere de un constante monitoreo de las características meteorológicas de la región, y la retroalimentación del modelo con información en tiempo real. Es útil para pronósticos de corto plazo y por lo tanto es generalmente usado por las agencias de seguridad aérea.

En este estudio se implementará el modelo de advección-difusión, dado que permite modelar de manera integral el proceso de depósito de las partículas de ceniza, usando información general asociada a las características del volcán y de los vientos regionales. A continuación se describe en detalle este modelo.

3.1.1 Modelo de advección-difusión

La metodología de advección-difusión considera que las partículas de ceniza son difundidas por la turbulencia atmosférica y la advección horizontal del viento, y son depositadas luego por la acción de la gravedad. Este modelo bidimensional considera la velocidad del viento, la difusividad atmosférica, la concentración de las partículas en la columna eruptiva, el tiempo de caída de las partículas y su velocidad límite de caída. Esta última incorpora parámetros de forma y dimensión de las partículas, así como la viscosidad y densidad del aire.

La ecuación general base del modelo fue propuesta por Armienti et al., en 1988, y se presenta a continuación.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V_x \frac{\partial C}{\partial x} + V_y \frac{\partial C}{\partial y} + V_z \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{\partial vC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S \quad (2)$$

en donde C es la concentración de partículas, k_x , k_y y k_z , son las componentes del tensor de difusividad, V_x , V_y y V_z definen el campo de velocidades del sistema, v es la velocidad límite de caída de partículas, y S es una función que describe la dimensión del espacio de entrada de partículas a la columna eruptiva. Para facilidad en la resolución del problema, se considera que la corriente de viento y difusión vertical son despreciables, y los coeficientes de difusión horizontal son iguales ($k=k_x=k_y$).

La distribución granulométrica se define en función del parámetro ϕ , definido como $d=2^{-\phi}$, donde d es el diámetro de la partícula. Así el volumen total de dicho tamaño de partícula, está definido como (Word y Bursik, 1991)

$$V_\phi = \frac{V}{\sqrt{2\pi\sigma_\phi}} \exp \left(-\frac{(\phi - \phi_m)^2}{2\sigma_\phi^2} \right) \quad (3)$$

donde V es el volumen total emitido, ϕ_m y σ_ϕ son el valor medio y la desviación estándar de la distribución del parámetro ϕ .

La distribución del material expulsado en la columna eruptiva, se modela asumiendo la velocidad de salida del gas en la boca de la erupción, como un valor varios órdenes de magnitud superior respecto a la velocidad límite de caída de las partículas (Armienti et al., 1988).

$$V_\phi(z) = V_\phi \frac{A_\phi^2 \left(1 - \frac{z}{H_T} \right) \exp \left(A_\phi \left(\frac{z}{H_T} - 1 \right) \right)}{H_T (1 - (1 + A_\phi) \exp(-A_\phi))} \quad (4)$$

donde H_T es la altura máxima de la columna de humo y A_ϕ es un parámetro para la localización del punto de máxima concentración de partículas a una altura definida como $H_T(1-1/A_\phi)$, y se calcula como $A_\phi = A/v_{\phi 0}$, donde A es un factor de forma de la columna y $v_{\phi 0}$ es la velocidad límite de caída de las partículas de tamaño ϕ a nivel del mar.

Las velocidades terminales de partículas, se calculan en función del número de Reynolds, de la siguiente manera (Banadonna et al., 1998)

$$\begin{aligned}
v &= \sqrt{\frac{8\rho_p d g}{6\rho_a D}} & \text{Re} > 500 \\
v &= d \left(\frac{4g^2 \rho_p^2}{255\rho_a \mu_a} \right)^{2/3} & 0.4 < \text{Re} < 500 \\
v &= \frac{g\rho_p d^2}{18\mu_a} & \text{Re} < 0.4
\end{aligned} \tag{5}$$

donde ρ_p es la densidad de las partículas, d es el diámetro de la partícula, ρ_a es la densidad del aire, D es el parámetro de arrastre, y μ_a es la viscosidad del aire

La columna eruptiva se divide en N capas de igual altura Δz , en las cuales se asume que el campo de viento y la velocidad terminal de partículas permanecen constantes, de tal manera que una concentración de masa con volumen $V_{\phi j}$, localizada a una altura z_j , se trasladará por efecto de corrientes de viento y caída libre de partículas de tamaño ϕ , hasta un punto localizado en coordenadas $x_{\phi j}$, y $y_{\phi j}$, dadas por (Folch y Felpeto, 2005)

$$\begin{aligned}
x_{\phi j} &= x_o + \sum_{i=j}^1 W_{xi} \frac{z_i - z_{i-1}}{v_{\phi i}} \\
y_{\phi j} &= y_o + \sum_{i=j}^1 W_{yi} \frac{z_i - z_{i-1}}{v_{\phi i}}
\end{aligned} \tag{6}$$

donde x_o y y_o son las coordenadas del centro de emisión. Se considera adicionalmente que toda la masa es emitida en el mismo instante $t=0$. El tiempo total necesario para que una masa de partículas cruce todas las capas desde una posición z_j es

$$t_{fall} = \sum_{i=1}^j \Delta t_i \tag{7}$$

De esta manera, el espesor depositado por partículas de tamaño ϕ , con distribución inicial circular de radio r_o , inicialmente localizadas a una altura z_j es (Carslaw y Jaeger, 1959):

$$T_{\phi j} = \frac{V_{\phi j}}{2\pi r_o^2} \left[\text{erf} \left(\frac{r_o + r}{2\sqrt{kt_{fall}}} \right) + \text{erf} \left(\frac{r_o - r}{2\sqrt{kt_{fall}}} \right) \right] \text{erf} \left(\frac{r_o}{2\sqrt{kt_{fall}}} \right) \tag{8}$$

donde r es la distancia entre el centro de concentración inicial ($x_{o\phi j}$, $y_{o\phi j}$) y el punto donde el espesor está siendo evaluado, y erf corresponde a la función gaussiana de error.

Finalmente el espesor total de partículas depositado se calcula como la suma de las contribuciones de todas las capas de la columna, y todos los tamaños de partícula considerados.

$$T = \sum_{\phi_{\min}}^{\phi_{\max}} \sum_{j=1}^N T_{\phi_j} \quad (9)$$

Este espesor total corresponde a la medida de intensidad del modelo de caída de ceniza, es decir, es el parámetro que mejor correlaciona con el daño en los elementos expuestos.

3.2 Implementación de las metodologías de cálculo

Con el fin de aplicar las metodologías de cálculo presentadas, dentro del enfoque probabilista de la amenaza volcánica, hace falta implementarlas en un programa de computador que permita hacer las simulaciones de las erupciones y determinar la distribución final de los productos volcánicos. Estas metodologías están siendo implementadas en el software VHAST, el cual es el único módulo de amenaza volcánica existente en la actualidad que permite una representación totalmente probabilista de la amenaza. VHAST ha sido desarrollado por el contratista de este trabajo.

VHAST se ha desarrollado para que sus resultados puedan integrarse con la plataforma CAPRA para la del riesgo o potenciales consecuencias sociales y económicas sobre poblaciones e infraestructura expuestas, así como a sistemas comerciales de información geográfica (SIG), particularmente Surfer (versión 9 o superior).

4 Amenaza por Caída de Ceniza del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle

El Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle (CVPCC), ubicado en la Región de los Ríos de Chile (40,59° S – 72,11° W), está conformado por la caldera Cordillera Nevada, el estratovolcán Puyehue y el volcán fisural Cordón Caulle (Sernageomin, 2012b). Es considerado un complejo volcánico con riesgo muy alto y uno de los más activos de los Andes del Sur. Entre las erupciones recientes, las de mayor intensidad se registraron en los años 1921, 1960 y 2011. En la Tabla 3 se presenta el resumen de eventos históricos registrados en la base de datos del Instituto Smithsonian (2015).

Tabla 3. Resumen de eventos de erupción e índices de explosividad volcánica (VEI)

Fecha Inicio	Fecha Fin	Certeza de Erupción	VEI	Evidencia	Área o unidad de actividad
2011 Junio 4	2012 Abril 21 (?)	Confirmado	5	Observaciones Históricas	Cordón Caulle, Al norte de la fisura de la erupción de 1960
1990	Desconocido	Confirmado	1	Observaciones Históricas	Cordón Caulle
1960 Mayo 24	1960 Julio 30	Confirmado	3	Observaciones Históricas	Cordón Caulle
1934 Marzo 6	Desconocido	Confirmado	2	Observaciones Históricas	Cordón Caulle
1929 Enero 7	Desconocido	Confirmado	2	Observaciones Históricas	Cordón Caulle
1921 Dice 13	1922 Feb 12	Confirmado	3	Observaciones Históricas	Cordón Caulle- Cordillera Nevada
1919	1920	Confirmado	2	Observaciones Históricas	Cordón Caulle
1914 Febrero 8	Desconocido	Confirmado	2	Observaciones Históricas	Cordón Caulle
1905 (?)	Desconocido	Confirmado	2	Observaciones Históricas	Cordón Caulle
1893 (?)	Desconocido	Confirmado	2	Observaciones Históricas	Cordón Caulle
1759 (?)	Desconocido	Confirmado	2	Observaciones Históricas	Cordón Caulle
1220 ± 150 años	Desconocido	Confirmado		Radiocarbono (corregido)	
1140 ± 100 años	Desconocido	Confirmado		Radiocarbono (corregido)	

Fecha Inicio	Fecha Fin	Certeza de Erupción	VEI	Evidencia	Área o unidad de actividad
0860 ± 75 años	Desconocido	Confirmado	5	Radiocarbono (corregido)	Puyehue, MH tephra
0500 ± 100 años	Desconocido	Confirmado		Radiocarbono (corregido)	
0140 ± 300 años	Desconocido	Confirmado		Tephrochronology	Puyehue?
0110 ± 200 años	Desconocido	Confirmado		Radiocarbono (corregido)	
490 BCE ± 300 años	Desconocido	Confirmado		Radiocarbono (corregido)	
990 BCE ± 500 años	Desconocido	Confirmado		Tephrochronology	
1490 BCE ± 150 años	Desconocido	Confirmado		Radiocarbono (corregido)	
3250 BCE ± 2400 años	Desconocido	Confirmado		Ar/Ar	Puyehue
4230 BCE ± 200 años	Desconocido	Confirmado		Radiocarbono (corregido)	
4450 BCE ± 900 años	Desconocido	Confirmado		Ar/Ar	Puyehue
4460 BCE (?)	Desconocido	Confirmado		Tephrochronology	
4690 BCE ± 200 años	Desconocido	Confirmado		Radiocarbono (corregido)	
5080 BCE ± 150 años	Desconocido	Confirmado	5	Radiocarbono (corregido)	Puyehue, PU-2 tephra

Para el caso de la erupción de Junio de 2011, que tuvo una columna eruptiva de 13.5 km de alto, la caída de ceniza afectó a las ciudades argentinas de Villa La Angostura, San Carlos de Bariloche e Ing. Jacobacci, así como extensas áreas de cultivos (Wilson et al. 2013). La ceniza, se afectó la ganadería por la muerte de animales por inanición y deshidratación, hubo impactos en las redes vitales de las poblaciones afectadas, como las redes eléctricas, de suministro de agua potable y recolección de agua residual. También se vieron afectadas las comunicaciones, el transporte terrestre y aéreo.

A continuación se describe el procedimiento de levantamiento de información del complejo volcánico y el cálculo de la amenaza, siguiendo la metodología descrita en la Sección 2 del presente documento.

4.1 Topografía del área de estudio

Las imágenes para crear la malla de topografía del CVPCC se descargaron de ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM, 2010). Estas imágenes tienen resolución de 30 metros. Dado el alcance del proyecto, se ajustó la resolución de la malla de topografía a 300 m, ya que no se quiere un nivel de detalle alto. La extensión de la malla de topografía, que se muestra en la Figura 2, incluye el complejo volcánico y las poblaciones que están más expuestas a la caída de cenizas del mismo, que son Villa La Angostura, San Carlos de Bariloche e Ingeniero Jacobacci, todas ciudades en Argentina.

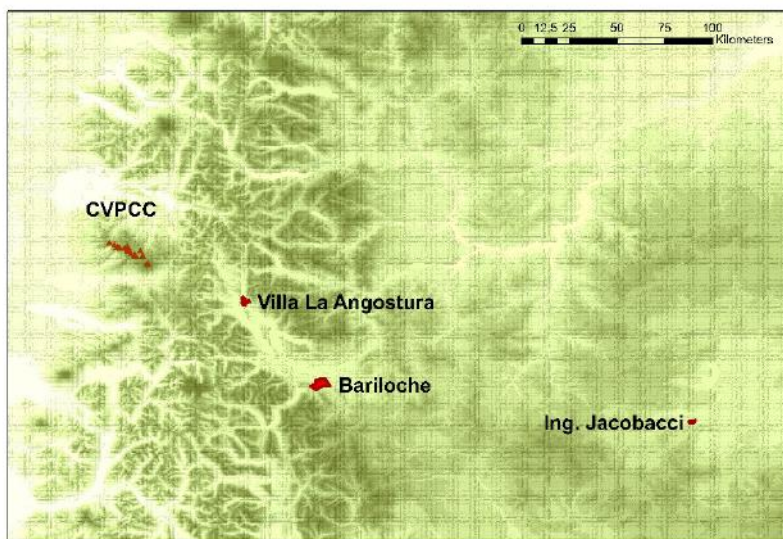


Figura 2. Malla de topografía del Complejo Volcánico Puyehue – Cordón Caulle.

4.2 Puntos de emisión

La localización geográfica de los centros de emisión del complejo volcánico se realizó siguiendo como guía el Mapa Preliminar de Peligros Volcánicos del CVPCC generado en el 2012 en la Subdirección Nacional de Geología como parte del Programa de Riesgo Volcánico del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin, 2012a).

En total se definieron 17 puntos de emisión en el complejo volcánico incluyendo los puntos identificados como cráter de las explosiones del Cordón Caulle en 1960 y 2011. También se incluyó el cráter del volcán Puyehue. En la Figura 3 se muestra las coordenadas este y norte de cada centro de emisión, y su localización en planta.

ID	Coordenada Este	Coordenada Norte
1	-72.216951	-40.508097
2	-72.133952	-40.545788
3	-72.144896	-40.523527
4	-72.191491	-40.533065
5	-72.241818	-40.509467
6	-72.174427	-40.542488
7	-72.171105	-40.543635
8	-72.168679	-40.545257
9	-72.204756	-40.505088
10	-72.204419	-40.52134
11	-72.205502	-40.516718
12	-72.255238	-40.503988
13	-72.249393	-40.506684
14	-72.201914	-40.524721
15	-72.112224	-40.583921
16	-72.267706	-40.494746
17	-72.291191	-40.484689

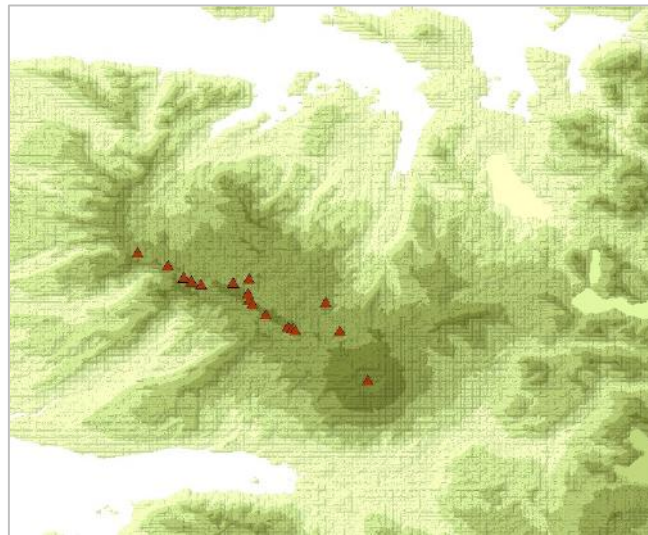


Figura 3. Localización de Puntos de Emisión en el Complejo Volcánico Puyehue Cordón-Caulle

4.3 Viento

En la Figura 4 se muestran la ubicación de las estaciones meteorológicas en la región cercana al área de estudio. Los puntos en verde indican aquellas estaciones en las que las series de información de magnitud y dirección del viento están completas, y los puntos rojos indican estaciones con información faltante. Para el caso del modelo de amenaza para el CVPCC únicamente se utilizó la información histórica de series de viento para la Estación de Bariloche, la estación más cercana a los puntos de interés (Bariloche y Villa la Angostura).

La estación meteorológica está ubicada en las coordenadas -71.16E y -41.15N a 840 metros sobre el nivel del mar. Esta estación cuenta con mediciones diarias de velocidad promedio del viento, velocidad máxima y dirección predominante para los años 2010 a 2014 (Weather Underground, 2015). La información está completa y no hubo que hacer procedimientos adicionales para completar espacios en blanco.

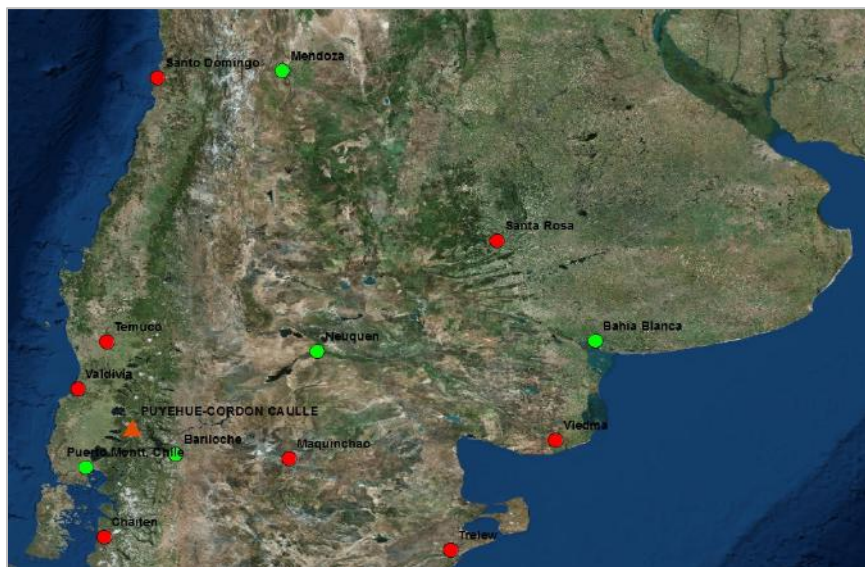


Figura 4. Localización de estaciones meteorológicas cercanas al Complejo Volcánico

En la Figura 5 se muestra la rosa de los vientos para el periodo de 2010 a 2014. Se puede ver que las direcciones predominantes de origen del viento en la estación de Bariloche son Noroeste y Oeste-Noroeste. Las ciudades de Villa La Angostura y Bariloche están ubicadas en dirección Sureste del complejo volcánico, por lo que se confirma que son poblaciones expuestas a la pluma de ceniza de una erupción que origine en este complejo.

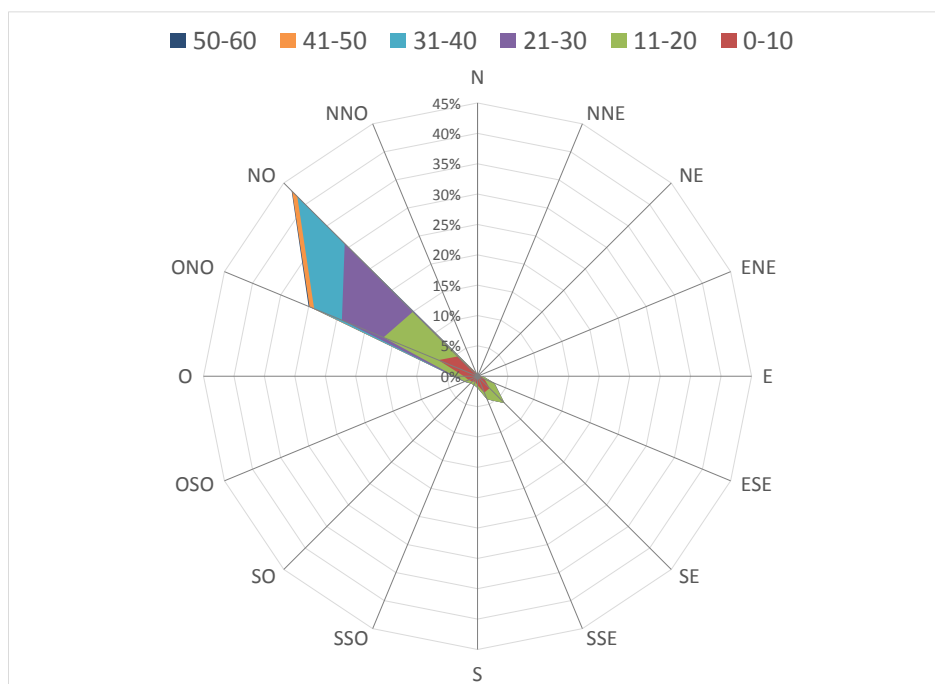


Figura 5. Rosa de los vientos. Información 2010-2014. Frecuencia y velocidad.

En cuanto a las magnitudes de velocidad promedio, para el periodo 2010-2014 se puede observar que predominan velocidades por debajo de 30 Km/h (8.3 m/s). El rango de mayor participación está entre 11 y 20 Km/h (3.0 y 5.5 m/s).

Tabla 4. Distribución de repeticiones según rango de velocidad promedio de viento para la estación Bariloche 2010-2014.

VELOCIDAD PROMEDIO (Km/h)	
RANGO	REPETICIONES
0-10	499
11-20	560
21-30	433
31-40	292
41-50	37
50-60	4

Para generar el campo de viento fijo en el programa VHASt se utilizaron los valores promedio de velocidad de viento, para las dos direcciones fijas predominantes, identificadas en a rosa de los vientos (Figura 5). Dado que la magnitud de la velocidad del viento aumenta con la altura, medida desde la superficie de la tierra, se estableció el perfil de velocidades de viento utilizando la ley de la potencia con $a=0.14$.

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^a \quad (10)$$

Donde v_1 es la velocidad del viento a la altura h_1 y v_2 es la velocidad del viento a la altura h_2 .

Los perfiles de viento de velocidades promedio, para las dos direcciones predominantes, se muestran en la siguiente Figura 6. En estos perfiles se estableció la tropopausa, la capa límite atmosférica que divide el flujo turbulento de la tropósfera del flujo laminar de la estratósfera, en 11 km de altitud. Por encima de la tropopausa, la magnitud del viento se considera constante. Para los eventos de erupción con VEI mayores a 4, se esperan columnas eruptivas de altura mayor a 11 km, por lo que también se espera que la ceniza de menor tamaño alcance distancias más lejanas del centro de emisión.

Las direcciones predominantes del viento, que sirven de dato de entrada al programa de cálculo de la amenaza, se establecieron en 315° y 330° , siendo esta la dirección hacia donde se dirige el viento, medida en grados desde el eje Este.

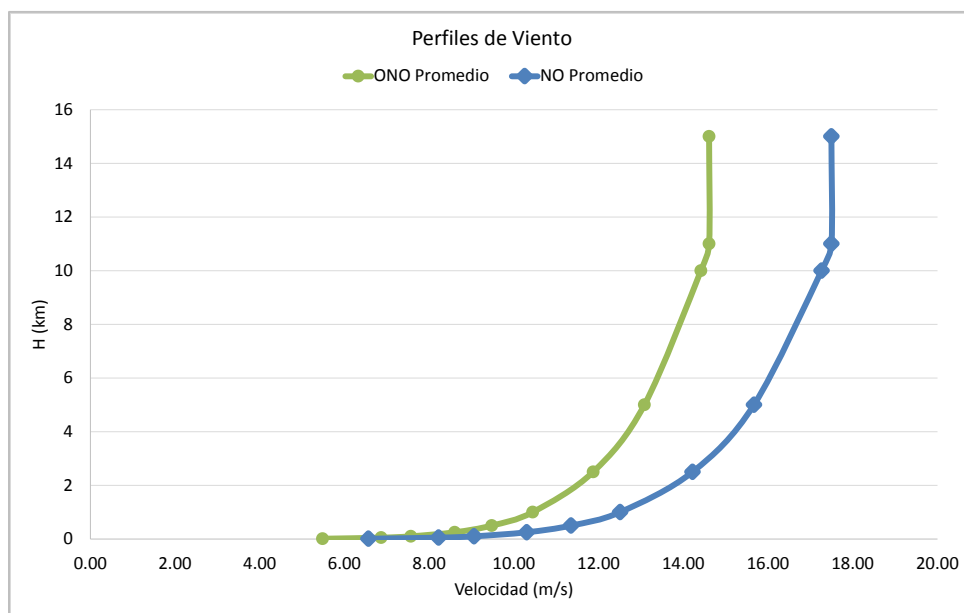


Figura 6. Perfil de Viento direcciones Oeste-Noroeste y Noroeste para estación Bariloche

4.4 Granulometría

Para determinar la distribución de tamaños de las partículas del material emitido en erupciones del complejo volcánico Puyehue-Cordón Caulle se consultaron publicaciones recientes como Pitolesi et al. (2015) y Bonadonna et al. (2015) que estudiaron la dinámica de la erupción del 2011 del CVPCC y la sedimentación de material emitido en este evento.

El tamaño y composición del material emitido por el CVPCC se obtuvo de la Tabla 1 de Pitolesi et al (2015). Para calcular la amenaza de caída de ceniza, se definió el tamaño promedio de partícula¹ $Md\phi$ como -1.52 y su desviación estándar $\sigma\phi$ promedio como 1.55. El valor de $Md\phi$ de -1.52 equivale a una partícula de 2.87 mm, consistente con lo reportado en el estudio de la Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina (2011) en el cual se encontraron partículas entre 1 y 3 mm en los depósitos piroclásticos del evento de 2011 en Villa La Angostura. La curva que describe la distribución de tamaños para la estimación de la amenaza se muestra en la siguiente gráfica.

¹ $Md\phi$ y $\sigma\phi$ son la media y la desviación estándar de la distribución de tamaño de partículas respectivamente, con $\phi = -\log 2D$ (donde D es el diámetro de la partícula en milímetros).

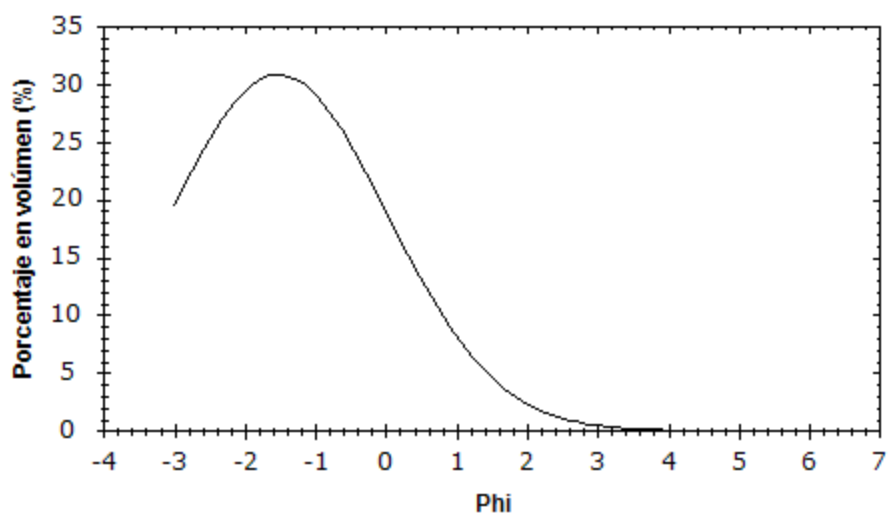


Figura 7. Curva granulométrica de material emitido por el CVPCC.

4.5 Tasas de excedencia

La definición de la recurrencia de las erupciones o valores de tasa de excedencia para VEI se obtuvieron de la base de datos del Instituto Smithsonian (2015) que se muestran en la Tabla 3. El valor máximo registrado de Índice de Explosividad Volcánica (VEI por sus siglas en inglés) es de 5, para el evento de Junio de 2011.

Los valores de tasa de excedencia utilizados en el modelo se muestran en la Tabla 5, estos son los eventos esperados por año según la magnitud de la erupción volcánica.

Tabla 5. Tasa de excedencia según intensidad de la erupción para el CVPCC.

VEI	Tasa de Excedencia (Evento/año)
1	0.044
2	0.040
3	0.012
4	0.004
5	0.002

4.6 Intensidad de las erupciones

La intensidad de las erupciones volcánicas se puede medir en la altura máxima de la columna eruptiva, según el VEI o Índice de Explosividad Volcánica como se explica en la Sección 1.2. Los valores utilizados para el modelo de la amenaza del CVPCC se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Altura media y desviación estándar de la columna eruptiva según intensidad de la erupción para el CVPCC.

VEI	Hc (Km)	σHc (Km)
1	0.5	0.05
2	3	0.3
3	9	0.9
4	15	1.5
5	25	2.5

5 Elementos Expuestos

Para caracterizar los elementos expuestos a la amenaza de caída de ceniza del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle se hizo el levantamiento de las ciudades de San Carlos de Bariloche y Villa La Angostura. Para determinar las características de las edificaciones en cada ciudad, se hizo el levantamiento estimado, haciendo uso de imágenes satelitales y fotografías de la zona, del número de pisos, el sistema estructural de la cubierta (incluido el material e inclinación), el uso, la categoría socioeconómica y el estado de la construcción. La descripción del proceso de la generación de esta base de datos se presenta a continuación

5.1 Villa La Angostura

La ciudad de Villa La Angostura se levantó predio a predio con el uso de imágenes satelitales como referencia. Por inspección visual, consultando fotografías disponibles en Internet o con la herramienta Street View de Google, a cada predio se le asignaron los siguientes campos:

- Uso: Residencial, Comercial o Institucional
- Categoría socioeconómica: Alta, Media o Baja
- Estado de la construcción: Bueno, Regular o Malo
- Tipo de material de la cubierta: Liviano o pesado
- Número de pisos

Con el fin de ajustar las funciones de vulnerabilidad definidas para la caída de ceniza, se asignó a cada predio el sistema estructural siguiendo el procedimiento que se explica a continuación.

5.1.1 Procedimiento para asignar sistema estructural

La información sobre el tipo de materiales de construcción se obtuvo del Censo Nacional de Población, Hogares y Vivienda 2010. Para estimar el porcentaje de uso de cada tipo de material, se consultaron los cuadros *H10-P. Hogares por tipo de vivienda, según material predominante de las paredes exteriores de la vivienda y presencia de revoque. Año 2010* para la Provincia de Neuquén disponible para consulta en línea (INDEC 2010).

De acuerdo a los resultados, materiales como ladrillo, piedra, bloque, hormigón y madera son de uso predominante en la región. En el Anexo 1 se presenta el mapa de asignación de sistema estructural en la ciudad.

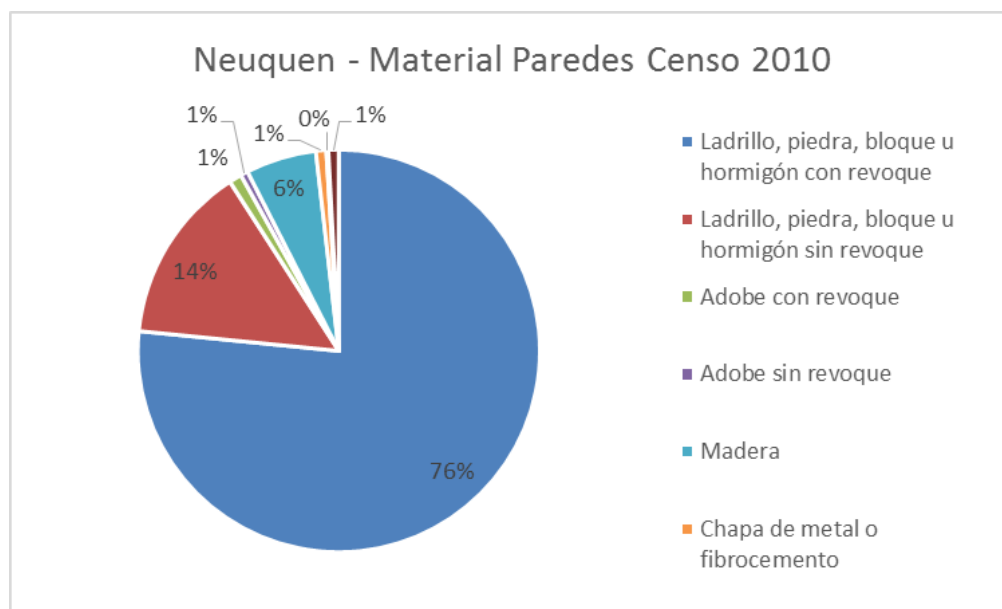


Figura 8. Resultados Censo 2010 para materiales en Provincia de Neuquen

Los sistemas estructurales que se asignaron fueron hormigón (18%), mampostería (72%), madera (6%), adobe (2%) y de construcción informal (1%). La asignación del sistema estructural a cada uno de los predios se hizo según la categoría socio-económica del predio, su uso y el número de pisos. Ahora bien, como para un mismo tipo de predio (misma categoría socio-económica, mismo uso e igual número de pisos) se puede tener diferente material de construcción, cada tipo de predio tiene una distribución de sistema estructural por porcentajes, como se muestra en la Tabla 7. Estos porcentajes son el resultado de ajustar el total de número de predios según tipo, con los porcentajes de materiales resultado del censo para la provincia (ver Tabla 8).

Dentro de la distribución de porcentajes de participación de sistema estructural según el tipo de predio, se realizaron consideraciones especiales según condiciones de sitio. Por ejemplo, para todos los predios de más de 4 pisos, indiferente de su uso o categoría socio-económica, se le asignó como sistema estructural hormigón. También, para el caso de la categoría socio-económica Alta, se asignó un alto uso de madera en cabañas de vivienda.

Tabla 7. Distribución de sistema estructural por clasificación socioeconómica, uso de suelo y número de pisos Villa La Angostura

Tipo	Clasificación socioeconómica	Uso del suelo	# Pisos	Sistema Estructural						Total
				Hormigón	Mampostería	Adobe	Madera	Informal	Sin_cubierta	
A	Alta	Residencial	1 y 2 pisos	20%	30%	0%	50%	0%	0%	100%
			3 y 4 pisos	50%	50%	0%	0%	0%	0%	100%
			> 4 pisos	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
B	Alta	Comercial	1 y 2 pisos	20%	30%	0%	50%	0%	0%	100%
			3 y 4 pisos	50%	50%	0%	0%	0%	0%	100%
			> 4 pisos	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
C	Alta	Institucional	1 y 2 pisos	50%	50%	0%	0%	0%	0%	100%
			3 y 4 pisos	50%	50%	0%	0%	0%	0%	100%
			> 4 pisos	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
D	Media	Residencial	1 y 2 pisos	20%	75%	0%	5%	0%	0%	100%
			3 y 4 pisos	80%	20%	0%	0%	0%	0%	100%
			> 4 pisos	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
E	Media	Comercial	1 y 2 pisos	20%	80%	0%	0%	0%	0%	100%
			3 y 4 pisos	80%	20%	0%	0%	0%	0%	100%
			> 4 pisos	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
F	Media	Institucional	1 y 2 pisos	20%	80%	0%	0%	0%	0%	100%
			3 y 4 pisos	50%	50%	0%	0%	0%	0%	100%
			> 4 pisos	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
G	Baja	Residencial	1 y 2 pisos	0%	75%	15%	0%	10%	0%	100%
			3 y 4 pisos	0%	100%	0%	0%	0%	0%	100%
			> 4 pisos	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
H	Baja	Comercial	1 y 2 pisos	0%	100%	0%	0%	0%	0%	100%
			3 y 4 pisos	0%	100%	0%	0%	0%	0%	100%
			> 4 pisos	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
I	Baja	Institucional	1 y 2 pisos	0%	100%	0%	0%	0%	0%	100%
			3 y 4 pisos	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
			> 4 pisos	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
J	No Urbanizable	Conservación		0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%

Tabla 8. Número y porcentaje de edificaciones por sistema estructural en censo y en base de datos Villa La Angostura

		Sistema Estructural						Total
		Mampostería	Hormigón	Adobe	Madera	Informal	Sin_cubierta	
En shape	Porcentaje	18.9%	72.7%	1.6%	5.8%	1.1%	0.0%	100%
	# Predios	544	2095	47	166	31	0	2883
Según censo	Porcentaje	19.0%	72.7%	1.6%	5.7%	1.0%	0.0%	100%
	# Predios	548	2096	46	164	29	0	2883

5.1.2 Valoración de elementos expuestos

De acuerdo con Eleisgui (2011), las cotizaciones de inmuebles en Villa La Angostura son muy parecidas a las de Bariloche. Por esta razón, a pesar de las diferencias de tamaño y población de las dos ciudades, se asignó como valor medio de m² construido \$1595 USD reportado en Bariloche en junio de 2015 (Guarino, 2015).

Finalmente, el valor de reposición del predio es el producto de su área, por el número de pisos, por el valor de metro cuadrado, y multiplicado por un índice que ajusta los valores según uso del predio. Estos valores (ver Tabla 9) fueron los mismos índices utilizados para el perfil nacional de riesgo. El valor de referencia es \$1595 USD.

Tabla 9. Índices de ajuste para definir valor de reposición según uso y categoría socioeconómica.

Valores de referencia	
Residencial Bajo	0.4
Residencial Medio	1.0
Residencial Alto	1.6
Comercial	1
Industrial	1.6
Institucional	1

5.2 San Carlos de Bariloche

Para la ciudad de San Carlos de Bariloche, por ser de mayor tamaño y no contar con información catastral completa, se hicieron procedimientos adicionales para caracterizar los predios según categoría socioeconómica, uso, número de pisos, y sistema estructural.

5.2.1 Geometría de manzanas

La geometría de las manzanas se obtuvo de la página web de la Secretaria de Desarrollo Estratégico de Bariloche, de los planos de Código Urbano y Código de Planeamiento.

5.2.2 Categoría Socio-económica

Para asignar la categoría socioeconómica de cada manzana (Alta, Media o Baja) se utilizó como guía el estudio de Matossian (2011) en el que analiza la distribución geográfica de las clases sociales en Bariloche y divide la ciudad en áreas y enclaves sociales por barrios (Ver Mapa 1 Matossian, 2011). La asignación de categoría socioeconómica se da por la siguiente tabla:

Tabla 10. Clasificación socioeconómica según tipo de manzanas homogéneas según Matossian (2010).

Clasificación socioeconómica	
Alta	A, G, Villa Catedral, Centro Atómico Bariloche
Media	B, C, D, E, EL Pinar, Colonia Suiza, Peumayen
Baja	F, H, Union, 2 de abril, Playa Serena
No Urbanizable	Zonas verdes, Aeropuerto

5.2.3 Densidad

La asignación de densidad por manzana (Alta, Media, Baja) se realizó siguiendo dos fuentes de información. Inicialmente se siguió con los resultados del estudio de Matossian (2011) que relaciona la densidad de construcción con la categoría socioeconómica. También se ajustó la asignación de densidad según el Código de Planeamiento de Bariloche (Secretaría de Desarrollo Estratégico Tabla 6.1, 6.3.1, 6.3.2, 6.3.3). Para esto, a cada manzana en el shape de exposición se le asignó el código de sub-área definido en el código.

Por último, se hizo una verificación visual, con una imagen satelital de referencia para ajustar valores de densidad que no se ajustaron a lo encontrado en sitio.

5.2.4 Número de pisos

La asignación de número de pisos se realizó en dos etapas. Para el centro de la ciudad, la parte de mayor densidad, se hizo un levantamiento manual del número de pisos promedio por manzana, consultando fotografías disponibles en Internet o con la herramienta Street View de Google. Para la zona menos densa, se utilizó como referencia la Sección 12 del Código de Planeamiento Urbano: Número de pisos y altura máxima de las construcciones (Secretaría de Desarrollo Estratégico).

5.2.5 Uso

Si bien la asignación de categoría socioeconómica, densidad y número de pisos se hizo a escala de manzanas, para tener mayor detalle en el análisis se discretizó cada manzana en predios. Este procedimiento se hizo con una herramienta desarrollada por el consultor, que asigna un número de puntos en la manzana igual a área de la manzana dividido por el tamaño promedio de lote. Para manzanas de Alta densidad se definió un tamaño promedio de lote de 200 m², para densidad Media predios de 2,000 m² y para densidad baja predios de 2'000.000 m² (200 ha). Los predios resultantes se verificaron visualmente para verificar que se cumpliera el parámetro de densidad.

Luego de tener como unidad de análisis predios, cada uno con los parámetros de categoría socioeconómica, código de sub-área según Código de Planeamiento y número de pisos de su respectiva manzana, se precedió a asignar el parámetro de uso de suelo. Como en cada manzana puede haber diferentes usos de suelo, se tomó como referencia la Sección 5 del Código de Planeamiento Urbano: Distribución funcional de superficies de edificaciones por áreas (Secretaría de Desarrollo Estratégico). La distribución porcentual de usos según sub-área se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Definición de distribución de usos en manzanas homogéneas en San Carlos de Bariloche

CLAS_POT	Descripción	Uso				
		Residencial	Comercial	Institucional	Conservación	Total
A1	Microcentro ciudad	0.20	0.60	0.20	-	100%
A2	Periferia Microcentro	0.30	0.60	0.10	-	100%
B	Subcentro de Calle Onelli	0.20	0.50	0.30	-	100%
C	Residencial I	0.60	0.30	0.10	-	100%
D	Residencial II	0.60	0.30	0.10	-	100%
GE-B2	Subárea costa a reservar para desarrollo agrícola	0.90	0.10	-	-	100%
GE-D	Subárea de pampa de Buenleu o	0.70	0.20	0.10	-	100%
GE-E	Subáreas no habitacionales agrícolas o forestales	0.90	0.10	-	-	100%
No Urbanizable		-	-	-	1.00	100%
RE-A	Regeneración ecológica	0.50	0.40	0.10	-	100%
RE-B1	Regeneración ecológica	0.50	0.40	0.10	-	100%
RE-B3	Regeneración ecológica	0.50	0.40	0.10	-	100%
RE-D	Regeneración ecológica	1.00	-	-	-	100%
RU	Renovación Urbana - Proyectos de vivienda social	0.90	0.05	0.05	-	100%
RUP	Renovación Urbana - Protección	-	-	-	1.00	100%
RURAL	Uso Agrícola	1.00	-	-	-	100%

A cada predio se le asignó de forma automática un uso de suelo según el valor de sub-área del predio. Como en el Código de Planeamiento se incluyen las manzanas que tiene como destino

conservación ecológica, en el shape de exposición se incluyeron estas áreas con uso Conservación-No Urbanizable.

Luego de la asignación de uso a cada predio, se hizo una inspección visual para ajustar valores que no correspondían con la imagen satelital de referencia. Para el caso de uso institucional, se hicieron algunas asignaciones manuales en predios cuyo uso es conocido como instituciones educativas, hospitales, centros administrativos de la ciudad o museos. En el caso de uso comercial, también se ajustaron algunos predios manualmente, para asignar uso a hoteles, centros comerciales, centros de descanso o aeropuerto.

5.2.6 Procedimiento para asignar sistema estructural

Para el caso de sistema estructural se siguió el mismo procedimiento de asignación que para Villa La Angostura. La información sobre el tipo de materiales de construcción se obtuvo del Censo Nacional de Población, Hogares y Vivienda 2010. Para estimar el porcentaje de uso de cada tipo de material, se consultaron los cuadros *H10-P. Hogares por tipo de vivienda, según material predominante de las paredes exteriores de la vivienda y presencia de revoque. Año 2010* para la Provincia de Río Negro disponible para consulta en línea (INDEC 2010).

De acuerdo a los resultados, materiales como ladrillo, piedra, bloque, hormigón y madera son de uso predominante en la región. En el Anexo 2 se presenta el mapa de asignación de sistema estructural en la ciudad.

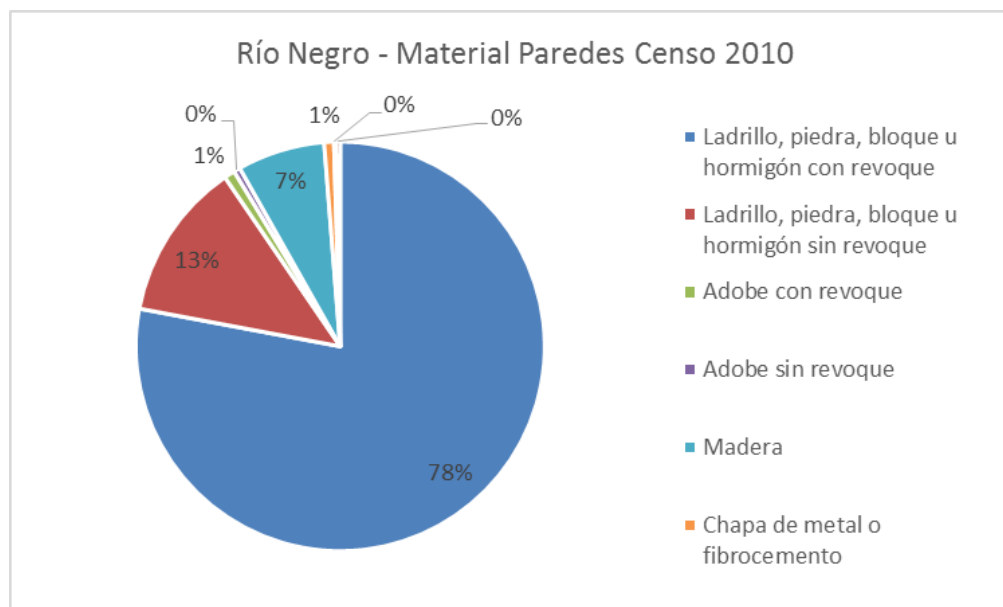


Figura 9. Resultados Censo 2010 para materiales en Provincia de Río Negro

A continuación se presenta la distribución de porcentajes de uso estructural según el tipo de manzana. Estos porcentajes son el resultado de ajustar el total de número de predios según tipo, con los porcentajes de materiales resultado del censo para la provincia.

Tabla 12. Distribución de sistema estructural por clasificación socioeconómica, uso de suelo y número de pisos Bariloche

Tipo	Clasificación socioeconómica	Uso del suelo	# Pisos	Sistema Estructural						Total
				Hormigón	Mampostería	Adobe	Madera	Informal	Sin_cubierta	
A	Alta	Residencial	1 y 2 pisos	20%	60%	0%	20%	0%	0%	100%
			3 y 4 pisos	50%	50%	0%	0%	0%	0%	100%
			> 4 pisos	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
B	Alta	Comercial	1 y 2 pisos	20%	65%	0%	15%	0%	0%	100%
			3 y 4 pisos	50%	50%	0%	0%	0%	0%	100%
			> 4 pisos	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
C	Alta	Institucional	1 y 2 pisos	30%	70%	0%	0%	0%	0%	100%
			3 y 4 pisos	50%	50%	0%	0%	0%	0%	100%
			> 4 pisos	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
D	Media	Residencial	1 y 2 pisos	15%	85%	0%	0%	0%	0%	100%
			3 y 4 pisos	50%	50%	0%	0%	0%	0%	100%
			> 4 pisos	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
E	Media	Comercial	1 y 2 pisos	10%	90%	0%	0%	0%	0%	100%
			3 y 4 pisos	80%	20%	0%	0%	0%	0%	100%
			> 4 pisos	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
F	Media	Institucional	1 y 2 pisos	20%	80%	0%	0%	0%	0%	100%
			3 y 4 pisos	50%	50%	0%	0%	0%	0%	100%
			> 4 pisos	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
G	Baja	Residencial	1 y 2 pisos	0%	75%	15%	0%	10%	0%	100%
			3 y 4 pisos	0%	100%	0%	0%	0%	0%	100%
			> 4 pisos	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
H	Baja	Comercial	1 y 2 pisos	0%	100%	0%	0%	0%	0%	100%
			3 y 4 pisos	0%	100%	0%	0%	0%	0%	100%
			> 4 pisos	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
I	Baja	Institucional	1 y 2 pisos	0%	100%	0%	0%	0%	0%	100%
			3 y 4 pisos	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
			> 4 pisos	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
J	No Urbanizable	Conservación		0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%

Tabla 13. Número y porcentaje de edificaciones por sistema estructural en censo y en base de datos Bariloche

		Sistema Estructural						Total
		Mampostería	Hormigón	Adobe	Madera	Informal	Sin_cubierta	
En shape	Porcentaje	17.4%	68.2%	1.5%	7.2%	1.0%	4.8%	100%
	# Manzanas	454	1782	39	188	26	126	2614
Según censo	Porcentaje	17.2%	68.9%	1.3%	6.6%	0.9%	4.8%	100%
	# Manzanas	457	1801	34	173	23	126	2614

5.2.7 Valoración de elementos expuestos

Se asignó como valor medio de m² construido \$1595 USD reportado en Bariloche en junio de 2015 (Guarino, 2015).

Finalmente, el valor de reposición del predio es el producto de su área, por el número de pisos, por el valor de metro cuadrado, y multiplicado por un índice que ajusta los valores según uso del predio. Estos valores (ver

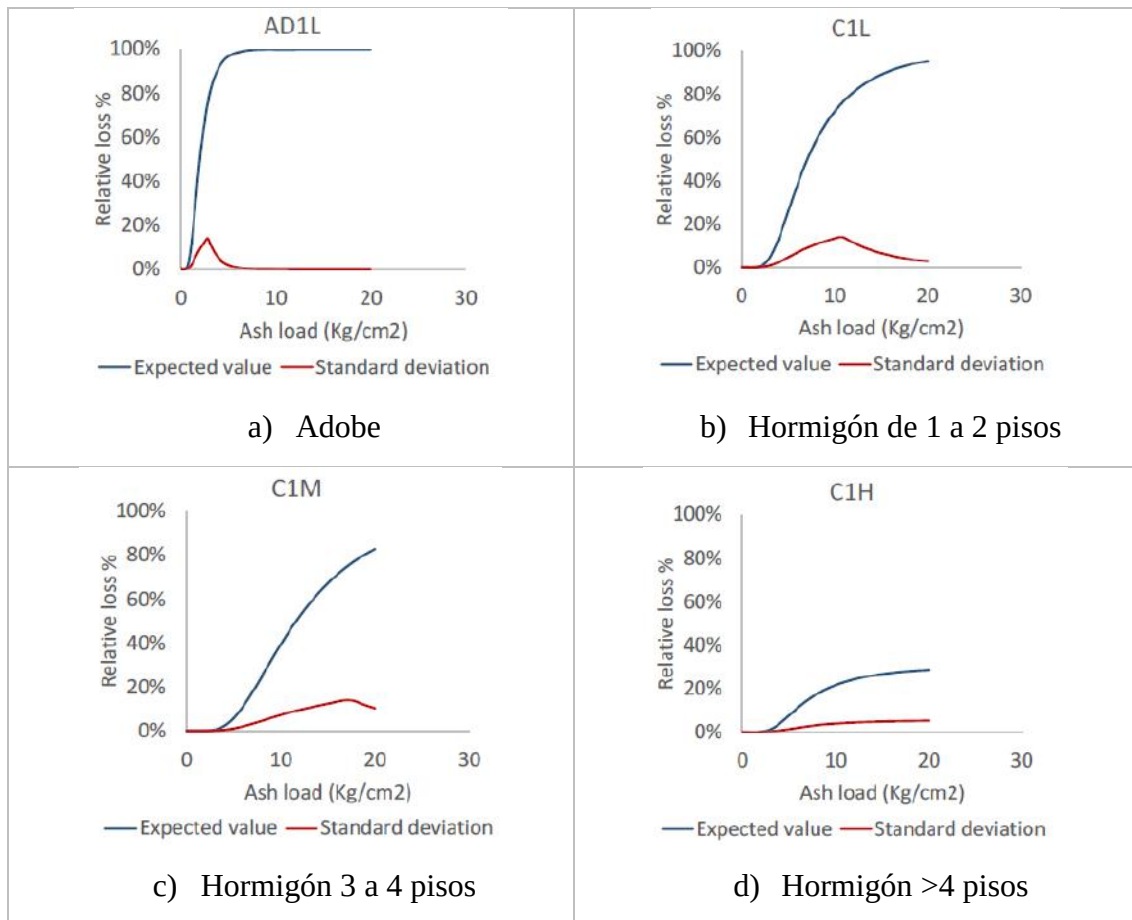
Tabla 14) fueron los mismos índices utilizados para el perfil nacional de riesgo. El valor de referencia es \$1595 USD.

Tabla 14. Índices de ajuste para definir valor de reposición según uso y categoría socioeconómica.

Valores de referencia	
Residencial Bajo	0.4
Residencial Medio	1.0
Residencial Alto	1.6
Comercial	1
Industrial	1.6
Institucional	1

6 Vulnerabilidad

Las funciones de vulnerabilidad relacionan la pérdida económica esperada sobre el valor de reposición de los elementos expuestos. Para las construcciones regulares incluidas en el portafolio de elementos expuestos de las ciudades de Villa La Angostura y San Carlos de Bariloche se definieron seis tipos constructivos, a partir de la asignación de sistema estructural. En este caso se asignó la función de vulnerabilidad para caída de ceniza desarrolladas por Geoscience Australia, para el GAR15 (Global Risk Assessment 2015). En la curvas presentadas en la Figura 10 se muestra la curva del valor esperado (en azul) y la curva de la desviación estándar (en rojo) que conforman las funciones de vulnerabilidad para el análisis probabilista de riesgo.



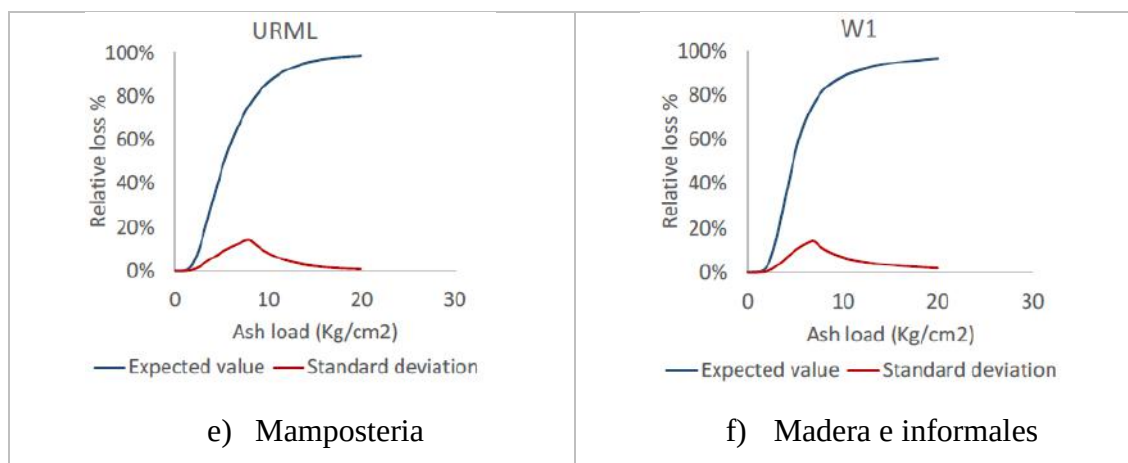


Figura 10. Curvas de vulnerabilidad para amenaza de caída de ceniza, según material y altura de la edificación.

De acuerdo a estas curvas se puede ver cómo materiales como el adobe y la madera son más vulnerables (mayor pérdida relativa a una menor carga de ceniza) que materiales como el hormigón. Cabe resalta que para este caso, la vulnerabilidad de una edificación no se ve afectada por el tipo de cubierta ni el uso de la construcción.

7 Resultados de la evaluación del riesgo por caída de ceniza

A continuación se muestran los resultados de evaluación de riesgo por caída de ceniza del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle. El análisis se hizo para los escenarios que representan las mayores pérdidas en las ciudades de Villa La Angostura y San Carlos de Bariloche, para las dos direcciones de viento fijas seleccionadas 315° y 330°. En la Tabla 15 se muestra el resumen de los resultados para los 4 escenarios de mayores pérdidas, dos para cada dirección de viento. En estos resultados se puede ver que las pérdidas son menores para la dirección del viento 315° incluso si la pluma de ceniza cubre mayores áreas de San Carlos de Bariloche, cosa que no ocurre cuando la dirección del viento es 330°. También se puede ver que las frecuencias de ocurrencia de los escenarios son muy bajas, lo que indica periodos de retorno mayores a 20,000 años. Los escenarios de mayores pérdidas se dan para índices de explosividad volcánica de 5, el mayor valor de VEI considerado en este estudio y registrado en el CVPCC. A continuación se presentan los resultados

Tabla 15. Resumen de resultados para escenarios de mayores pérdidas por dirección del viento

Dirección del viento	315° Este	315° Este	330° Este	330° Este
Escenario	12	60	8	12
VEI	5	5	5	5
Frecuencia	4.40E-05	4.40E-05	3.07E-05	3.07E-05
PAE [\$USD]	\$ 374,670	\$ 267,013	\$ 161,109,000	\$ 144,863,000
Valor expuesto [\$USD]	\$ 26,895,000,000	\$ 26,895,000,000	\$ 26,895,000,000	\$ 26,895,000,000
Prima [‰]	0.01	0.01	5.99	5.39

7.1 Dirección del Viento 315° Este

Los escenarios de la dirección del viento de 315° (medidos desde el eje Este) son los que presentan menores pérdidas, comparados con los de dirección de viento 330° Este. Se presentan los resultados para el Escenario 12 y el Escenario 60, de VEI 5, con valores de PAE menores a 0.01‰.

7.1.1 Escenario 12

En la Figura 11 se muestra la extensión la pluma de ceniza resultante de una erupción de VEI 5, alcanzando a las ciudades de Villa La Angostura (ubicada a la izquierda) y San Carlos de Bariloche (ubicada a la derecha). El detalle de la intensidad de caída cenizas para las ciudades se muestra en la Figura 12, en la que se muestran curvas con la misma medida de caída de ceniza en kg/cm^2 . Para la ciudad de Villa La Angostura se espera caída de 0.75 kg/cm^2 en promedio, mientras que para San Carlos de Bariloche los valores de intensidad no superan 0.5 kg/cm^2 . De acuerdo con las curvas de vulnerabilidad, la pérdida relativa es baja, por lo que los resultados de pérdida anual esperada también son bajos.

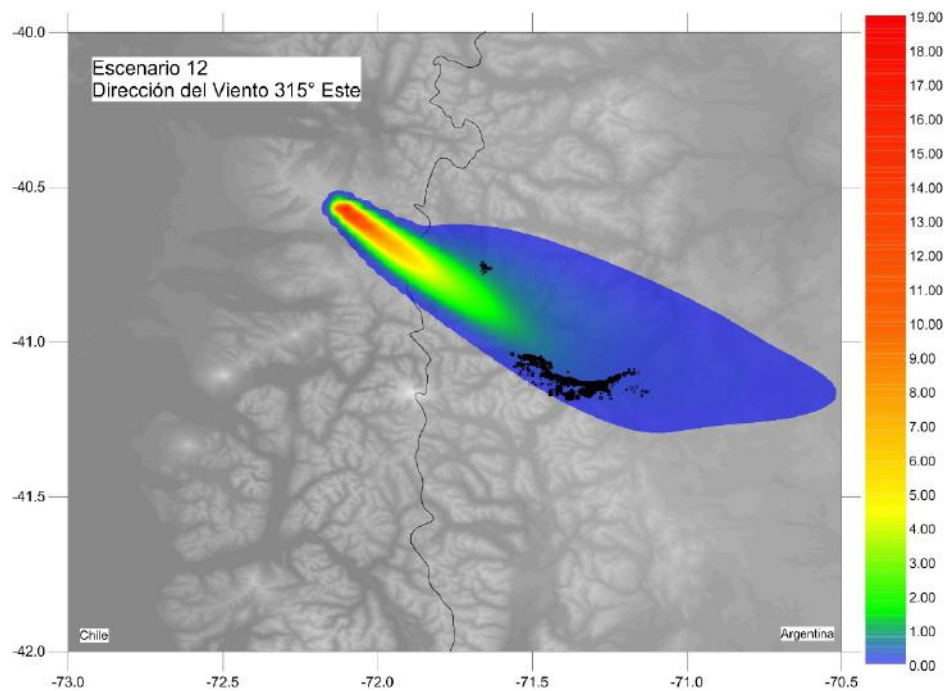


Figura 11. Pluma de ceniza para escenario 12 de VEI = 5 y dirección de viento 315°

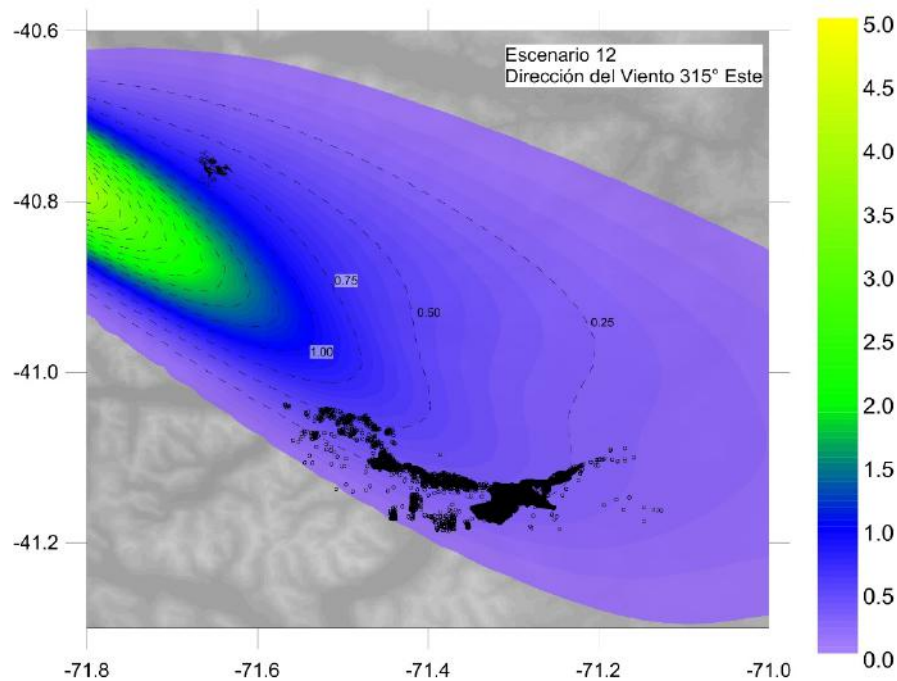


Figura 12. Pluma de ceniza para escenario 12 de VEI = 5 y dirección de viento 315° - Detalle ciudades

En la Figura 13 se muestran los resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para cada manzana en San Carlos de Bariloche, en ésta se puede ver cómo las pérdidas en todos los casos son bajas (menores a \$2000 USD), con poco casos en el centro de la ciudad que presentan mayores pérdidas. La Figura 14 muestra el valor relativo de la pérdida anual esperada con respecto a su valor expuesto. En este caso se puede ver que aunque se mantienen valores de

pérdida bajos (menores a 1%) y vale la pena resaltar que las manzanas de mayor pérdida (de la Figura 13) no necesariamente son los más vulnerables o las que persentan mayores pérdidas respecto a su valor expuesto.

De la misma forma, la Figura 15 muestra los resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para cada predio en Villa La Angostura y la Figura 16 muestra el valor relativo de la pérdida, con respecto a su valor expuesto. Para Villa La Angostura, por la mayor cercanía al Complejo Volcánico Puyehue Cordón Caulle, se esperan mayores concentraciones de ceniza lo que resulta en mayores pérdidas anuales esperadas. En esta ciudad se esperan pérdidas hasta de \$7,000 USD, sin embargo cuando se evalúa la pérdida con respecto al valor expuesto de la edificación no se superan valores de 4%.

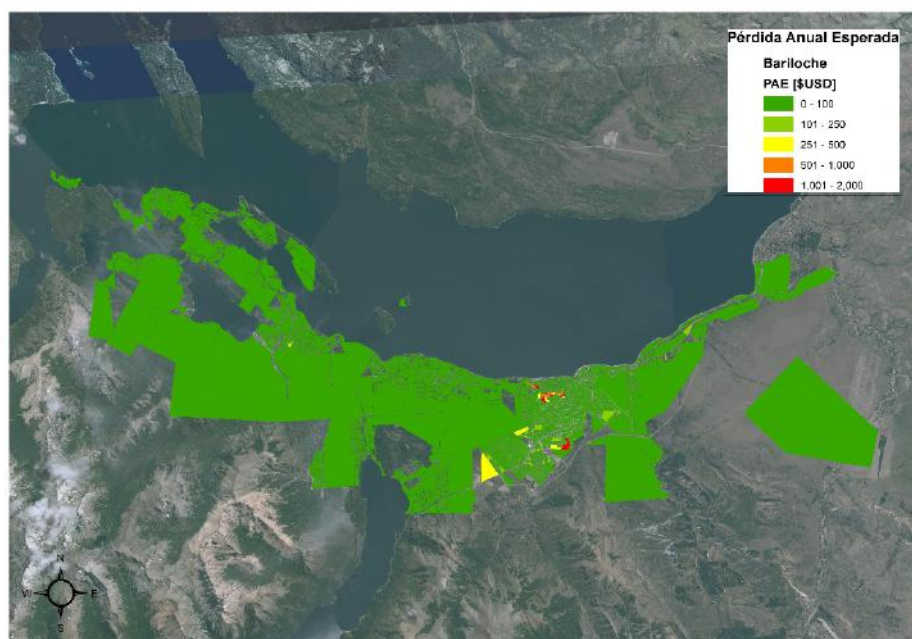


Figura 13. Resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para San Carlos de Bariloche – Es12 DV315

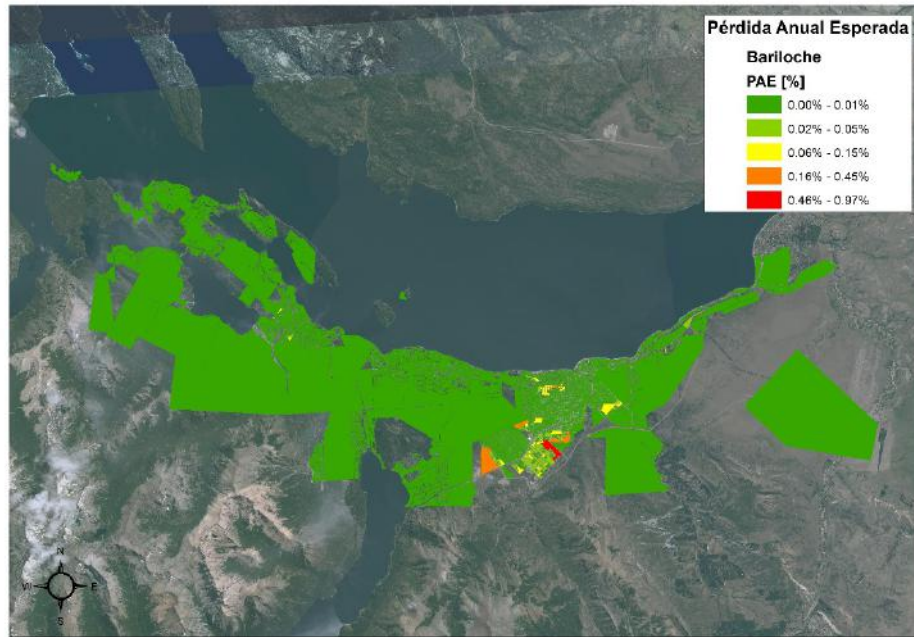


Figura 14. Resultados de PAE relativa a su valor expuesto para Bariloche – Es12 DV315



Figura 15. Resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para Villa La Angostura – Es12 DV315

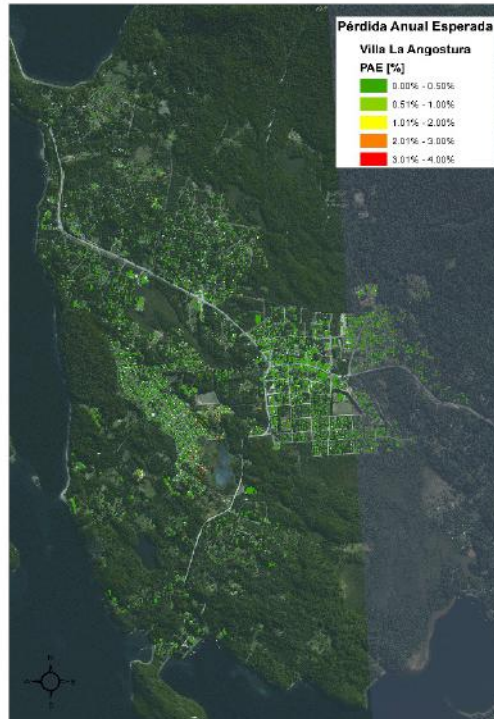


Figura 16. Resultados de PAE relativa a su valor expuesto para Villa La Angostura – Es12 DV315

7.1.2 Escenario 60

En la Figura 17 se muestra la extensión la pluma de ceniza resultante de una erupción de VEI 5, alcanzando a las ciudades de Villa La Angostura (ubicada a la izquierda) y San Carlos de Bariloche (ubicada a la derecha). El detalle de la intensidad de caída cenizas para las ciudades se muestra en la Figura 18, en la que se muestran curvas con la misma medida de caída de ceniza en kg/cm^2 . Para la ciudad de Villa La Angostura se espera caída de $0.50 \text{ kg}/\text{cm}^2$ en promedio, mientras que para San Carlos de Bariloche los valores de intensidad se ubican entre 0.25 y $1.0 \text{ kg}/\text{cm}^2$. De acuerdo con las curvas de vulnerabilidad, la pérdida relativa es baja para estos valores de intensidad, por lo que los resultados de pérdida anual esperada también son bajos.

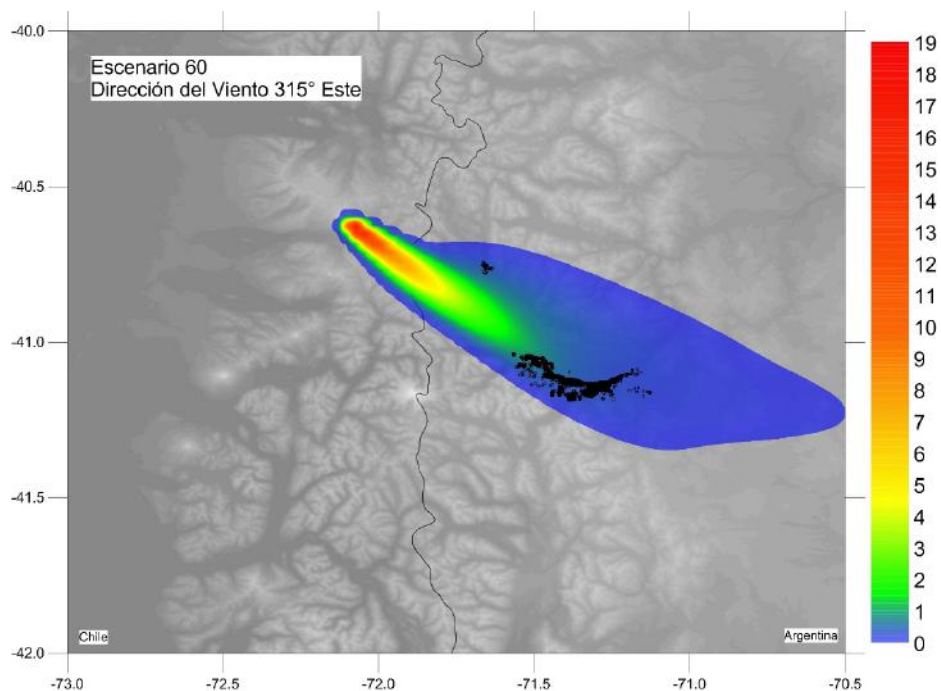


Figura 17. Pluma de ceniza para escenario 60 de VEI = 5 y dirección de viento 315°

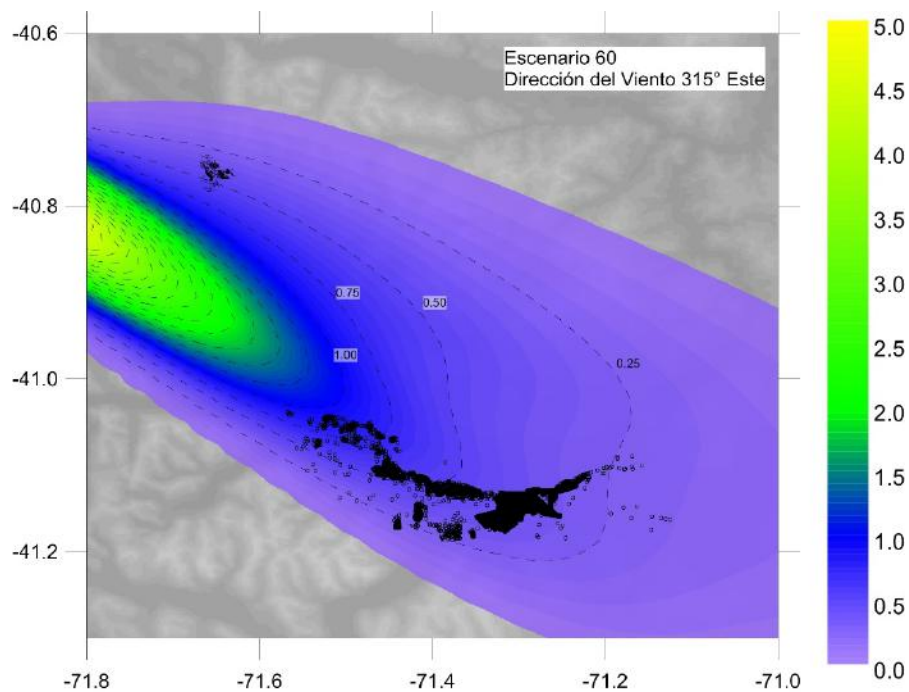


Figura 18. Pluma de ceniza para escenario 60 de VEI = 5 y dirección de viento 315° - Detalle ciudades

En la Figura 19 se muestran los resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para cada manzana en San Carlos de Bariloche, en ésta se puede ver cómo las pérdidas en todos los casos son bajas (menores a \$1000 USD), y para este escenario con mayores pérdidas económicas en la zona nor-oeste de la ciudad que presenta mayor acumulación de ceniza, sin que represente una amenaza alta. La Figura 20 muestra el valor relativo de la pérdida anual esperada con respecto a

su valor expuesto. Para el escenario 60 se puede ver los valores relativos de pérdidas son bajos (menores a 5%) y no necesariamente las manzanas con mayor pérdida económica tienen mayor pérdida relativa, por lo que no son las más vulnerables dentro de la ciudad.

De la misma forma, la Figura 21 muestra los resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para cada predio en Villa La Angostura y la Figura 22 muestra el valor relativo de la pérdida, con respecto a su valor expuesto. Para Villa La Angostura, se tienen menores pérdidas en la ciudad dado la menor cantidad de ceniza acumulada, comparando los escenarios 12 y 60.

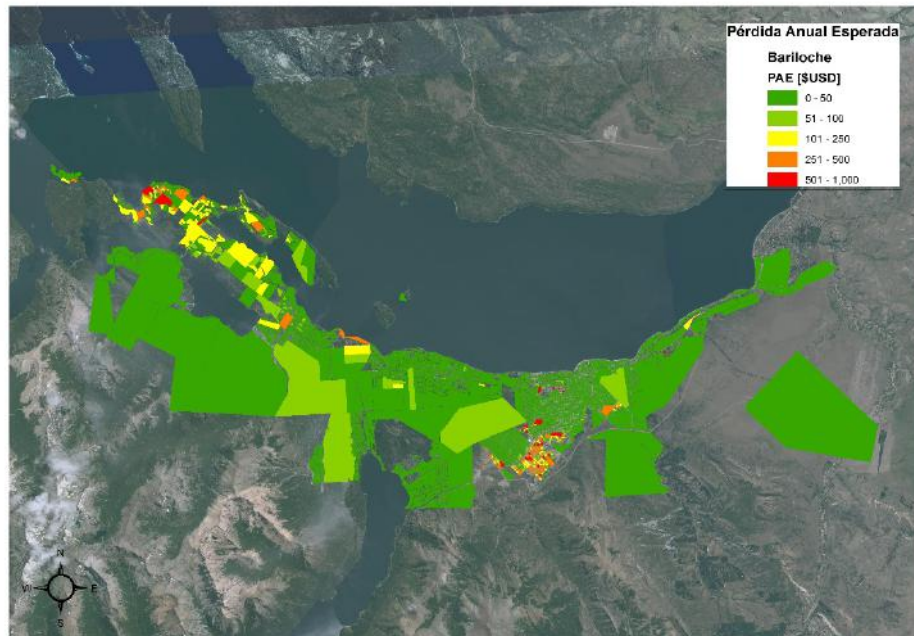


Figura 19. Resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para San Carlos de Bariloche – Es60 DV315

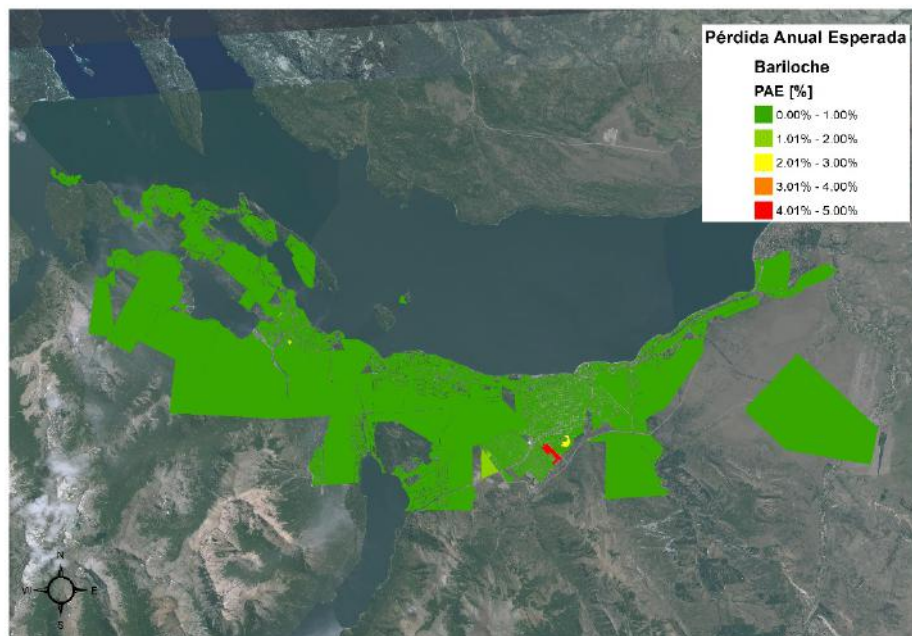


Figura 20. Resultados de PAE relativa a su valor expuesto para Bariloche – Es60 DV315

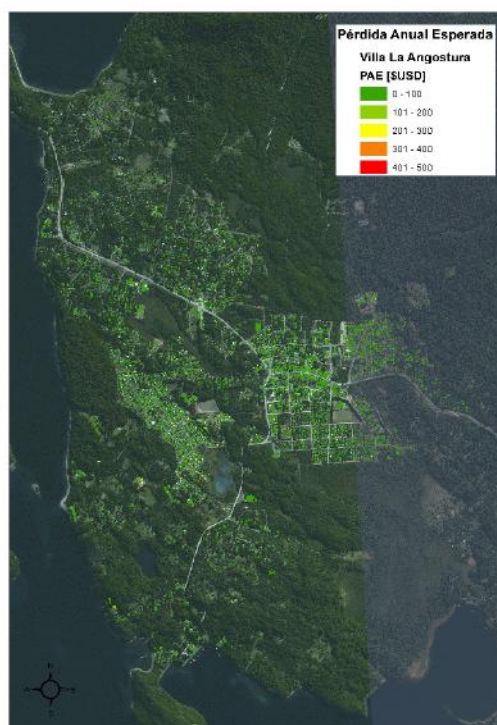


Figura 21. Resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para Villa La Angostura – Es60 DV315

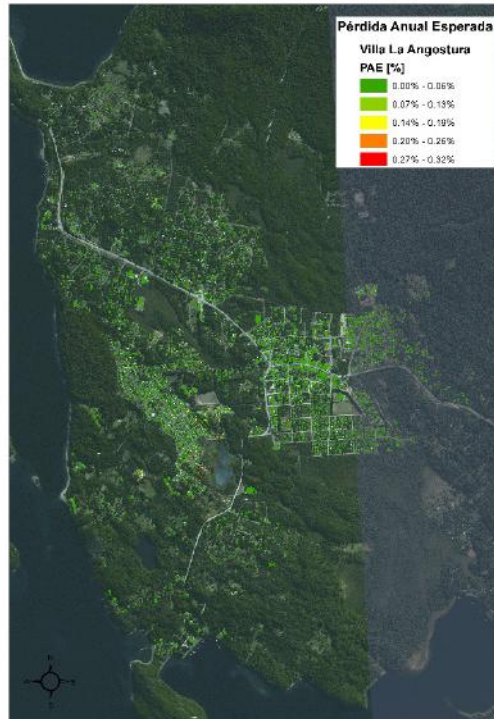


Figura 22. Resultados de PAE relativa a su valor expuesto para Villa La Angostura – Es60 DV315

En general, los resultados para la dirección de viento 315° (medidos desde el eje Este) muestran las posibles formas que puede tomar la pluma de ceniza, y cómo los resultados en términos de métricas de riesgo pueden variar según las condiciones que se presenten, con ocasiones en las que se presenten mayores daños en una ciudad que en otra sin necesidad de afirmar que las pérdidas en Villa La Angostura todas las veces van a ser mayores por está más cerca del complejo volcánico.

7.2 Dirección del Viento 330° Este

Los escenarios de la dirección del viento de 330° (medidos desde el eje Este) presentan mayores pérdidas globales, comparadas con los resultados de la dirección de viento 315° Este. En este caso, las pérdidas se concentran en la ciudad de Villa La Angostura. Se presentan los resultados para el Escenario 8 y el Escenario 12, de VEI 5, con valores de PAE menores a 6%.

7.2.1 Escenario 8

En la Figura 23 se muestra la extensión la pluma de ceniza resultante de una erupción de VEI 5, alcanzando a las ciudades de Villa La Angostura (ubicada a la izquierda) y un poco de la ciudad de San Carlos de Bariloche (ubicada a la derecha). El detalle de la intensidad de caída cenizas para las ciudades se muestra en la Figura 12, en la que se muestran curvas con la misma medida de caída de ceniza en kg/cm^2 . Para la ciudad de Villa La Angostura se espera caída mayores a $2.50 \text{ kg}/\text{cm}^2$ en promedio, mientras que para San Carlos de Bariloche los valores de intensidad no

superan 0.25 kg/cm^2 en una pequeña parte de la ciudad al nor-este. Por la dirección y la forma de la pluma de ceniza, no se presenta amenaza considerable en San Carlos de Bariloche.

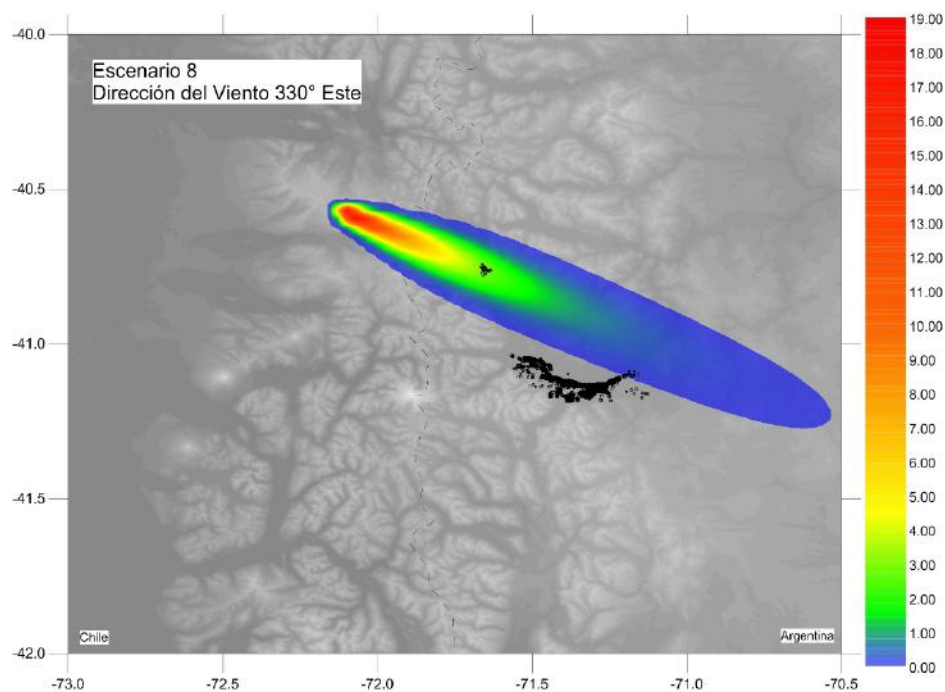


Figura 23. Pluma de ceniza para escenario 8 de VEI = 5 y dirección de viento 330°

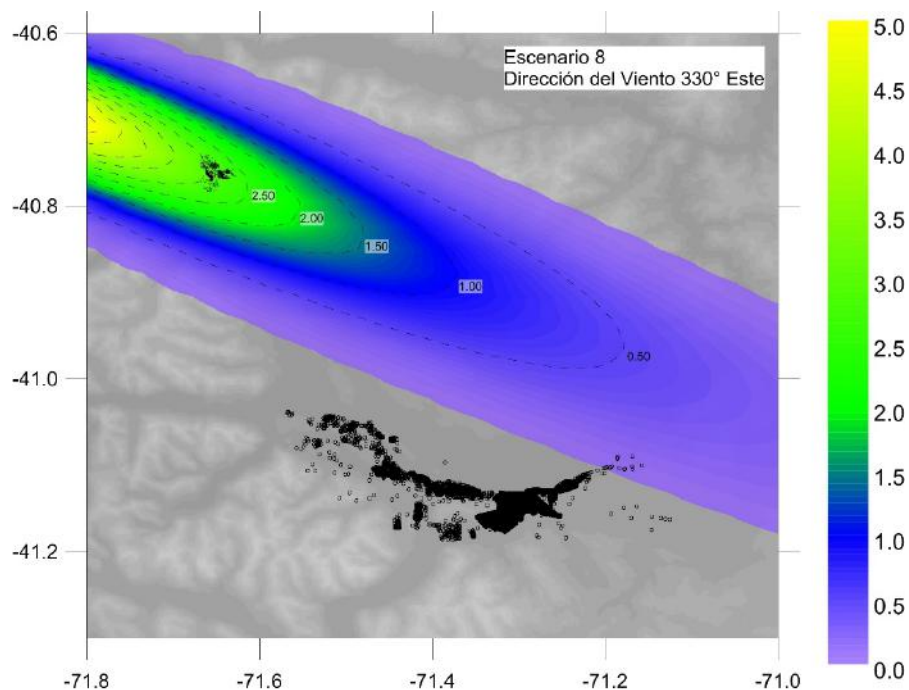


Figura 24. Pluma de ceniza para escenario 8 de VEI = 5 y dirección de viento 330° - Detalle ciudades

En la Figura 25 se muestran los resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para cada manzana en San Carlos de Bariloche, en ésta se puede ver cómo las pérdidas en todos los casos

son muy bajas (pocos centavos de dólar). La Figura 26 muestra el valor relativo de la pérdida anual esperada con respecto a su valor expuesto. En este caso se puede ver las pérdidas son cero, debido a la ausencia de amenaza.

De otro lado, la Figura 27 muestra los resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para cada predio en Villa La Angostura y la Figura 28 muestra el valor relativo de la pérdida, con respecto a su valor expuesto. Para Villa La Angostura, por la mayor cercanía al Complejo Volcánico Puyehue Cordón Caulle y la dirección del viento, se esperan mayores concentraciones de ceniza lo que resulta en mayores pérdidas anuales esperadas, superando el millón de dólares en algunos predios en el centro de la ciudad. En cuanto a la pérdida relativa al valor expuesto de cada predio, se tienen casos en que se supera el 70%, lo que indica en caso que se presente el evento de erupción volcánica de estas características, se espera pérdida total de muchos de los inmuebles expuestos.

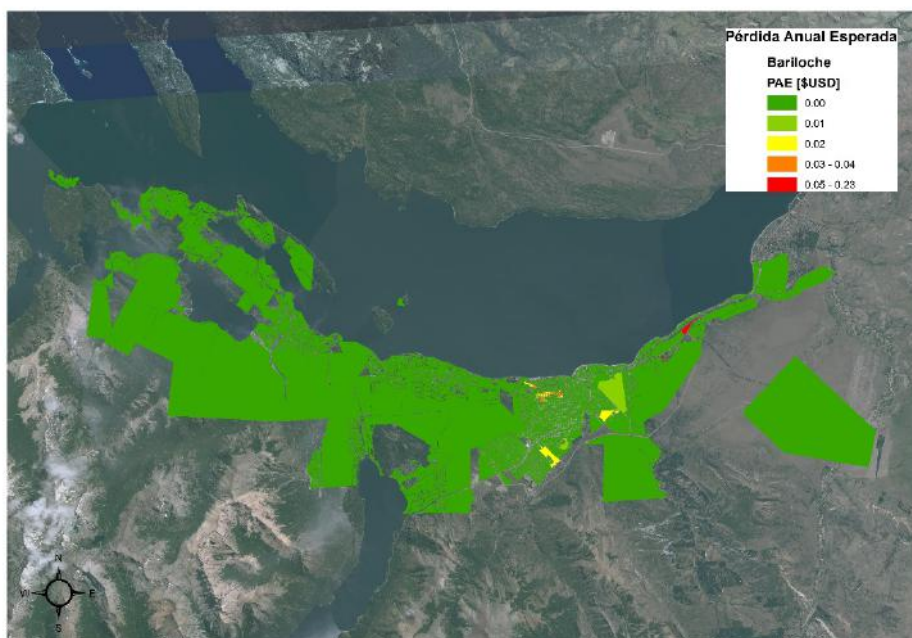


Figura 25. Resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para San Carlos de Bariloche – Es8 DV330



Figura 26. Resultados de PAE relativa a su valor expuesto para Bariloche – Es8 DV330

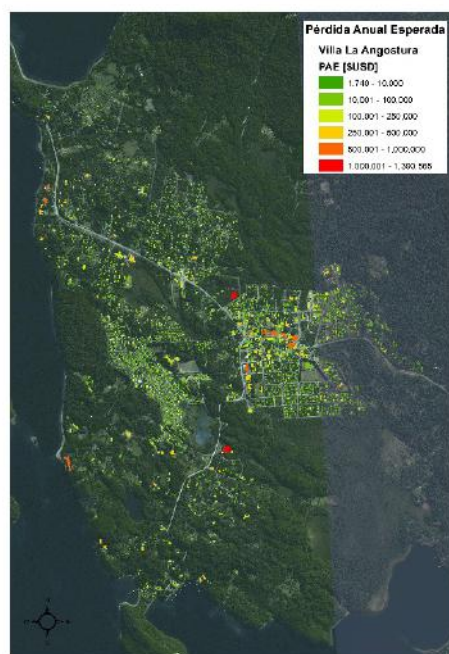


Figura 27. Resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para Villa La Angostura – Es8 DV330

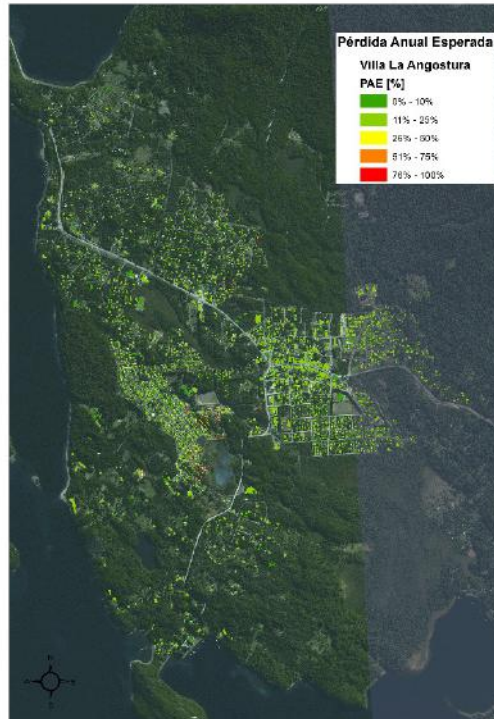


Figura 28. Resultados de PAE relativa a su valor expuesto para Villa La Angostura – Es8 DV330

7.2.2 Escenario 12

En la Figura 29 se muestra la extensión la pluma de ceniza resultante de una erupción de VEI 5, alcanzando a las ciudades de Villa La Angostura (ubicada a la izquierda) y no se presenta caída de ceniza superior a 0.05 kg/cm^2 en la ciudad de San Carlos de Bariloche (ubicada a la derecha). El detalle de la intensidad de caída cenizas para las ciudades se muestra en la Figura 30, en la que se muestran curvas con la misma medida de caída de ceniza en kg/cm^2 . Para la ciudad de Villa La Angostura se espera caída mayores a 3.00 kg/cm^2 en promedio. Por la dirección y la forma de la pluma de ceniza, no se presenta amenaza considerable en San Carlos de Bariloche.

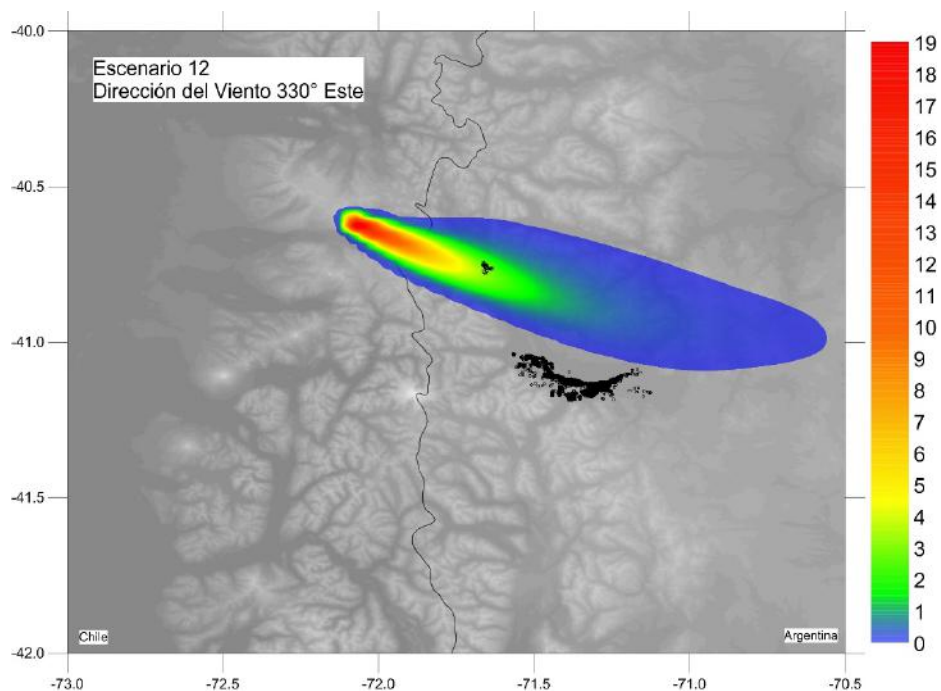


Figura 29. Pluma de ceniza para escenario 12 de VEI = 5 y dirección de viento 330°

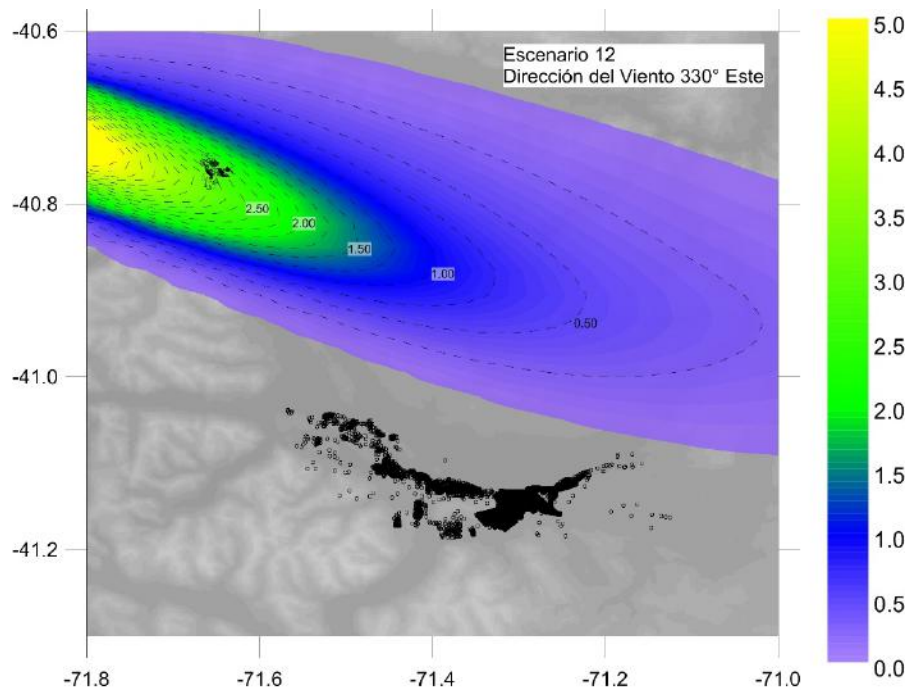


Figura 30. Pluma de ceniza para escenario 12 de VEI = 5 y dirección de viento 330° - Detalle ciudades

En la Figura 31 se muestran los resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para cada manzana en San Carlos de Bariloche, y en Figura 32 muestra el valor relativo de la pérdida anual esperada con respecto a su valor expuesto. En este caso se puede ver las pérdidas son cero, debido a la ausencia de amenaza.

De otro lado, la Figura 33 muestra los resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para cada predio en Villa La Angostura y la Figura 34 muestra el valor relativo de la pérdida, con respecto a su valor expuesto. Para Villa La Angostura, por la mayor cercanía al Complejo Volcánico Puyehue Cordón Caulle y la dirección del viento, se esperan mayores concentraciones de ceniza lo que resulta en mayores pérdidas anuales esperadas, superando el millón de dólares en algunos predios en el centro de la ciudad. En cuanto a la pérdida relativa al valor expuesto de cada predio, se tienen casos en que se supera el 70%, lo que indica en caso que se presente el evento de erupción volcánica de estas características, se espera pérdida total de muchos de los inmuebles expuestos.

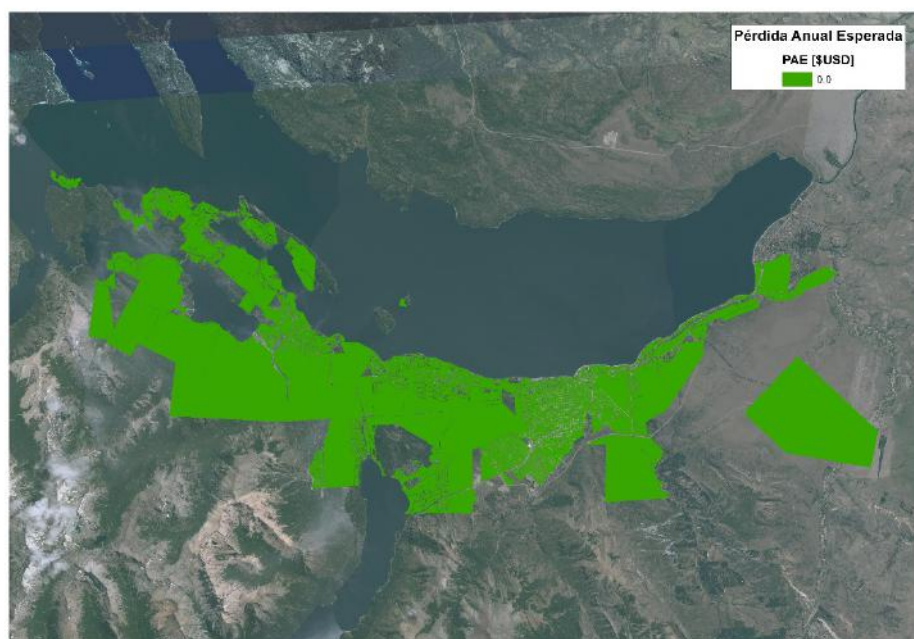


Figura 31. Resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para San Carlos de Bariloche – Es12 DV330

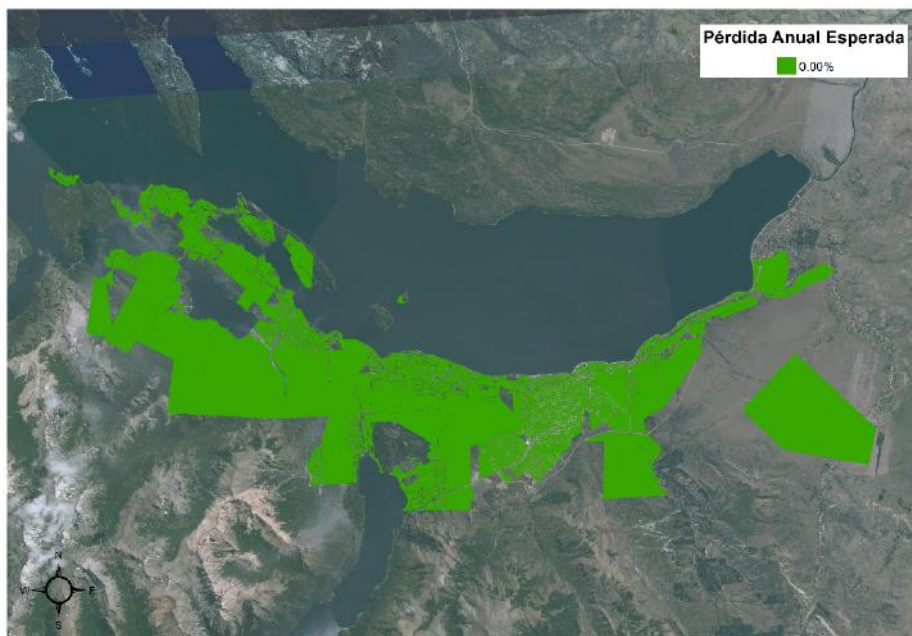


Figura 32. Resultados de PAE relativa a su valor expuesto para Bariloche – Es12 DV330

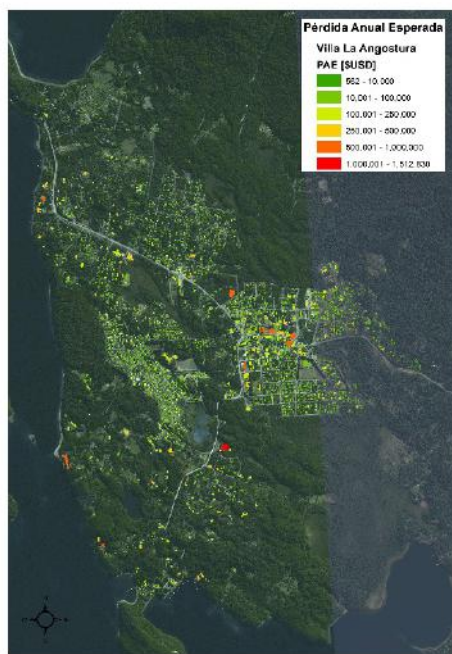


Figura 33. Resultados de pérdida anual esperada (en dólares) para Villa La Angostura – Es12 DV330

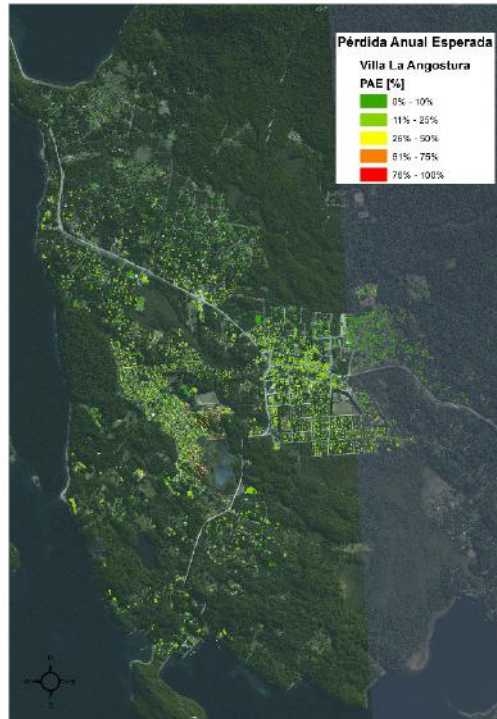


Figura 34. Resultados de PAE relativa a su valor expuesto para Villa La Angostura – Es12 DV330

En general, los resultados para la dirección de viento 330° (medidos desde el eje Este) muestran las posibles formas que puede tomar la pluma de ceniza, y el efecto de la dirección del viento en la amenaza que puede enfrentar una ciudad. En este caso también se puede ver cómo los resultados en términos de métricas de riesgo pueden variar según las condiciones que se presenten, de cero a cuantiosas pérdidas en una misma región causado por un mismo evento de erupción volcánica.

8 Conclusiones

En este informe se presenta una evaluación del riesgo por caída de ceniza por erupciones en el Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle. Este complejo volcánico está ubicado en la Cordillera de Los Andes en Chile, muy cercano a la frontera con Argentina. El presente informe se concentro en los efectos de la caída de ceniza de erupciones del CVPCC en territorio argentino, particularmente en las poblaciones de Villa La Angostura y San Carlos de Bariloche, ciudades que han sido afectadas por caída de ceniza en el pasado. Estos resultados son ilustrativos de los niveles de riesgo presentes en la región, pues el análisis ha tenido en cuenta los componentes principales que son la amenaza, los elementos expuestos y la vulnerabilidad para evaluar el riesgo físico.

La metodología seguida en el presente estudio tiene en cuenta el VEI o Índice de explosividad volcánica como medida de la magnitud de las erupciones del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle. Se evaluaron valores de 1 a 5 VEI, de acuerdo con los valores históricos registrados en bases de datos mundialmente reconocidas.

El proceso de caracterización del complejo volcánico permitió definir condiciones de topografía, localización de puntos de emisipon, características de las erupciones como su magnitud y frecuencia, condiciones de dirección y velocidad de viento en la región, y distribución de tamaños de partículas de productos emitidos por el volcán. Toda esta información tomada de fuentes oficiales o publicaciones académicas reconocidas. También se hizo la caracterización de los elementos expuestos en las ciudades de Villa La Angostura y San Carlos de Bariloche.

Los resultados de la evaluación de riesgo por caída de ceniza se presenta por escenarios, en los que se muestra las diferentes formas e intensidades que puede tener una pluma de ceniza, y sus efectos en pérdidas en las ciudades de interés. De acuerdo a los resultados presentados se puede ver cómo la dirección del viento influye en qué tanto queda expuesta una ciudad pero es la velocidad del viento y su capacidad de transportar ceniza la que indica la intensidad de la amenaza en cierto punto. Esto se puede ver con los resultados de los escenarios de la dirección de viento 330, en lo que no se presenta amenaza en San Carlos de Bariloche pero la intensidad de la misma es muy alta en Villa La Angostura.

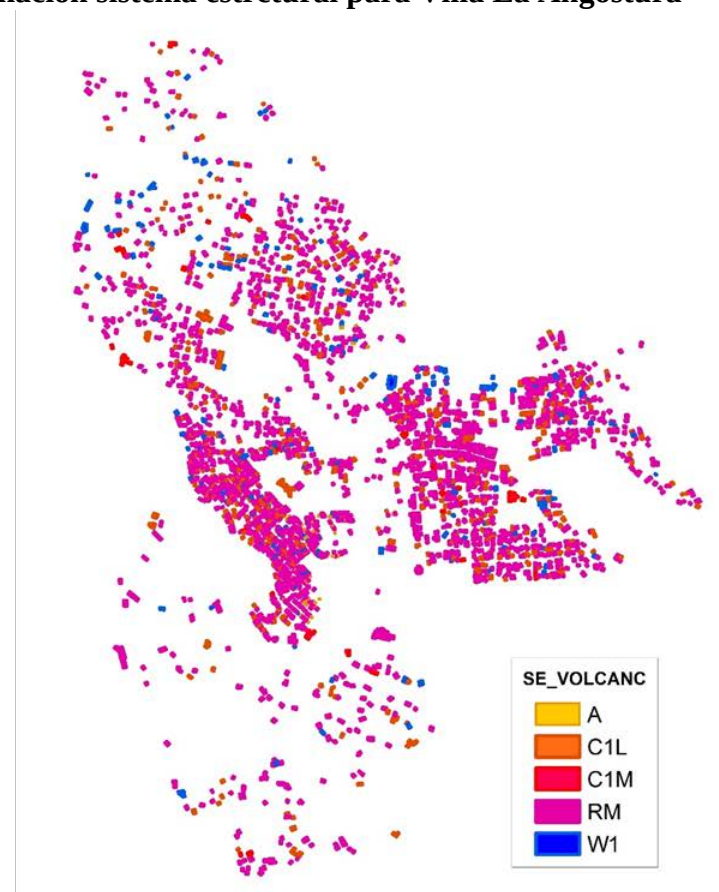
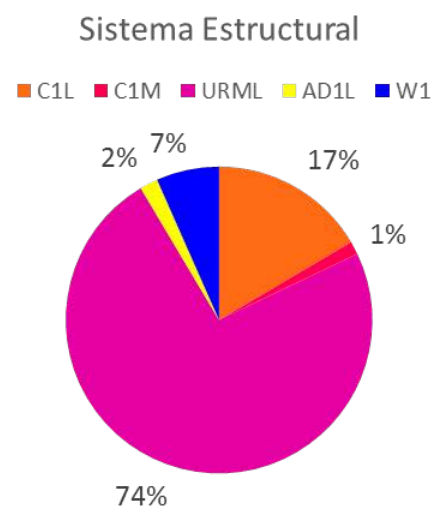
9 Referencias

- Armienti, P., G. Macedonio y M. Pareschi (1988). A Numerical Model for Simulation of Tephra Transport and Deposition: Applications to May 18, 1980, Mount St. Helens Eruption. *J. Geophys. Res.*, 93(B6), 6463-6476.
- ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) (2010). Disponible en línea <<http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/search.jsp>>
- Bonadonna et al. (2015). *Sedimentation of long-lasting wind-affected volcanic plumes: the example of the 2011 rhyolitic Cordon Caulle eruption*, Chile Bulletin of Volcanology 77:13
- Bonadonna, C., Ernst, G., Sparks, R. (1998). *Thickness variations and volume estimates of tephra fall deposits: the importance of the particle Reynolds number*. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 81 (3-4), 173-187.
- Carslaw, H., Jaeger, J. (1959). *Conduction of Heat in Solids*. Clarendon Press, Oxford.
- Denlinger RP, Iverson RM (2001). *Flow of variably fluidized granular material across three-dimensional terrain: 2. Numerical predictions and experimental tests*. *J Geophys Res* 106:553–566
- Eleisegui, P. 2011. Inversiones inmobiliarias: conozca qué oportunidades ofrecen Bariloche, Villa La Angostura y el sur del país. Publicado en iProfesional Febrero 09. Disponible en línea <http://www.iprofesional.com/notas/111314-Inversiones-inmobiliarias-conozca-qu-oportunidades-ofrecen-Bariloche-Villa-La-Angostura-y-el-sur-del-pas> [Consultado en 28.Julio.2015]
- Esposti, O., Cavazzoni, C., Erbacher, G., Neri, A., Salvetti, M. V. (2007). *A parallel multiphase flow code for the 3D simulation of explosive volcanic eruptions*. *Parallel Computing* 33 (2007) 541–560. *J Geophys Res* 113:B03211
- Esposti, O., Clarke, A. B., Neri, A., Voight, B., Widiwijayanti, C. (2008). *Fluid dynamics of the 1997 Boxing Day volcanic blast on Montserrat, West Indies*
- Folch, A., Felpeto, A. (2005). *A coupled model for dispersal of tephra during sustained explosive eruptions*. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 145. 337-349
- Guarino, L. 2015. Real Estate: precios, desarrollos y oportunidad en el interior del país. Publicado en Cronista.com Junio 27. Disponible en línea <http://www.cronista.com/realestate/Real-Estate-precios-desarrollos-y-oportunidad-en-el-interior-del-pais-20150626-0031.html> [Consultado en Julio.2015]
- INDEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina) 2010. *Publicación del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010. Censo del Bicentenario. Resultados definitivos. Serie B N° 2*. Disponible en línea http://www.censo2010.indec.gov.ar/index_cuadros.asp [Última consulta en Agosto 2015]
- Iverson RM, Denlinger RP (2001). *Flow of variably fluidized granular material across three-dimensional terrain: 1. Coloumb mixture theory*. *J Geophys Res* 106:537–552

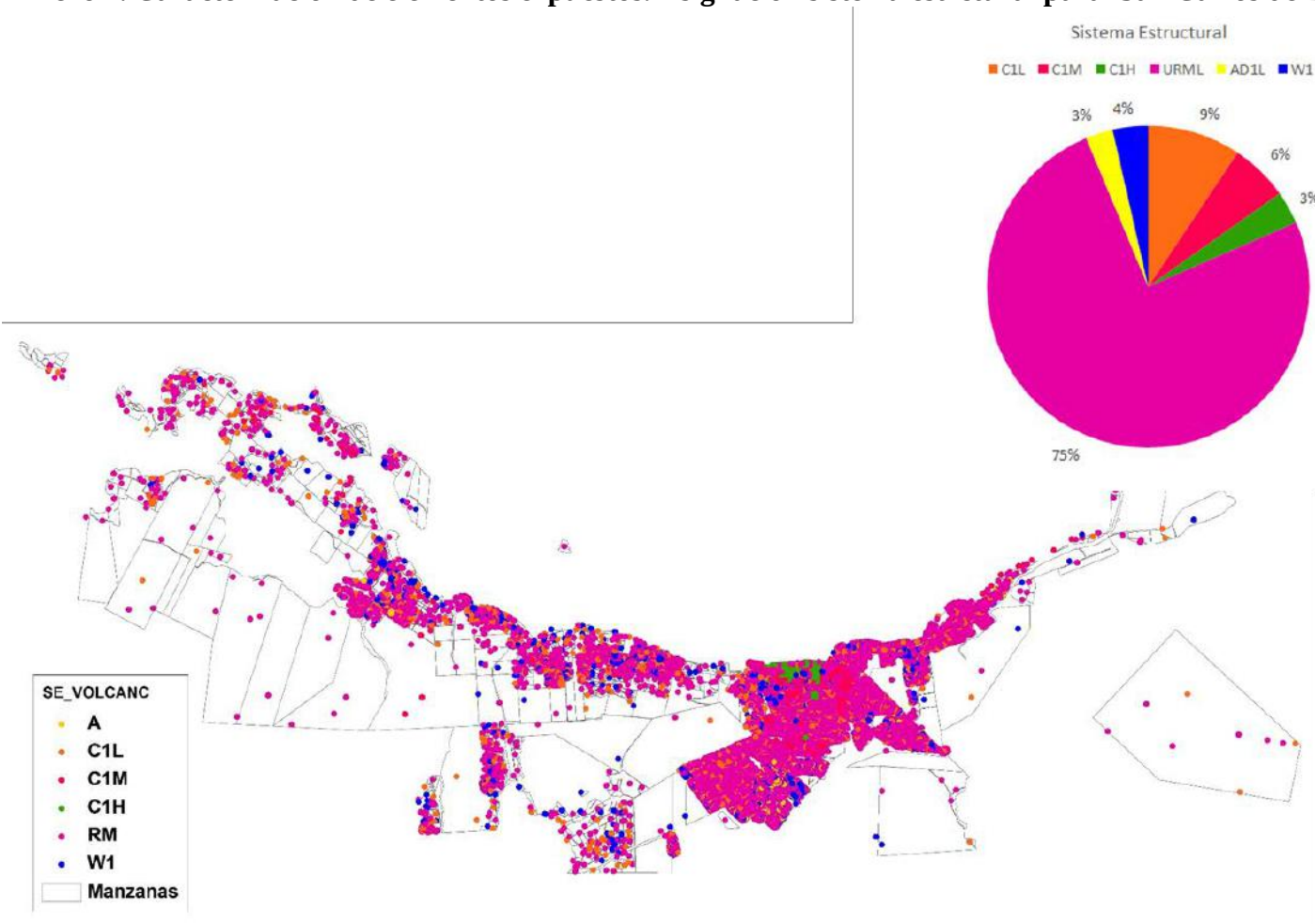
- Iverson, R. M., Schilling, S. P., Vallance, J. W. (1998). *Objective delineation of lahar-inundation hazard zones*. GSA Bulletin; August 1998; v. 110; no. 8; p. 972–984.
- Jenkins et al. (2012). *Regional ash fall hazard I: a probabilistic assessment methodology*. Bulletin of Volcanology. Volume 74, Issue 7, pp 1699-1712
- Macedonio, G. (1996). *Modelling lava flow hazard*. In: Barberi, F., Casale, R. (Eds), The Mitigation of Volcanic Hazards, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, pp. 89–95.
- Mageney-Castlenau A, Vilotte JP, Bristeau MO, Perthame B, Bouchut F, Simeoni C, Yernemi S (2003). *Numerical modelling of avalanches based on Saint Venant equations using a kinetic scheme*. J Geophys Res 108:2527
- Matossian, Brenda (2011). Dimensiones objetivas y subjetivas de la segregación urbana: el caso de San Carlos de Bariloche. XI Jornadas Argentinas de Estudios de Población. Asociación de Estudios de Población de la Argentina, Neuquén.
- Patra AK, Bauer AC, Nichita CC, Pitman EB, Sheridan MF, Bursik MI, Rupp B, Webber A, Stinton AJ, Namikawa LM, Renschler CS (2005). *Parallel adaptive simulation of dry avalanches over natural terrain*. J Volcanol Geotherm Res 139:1–22
- Pitolesi et al. (2015). *Complex dynamics of small-moderate volcanic events: the example of the 2011 rhyolitic Cordón Caulle eruption, Chile*. Bulletin of Volcanology 77:3
- Secretaría de Desarrollo Estratégico. Disponible en línea <http://www.bariloche.gov.ar/sector2014.php?sector=116> [Última consulta en Agosto 2015]
- Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin). (2012^a). *Mapa Preliminar de Peligros Volcánicos del CVPCC*. Programa de Riesgo Volcánico. Subdirección Nacional de Geología Disponible en línea <<http://www.sernageomin.cl/pdf/rmvv/Puyehue.pdf>>
- Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin). (2012b). *Ficha completa - Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle*. Disponible en línea <<http://www.sernageomin.cl/archivosVolcanes/2012091304582290FichaVnPuyehueCord%C3%B3nCaulle.pdf>>
- Sheridan, M., Malin, M. (1983). *Application of computer assisted mapping to volcanic hazard evaluation of surge eruptions: Vulcano, Lipari and Vesuvius*. J. Volcanol. Geotherm. Res. 17, 187-202.
- Smithsonian Institution (2015). *Puyehue-Cordon Caulle Eruptive History*. Global Volcanism Program. Disponible en línea <<http://www.volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=357150>>
- Spence, R., Baxter, P., Zuccaro, G. (2004). *Building vulnerability and human casualty estimation for a pyroclastic flow: a model and its application to Vesuvius*. J. Volcanol. Geotherm. Res. 133. 321-343.
- Spence, R., Kelman, I., Calogero, E., Toyos, G., Baxter, P., Komorowski, J. (2005). *Modeling expected physical impacts and human casualties from explosive volcanic eruptions*. Nat. Haz. Earth. Sci. 5. 1003-1015.
- Toyos, G., Cole, P., Felpeto, A., Martí, J. (2007). *A GIS-based methodology for hazard mapping of small volumen pyroclastic density currents*. Nat. Hazards. 41. 99-112.

- Weather Underground. (2015). *San Carlos de Bariloche, Argentina. Custom History*. Disponible en línea <<http://www.wunderground.com/>>
- Wilson et al. 2013. *Impacts of the June 2011 Puyehue-Cordón Caulle volcanic complex eruption on infrastructure, agriculture and public health*. GNS Science Report 2012/20. 88p.
- Woods, A. y Bursik, M. (1991). *Particle fallout, thermal disequilibrium and volcanic plumes*. Bull.Volcanol. 53, 559-570.
- Young (1998). *Volcanic Hazard and Community Preparedness at Volcán Irazú, Costa Rica*. British Geotechnical Survey Report WC/98/16R.
- Young y Sparks. (1998). *Preliminary Assessment of Volcanic Risk on Monserrat*. Monserrat Volcano Observatory Internal Report to UK Government; Vesuvius, Azores – EU-EXPLORIS project

Anexo 1. Caracterización de elementos expuestos. Asignación sistema estructural para Villa La Angostura



Anexo 2. Caracterización de elementos expuestos. Asignación sistema estructural para San Carlos de Bariloche



Evaluación Probabilista del Riesgo por Inundación en la Ciudad de Santa Fe

Tabla de contenido

1 INTRODUCCIÓN1

2 AMENAZA POR INUNDACIÓN3

3 GENERACIÓN DE BASE DE DATOS DE ELEMENTOS EXPUESTOS22

4 VALORACIÓN DE ELEMENTOS EXPUESTOS25

5 VULNERABILIDAD DE ELEMENTOS EXPUESTOS27

6 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL RIESGO POR INUNDACIÓN EN SANTA FE (CON
DESBORDAMIENTO)30

7 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL RIESGO POR INUNDACIÓN EN SANTA FE (SIN
DESBORDAMIENTO)37

8 ANÁLISIS DE PROBABILIDADES DE EXCEDENCIA PARA VARIAS ALTURAS DE INUNDACIÓN Y
AFECTACIÓN A LA POBLACIÓN40

9 CONCLUSIONES50

10 REFERENCIAS.....51

1 Introducción

En el marco del proyecto de desarrollo del perfil de riesgo de desastres a nivel nacional para Argentina, se ha realizado una evaluación probabilista del riesgo por inundación para la ciudad de Santa Fe. Esta se realizó con base en la información recibida y recolectada en términos de identificación, caracterización y valoración económica de los elementos expuestos, así como en la información existente relacionada con la amenaza por inundación y el sistema de defensas de protección ante inundaciones por creciente de ríos en el área de estudio.

Este informe presenta los resultados de la evaluación del riesgo por inundación en términos de las métricas probabilistas como lo son la curva de excedencia de pérdidas, la pérdida anual esperada y las pérdidas máximas probables asociadas a diferentes períodos de retorno. Adicionalmente se han expresado los resultados de pérdidas a través de mapas que permiten una estimación georreferenciada de las pérdidas en Santa Fe.

Esta evaluación se ha realizado mediante la herramienta CAPRA-GIS, la cual constituye el módulo de cálculo de riesgo de la Plataforma CAPRA¹ la cual es mundialmente aceptada y reconocida para este tipo de evaluaciones. El presente capítulo se estructura de la siguiente manera:

- Presentación de la metodología de evaluación probabilista del riesgo para eventos de inundación por crecidas de ríos.
- Un resumen del procedimiento de generación de escenarios de amenaza de inundación.
- Descripción del procedimiento de valoración y caracterización de los elementos expuestos para los portafolios disponibles de edificaciones, y salud.
- Resultados de la evaluación del riesgo para las edificaciones de la ciudad.
- Resultados de la evaluación para el portafolio de edificaciones destinadas a prestación de servicios de salud.

1.1 Fuentes de información

Con el objetivo de definir alternativas para desarrollar la modelación de riesgo por eventos de inundación en Santa Fe, se ha consultó la siguiente información recibida:

1. Estudio de zonas críticas por inundaciones frecuentes en la Ciudad de Santa Fe (Octubre 2014) del Convenio INA-MCSF.
2. Estudio de delimitación de áreas de riesgo hídrico en Santa Fe, realizado por el Instituto Nacional del Agua (INA) Centro Regional Litoral publicado en Junio 2006.

¹ Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment

3. Evaluación del estado y grado de protección del sistema de defensa de las ciudades de Santa Fe – Recreo y Anillos de la Ruta Provincial No. 1, realizado por el convenio del Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente de la Provincia de Santa Fe y el Instituto Nacional del Agua (INA) – Centro Regional Litoral, publicado en Julio de 2009.
4. Atlas de riesgo por inundaciones de la Provincia de Santa Fe del año 2011. Este documento incluye información general de la provincia y para La Capital hace referencia al estudio del INA 2006.
5. Aprender de los desastres. Gestión Local del Riesgo en Santa Fe. Editado por el Gobierno de la ciudad y UNISDR en 2014.
6. Santa Fe Cómo vamos 2012 editado por el Gobierno de la ciudad y la Bolsa de Comercio de Santa Fe.
7. La construcción social del riesgo y el desastre en el aglomerado Santa Fe, publicación de la Universidad Nacional del Litoral (Hilda Hezer y Hugo Arrillaga) 2009.
8. Convivir con el Río. Aula Ciudad Fascículo 13.
9. Santa Fe. La ciudad y el río. Aula Ciudad Fascículo 5.

De la misma forma, para complementar la información recibida, se consultaron diferentes fuentes que incluyen:

1. Pericia Hidráulica Expediente No. 1341/2003 (Publicado Marzo 2006) por J.D.Bacchiega; J.C.Bertoni y J.A.Maza.
2. Evaluación del impacto de las inundaciones y el desbordamiento del Río Salado en la Provincia de Santa Fe, República de Argentina en 2003 desarrollado por la CEPAL
3. Archivo de Noticias. Diario El Litoral
4. Resultados para la Provincia de Santa Fe del Censo 2010 (INDEC).
5. Cartografía por localidad de la Provincia de Santa Fe (IPEC, s.f.)
6. Reglamento de Ordenamiento Urbano (Concejo Municipal, 2011) y la definición de las zonas inmobiliarias conforme Ordenanza N°11883 (OVIM, 2015).

2 Amenaza por inundación

La amenaza se mide usando su frecuencia de ocurrencia y su severidad, esta última siendo caracterizada a través de parámetros de intensidad calculados en cada ubicación geográfica. Una vez que los parámetros que caracterizan la ocurrencia del fenómeno se definen desde un punto de vista físico, es necesario generar un conjunto de escenarios estocásticos que, analíticamente hablando, permiten definir todas las formas posibles en que la amenaza puede manifestarse en la región de análisis, en función de su frecuencia y severidad.

La amenaza se caracteriza entonces, en cada punto de análisis en el territorio de estudio, a través de la distribución de la probabilidad de la medida de intensidad asociada a su severidad, definida en términos de su valor central y su medida de dispersión, la cual da cuenta de la incertidumbre asociada con la ocurrencia de dicho grado de intensidad en el territorio. Es importante señalar que, en lo que respecta a la evaluación del riesgo por inundación en Santa Fe dado el efecto de los Ríos Salado y Paraná, la dispersión es altamente relevante para la correcta cuantificación de las pérdidas, dado que un mismo escenario puede causar una correlación de pérdida, es decir, afectación simultánea a varios elementos expuestos en un área extensa.

La razón por la cual debe representarse la amenaza como una colección de escenarios está relacionada directamente con la evaluación del riesgo. Es representación permite aplicar la metodología probabilista de análisis de riesgo de manera directa, y permite incluir de manera racional las incertidumbres asociadas a la amenaza.

En este caso de estudio la evaluación de amenazas por inundaciones, con enfoque tipo CAPRA, se hace con base en la información disponible de riesgo por inundación por eventos de falla de dique en la ciudad de Santa Fe. Adicionalmente, se realiza la delimitación de zonas inundables y cuantificación de la profundidad de inundación (tirante hídrico), para diferentes períodos de retorno en los diferentes sectores del dique de protección ante las crecientes de los ríos Salado y Paraná.

2.1 Fuentes de información

Las principales fuentes de información utilizadas como referencia para la obtención de caudales y niveles de profundidad de inundación de los ríos Salado y Paraná para diferentes períodos de retorno, así como también el estado y geometría del sistema de defensas para la ciudad de Santa Fe son; Estudio de delimitación de áreas de riesgo hídrico en Santa Fe (2006) adelantado por el Instituto Nacional de Agua (INA) y Evaluación del estado y grado de protección del sistema de defensa de las ciudades de Santa Fe – Recreo y Anillos de la ruta Prov. No. 1 (2009) adelantado por el INA.

Del estudio adelantado por el INA (2009) se obtienen principalmente tres elementos; levantamiento del alineamiento de los sistemas de defensa, levantamiento altimétrico de las

secciones transversales de los sistemas de defensa y la caracterización de las propiedades geotécnicas de las diferentes zonas del sistema.

2.2 Eventos históricos de inundación por crecientes en los ríos Salado y Paraná

De acuerdo con el Estudio del INA 2006, “los regímenes de los ríos Paraná y Salado en su desembocadura son independientes entre sí”. Entonces, se espera que la condición crítica para la amenaza es en el caso en que se presenten crecidas simultáneas. A continuación se hace un recuento de las crecidas registradas para cada uno de estos ríos.

Río Paraná

El río Paraná tiene un caudal medio $17.000 \text{ m}^3/\text{s}$. En la Tabla 2-1 se presenta un recuento de las crecidas históricas registradas en este río.

Tabla 2-1. Crecidas históricas en Río Paraná

AÑO	ALTURA MÁXIMA	CAUDAL MÁXIMA	OBSERVACIONES
1905	7 m	$50.000 \text{ m}^3/\text{s}$	
1966	6.94 m	$42.000 \text{ m}^3/\text{s}$	En Puerto Sta. Fe
1977		$39.000 \text{ m}^3/\text{s}$	
1982-1983	7.33 m	$61.100 \text{ m}^3/\text{s}$	En Puerto Sta. Fe. Entre diciembre de 1982 y agosto de 1983, se produce la mayor crecida registrada, con cinco picos de crecidas.
1992	7.43 m	$56.000 \text{ m}^3/\text{s}$	
1998	7.16 m	$47.500 \text{ m}^3/\text{s}$	

Río Salado

El río Salado tiene un caudal medio entre $140\text{-}170 \text{ m}^3/\text{s}$. En la Tabla 2-2 se presenta un recuento de las crecidas históricas registradas en este río.

Tabla 2-2. Crecidas históricas en Río Salado

AÑO	ALTURA MÁX	CAUDAL MÁX	OBS
1914		2750 m ³ /s	El sector no se encontraba poblado.
1973	7.19 m	2430 m ³ /s	90 días de duración de onda
1977	6.55 m	1790 m ³ /s	22 días con caudal por encima de 1000 m ³ /s
1981			4 días con caudal por encima de 1000 m ³ /s
1998	7.10 m	2350 m ³ /s	61 días con caudal por encima de 1000 m ³ /s
2003	7.86 m	4000 m ³ /s	Estado de saturación de la cuenca baja. 31 días con caudal por encima de 1000 m ³ /s. (cota máxima de 18.95 m, cota 0 de 11.09 m).

2.3 Sistema de protección ante inundaciones por creciente de ríos

La ciudad de Santa Fe cuenta con 64 km de terraplenes de defensa frente a crecidas de los ríos Paraná y Salado. Para poder extraer el agua lluvia de la ciudad, se tienen en operación 53 estaciones de bombeo con aproximadamente 152 bombas (fijas, móviles y de reserva) (Aula Ciudad 2012, 2013). Las defensas fueron construidas en tierra, arcilla o arena. Algunas estructuras complementarias a las defensas son los lagos reservorios para almacenar y amortiguar aguas lluvias, estaciones de bombeo y la red de drenaje urbano. En la Figura 2-1 se muestra la ubicación de las defensas, siguiendo el perímetro de la ciudad de Santa Fe. Las defensas se dividen en 17 sectores, según sus características topográficas, geométricas, y geotécnicas; esta información se obtuvo del estudio Evaluación del estado y grado de protección del sistema de defensa de las ciudades de Santa Fe – Recreo y Anillos de la Ruta Provincial No. 1.

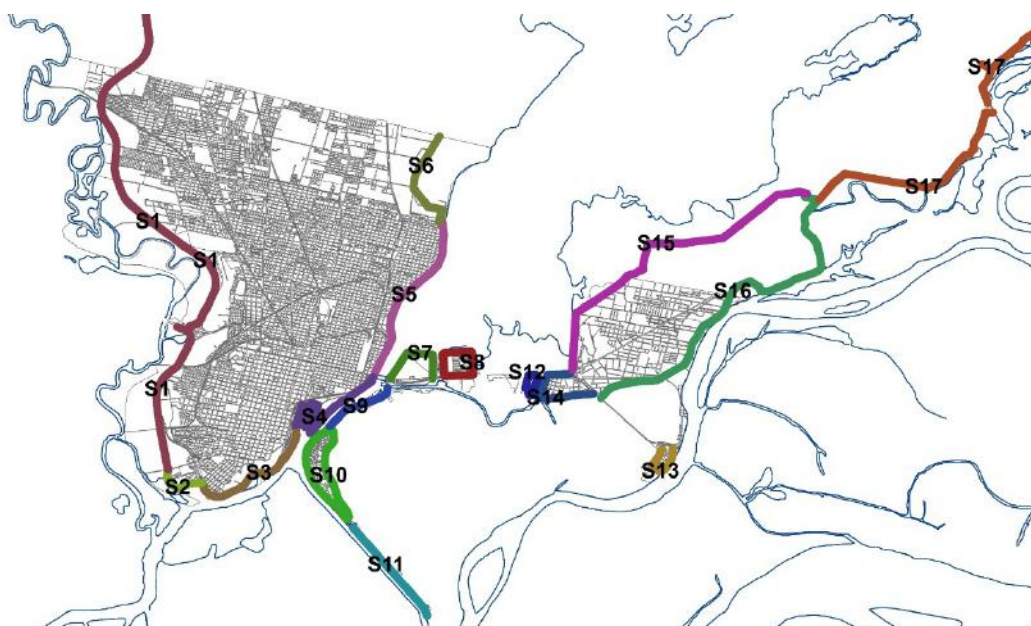


Figura 2-1. Mapa de ubicación de defensas por sector.

Las obras de defensas se han construido en varias etapas, con diferentes criterios de diseño y diferentes calidades constructivas. Algunas defensas fueron construidas para atender una emergencia, sin un proceso de diseño riguroso. “Las defensas presentan grados de formación y niveles de seguridad diferentes, ya sea por el material que las compone, por su diseño estructural y por su estado de conservación” (INA 2009). Por esta razón, no todas las defensas tienen el mismo nivel de protección ante crecidas de los ríos Salado y Paraná.

De acuerdo con esta información consultada, se puede concluir que las barreras de protección ante eventos de desbordamiento de los ríos Salado y Paraná son indispensables para prevenir daños en la ciudad. Es así como las defensas fueron diseñadas para periodos de retorno entre 100 y 200 años. Incluso, el tercer tramo del terraplén al oeste de la ciudad, que fue construido después de la inundación de 2003, fue diseñado para proteger la ciudad ante un evento con periodo de retorno de 1000 años. Sin embargo, existen obras provisorias para periodos de retorno de 10 años.

2.4 Definición de la topografía del área de estudio

Del estudio adelantado por el INA (2006) se obtiene información topográfica en términos de curvas de nivel cada 0.5 metros para la ciudad de Santa Fe. La Figura 2-2 representa las curvas de nivel utilizadas para la distribución de volúmenes de agua de inundación proveniente de los sistemas del río Salado y Paraná en la ciudad de Santa Fe.

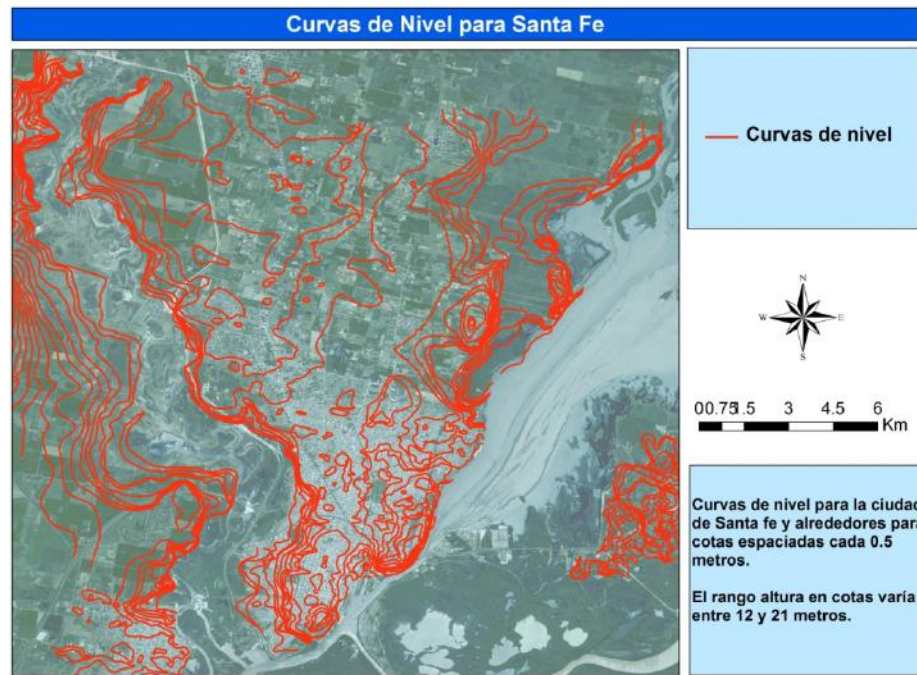


Figura 2-2. Curvas de nivel para la ciudad de Santa Fe cada 0.5 metros. (INA, 2006)

A partir de las curvas de nivel y con el fin de distribuir el volumen de agua de inundación proveniente de los sistemas hídricos del Salado y Paraná dentro de la ciudad de Santa Fe, es necesario redefinir la topografía expresada en formato ráster. La resolución espacial que se usa para la definición de la topografía en formato ráster es de 30 metros. El rango de altura de cotas varía entre 12 y 21 msnm. La Figura 2-3 presenta el mapa de topografía en formato ráster tenido en cuenta para el modelo de inundación.

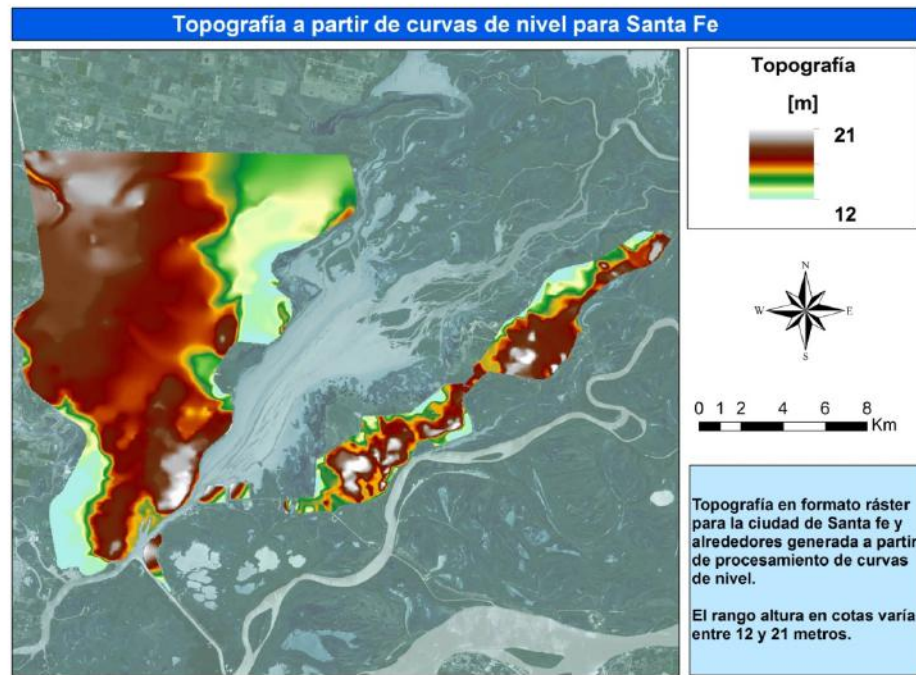


Figura 2-3. Topografía en formato tipo ráster a partir de curvas de nivel.

2.5 Análisis hidrológicos del área de estudio

A partir de análisis hidrológicos, el estudio del INA (2006) estima diferentes hidrogramas de creciente para los sistemas hídricos de los ríos Salado y Paraná para diferentes períodos de retorno. Dichos hidrogramas se traducen en niveles limnimétricos del río para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, los cuales se usan para la modelación de escenarios de falla del sistema de defensas en la ciudad de Santa Fe. La Figura 2-4 presenta los diferentes hidrogramas de creciente definidos por el estudio del INA (2006).

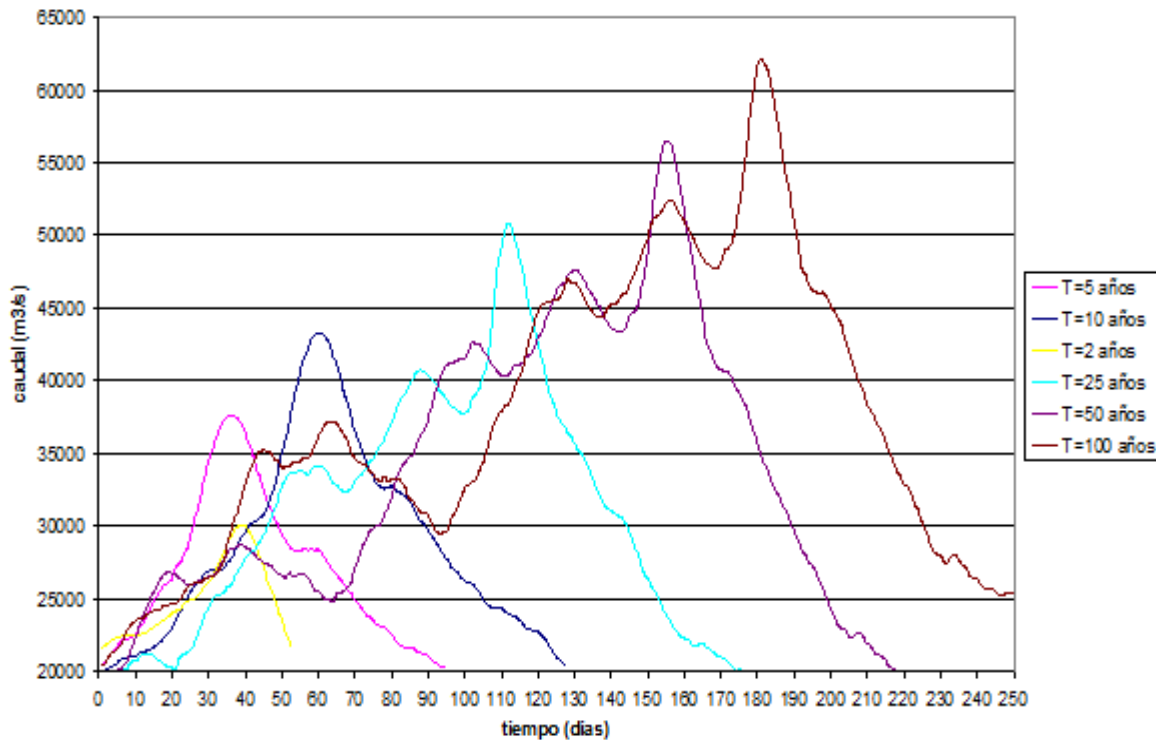


Figura 2-4. Hidrogramas de creciente para diferentes períodos de retorno para los ríos Salado y Paraná. (INA, 2006)

La Figura 2-5 presenta los escenarios teóricos de inundación para la ciudad de Santa Fe, calculados por parte del INA (2006). Dichos escenarios de inundación se tienen en cuenta únicamente como referencia de posibles resultados de inundación para diferentes períodos de retorno y no dentro de la definición de la amenaza. Los resultados de la amenaza de este estudio y los resultados del estudio del INA (2006) no son del todo comparables ya que los escenarios teóricos presentados en este último son calculados asumiendo que los diques existentes no presentan fallas o que no existen defensas de protección en la ciudad, mientras que el presente estudio si las tiene en cuenta y considera su posible falla en diferentes puntos.

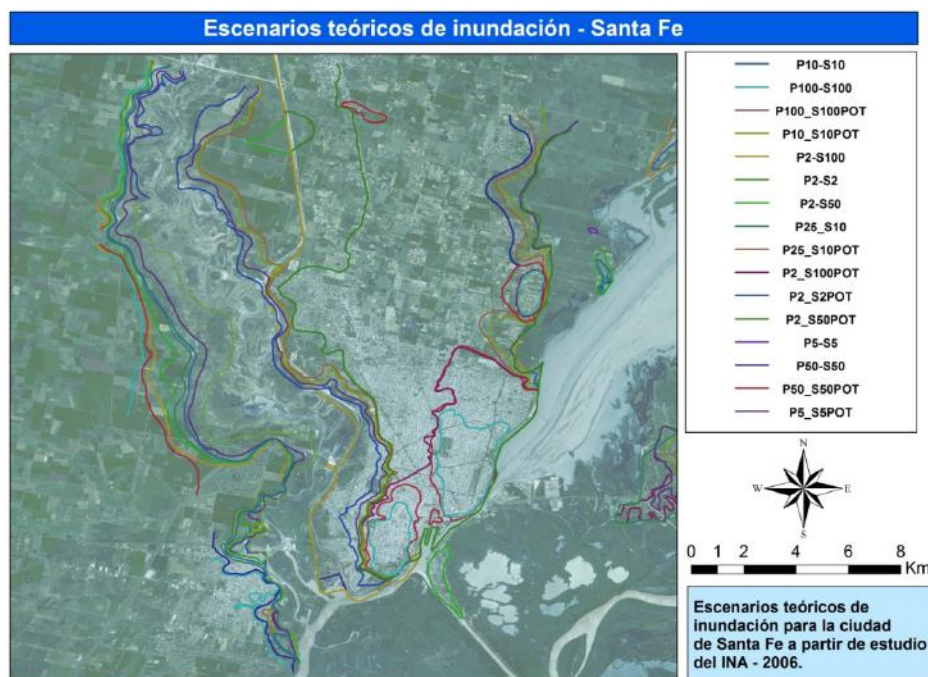


Figura 2-5. Escenarios teóricos de inundación para la ciudad de Santa Fe. (INA, 2006)

2.6 Análisis hidráulico propuesto

El proceso de erosión del sistema de defensas puede ser modelado considerando tres parámetros principales:

- Tamaño de la brecha de rotura
- Tiempo de formación de la brecha
- Hidrograma de descarga producto de la formación de la brecha

Con el fin de determinar la amenaza de inundación por un evento de rotura de dique, el parámetro más importante a considerar es el hidrograma de descarga. Lo anterior se debe a que a partir de este parámetro es posible derivar y/o calcular diferentes resultados importantes a tener en cuenta en la distribución geográfica de la intensidad de inundación, por ejemplo: volumen total de descarga para un período determinado.

2.6.1 Hidrograma de descarga

El hidrograma de descarga se define como la relación entre el caudal de salida y el tiempo en el cual dicho caudal fluye en un sistema hídrico (e.g. canal, río o un evento de rotura de dique). El hidrograma de salida se obtiene a partir de un análisis iterativo paso a paso proporcionado por el modelo de análisis de diques de tierra “*BREACH*”: *An erosion model for earthen dam failures* (Fread, 1988). El modelo considera los siguientes parámetros para el cálculo del hidrograma de descarga:

- Propiedades de los materiales del sistema de defensas: Tamaño D_{50} , peso unitario, ángulo de fricción y la cohesión.
- Propiedades de material de núcleo
- Propiedades de material de cobertura
- Características geométricas del sistema de defensa: Pendiente aguas arriba, pendiente aguas abajo, ancho de base, ancho de cresta, altura del sistema de defensas desde su base a la cresta.
- Caudal de entrada al sistema hídrico de análisis
- Área superficial del sistema hídrico de análisis
- Curva de elevación vs. Área superficial para el sistema hídrico de análisis
- Propiedades geométricas del área de descarga

2.7 Modelo analítico propuesto

El modelo analítico propuesto debido a eventos de rotura de dique sugiere la incorporación de un grupo aleatorio de escenarios de rotura que se detonan con un espaciamiento específico a lo largo del sistema de defensas (cada 1000 metros, aproximadamente), los cuales generan volúmenes de descarga de inundación para diferentes ventanas de tiempo de interés (Horas) y para diferentes períodos de retorno (Años). Para definir la distribución geográfica del tirante hídrico se hace uso de la topografía detallada disponible para la zona de análisis y un modelo simplificado de Sistemas de Información Geográficos (SIG) de llenado de zonas inundables.

2.7.1 Procedimiento de análisis

La Figura 2-6 presenta un diagrama de flujo del modelo propuesto para la evaluación de la amenaza por eventos de rotura de dique. El proceso principal para la aplicación del modelo se anuncia a continuación:

1. *Caracterización del sistema hídrico de análisis:* La zona de interés debe ser caracterizada por medio de los parámetros del sistema de defensas y del sistema hídrico mencionados en la sección 2.5.
2. *Caracterización del hidrograma de descarga:* El modelo propuesto calcula el volumen de descarga para diferentes ventanas de tiempo de interés.
3. *Generación de eventos de rotura:* Teniendo la información contenida en el hidrograma de descarga, se seleccionan los puntos de rotura considerando las funciones de probabilidad de falla del sistema de defensas de análisis.
4. *Generación de escenarios de inundación:* Basados en la información contenida en el hidrograma de descarga para cada localización y duración, la amenaza por inundación es generada considerando el análisis SIG de la topografía detallada.

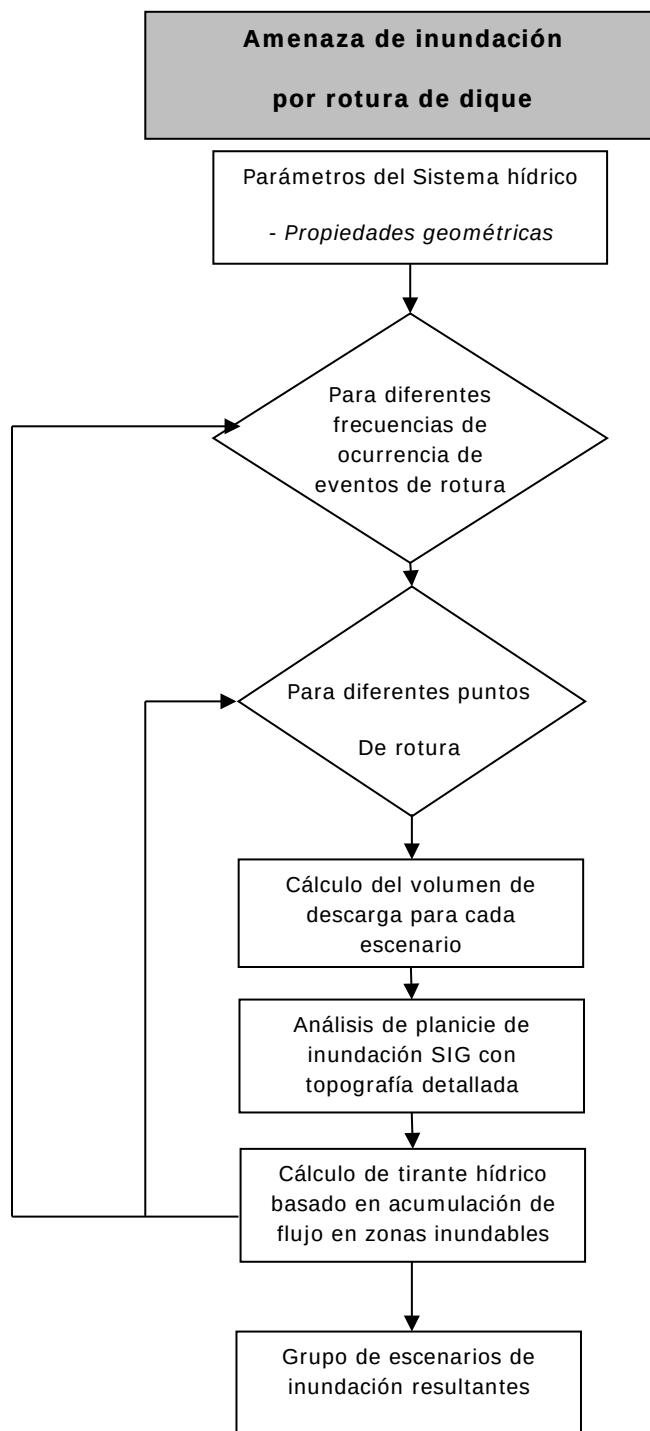


Figura 2-6. Diagrama de flujo modelo de amenaza por rotura de dique

2.7.2 Análisis de inundación de planicie

Los datos del hidrograma de descarga para cada escenario se requieren para el análisis hidráulico y el análisis de inundación de planicie. Debe haber topografía detallada que incluya las principales características del curso de agua y llanuras de inundación con la suficiente resolución espacial. La calidad de los resultados dependerá de la resolución espacial de la topografía detallada.

Los pasos para aplicar el análisis hidráulico y proceso de inundación de planicie se mencionan como sigue:

1. Se selecciona un punto de rotura como la base para realizar el análisis. Debe ser un punto situado en cada zona de la coronación del sistema de defensas para cada período de interés. Si es posible debe ser un punto para el cual el dique tiene una alta probabilidad de falla; esto se puede considerar por medio de los datos históricos o mediante la evaluación de la coronación del dique en el sitio.

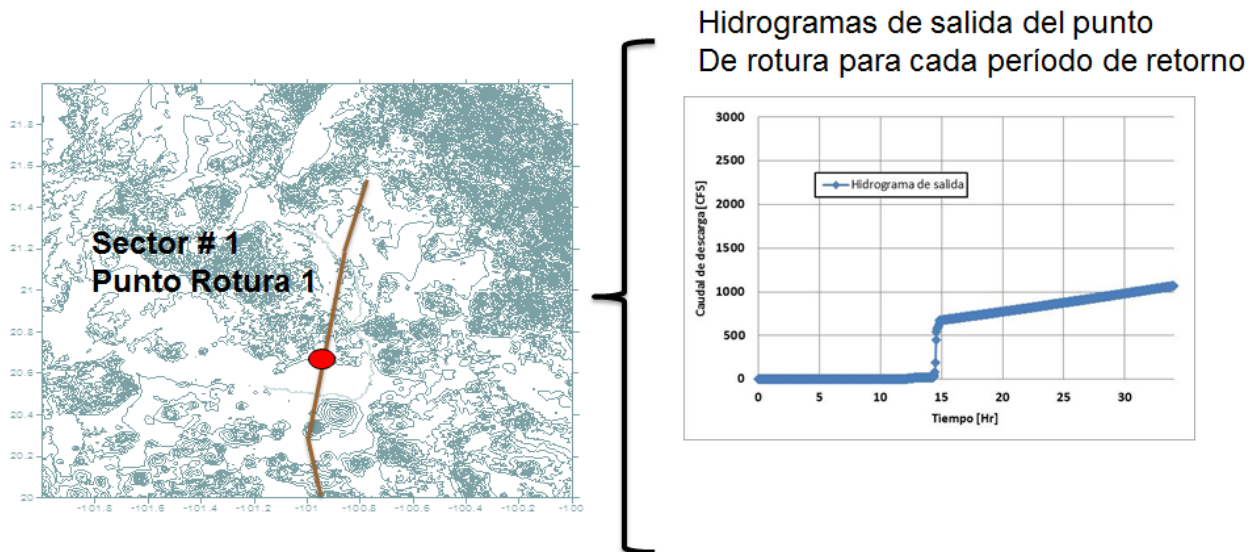


Figura 2-7. Generación de punto de rotura y generación de hidrograma de descarga

2. Con la topografía detallada, y el hidrograma de descarga para cada evento, un algoritmo de flujo paramétrico se aplica teniendo en cuenta la diferencia de altitud entre las celdas espaciales del modelo digital de elevación, mediante la distribución del volumen de descarga en las zonas de acumulación previamente identificadas (áreas propensas a inundaciones).

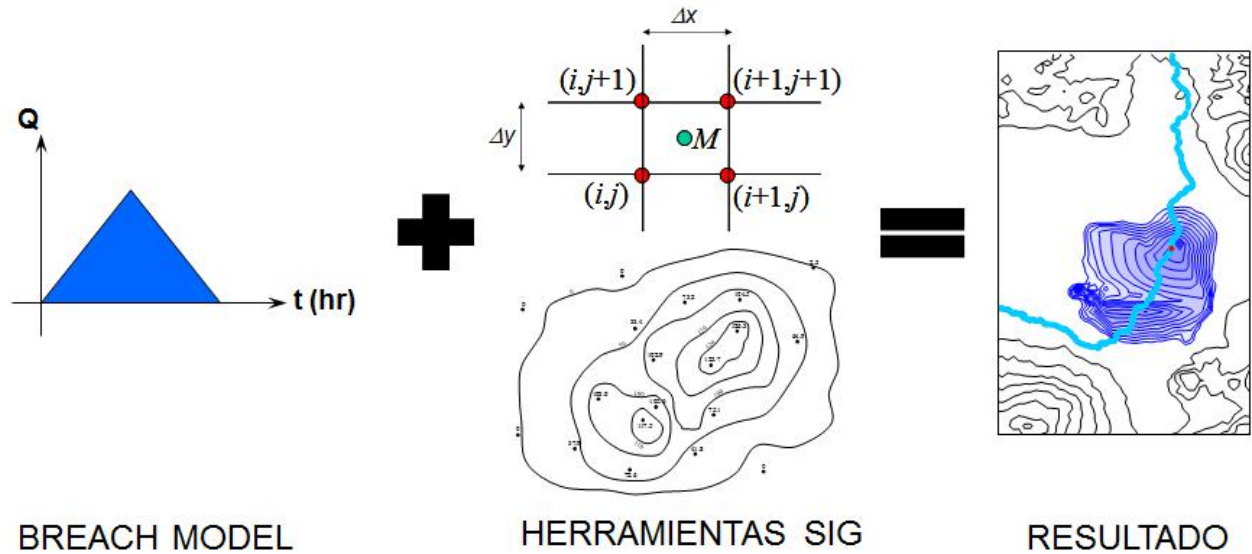


Figura 2-8. Modelo de generación de zonas inundables por medio de herramientas SIG

- Los valores máximos de inundación para cada evento se almacenan, creando una red de inundaciones por escenario.

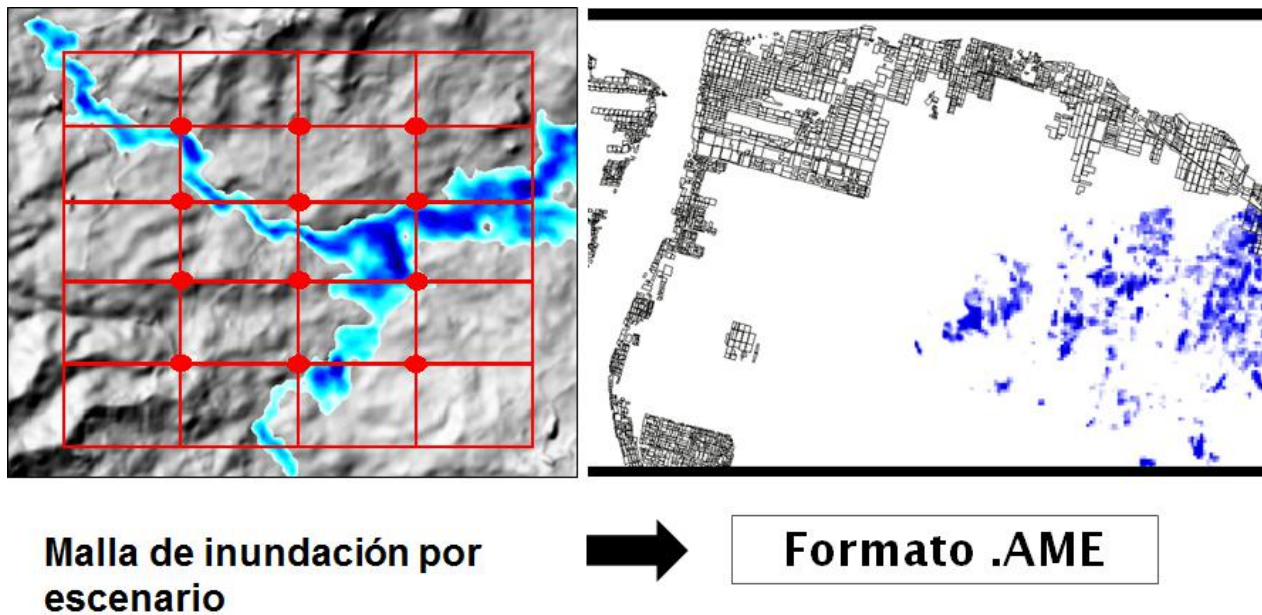


Figura 2-9. Generación de formato tipo .AME

2.8 Fragilidad de las estructuras de defensa

Con base en la información disponible, se propone un modelo de fragilidad de los diques de protección, el cual determina con que probabilidad se puede presentar una falla de determinado

tipo en una ubicación en las estructuras de defensa. Con este fin, se determinan funciones de fragilidad para cada punto de rotura seleccionado, en función del nivel del río en la cara húmeda de los diques.

En términos generales, las funciones de fragilidad estipulan cuánto vale la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño como función de cierto parámetro de intensidad. Los estados de daño se asocian normalmente a estados de comportamiento del elemento de infraestructura. En el caso de estructuras de defensa ante inundaciones, se contempla exclusivamente el estado de daño de “colpaso”, el cual indica la pérdida del elemento en una ubicación y, en consecuencia, la pérdida de su función de control de ingreso de volúmenes de agua a la zona protegida.

Para la modelación de las estructuras de defensa en Santa Fe, se establecen dos posibles mecanismos de falla:

- Sobrepaso (sin considerar erosión en la cara seca del dique)
- Infiltración con micro inestabilidad

Estos mecanismos de falla cubren la mayoría de los escenarios factibles de ocurrir en Santa Fe. El sobrepaso de la altura de coronamiento de los diques se presenta solamente en unos puntos muy específicos de la ciudad, y su ocurrencia depende exclusivamente de los caudales y alturas aportados por los ríos. En el caso del mecanismo de infiltración con micro inestabilidad, se construyó un modelo de estado límite para cada uno de los 68 puntos de rotura en función de la información geotécnica y geométrica disponible.

La infiltración con micro inestabilidad es un proceso que se da luego de la infiltración de la lámina de agua dentro de la estructura de defensa, ilustrada en la Figura 2-10 como un nivel freático variable con la distancia. Al alcanzar dicha infiltración la cara seca del dique, puede presentarse pérdida de la estabilidad del material y la consecuente falla de la estructura.

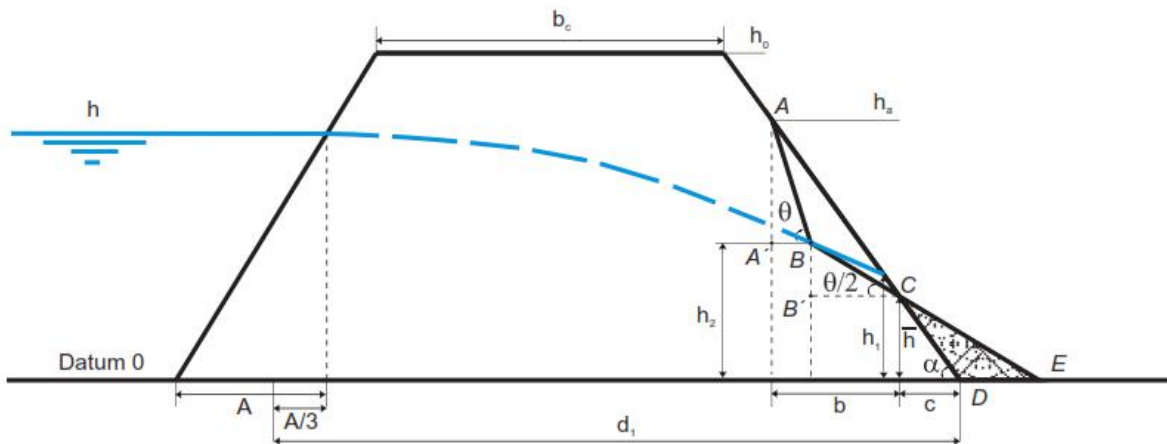


Figura 2-10. Configuración del modelo de infiltración con micro inestabilidad

Se construyó un modelo de simulación por Monte Carlo, en el cual cada una de las variables geotécnicas y geométricas, en cada punto de rotura, se considera como una variable aleatoria, de manera que, para diferentes niveles de altura del río, se calculan 10,000 simulaciones de la respuesta del dique, obteniendo así una medida de la probabilidad con que la estructura puede fallar para cada altura del río en la cara húmeda.

2.9 Resultados de amenaza por inundación para la ciudad de Santa Fe

La aplicación del modelo de rotura de dique escogido para la generación de escenarios de falla y posterior inundación en la ciudad de Santa Fe se justifica por medio del análisis de los hidrogramas presentados en la Figura 2-11, Figura 2-12, y Figura 2-4. Los picos de crecienta que se observan en los hidrogramas de crecienta tienen una característica común para el caso del sistema hídrico de los ríos Paraná y Salado, dicha característica es que el pico de crecienta para cada uno de los eventos históricos y escenarios modelados tiene un período de ocurrencia igual o superior a dos meses. Dicho comportamiento es común en ríos de gran capacidad y con pendientes menores al 10%.

Dado que el comportamiento de crecienta de tiene un período de ocurrencia superior a dos meses es posible modelar el sistema hídrico de cada uno de los ríos como un reservorio transitorio en el cual las condiciones de caudal y de tirante hídrico se asumen constantes con el fin de definir las características necesarias para la modelación de eventos de falla de las defensas de la ciudad de Santa Fe.

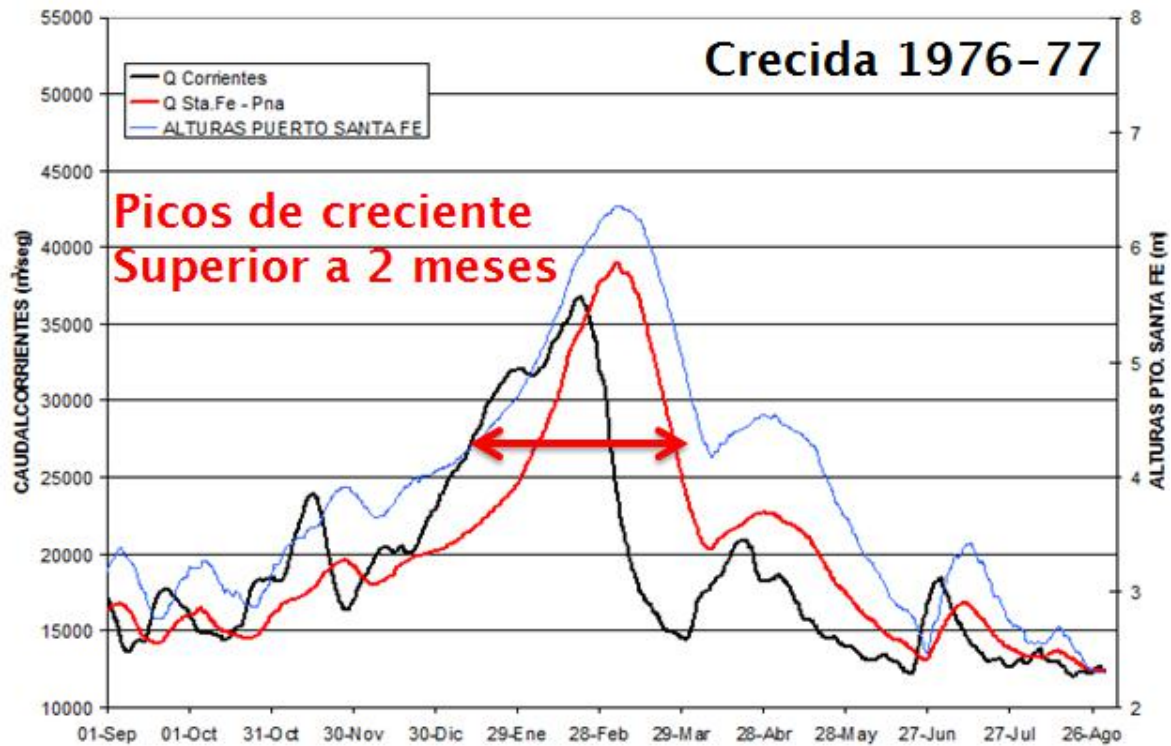


Figura 2-11. Hidrograma de creciente para el evento de crecida 1976-1977



Figura 2-12. Hidrograma de creciente para el evento de creciente de 1991-1992

Adicionalmente, los puntos de rotura para la aplicación del modelo de inundación propuesto se generan sobre el alineamiento y la cresta del sistema de defensas en cada una de los 17 sectores del dique con un espaciamiento aproximado de 1000 metros. Un total de 66 posibles puntos de falla son identificados a lo largo del sistema de defensas, para los cuales se producen 3 escenarios de inundación con períodos de retorno de 10, 50 y 100 años, para una duración de apertura de brecha de 24 horas. La Figura 2-13 presenta la localización de los puntos de rotura a lo largo del sistema de defensa en cada uno de sus sectores.

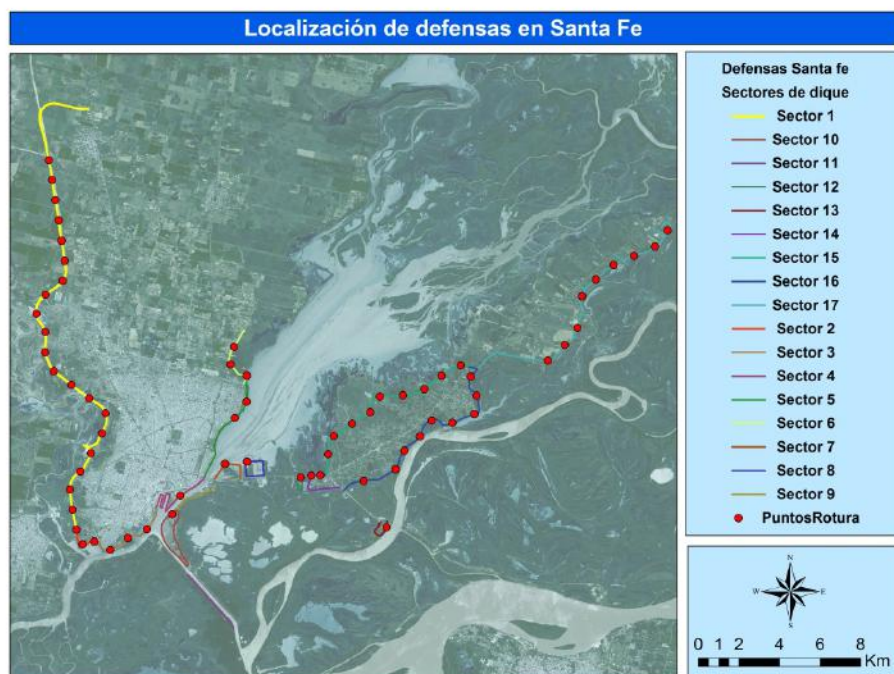


Figura 2-13. Localización de los puntos de falla del sistema de defensa

Los resultados de la modelación de amenaza por rotura del sistema de defensas de la ciudad de Santa Fe se presentan a continuación en formato de mapas de amenaza integrada para la totalidad de 198 escenarios de inundación calculados. Los períodos de retorno para los cuales se presentan los resultados son 10, 50, 100 y 500 años.

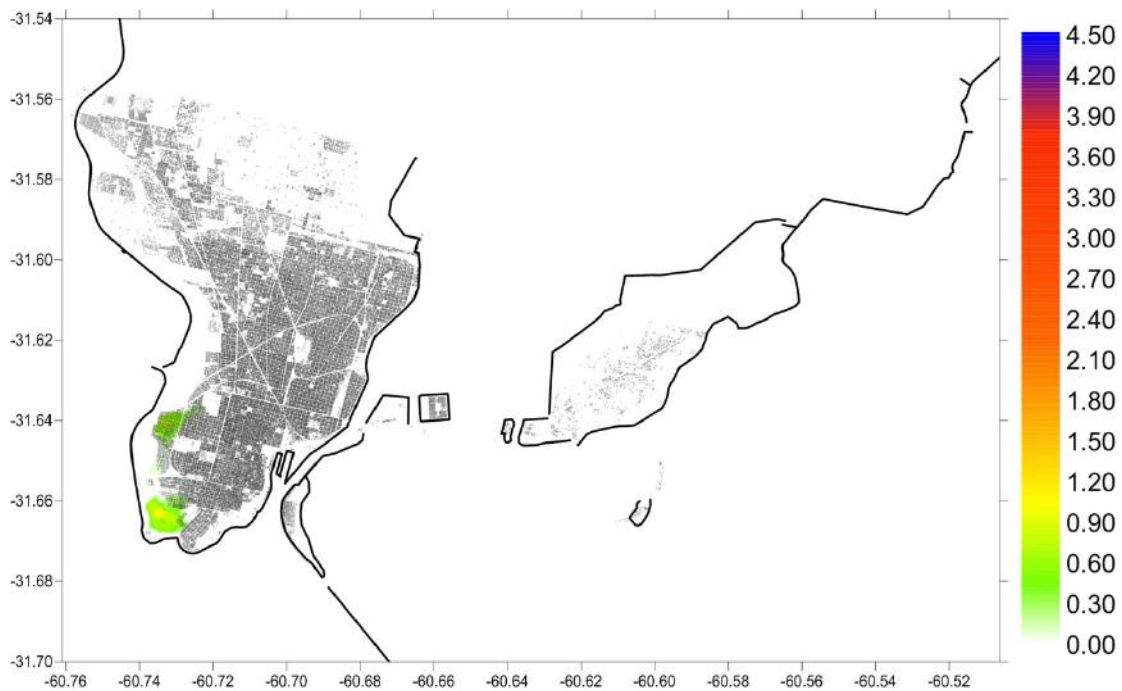


Figura 2-14. Mapa de amenaza integrada por inundación para la ciudad de Santa Fe. Tr: 10 años

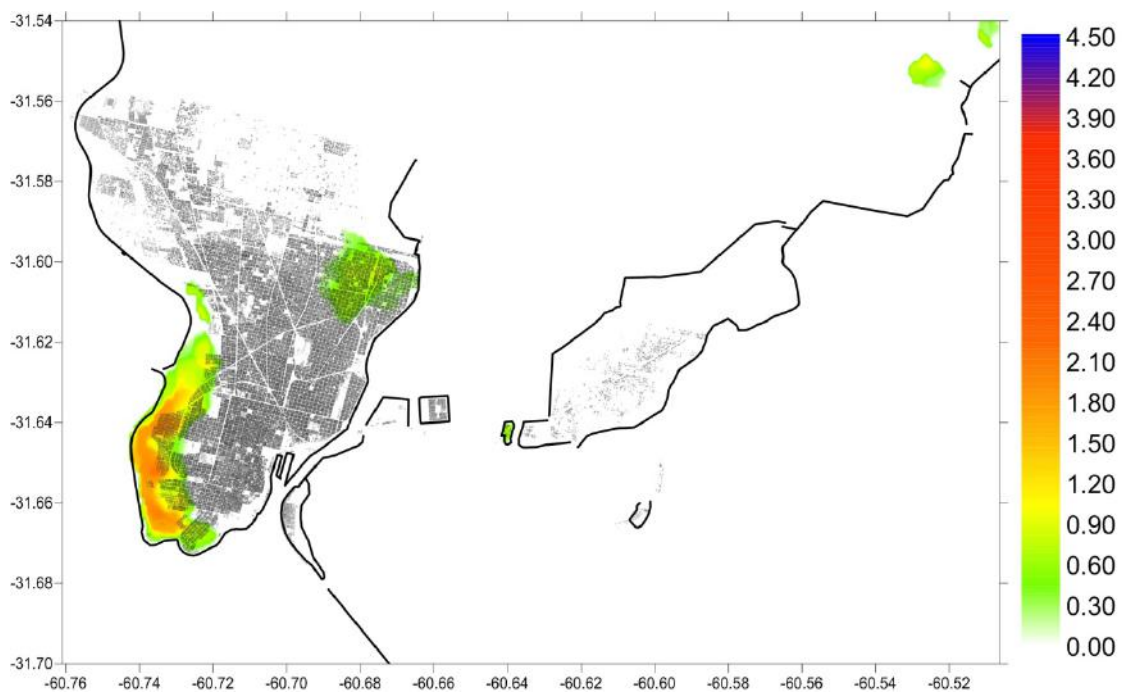


Figura 2-15. Mapa de amenaza integrada por inundación para la ciudad de Santa Fe. Tr: 50 años

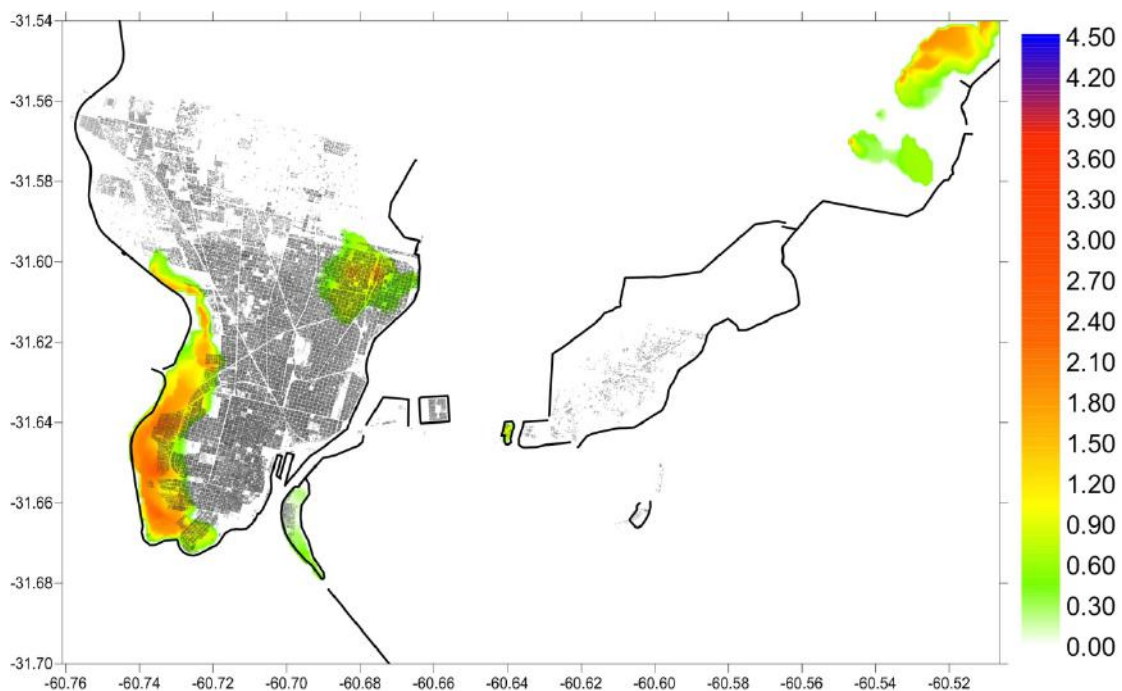


Figura 2-16. Mapa de amenaza integrada por inundación para la ciudad de Santa Fe. Tr: 100 años

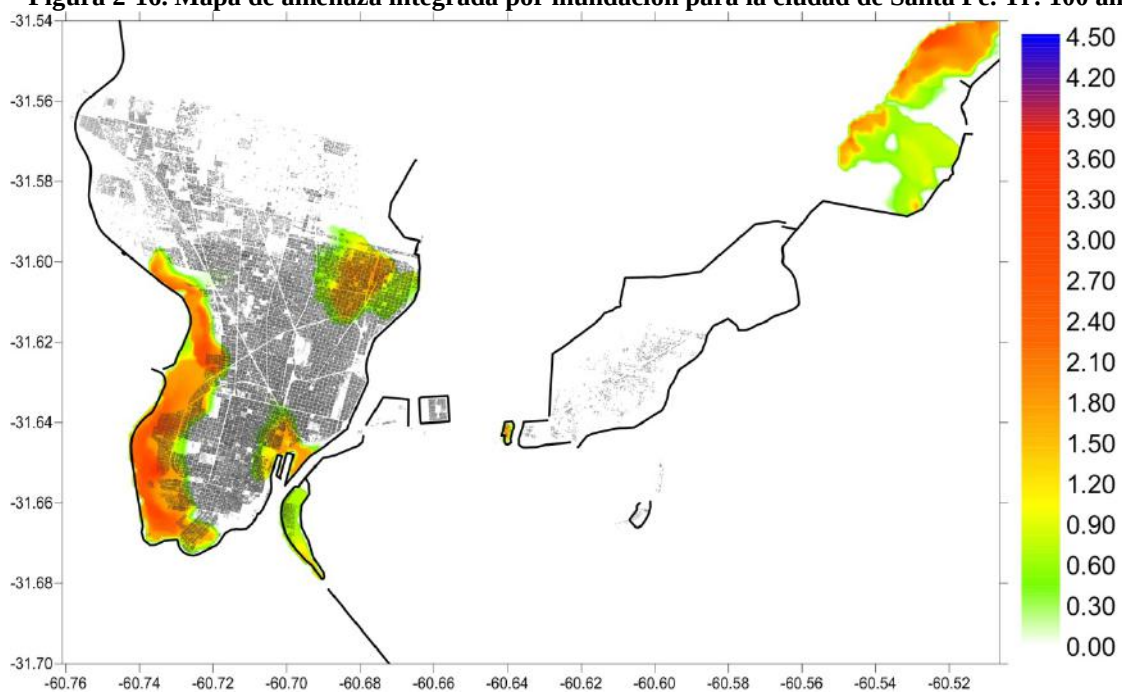


Figura 2-17. Mapa de amenaza integrada por inundación para la ciudad de Santa Fe. Tr: 500 años

3 Generación de base de datos de elementos expuestos

El portafolio de elementos expuestos se compone de los elementos críticos susceptibles a sufrir daño o a generar una pérdida dada la ocurrencia de un evento. Para la generación de esta base de datos se deben tener en cuenta elementos como edificaciones en una ciudad, cultivos, infraestructura industrial o de uso público, sistemas eléctricos, de telecomunicaciones, de abastecimiento de agua. Para evaluar los efectos de una inundación en Santa Fe, la base de datos de elementos expuestos se limitó a la identificación de elementos tipo edificaciones en la zona urbana de la ciudad, que se encuentra dentro de las defensas existentes.

3.1 Portafolio de edificaciones

Dada la disponibilidad de información, para Santa Fe se generó un portafolio de edificaciones a una resolución de escala predial. Es decir, para cada predio dentro de la ciudad se hizo la caracterización de tipología estructural, valoración y georreferencia. Los atributos que se asignaron a cada predio incluyen:

- Número de pisos
- Tipología estructural (sistema estructural)
- Uso: Residencial, Comercial o Institucional
- Categoría socioeconómica: Alta, Media o Baja

La información disponible incluye una capa georreferenciada de la geometría para un poco menos de 216,000 predios, con información del número de pisos para cada polígono. Con el fin de completar la información faltante (sistema estructural, uso, categoría socioeconómica) y asignar las funciones de vulnerabilidad, se consultaron publicaciones oficiales como los resultados de Censo 2010 (INDEC), la cartografía por localidad de la Provincia de Santa Fe (IPEC, s.f.), los distritos de zonificación del Reglamento de Ordenamiento Urbano (Concejo Municipal, 2011) y la definición de las zonas inmobiliarias conforme Ordenanza N°11883 (OVIM, 2015).

Para conocer qué tipo de materiales de construcción se utilizan en la provincia, se hizo un análisis de los resultados del censo (INDEC, 2010), para el material predominante de paredes según el tipo de vivienda que se muestra en la Tabla 3-1. En términos generales, se puede ver que sin importar el terminado de las paredes (si hay revoque o no), el 97% de las viviendas tiene paredes de ladrillo, piedra, bloque u hormigón. Estos son resultados para la provincia de Santa Fe, que incluye viviendas rurales y urbanas.

Tabla 3-1. Resultados Censo 2010. Hogares por tipo de vivienda, según material predominante de paredes

Cuadro H10-P. Provincia de Santa Fe. Hogares por tipo de vivienda, según material predominante de las paredes exteriores de la vivienda y presencia de revoque. Año 2010

Material predominante de las paredes exteriores y presencia de revoque	Total de hogares	Tipo de vivienda									
		Casa			Rancho	Casilla	Departamento	Pieza/s en inquilinato	Pieza/s en hotel o pensión	Local no construido para habitación	Vivienda móvil
		Total	A (¹)	B (²)							
Total	1,023,042	873,314	751,723	121,591	14,047	13,316	116,890	2,724	1,128	1,357	266
Ladrillo, piedra, bloque u hormigón con revoque	879,896	758,968	687,860	71,108	2,848	3,942	109,863	2,218	1,006	1,051	-
Ladrillo, piedra, bloque u hormigón sin revoque	115,124	101,010	57,465	43,545	3,818	3,298	6,226	447	85	240	-
Adobe con revoque	1,299	1,021	627	394	207	17	49	5	-	-	-
Adobe sin revoque	2,481	821	164	657	1,601	51	3	4	-	1	-
Madera	7,134	3,819	2,176	1,643	887	2,181	195	22	6	8	16
Chapa de metal o fibrocemento	12,737	5,334	1,996	3,338	3,533	3,526	156	22	31	28	107
Chorizo, cartón, palma, paja sola o material de desecho	1,516	392	47	345	947	161	8	-	-	2	6
Otros	2,855	1,949	1,388	561	206	140	390	6	-	27	137

Fuente: Censo 2010

Detallando el análisis para la ciudad, se eliminaron de los resultados del censo la vivienda tipo rancho, casilla y la tipo móvil; que se consideran de tipo rural. En este caso el 99% de las viviendas tiene paredes tipo ladrillo, piedra, bloque u hormigón (ver Tabla 3-2). Estos son los datos base para hacer la asignación de sistema estructural para cada predio. Los sistemas estructurales que se asignaron fueron hormigón (67.8%), mampostería (31.9%), y adobe/madera (0.3%).

Tabla 3-2. Porcentaje de participación según tipo de material por paredes para ciudad de Santa Fe.

	Casa		Departamento	Pieza/s en inquilinato	Pieza/s en hotel o pensión	Local no construido para
	A (¹)	B (²)				
Ladrillo, piedra, bloque u hormigón	75.21%	11.57%	11.71%	0.27%	0.11%	0.13%
Adobe	0.08%	0.11%				
Madera	0.22%	0.17%				
Chapa de metal o fibrocemento		0.43%				

Fuente: A partir de información Censo 2010.

A partir de las zonas homogéneas definidas por las fracciones censales del Censo 2010, se relacionó cada predio, según su ubicación, con la fracción censal que lo contiene para georreferenciar algunos resultados como la calidad de material de las viviendas y la calidad de construcción de las mismas.

La asignación del sistema estructural a cada uno de los predios se hizo según el número de pisos, la calidad constructiva y la calidad de los materiales. Ahora bien, como para un mismo tipo de predio (misma calidad constructiva, misma calidad de materiales e igual número de pisos) se puede tener diferente material de construcción, cada tipo de predio tiene una distribución de sistema estructural por porcentajes, como se muestra en el Anexo A1-1.

La asignación del sistema estructural, para cada uno de los casi 216,000 predios, siguió un procedimiento automático que se explica a continuación:

1. Para cada predio se evaluó si el número de pisos es igual o mayor a 6. En caso de ser positivo, se asigna un sistema estructural concreto. En este caso, se entiende que edificaciones de gran altura son construidas en pórticos de concreto por restricciones de norma.
2. En caso contrario, para cada predio se evaluó la calidad constructiva y calidad de los materiales, información que se relaciona con la zona homogénea en la que el predio está ubicado.
3. De acuerdo con el número de pisos, se asignó de forma aleatoria el sistema estructural de acuerdo con los porcentajes establecidos en el Anexo A1-1.

El resultado del procedimiento de asignación de sistemas estructurales se puede ver gráficamente en la Figura 3-1. En éste se puede ver la distribución georreferenciada de los sistemas estructurales tipo concreto, mampostería y tierra. Los sistemas estructurales más utilizados son concreto de un piso, mampostería de un piso y concreto de dos pisos, en su orden.

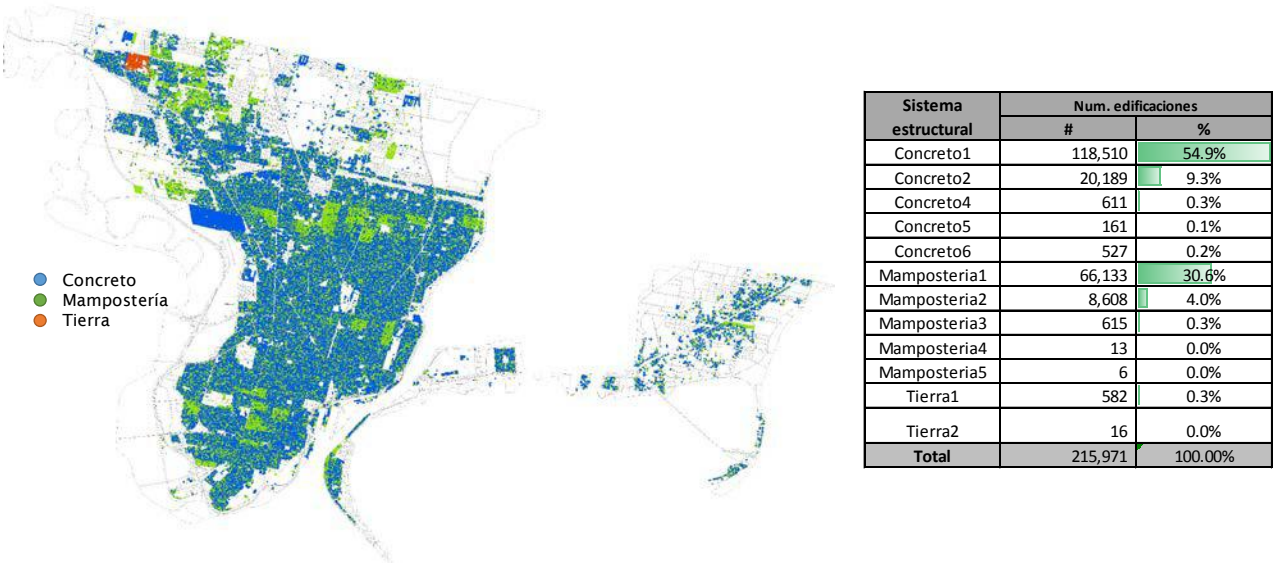


Figura 3-1. Sistemas estructurales por predio.

Aunque este procedimiento sigue criterios de experto, se recomienda tener información de mayor detalle levantada en campo.

3.2 Portafolio de salud

Es necesario dividir la base de datos de elementos expuestos en portafolios, para establecer los responsables de las pérdidas por la ocurrencia de un evento de inundación. En el caso de las edificaciones destinadas a la prestación del servicio de salud, se recibió la información de ubicación de hospitales y centros de salud en la ciudad. La lista de los centros de salud georreferenciados se presenta, junto a los resultados de riesgo, en el Anexo A1-5. Para los atributos de número de pisos y sistema estructural se siguió el mismo procedimiento que para la base de datos completa.

4 Valoración de elementos expuestos

La valoración económica de los predios, para establecer su valor de reposición en caso de presentarse daños luego de un evento de inundación, se basó en la información del Reglamento de Ordenamiento Urbano, las zonas inmobiliarias (OVIM, 2015) y el valor medio del metro cuadrado publicado por el Colegio de Arquitectos de la Provincia, para Julio de 2015. El valor de reposición de cada predio se definió según el uso del mismo y su clasificación de categoría socioeconómica.

Siguiendo lo establecido por el Reglamento de Ordenamiento Urbano para Santa Fe, para cada predio en la ciudad se asignó el uso de acuerdo a lo que está permitido en cada distrito. En el Anexo A1-2 se muestra la participación relativa de cada uso considerado (Residencial, Comercial, Institucional e Industrial) según uso predominante del distrito.

De otro lado, para establecer una clasificación según categoría socio-económica de los predios (Alta, Media, Baja) se utilizó información del censo (INDEC, 2010) como los resultados por fracción censal del índice de Necesidades Básicas Insatisfechas, tenencia de agua, material de pisos, conexión a servicios públicos. También se clasificaron según la zona inmobiliaria que los contenía, que es el índice que establece el valor medio del metro cuadrado de terreno. Aquellos predios en zonas de bajo valor se consideran de categoría socioeconómica baja y los predios ubicados en las zonas inmobiliarias de mayor valor, se consideran de categoría socioeconómica alta.

Finalmente, el valor de reposición del predio es el producto de su área, por el número de pisos, por el valor de metro cuadrado, y multiplicado por un índice que ajusta los valores según categoría socioeconómica y uso del predio. Estos valores (ver Tabla 4-1) fueron los mismos índices utilizados para el perfil nacional de riesgo.

Tabla 4-1. Índices de ajuste para definir valor de reposición según uso y categoría socioeconómica.

Valores de referencia (ResPM=1)	
Residencial Bajo	0.4
Residencial Medio	1
Residencia Alto	1.6
Comercial	1
Industrial	1.6
Salud	1.28
Educación	1
Institucional	1

Fuente: Elaboración propia

El valor de referencia Residencial Medio es de \$11,350 pesos argentinos. A continuación se muestran los resultados para cada predio, según rango de valor de reposición. Estos valores se presentan en pesos argentinos.

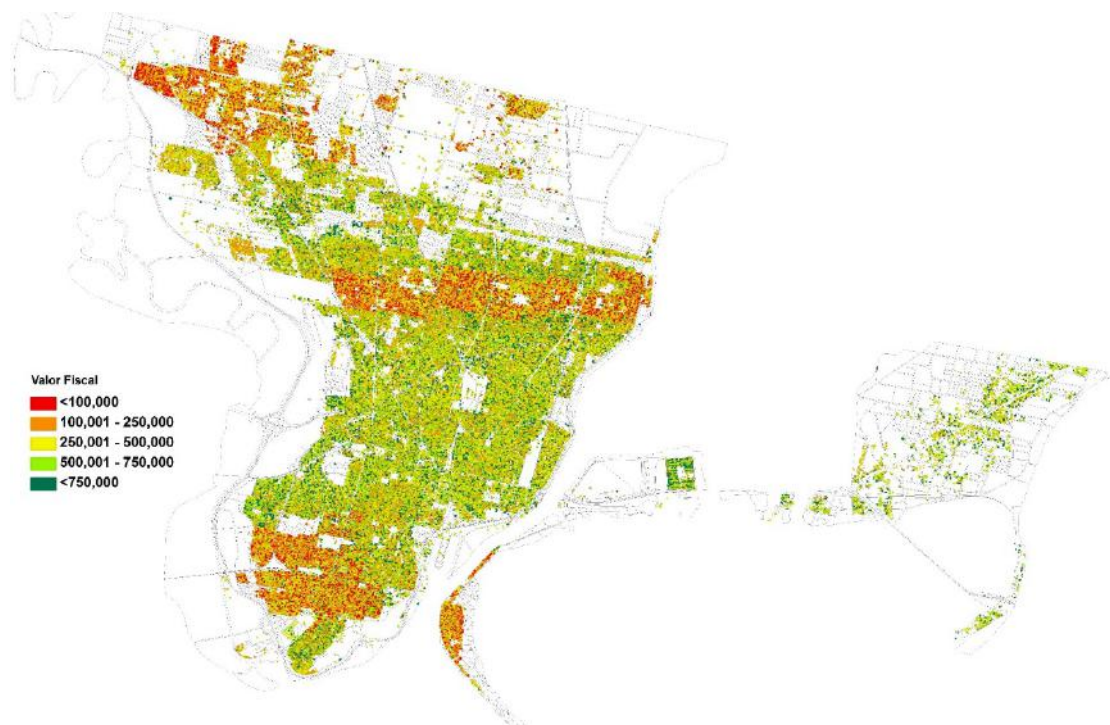


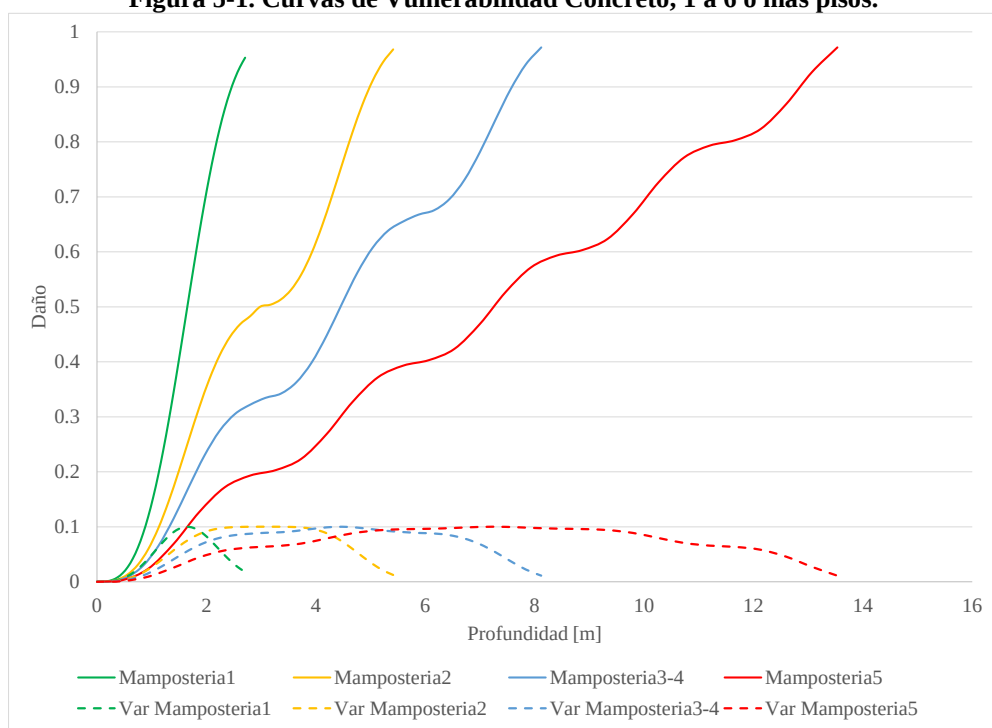
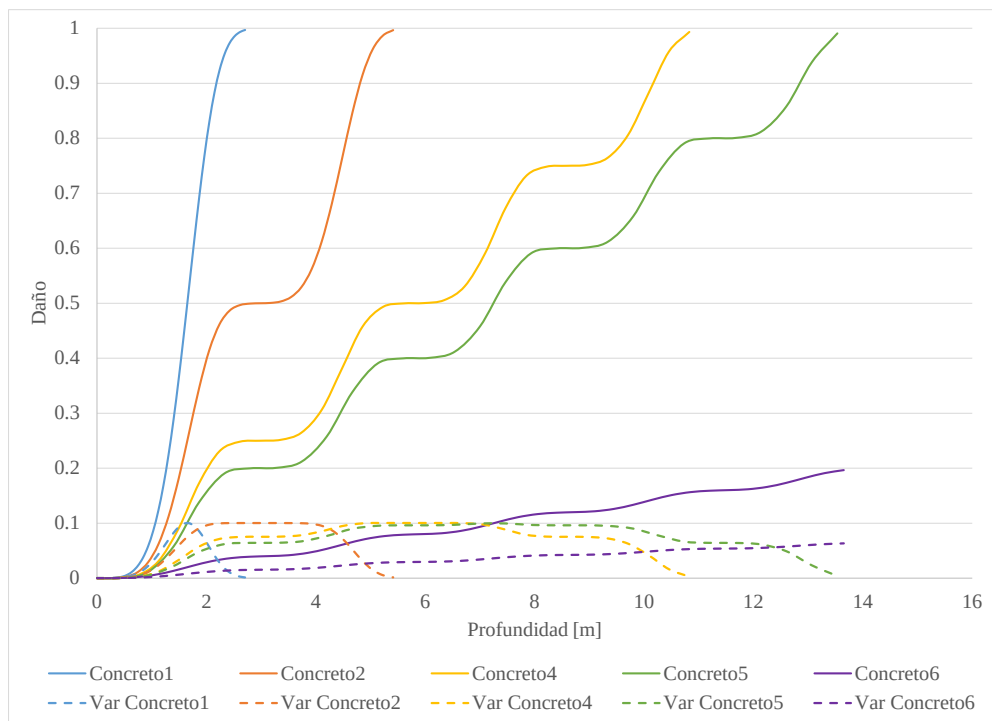
Figura 4-1. Valor de reposición por predio.

5 Vulnerabilidad de elementos expuestos

Las funciones de vulnerabilidad relacionan la pérdida económica esperada sobre el valor de reposición de los elementos expuestos. Para las construcciones regulares incluidas en el portafolio de elementos expuestos de la ciudad de Santa Fe se definieron 12 tipos constructivos, a partir de la asignación de sistema estructural que incluye el material de la estructura y su número de pisos. Para este caso, la vulnerabilidad de una edificación no se ve afectada por el tipo de cubierta ni el uso de la construcción. Vale la pena resaltar que los tipos constructivos Concreto1, Mamposteria1, Concreto2 y Mamposteria2 suman el 93% del total de los tipos constructivos de la ciudad de Santa Fe.

De acuerdo con las curvas, se puede ver que el material más susceptible a daño en el evento de una inundación es la tierra, llegando a pérdidas relativas máximas del 100% en profundidades de inundación menores a 2 metros de altura de agua para edificaciones de un piso. De otro lado, se puede ver el efecto el número de pisos en la vulnerabilidad de la edificación, alcanzando menores valores de pérdida relativa para la misma profundidad a medida que se incrementa la altura de las mismas.

A continuación se presentan las curvas de vulnerabilidad utilizadas en el estudio.



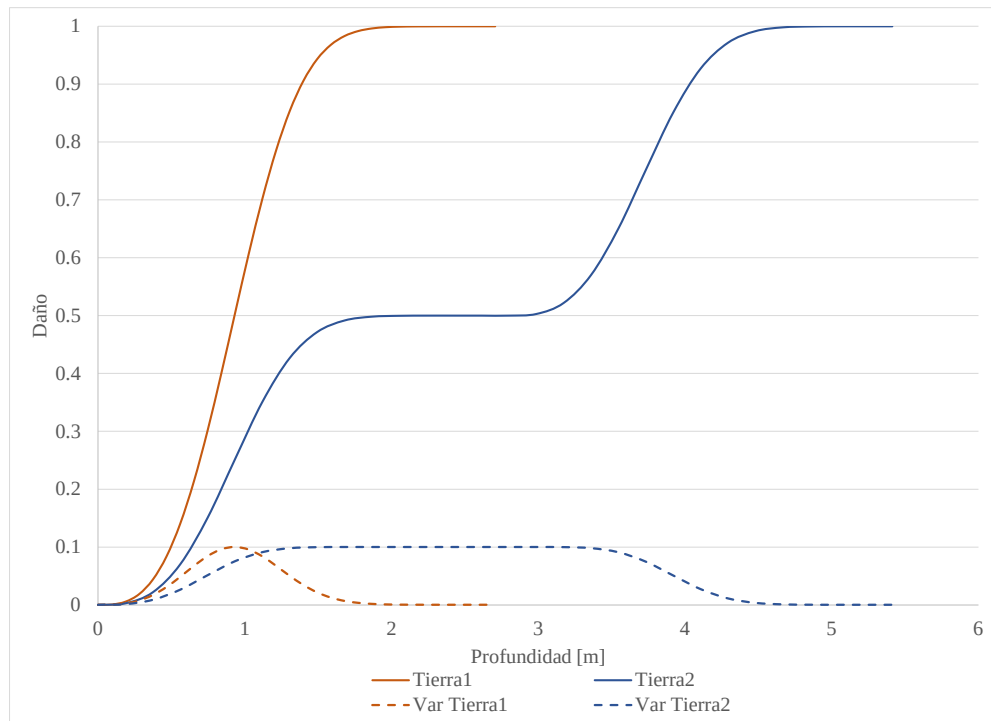


Figura 5-3. Curvas de Vulnerabilidad Madera, 1 y 2 pisos.

6 Resultados de la evaluación del riesgo por inundación en Santa Fe (con desbordamiento)

A continuación se presentan los resultados para la evaluación de riesgo por inundación en la ciudad de Santa Fe. Para cada portafolio analizado, se presenta la curva de excedencia de pérdidas y otras métricas de riesgo como la Pérdida Anual Esperada (valor anual que debe pagarse para compensar, en el largo plazo, todas las pérdidas futuras) y la curva de Pérdida Máxima Probable (relaciona las pérdidas a su correspondiente periodo de retorno).

6.1 Portafolio completo

Los resultados que se presentan a continuación son para el portafolio completo de edificaciones de la ciudad de Santa Fe. En la Tabla 6-1 se muestra que el valor de pérdida anual esperada, en caso de inundación, para el portafolio completo es de \$141 millones de pesos argentinos, que representa el 0.76‰ de su valor expuesto total (\$185,360 millones de pesos argentinos).

Tabla 6-1. Resultados de riesgo para el portafolio completo

Resultados		
Valor Expuesto	ARS\$ x10 ⁶	185,361
Pérdida anual esperada	ARS\$ x10 ⁶	141.30
	‰	0.76
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	ARS\$ x10 ⁶	%
50	\$1,380	0.74
200	\$1,748	0.94
500	\$1,777	0.96
1000	\$1,827	0.99

La Figura 6-1 muestra la curva de excedencia de pérdidas que relaciona el valor de pérdida con la tasa de excedencia que no es más que el inverso del periodo de retorno. De otro lado, en la Figura 6-2 muestra tres curvas que relacionan la pérdida con la probabilidad de tener o exceder ese valor para diferentes tiempos de exposición (50, 100 y 200 años) de los elementos considerados dentro del portafolio de edificaciones expuestas; de estas curvas se pueden obtener resultados de pérdidas para diferentes periodos de retorno según numerosos escenarios; por ejemplo, un periodo de retorno de 475 años corresponde a una probabilidad de excedencia del 20% en una ventana de exposición de 50 años, por ejemplo.

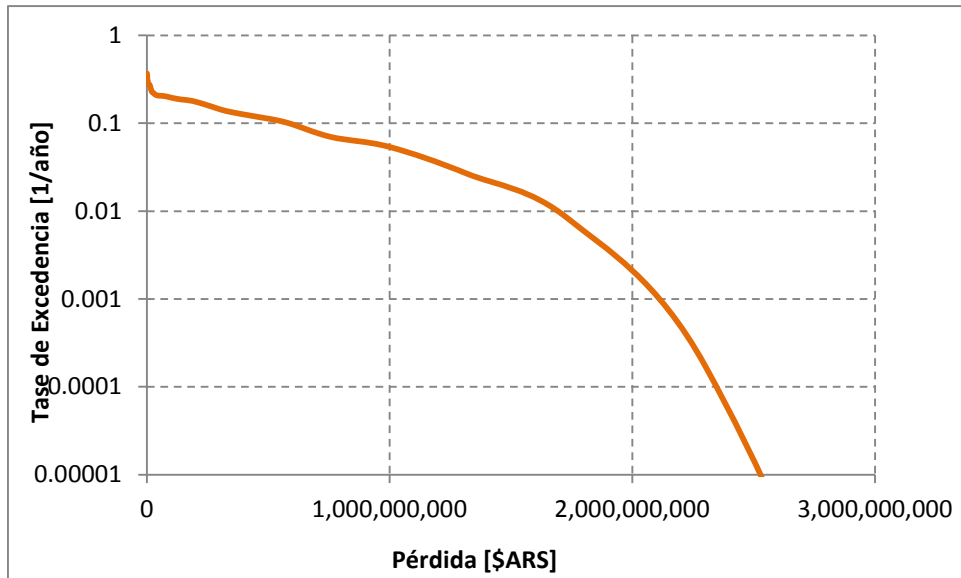


Figura 6-1. Curva de excedencia de pérdidas para el portafolio completo

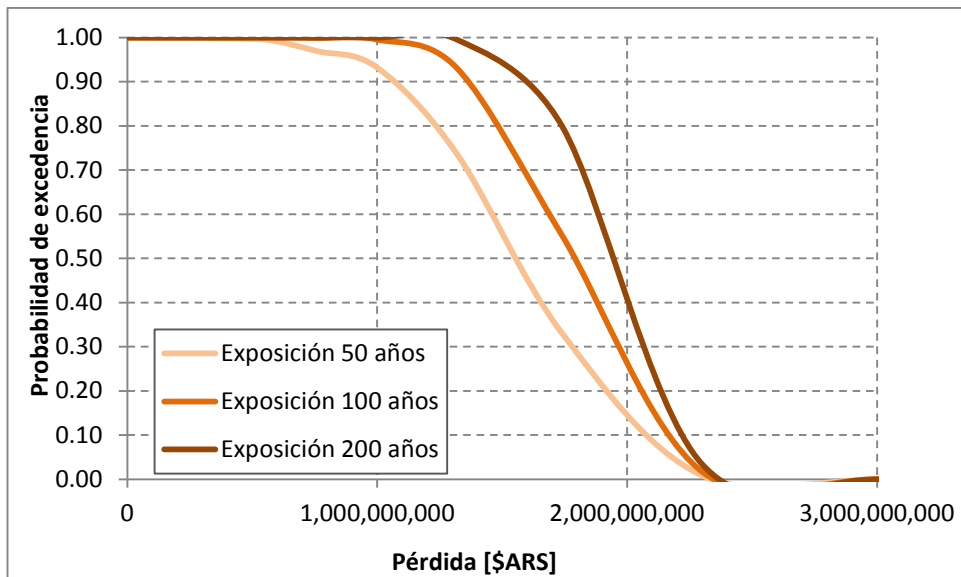


Figura 6-2. Curvas de probabilidad de excedencia de pérdidas para el portafolio completo.

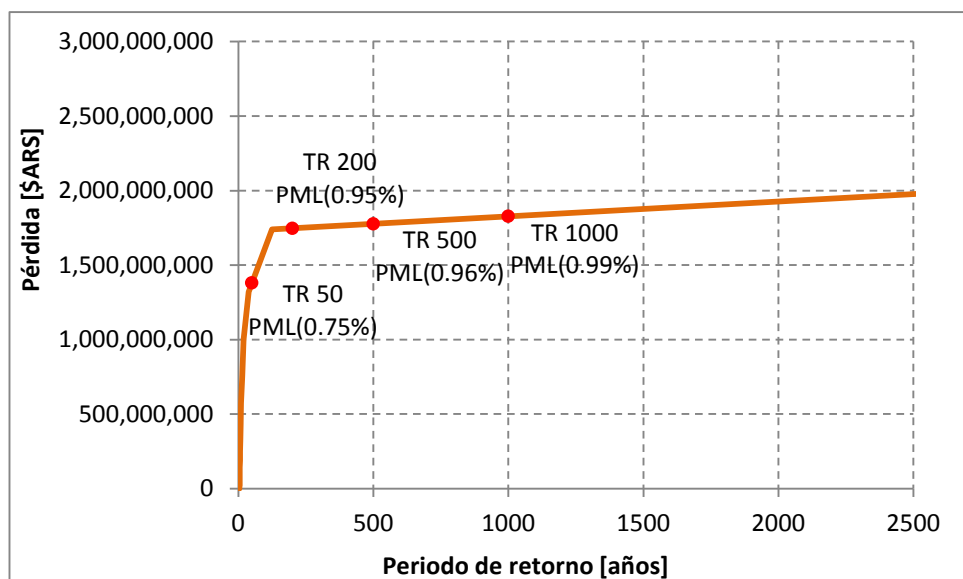


Figura 6-3. Curva de PML para el portafolio completo

En la Tabla 6-1 se presentan los valores de las pérdidas máximas probables para 50, 200, 500 y 1000 años de periodo de retorno, las cuales varían del 0.75% al 0.99% del valor total expuesto. La curva completa de la relación entre pérdidas máximas probables y el periodo de retorno, conocida como la curva de PML, se presenta en la Figura 6-3. Los mapas de pérdida anual esperada y valores de prima se presentan en el Anexo A1-3 y en el Anexo A1-4, respectivamente.

6.2 Resultados según uso de la edificación

En la Tabla 6-2 se presenta la distribución relativa de edificaciones según su uso, en la que el 82% de edificaciones son de uso residencial, casi el 10% de las edificaciones son dedicadas a uso industrial y 8% a uso institucional general (edificios de Gobierno, deporte, cultura entre otros).

Tabla 6-2. Resultados según uso de la edificación

Uso asignado	Num. edificaciones		Valor de reposición		Pérdida anual esperada		
	#	%	Pesos [Millones]	%	Pesos [Millones]	Prima [%]	%
Residencial	176,861	81.89%	\$ 135,854	73%	\$ 118.383	0.871	83.78%
Comercial	21,316	9.87%	\$ 24,994	13%	\$ 12.724	0.509	9.01%
Industrial	115	0.05%	\$ 2,399	1%	\$ 0.000	0.000	0.00%
Institucional	17,399	8.06%	\$ 20,124	11%	\$ 10.035	0.499	7.10%
Educacion	114	0.05%	\$ 1,311	1%	\$ 0.000	0.000	0.00%
Salud	166	0.08%	\$ 678	0%	\$ 0.157	0.232	0.11%
Total	215,971	100%	\$ 185,360.52	100%	\$ 141.30	0.76	100%

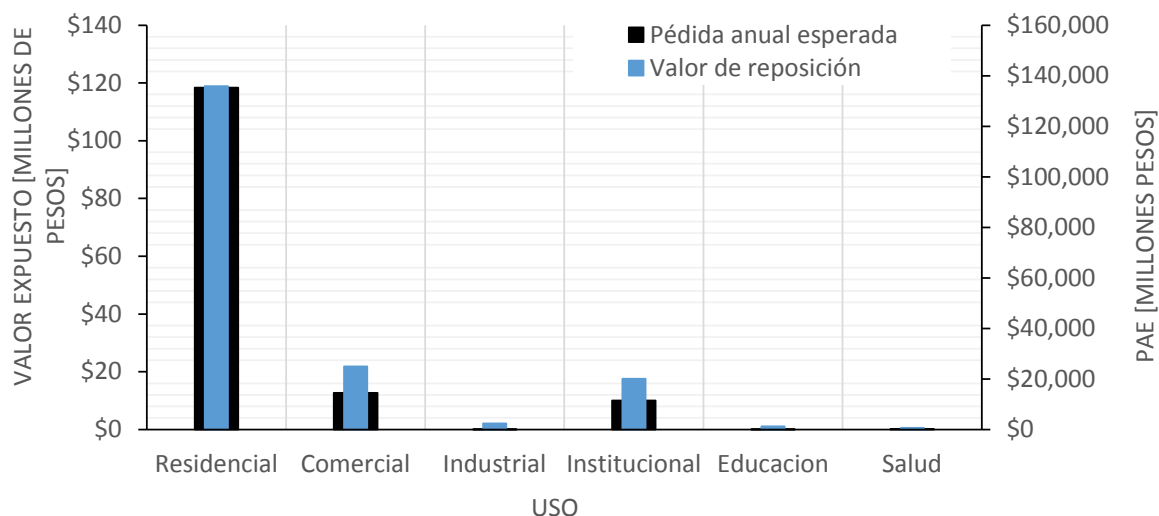


Figura 6-4. Valor expuesto y pérdida esperada por uso

En cuanto a los resultados, se puede ver que las pérdidas se concentran en el portafolio de uso residencial. Este portafolio es el que mayor prima tiene (relación al millar entre la pérdida anual esperada y el valor de reposición), con 0.871‰, seguido por el portafolio de edificaciones de uso comercial, institucional y salud. En general los valores de prima para el caso de inundación en Santa Fe son bajos. Para los portafolios de edificaciones destinadas a uso industrial y de educación no se esperan pérdidas.

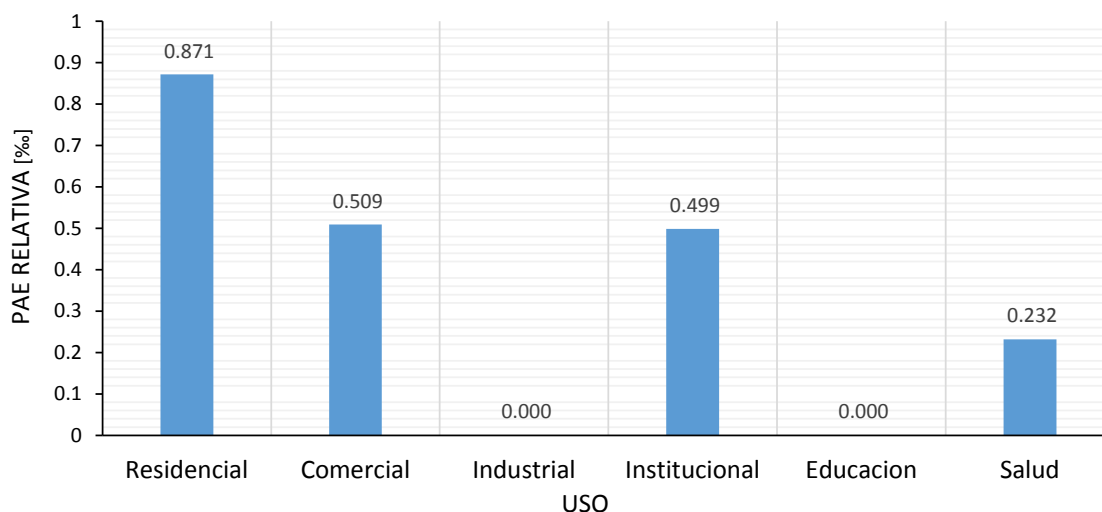


Figura 6-5. Prima por uso

6.2.1 Portafolio Salud

Se realizó el análisis de riesgo por inundación con la información adicional recibida para 60 centros de salud y hospitales que conforman el portafolio de edificaciones de salud. El valor de pérdida anual esperada, para el portafolio de salud es de \$157,000 de pesos argentinos, que representa el 0.23% de su valor expuesto total (\$678 millones de pesos argentinos). La Figura 6-6 muestra la curva de excedencia de pérdidas que relaciona el valor de pérdida con la tasa de excedencia, o el inverso del periodo de retorno.

Tabla 6-3. Resultados de riesgo para el portafolio de salud

Resultados		
Valor Expuesto	ARS\$ x10 ⁶	678
Pérdida anual esperada	ARS\$ x10 ⁶	0.157
	‰	0.232
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	ARS\$ x10 ⁶	%
50	\$1.78	0.26
200	\$2.38	0.35
500	\$2.49	0.37
1000	\$2.55	0.38

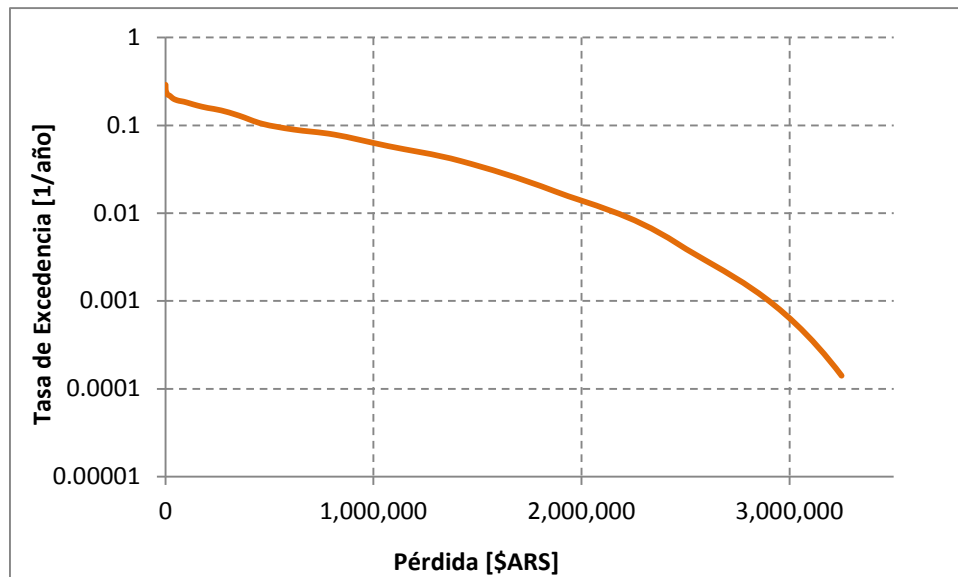


Figura 6-6. Curva de excedencia de pérdidas para el portafolio de salud

En forma particular, se calculó la pérdida anual esperada por centro de salud para identificar aquellos sitios en los que se esperan mayores pérdidas en caso de eventos de inundación. Los resultados para las 60 edificaciones se presentan en el Anexo A1-5. Los centros de salud con

mayor prima se muestran en la Tabla 6-4, en la cual la columna de VALFIS es el valor de reposición de la edificación y la columna de PAE es la pérdida anual esperada.

Tabla 6-4. Centros de salud con mayor prima

Tipo	Nombre	VALFIS	PAE	Prima
		Pesos [Millones]	Pesos [Millones]	[%]
Centro de Salud	12 de Octubre	\$ 641,324	\$ 43,737	68.20
Centro de Salud	Mendoza Oeste	\$ 844,823	\$ 22,722	26.90
Centro de Salud	B. Chalet	\$ 1,415,667	\$ 26,354	18.62
Centro de Salud	Guadalupe Central Padre	\$ 2,135,595	\$ 26,653	12.48
Centro de Salud	Oratorio San Lorenzo	\$ 934,365	\$ 5,310	5.68
Centro de Salud	Alberdi	\$ 1,047,870	\$ 5,340	5.10
Centro de Salud	M. Montes (Guad. Oeste)	\$ 2,795,929	\$ 10,636	3.80
Centro de Salud	Fonavi Cementerio	\$ 2,336,479	\$ 7,143	3.06
Centro de Salud	Cristo Obrero	\$ 1,027,122	\$ 2,885	2.81
Centro de Salud	Baradero Sarsoti	\$ 903,549	\$ 2,014	2.23
Centro de Salud	Emaus	\$ 1,271,461	\$ 2,454	1.93
Centro de Salud	Alto Verde	\$ 994,167	\$ 520	0.52

En la Figura 6-7 y en la Figura 6-8 se muestra la ubicación de los 3 Centros de Salud que obtuvieron la mayor prima, que son 12 de Octubre (68.2‰), Mendoza Oeste (26.9‰) y B. Chalet (18.6‰), con respecto al mapa de amenaza integrada para 100 y 1,000 años de periodo de retorno. En los mapas se puede ver cómo el nivel de inundación alcanza profundidades superiores a 2 metros en 100 años de periodo de retorno y hasta 4 metros en 1,000 años de periodo de retorno para el caso del Centro de Salud 12 de Octubre.

En el Anexo A1-5 y en el Anexo A1-7 se presentan la ubicación de Centros de Salud analizados con el mapa de amenaza integrada para 100 y 1,000 años de periodo de retorno, respectivamente. En estos mapas se puede ver como las zonas en las que se obtuvieron pérdidas anuales esperadas altas son la zona sur-occidental (cercano a las defensas del Sector 1) y en la zona nor-oriental (cercano a las defensas del Sector 5 y Sector 6).

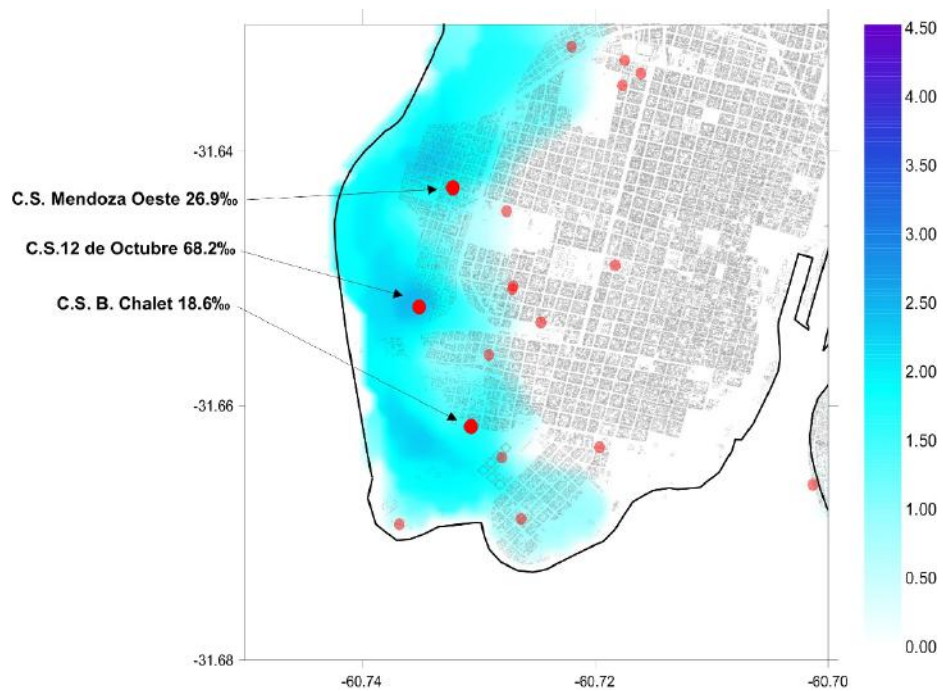


Figura 6-7. Edificaciones de salud de mayor prima en mapa de amenaza integrada de TR100 años.

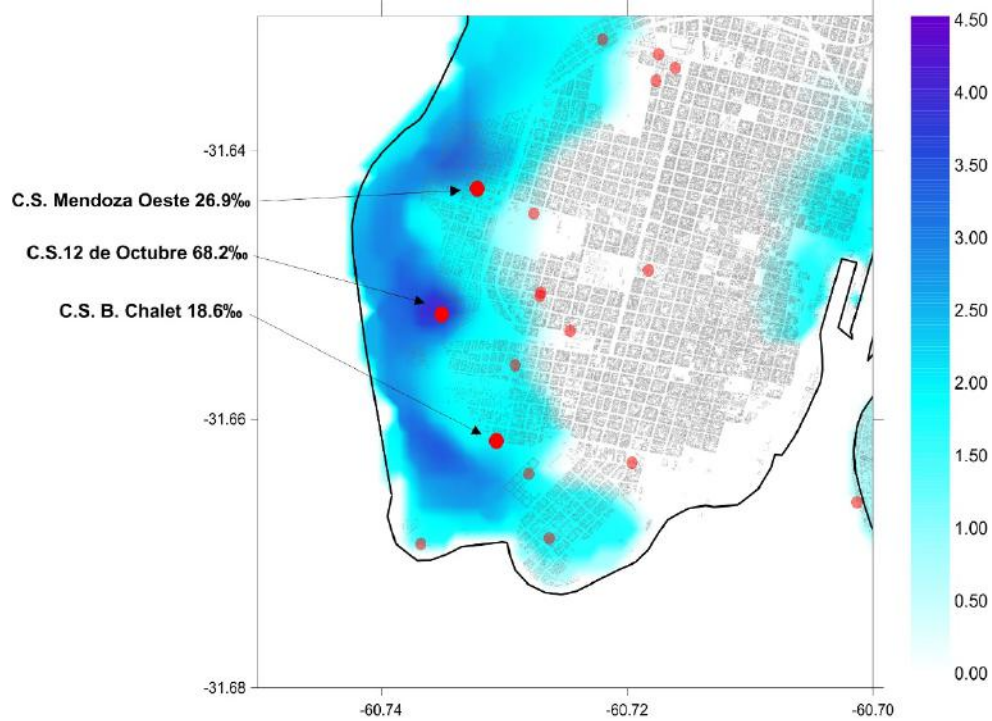


Figura 6-8. Edificaciones de salud de mayor prima en mapa de amenaza integrada de TR1000 años.

7 Resultados de la evaluación del riesgo por inundación en Santa Fe (sin desbordamiento)

Los resultados que se presentan a continuación son para el portafolio completo de edificaciones de la ciudad de Santa Fe, pero cambiando la amenaza al eliminar los escenarios en los que se presenta desbordamiento por sobrepaso del nivel del agua con respecto a la cota de coronamiento de la defensa. Esto se logra al intervenir las defensas, aumentando la cota de coronamiento de las mismas.

En la Tabla 7-1 se muestra que el valor de pérdida anual esperada, en caso de inundación sin desbordamiento de defensas, para el portafolio completo es de \$30.3 millones de pesos argentinos, que representa el 0.16% de su valor expuesto total (\$185,360 millones de pesos argentinos).

Tabla 7-1. Resultados de riesgo para el portafolio completo sin eventos de desbordamiento

Resultados		
Valor Expuesto	ARS\$ x 10 ⁶	185,361
Pérdida anual esperada	ARS\$ x 10 ⁶	30.34
	%	0.164
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	ARS\$ x 10 ⁶	%
50	\$634	0.34
200	\$1,153	0.62
500	\$1,322	0.71
1000	\$1,329	0.72

Comparando estos resultados con los obtenidos con la amenaza completa (ver Tabla 6-1) se puede ver que en el caso en el que se evitan los desbordamientos se disminuye de 141 millones de pesos argentinos (0.76‰) a 30.3 millones de pesos argentinos (0.16‰). Esto demuestra que al aumentar la cota de coronamiento de las defensas, hay una disminución considerable en la pérdida anual, sin llegar a ser cero, por lo que permanece un riesgo de falla de las defensas.

La Figura 7-1 muestra la comparación de las curvas de excedencia de pérdidas que relaciona el valor de pérdida con la tasa de excedencia que no es más que el inverso del periodo de retorno. Se puede ver como la curva del caso sin desbordamiento está por debajo de la curva resultante de la amenaza completa, disminuyendo las pérdidas para todas las tasas de excedencia. Así mismo, en la Figura 7-2 se muestra la comparación de las curvas de PML, demostrando una menor pérdida para todos los periodos de retorno, en el caso de amenaza sin desbordamiento.

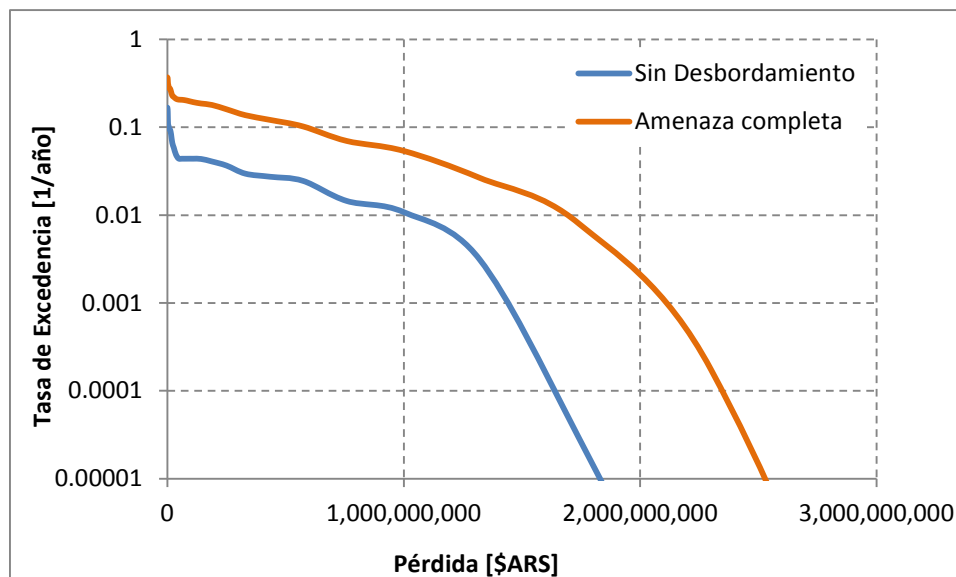


Figura 7-1. Comparación de curvas de excedencia de pérdidas para el portafolio completo.

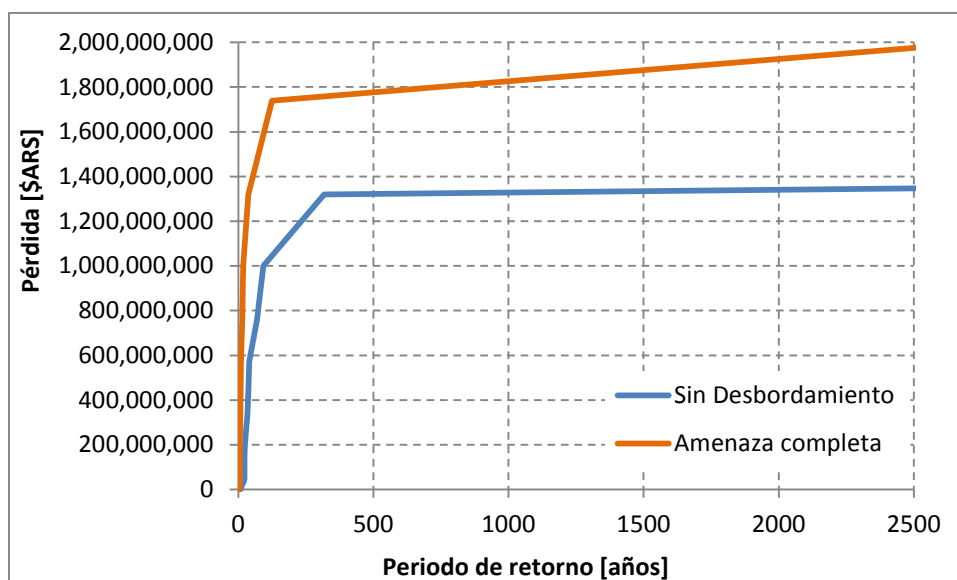


Figura 7-2. Comparación de curvas de PML para el portafolio completo

La reducción en las pérdidas esperadas también se ve reflejada en los mapas de PAE y prima para cada uno de los predios de la ciudad de Santa Fe, que se presentan en los Anexos A1-8 y A1-9, respectivamente. Al comparar los mapas de prima (Ver Figura 7-3), o pérdida anual esperada relativa, se pueden ver la reducción de los valores en el sector sur-occidental, cerca de la defensa del Sector 1, y en la zona nor-oriental cerca de las defensas de los sectores 5 y 6.

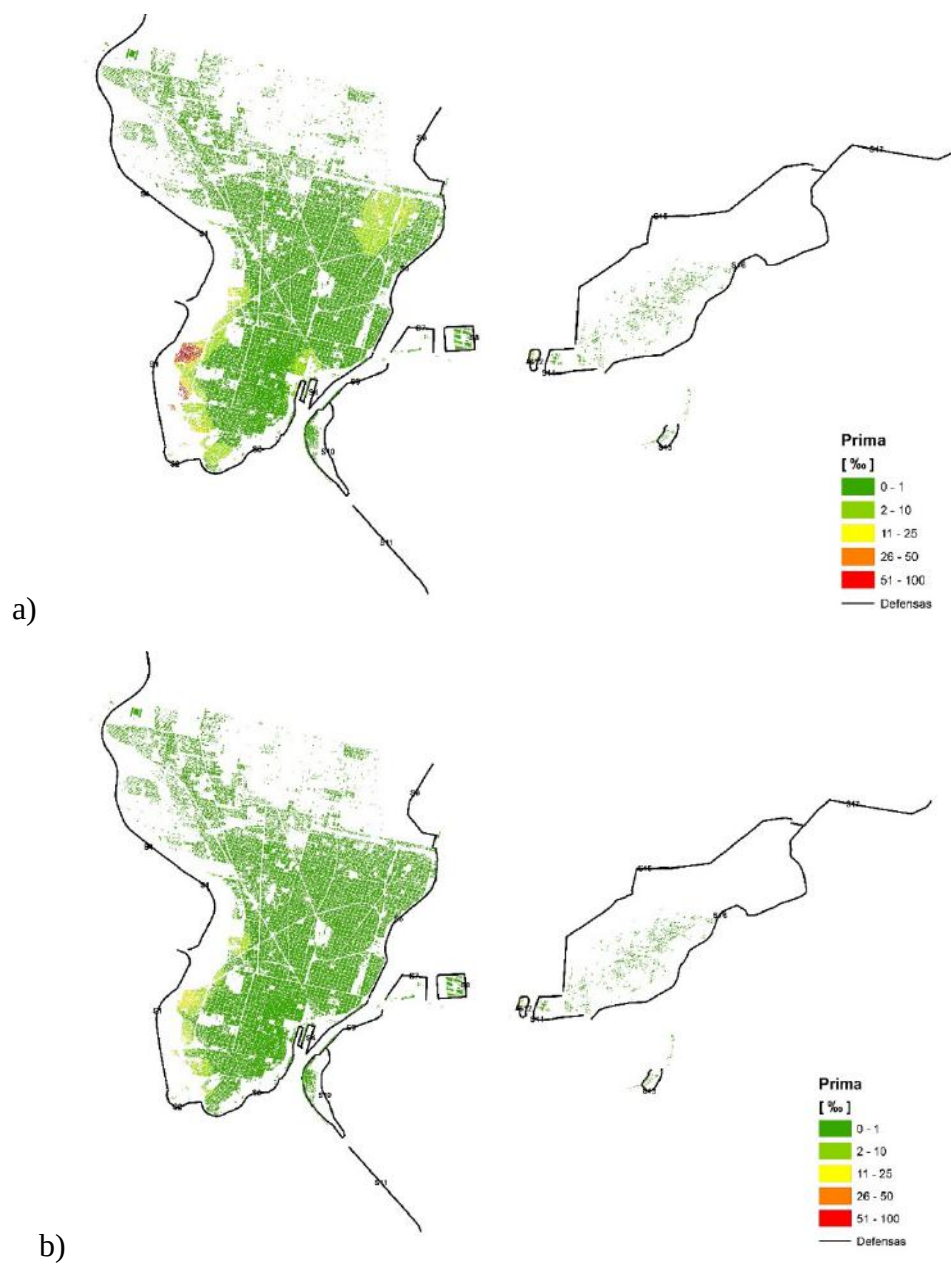


Figura 7-3. Mapas de pérdida anual esperada relativa [%] para a) Amenaza completa y b) Amenaza sin escenarios de desbordamiento

8 Análisis de probabilidades de excedencia para varias alturas de inundación y afectación a la población

En la sección anterior se presentaron los resultados de la amenaza integrada para Santa Fe en términos de la intensidad de la inundación (altura en metros) para varios periodos de retorno. El tratamiento de la amenaza de una forma probabilista permite expresar estos mismos resultados de maneras alternativas que proveen perspectivas diversas sobre la amenaza. Una de estas formas alternativas de ver los resultados de la amenaza consiste en determinar la probabilidad que se tiene de exceder cierto nivel de intensidad (altura de la inundación) en una ventana de tiempo determinado; es decir, determinar qué probabilidad existe de que se iguale o exceda 1.3 metros de altura del agua en 30 años, por ejemplo. Esto se realiza utilizando la siguiente relación matemática que existe entre el periodo de retorno, la ventana de exposición y la probabilidad de excedencia:

$$P = 1 - e^{-T/PR}$$

Donde P es la probabilidad de exceder determinada intensidad, T es la ventana de exposición en años y PR es el periodo de retorno de dicha intensidad. De acuerdo con esta relación sigue que diferentes combinaciones de probabilidad de excedencia y tiempo de exposición resultan en diferentes periodos de retorno. Esto permite explicar un poco mejor qué significa un periodo de retorno determinado: una altura de inundación que tiene un periodo de retorno de 475 años tiene una probabilidad del 10% de ser excedida en 50 años, mientras que una altura de inundación que tiene un periodo de retorno de 100 años tiene una probabilidad del 39.3% de ser excedida en 50 años. La Figura 8-1 presenta mapas que muestran precisamente esta probabilidad de excedencia para varias alturas de inundación y un tiempo de exposición de 50 años. Adicionalmente y dado que se tienen dos modelos de amenaza (uno considerando desbordamiento en las defensas y otro sin esto) se realizó este análisis para ambos casos para poder comparar (en la Figura 8-1 la columna izquierda muestra los resultados para el modelo con desbordamiento mientras que la columna derecha muestra los resultados para el modelo sin desbordamiento). Estos mapas ilustran claramente el hecho que un único valor de altura de inundación, por ejemplo 1 metro, corresponde a periodos de retorno distintos para cada punto en la ciudad, y esto se da precisamente a que cada punto tiene una probabilidad distinta de igualar o exceder ese valor (en 50 años); las áreas de color rojo tienen una probabilidad más alta de igualar o exceder un determinado valor de altura de agua que las áreas verdes, lo que hace que esas áreas tengan un periodo de retorno más corto para dicha altura de agua que las áreas verdes. El mapa correspondiente a una altura de inundación de 0 metros sirve para identificar las áreas completamente secas; es decir, las áreas en blanco en estos mapas representan áreas donde la probabilidad de superar 0 m de inundación en 50 años es 0%, y por lo tanto, estas áreas son secas (por el contrario las áreas rojo oscuro representan un 100% de probabilidad de exceder 0 m de inundación en 50 años, lo que indica que con certeza estas áreas se mojarán). En forma sucesiva, a medida que la altura de inundación se incrementa, las probabilidades de excedencia disminuyen, reduciéndose las áreas rojas. Por otro lado, si se comparan los dos modelos de amenaza, se puede ver que en todos los casos el modelo sin desbordamiento resulta en probabilidades de excedencia menores, y por lo tanto en manchas más reducidas y por lo tanto niveles de amenaza más bajos.

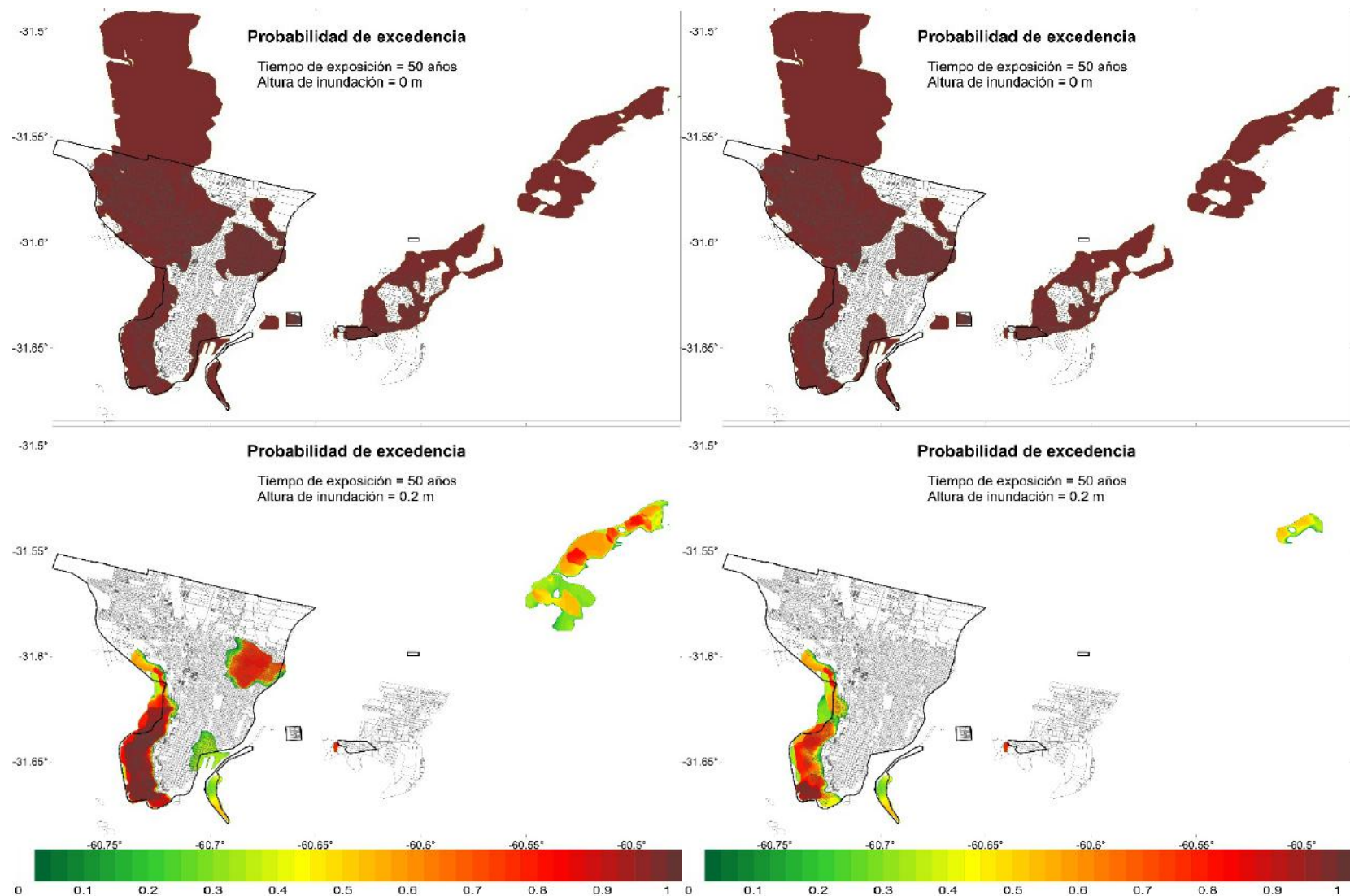


Figura 8-1 Probabilidad de excedencia de varias alturas de inundación en 50 años. Izquierda: amenaza con desborde. Derecha: amenaza sin desborde.

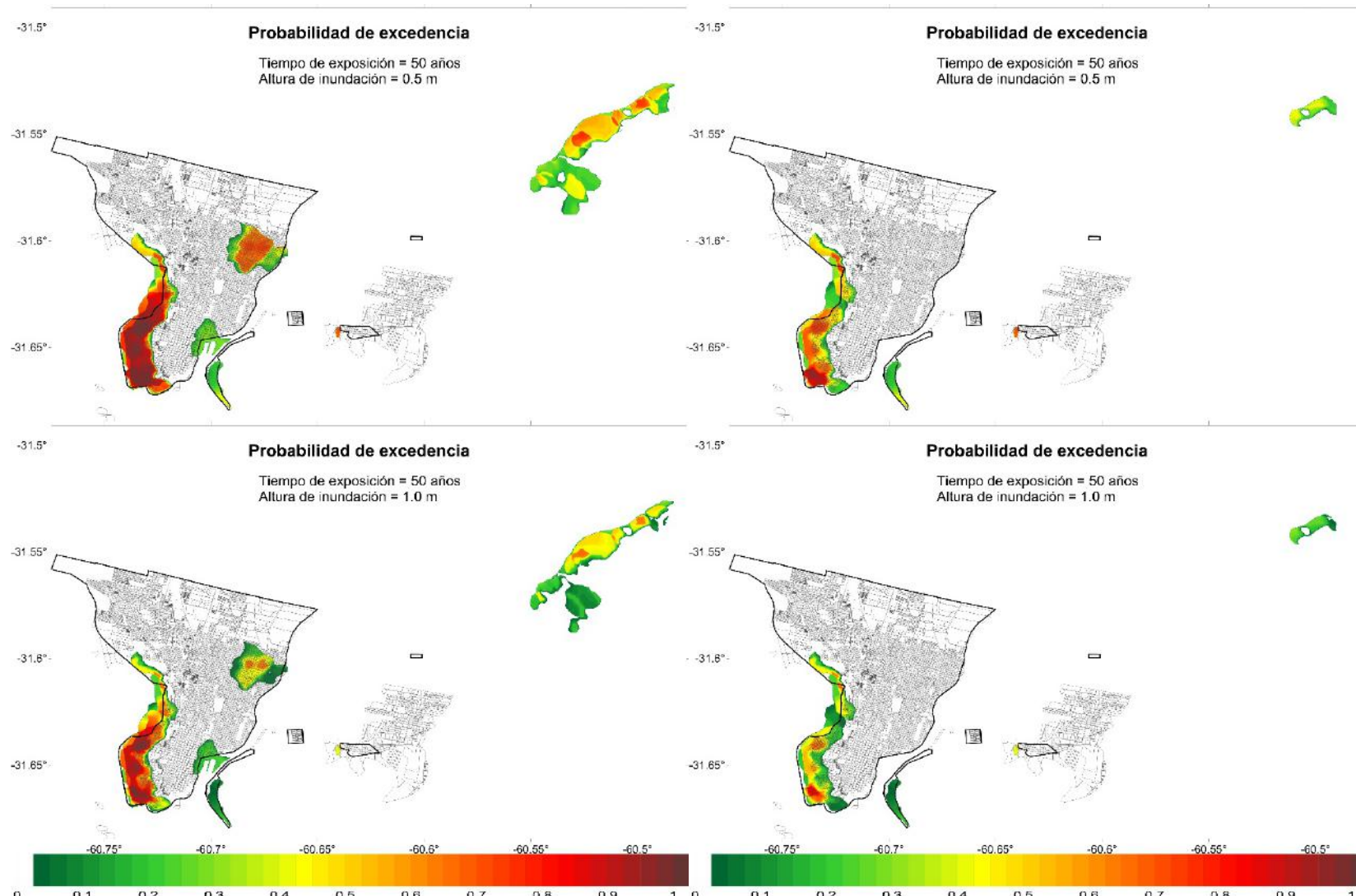


Figura 2-17 Probabilidad de excedencia de varias Alturas de inundación en 50años. Izquierda: con desborde. Derecha: sin desborde (Continuación).

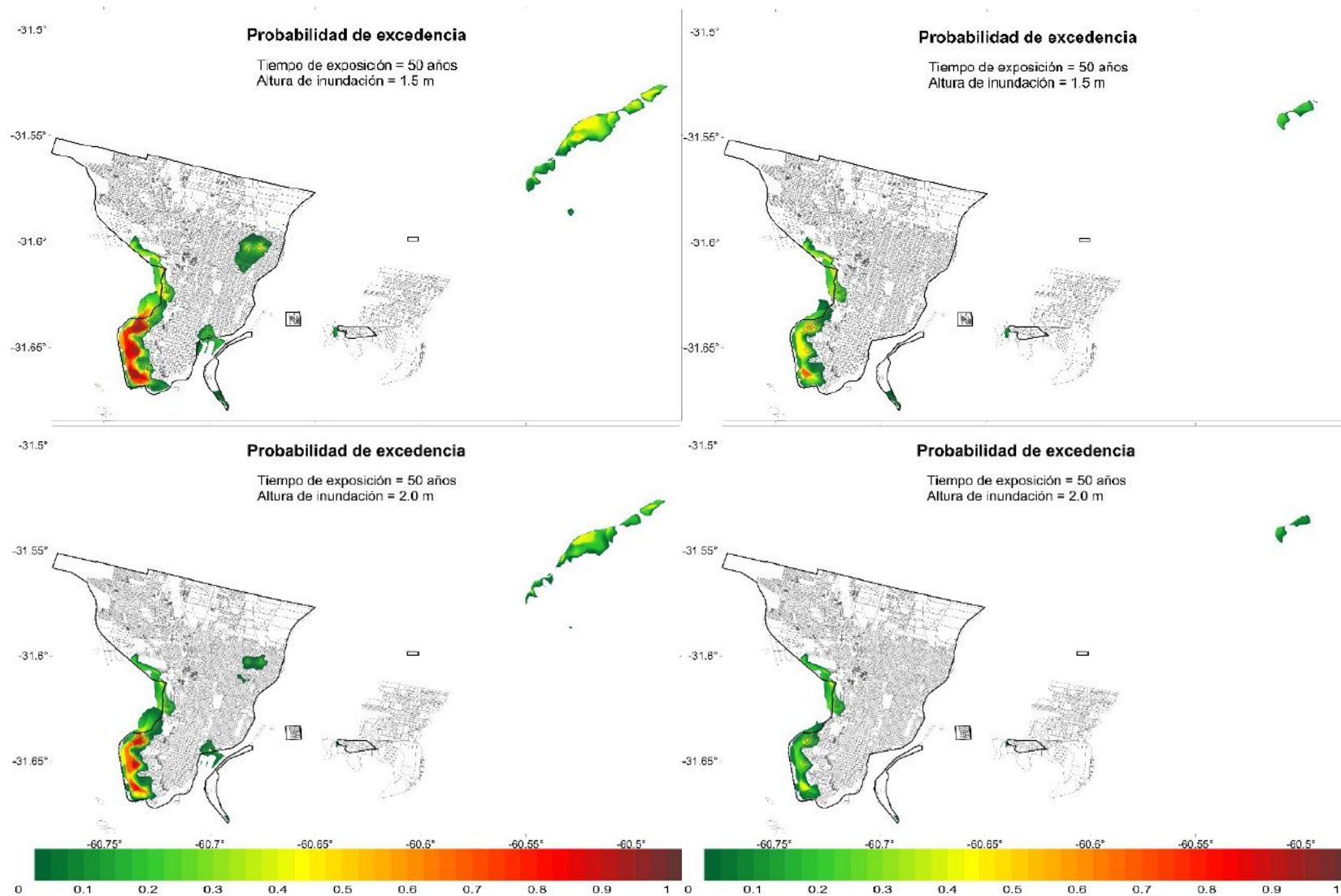


Figura 2-17 Probabilidad de excedencia de varias alturas de inundación en 50 años. Izquierda: con desborde. Derecha: sin desborde (Continuación)

Si se sobreponen los elementos expuestos de Santa Fe a estos mapas de probabilidad de excedencia se puede determinar este valor para cada una de las edificaciones. Esto permite determinar cuántas edificaciones o qué porcentaje de la ciudad caen en distintos rangos de probabilidad y así poder identificar las edificaciones con mayor o menor amenaza. A continuación se muestran los resultados de este análisis para la amenaza con desbordamiento. La Tabla 8-1 muestra un resumen de la cantidad de edificaciones que tienen una probabilidad de excedencia dentro de ciertos rangos (0%-10%, 10%-30%, 30%-50%, 50%-80% y 80%-100%) para seis alturas de inundación (0m, 0.2m, 0.5m, 1m, 1.5m y 2m); la Tabla 8-2 muestra estos mismos resultados pero en porcentaje. Lo primero que se ve de estas tablas es que hay 83,256 edificaciones (38.5%) en condición “seca” (probabilidad de 0% de exceder 0m) y 132,715 (61.5%) que con certeza se mojarán en algún momento de una ventana de 50 años (100% de probabilidad de exceder 0m); esto indica que el 62% de la ciudad se verá afectada en algún grado por inundaciones en una ventana de 50 años. Si se considera una altura de inundación de 20cm se ve que 162,346 edificaciones (el 75%) tienen máximo 10% de probabilidad de exceder esa altura en 50 años, mientras que 15,672 edificaciones (el 7%) tienen una probabilidad del 100%. Aunque el cambio en altura de 0m a 0.2m es pequeño, el cambio en la cantidad de edificaciones con diferentes niveles de afectación es grande, disminuyendo considerablemente la cantidad de edificaciones con probabilidades altas de excedencia (bajó del 62% al 7% de la ciudad en probabilidad entre 80% y 100%). A medida que se incrementa la altura de inundación esto se vuelve más marcado, hasta el punto que para 2m el 98% de la ciudad tiene una probabilidad máxima del 10% de exceder esta altura en 50 años.

Tabla 8-1
Número de edificaciones en rangos de probabilidad de excedencia de distintas alturas de inundación en un periodo de 50 años (amenaza con desbordamiento)

		Número de edificaciones				
Probabilidad de excedencia Periodo de retorno [años]		0.00 - 0.10 475 o más	0.11 - 0.30 140-475	0.31 - 0.50 72-140	0.51 - 0.80 31-72	0.81 - 1.00 Hasta 31
Altura de inundación [m]	0	83256	0	0	0	132715
	0.2	162346	12218	6727	19008	15672
	0.5	173616	13602	5260	14265	9228
	1	189482	9737	8014	5542	3196
	1.5	200976	10890	1569	1568	968
	2	211849	2309	899	912	2

Tabla 8-2
Porcentaje de edificaciones en rangos de probabilidad de excedencia de distintas alturas de inundación en un periodo de 50 años (amenaza con desbordamiento)

		Porcentaje de edificaciones				
Probabilidad de excedencia Periodo de retorno [años]		0.00 - 0.10 475 o más	0.11 - 0.30 140-475	0.31 - 0.50 72-140	0.51 - 0.80 31-72	0.81 - 1.00 Hasta 31
Altura de inundación [m]	0	38.5%	0.0%	0.0%	0.0%	61.5%
	0.2	75.2%	5.7%	3.1%	8.8%	7.3%
	0.5	80.4%	6.3%	2.4%	6.6%	4.3%
	1	87.7%	4.5%	3.7%	2.6%	1.5%
	1.5	93.1%	5.0%	0.7%	0.7%	0.4%
	2	98.1%	1.1%	0.4%	0.4%	0.0%

Adicionalmente, lo anterior se puede extender para llegar a definir una “altura de diseño” para las edificaciones que cumpla con un nivel de seguridad predeterminado. Esto se refiere a que si se fija un nivel de amenaza aceptable, es posible determinar para cada edificación la altura a la que se tendrían que elevar para que cumplan con ese nivel de seguridad. Para este análisis se definió un periodo de retorno de 475 años (es decir una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años) como el nivel de amenaza para diseño. Según esto para cada edificación se vio qué altura de inundación tenía el 10% o menos de probabilidad de ser excedida, y se escogió esta altura como la altura de diseño para esa edificación. La Tabla 8-3 muestra un resumen de la cantidad de edificaciones que se tienen con las diferentes alturas de diseño. De ahí se pueden ver las siguientes conclusiones importantes: el 38.5% de las edificaciones no necesitan ser elevadas, el 37% requieren ser elevadas a 0.2m, y el 2% requieren ser elevadas a más de 2 metros, lo que puede indicar que otro tipo de medida se puede pensar para estas últimas ya que elevarlas a más de 2 metros puede no ser factible o práctico. La Figura 8-2 muestra la altura de diseño para cada una de las edificaciones de Santa Fe.

Tabla 8-3
Cantidad de edificaciones con diferentes alturas de diseño (amenaza con desbordamiento)

Altura de diseño [m]	Número de edificaciones	
	---	[%]
0m	83,256	38.5
0.2m	79,090	36.6
0.5m	11,270	5.2
1m	15,866	7.3
1.5m	11,494	5.3
2m	10,873	5.0
> 2m	4,122	1.91

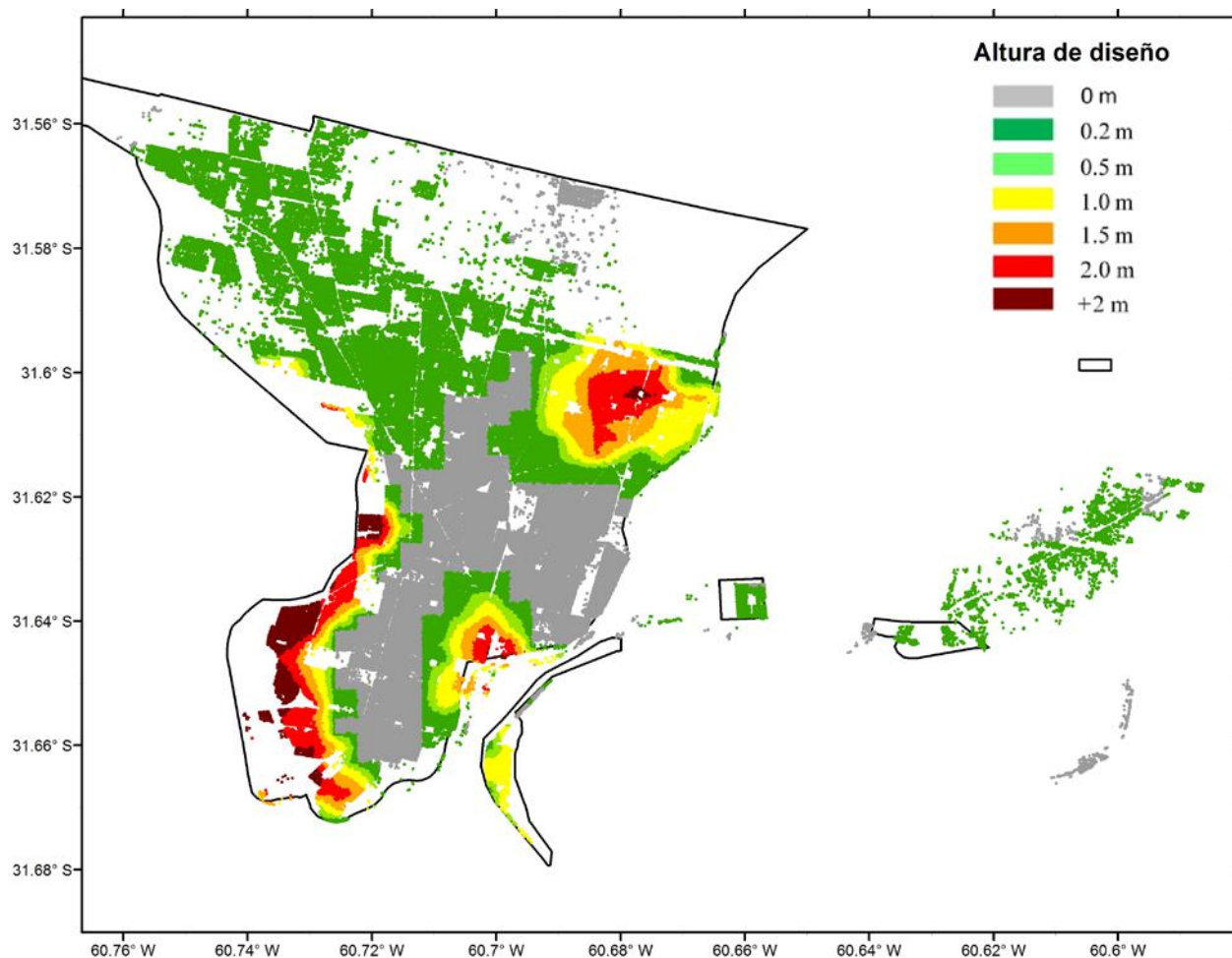


Figura 8-2
Mapa de alturas de diseño para las edificaciones (amenaza con desbordamiento)

Si además de estos análisis se toma en cuenta la ocupación humana de cada una de las edificaciones, es posible estimar también la cantidad de afectados para distintos niveles de inundación. Para esto lo primero que se hizo fue asignar una ocupación humana a las edificaciones basándose en la información de población del Censo del 2010 (REF); de allí se extrajo información de densidad de población por áreas censales, y la población finalmente fue asignada posteriormente a cada edificación de acuerdo al área construida. Una vez se conoce la ocupación de cada construcción, esta información se cruza nuevamente con los mapas de probabilidad de excedencia de intensidad, para así poder calcular cuántos afectados se tendrían para varias alturas de inundación. Para definir qué se considera como afectación se eligió como mínimo un 10% de probabilidad de excedencia de la altura de inundación; es decir, una edificación (y por lo tanto todos sus ocupantes) son consideradas como afectadas sólo si la probabilidad de que la altura del agua exceda el nivel analizado es más del 10% en 50 años. De esta manera se tomaron varios niveles de inundación a los cuales se les calculó la cantidad de afectados correspondientes, lo cual se muestra en la Tabla 8-4 (se muestra en cantidad y en porcentaje de la población total de Santa Fe). En esta tabla se ve que el 73% de la población se vería afectada por una inundación de más de 0 metros (con por lo menos una probabilidad de más

del 10% en 50 años), mientras que ya tan sólo el 27% de la población se vería afectada por una inundación de más de 0.2 metros, y finalmente tan solo el 4% de la población se vería afectada por una inundación de más de 2 metros.

Tabla 8-4
Estimación de personas afectadas para diferentes alturas de inundación (amenaza con desbordamiento)

Altura de inundación [m]	Personas afectadas	
	---	[%]
> 0m	286,367	73%
> 0.2m	105,150	27%
> 0.5m	86,790	22%
> 1m	59,112	15%
> 1.5m	37,866	10%
> 2m	16,005	4%

Los resultados de este mismo análisis para la amenaza sin desbordamiento se presentan a continuación en la Tabla 8-5, Tabla 8-6, Tabla 8-7, Figura 8-3 y Tabla 8-8. Si se compara con los resultados de la amenaza con desbordamiento se ve que para una altura de inundación de 0.2m el porcentaje de edificaciones con probabilidad de excedencia de máximo 10% aumenta hasta llegar al 91%, y de igual manera para una altura de inundación de 2m el porcentaje de edificaciones con probabilidad de excedencia de máximo 10% alcanza el 99%. En general todas las edificaciones disminuyen sus niveles de amenaza. En cuanto a las alturas de diseño se ve que la cantidad de edificaciones secas se mantiene igual, pero las edificaciones con altura de diseño de 0.2m aumentan considerablemente hasta llegar a concentrar el 52% de manera que representa la gran mayoría de las edificaciones. Las edificaciones con altura de diseño mayor a 2 metros y que por consiguiente se tendrían que explorar otras opciones (reubicación por ejemplo), disminuye hasta el 0.9%.

En términos de las personas afectadas, se ve, primero que todo, que la cantidad total de personas afectadas disminuye en un 24% (446,575 personas afectadas sin desbordamiento comparado con 591,290 personas afectadas con desbordamiento). De igual manera se ve que para cada uno de los distintos niveles de inundación la cantidad y por lo tanto el porcentaje de la población total que se ve afectada disminuye: en este caso tan sólo el 15% de la población se vería afectada por una inundación de más de 20 cm (comparado con el 27% con desbordamiento), y tan sólo el 2% se vería afectada por una inundación de más de 2 metros (comparado con el 4% con desbordamiento).

Tabla 8-5
Número de edificaciones en rangos de probabilidad de excedencia de distintas alturas de inundación en un periodo de 50 años (amenaza sin desborde)

Número de edificaciones						
Probabilidad de excedencia Periodo de retorno [años]		0.00 - 0.10 475 o más	0.11 - 0.30 140-475	0.31 - 0.50 72-140	0.51 - 0.80 31-72	0.81 - 1.00 Hasta 31
Altura de inundación [m]	0	83256	0	0	0	132715
	0.2	195829	4759	4841	9288	1254
	0.5	200189	6109	4933	4698	42
	1	206810	5606	2451	1104	0
	1.5	211991	2865	1115	0	0
	2	214089	1882	0	0	0

Tabla 8-6
Porcentaje de edificaciones en rangos de probabilidad de excedencia de distintas alturas de inundación en un periodo de 50 años (amenaza sin desborde)

Porcentaje de edificaciones						
Probabilidad de excedencia Periodo de retorno [años]		0.00 - 0.10 475 o más	0.11 - 0.30 140-475	0.31 - 0.50 72-140	0.51 - 0.80 31-72	0.81 - 1.00 Hasta 31
Altura de inundación [m]	0	38.5%	0.0%	0.0%	0.0%	61.5%
	0.2	90.7%	2.2%	2.2%	4.3%	0.6%
	0.5	92.7%	2.8%	2.3%	2.2%	0.0%
	1	95.8%	2.6%	1.1%	0.5%	0.0%
	1.5	98.2%	1.3%	0.5%	0.0%	0.0%
	2	99.1%	0.9%	0.0%	0.0%	0.0%

Tabla 8-7
Cantidad de edificaciones con diferentes alturas de diseño (amenaza sin desborde)

Altura de diseño [m]	Número de edificaciones	
	---	[%]
0m	83,256	38.5
0.2m	112,573	52.1
0.5m	4,360	2.0
1m	6,621	3.1
1.5m	5,181	2.4
2m	2,098	1.0
> 2m	1,882	0.87

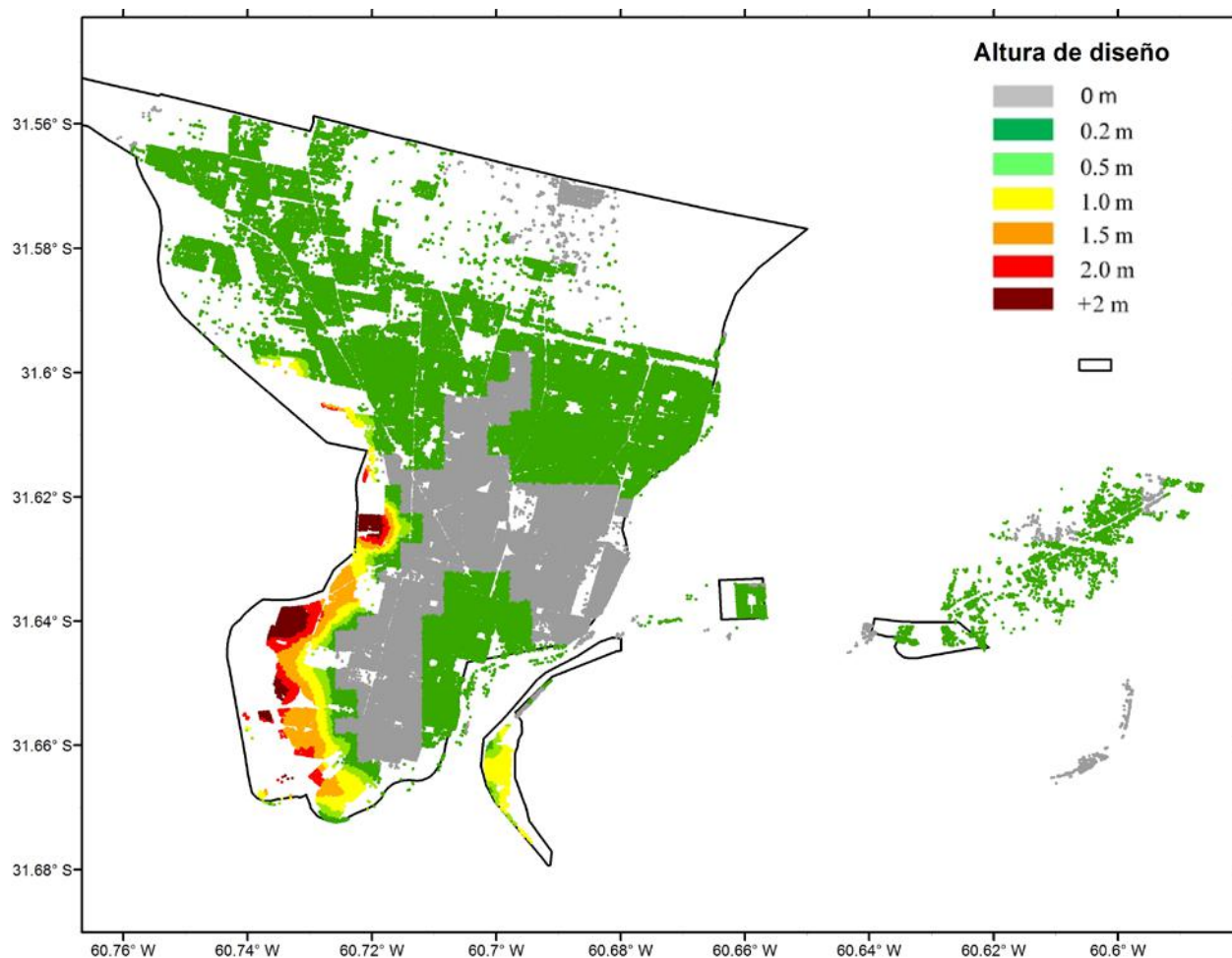


Figura 8-3
Mapa de alturas de diseño para las edificaciones (amenaza sin desbordamiento)

Tabla 8-8
Estimación de personas afectadas para diferentes alturas de inundación (amenaza sin desbordamiento)

Altura de inundación [m]	Personas afectadas	
	---	[%]
> 0m	286,367	73%
> 0.2m	58,176	15%
> 0.5m	48,684	12%
> 1m	29,653	8%
> 1.5m	15,961	4%
> 2m	7,735	2%

9 Conclusiones

En este informe se presenta la evaluación de riesgo probabilístico por inundaciones en la ciudad de Santa Fe, en Argentina. Estos resultados ilustran los niveles de riesgo asociados con la amenaza por desbordamiento o rompimiento de las defensas existentes, la base de datos de exposición y su vulnerabilidad asociada. Entre los resultados obtenidos, vale la pena resaltar lo siguiente:

- Los resultados de riesgo se evaluaron para casi 216,000 predios incluidos en la base de datos de elementos expuestos de la ciudad, que suman un valor total de reposición de \$185,360 millones de pesos argentinos. En particular, se evaluó el portafolio de edificaciones destinadas a la prestación de servicios de salud. En total se evaluaron 60 centros de salud y hospitales, que sumen un valor total de reposición de \$678 millones de pesos argentinos.
- Para el caso de amenaza por inundación por desbordamiento o falla de las estructuras de defensa existentes en la ciudad, se obtuvo que el valor de la pérdida anual esperada del portafolio completo es de \$141 millones de pesos argentinos, lo que representa el 0.76% de su valor expuesto total. En particular, para el portafolio de salud se obtuvo que el valor de la pérdida anual esperada es \$157,000 de pesos argentinos, lo que representa el 0.23% de su valor expuesto total.
- Para el caso de amenaza por inundación por falla de las estructuras de defensa (sin incluir escenarios de desbordamiento), se obtuvo que el valor de la pérdida anual esperada del portafolio completo es de \$30.3 millones de pesos argentinos, lo que representa el 0.16% de su valor expuesto total.
- Al hacer la evaluación del riesgo sin incluir en la amenaza escenarios de desbordamiento de las defensas se tienen menores pérdidas esperadas para todos los periodos de retorno, como lo muestran las curvas de PML. Esto demuestra que una intervención de mantenimiento de las defensas, como lo es elevar la cota de coronamiento de las mismas, tiene un efecto directo en la disminución de las pérdidas. Sin embargo, las pérdidas no disminuyen a cero, lo que indica que se mantiene el riesgo por falla de la estructura de las defensas.

Finalmente es importante señalar que el análisis de riesgo probabilista no se había realizado para la ciudad, lo cual muestra el gran salto cualitativo en los estudios de riesgo en Santa Fe, y en particular los aplicados a eventos de inundación. Este tipo de resultados son de gran utilidad en la definición de medidas físicas de intervención y políticas de gestión del riesgo.

10 Referencias

Aprender de los desastres. Gestión Local del Riesgo en Santa Fe. Editado por el Gobierno de la ciudad y UNISDR en 2014.

Aula Ciudad 2012. *Santa Fe. La ciudad y el río*. Fascículo 5.

Aula Ciudad 2013. *Convivir con el Río*. Fascículo 13.

Concejo Municipal 2011. *Ordenanza No. 11748. Reglamento de Ordenamiento Urbano de la Ciudad de Santa Fe de la Veracruz*. Disponible en línea <http://www.santafeciudad.gov.ar/rou> [Última Consulta en Agosto 2015]

Convenio INA-MCSF 2014. *Estudio de zonas críticas por inundaciones frecuentes en la Ciudad de Santa Fe*. Informe Final de Octubre de 2014.

Hezer, H. Arrillaga, H. 2009. *La construcción social del riesgo y el desastre en el aglomerado Santa Fe*. Publicado por la Universidad Nacional del Litoral.

INDEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina) 2010. *Publicación del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010. Censo del Bicentenario. Resultados definitivos. Serie B N° 2*. Disponible en línea http://www.censo2010.indec.gov.ar/index_cuadros.asp [Última consulta en Agosto 2015]

Instituto Nacional del Agua (INA) 2006. *Estudio de delimitación de áreas de riesgo hídrico en Santa Fe*. Centro Regional Litoral. Informe Final de Junio de 2006.

IPEC - Instituto Provincial de Estadística y Censos (s.f.) *Cartografía por localidad. Provincia Santa Fe* Disponible en línea <http://www.ipec.santafe.gov.ar/descarga/download.php> [Última Consulta en Agosto 2015]

Marulanda, M., C. 2013. *Modelación probabilista de pérdidas económicas por sismo para la estimación de la vulnerabilidad fiscal del estado y la gestión financiera del riesgo*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente de la Provincia de Santa Fe y el Instituto Nacional del Agua (INA) 2009. *Evaluación del estado y grado de protección del sistema de defensa de las ciudades de Santa Fe – Recreo y Anillos de la Ruta Provincial No. 1*. Informe Final de Julio de 2009.

Observatorio de Valores Inmobiliarios Municipales (OVIM) 2015. *Plano de zonas inmobiliarias*. Santa Fe, Argentina.

Ordaz, M. 2000. *Metodología para la evaluación del riesgo sísmico enfocada a la gerencia de seguros por terremoto*. Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F.

Ordaz, M. 2008. *Relaciones entre curvas de fragilidad, matrices de probabilidad y funciones de vulnerabilidad*. Nota técnica ERN Ingenieros Consultores S.C.

Provincia de Santa Fe 2006. *Atlas de riesgo por inundaciones de la Provincia de Santa Fe*.

Santa Fe Cómo vamos 2012 editado por el Gobierno de la ciudad y la Bolsa de Comercio de Santa Fe.

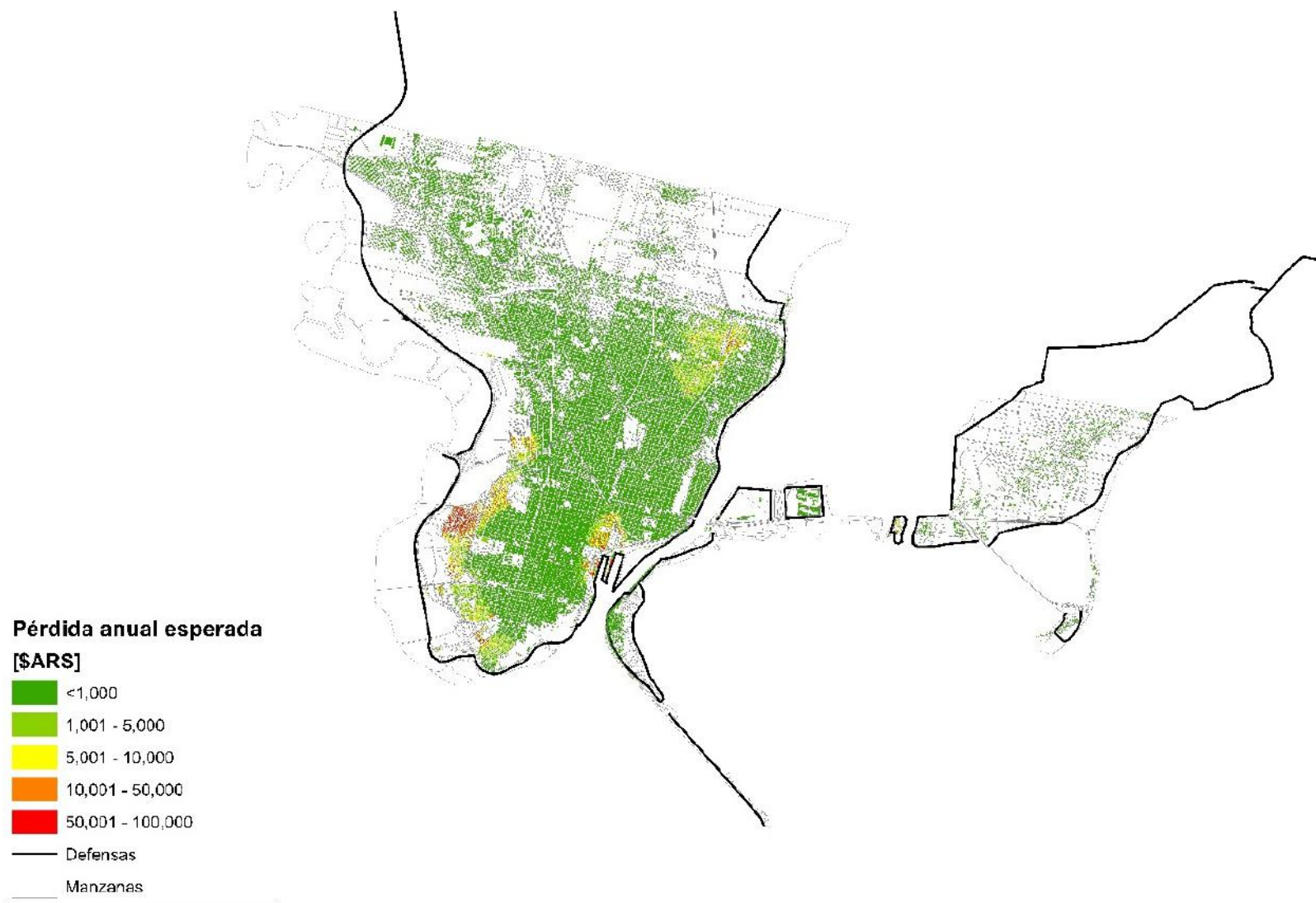
Anexo 1
Caso de estudio de riesgo por inundación de Santa Fe

Anexo A1-1. Distribución porcentual de material según calidad constructiva, calidad de materiales y número de pisos

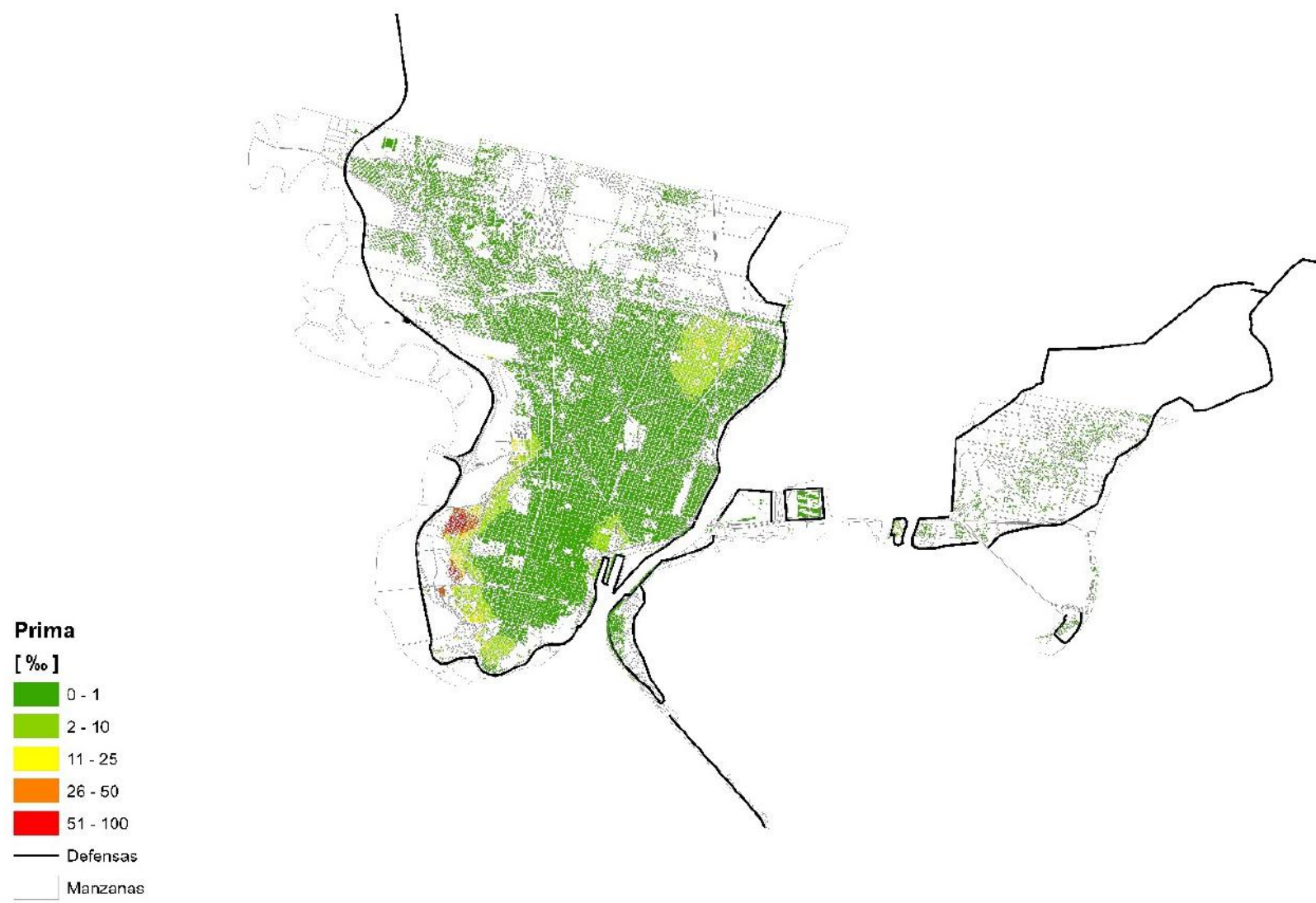
Calidad Constructiva	Calidad Materiales	# Pisos	Sistema Estructural												
			Concreto1	Concreto2	Concreto2	Concreto4	Concreto5	Concreto6	Mamposteria1	Mamposteria2	Mamposteria3	Mamposteria4	Mamposteria5	Tierra1	Tierra2
Satisfactoria	Calidad 1	1	70%	0%	0%	0%	0%	0%	30%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		2	0%	70%	0%	0%	0%	0%	0%	30%	0%	0%	0%	0%	0%
		3	0%	0%	80%	0%	0%	0%	0%	0%	20%	0%	0%	0%	0%
		4	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		5	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Calidad 2	1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Calidad 3	1	20%	0%	0%	0%	0%	0%	80%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		2	0%	20%	0%	0%	0%	0%	0%	80%	0%	0%	0%	0%	0%
		3	0%	0%	20%	0%	0%	0%	0%	0%	80%	0%	0%	0%	0%
		4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Básica	Calidad 1	1	50%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		2	0%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	0%	0%	0%	0%	0%
		3	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Calidad 2	1	50%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		2	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		3	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Calidad 3	1	20%	0%	0%	0%	0%	0%	80%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		2	0%	20%	0%	0%	0%	0%	0%	80%	0%	0%	0%	0%	0%
		3	0%	0%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	0%	0%	0%	0%
		4	0%	0%	0%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	0%	0%	0%
		5	0%	0%	0%	0%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	0%	0%
Insuficiente	Calidad 1	1	50%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		2	0%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	0%	0%	0%	0%	0%
		3	0%	0%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	0%	0%	0%	0%
		4	0%	0%	0%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	0%	0%	0%
		5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Calidad 3	1	20%	0%	0%	0%	0%	0%	80%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		2	0%	20%	0%	0%	0%	0%	0%	80%	0%	0%	0%	0%	0%
		3	0%	0%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	0%	0%	0%	0%
		4	0%	0%	0%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	0%	0%	0%
		5	0%	0%	0%	0%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	0%	0%
	Calidad 4	1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%
		2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
		3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Cualquiera	Cualquiera	>=6	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	

Anexo A1-2. Participación relativa de uso de predio según Reglamento de Ordenamiento Urbano

Reglamento de Ordenamiento Urbano	Densidad	Uso Predominante	Residencial	Comercial	Institucional	Industrial	No_Urbanizable
R1	Alta	Residencial	90%	5%	5%	0%	0%
R1a	Alta	Residencial	90%	5%	5%	0%	0%
R2	Media	Residencial	90%	5%	5%	0%	0%
R2a	Media	Residencial	90%	5%	5%	0%	0%
R3	Baja	Residencial	90%	5%	5%	0%	0%
R4	Baja	Residencial	90%	5%	5%	0%	0%
R5	Baja	Residencial	90%	5%	5%	0%	0%
R6	Media	Residencial	90%	5%	5%	0%	0%
R7	Baja	Residencial	90%	5%	5%	0%	0%
R8	Baja	Residencial	90%	5%	5%	0%	0%
R9	Media	Residencial	90%	5%	5%	0%	0%
C1	Alta	Usos terciarios compatibles con uso residencial	10%	60%	30%	0%	0%
C2	Alta	Usos terciarios compatibles con uso residencial	10%	60%	30%	0%	0%
C2a	Alta	Usos terciarios compatibles con uso residencial	10%	60%	30%	0%	0%
C2b	Alta	Usos terciarios compatibles con uso residencial	10%	60%	30%	0%	0%
C2c	Alta	Usos terciarios compatibles con uso residencial	10%	60%	30%	0%	0%
C3	Alta	Usos terciarios compatibles con uso residencial	10%	60%	30%	0%	0%
E1	Baja	Equipamiento compatible con uso residencial	40%	30%	30%	0%	0%
EE	Medio	Equipamiento no compatible con uso residencial	0%	40%	60%	0%	0%
I	Alta	Industrial	0%	0%	0%	100%	0%
UF1	Baja	Terrenos no urbanizados	0%	0%	0%	0%	100%
UF2	Baja	Terrenos no urbanizados	0%	0%	0%	0%	100%
EV1	Baja	Espacios verdes	0%	0%	0%	0%	100%
EV2	Baja	Espacios verdes con instalaciones para usos no residenciales	0%	40%	60%	0%	0%
EV3	Baja	Espacios verdes con instalaciones para usos no residenciales	0%	40%	60%	0%	0%
RUA	Baja	Inundable no urbanizable	0%	0%	0%	0%	100%
ZSH	Baja	Inundable no urbanizable	0%	0%	0%	0%	100%
CP	Media	Varios					
PT	Media	Institucional-Educativo	0%	0%	100%	0%	0%
EI	Baja	Residencial (palafíticas)	100%	0%	0%	0%	0%



Anexo A1-3. Mapa de pérdida anual esperada (millones de pesos)

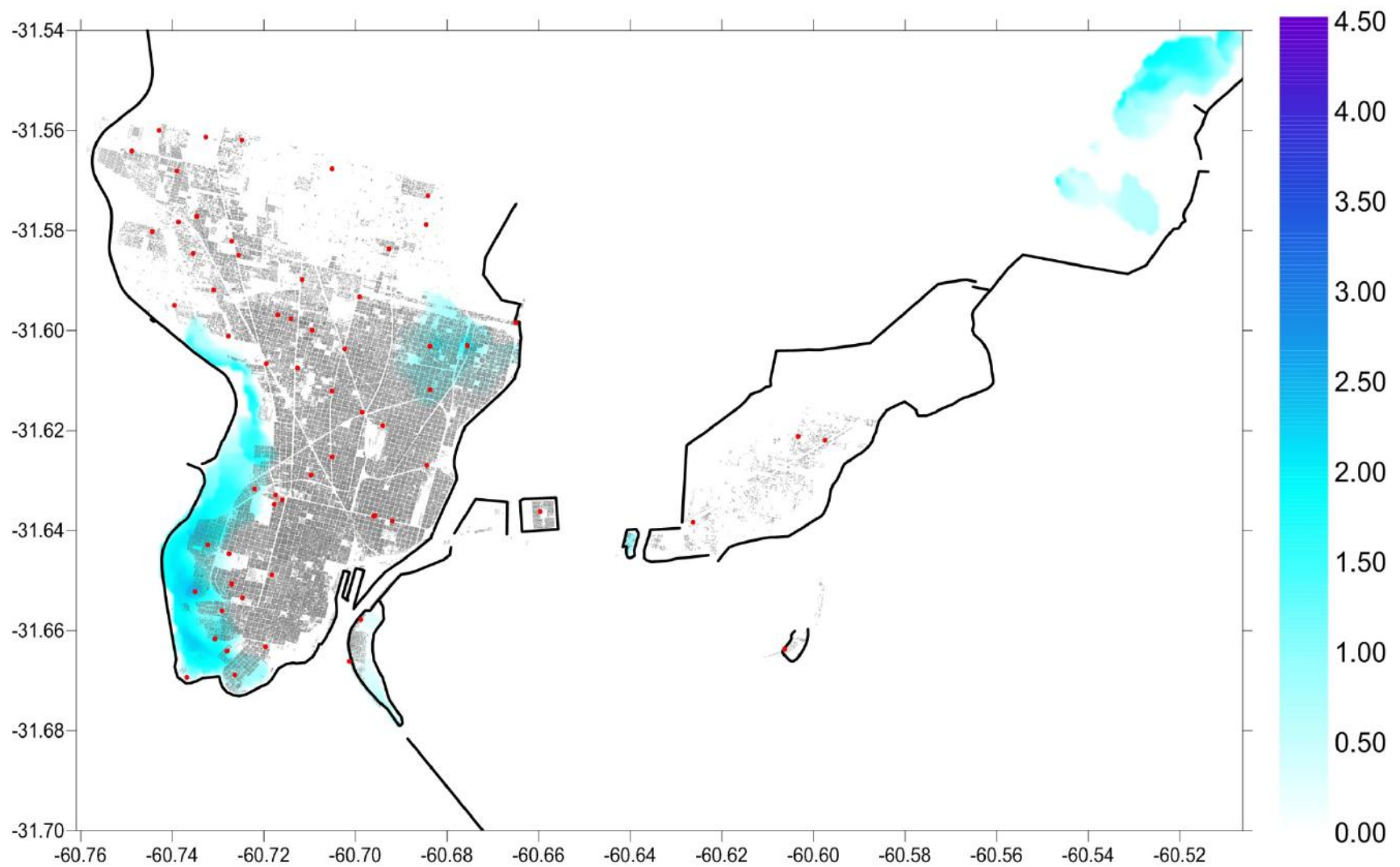


Anexo A1-4. Mapa de pérdida anual esperada relativa (‰)

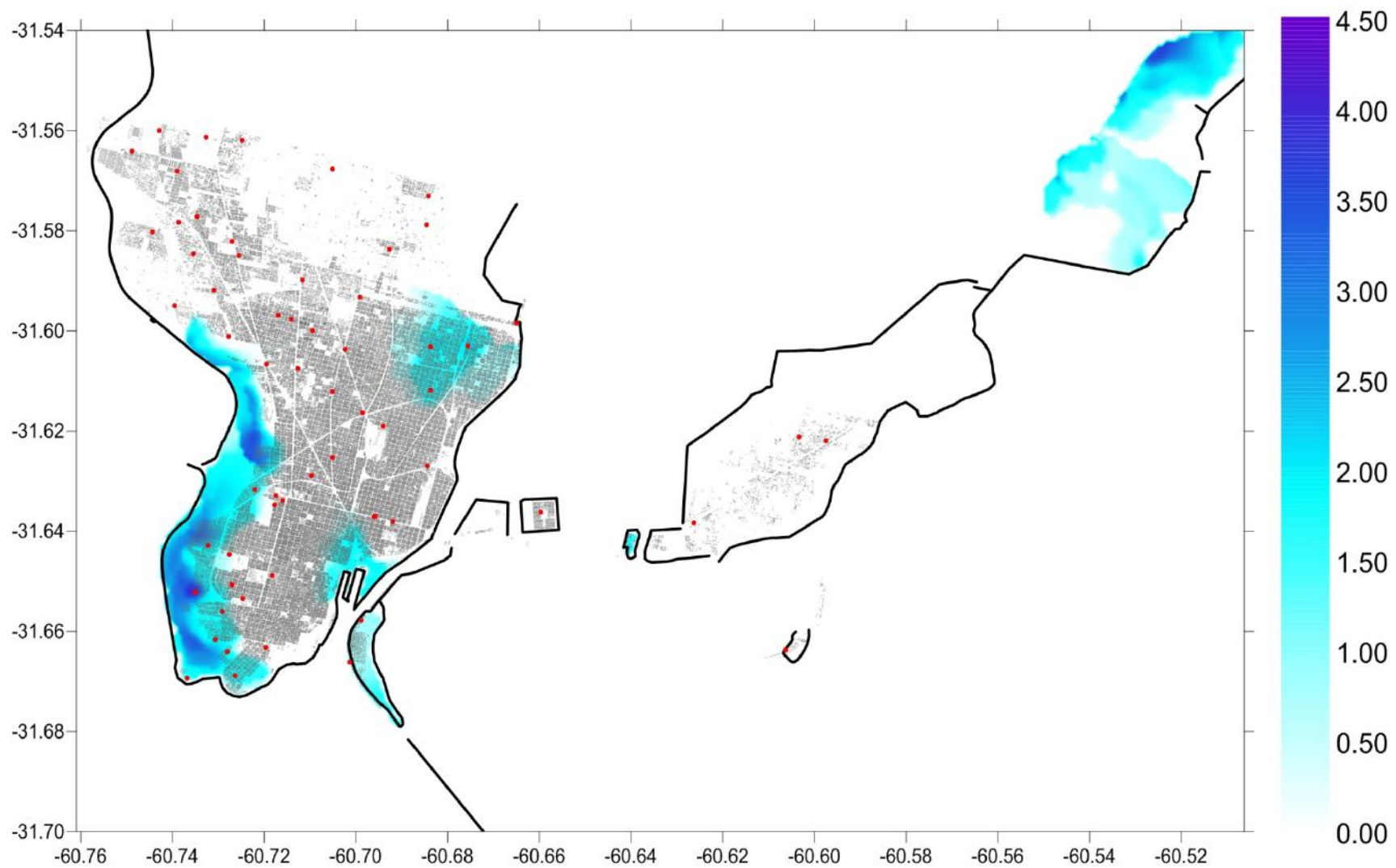
Anexo A1-5. Resultados por proyecto en sector salud

Tipo	Nombre	VALFIS	PAE	Prima
		Pesos [Millones]	Pesos [Millones]	[%]
Centro de Salud	12 de Octubre	\$ 641,324	\$ 43,737	68.20
Centro de Salud	Abasto	\$ 525,100	\$ 0.00	0.00
Centro de Salud	Acería	\$ 2,637,614	\$ 0.01	0.00
Centro de Salud	Alberdi	\$ 1,047,870	\$ 5,340	5.10
Centro de Salud	Alto Verde	\$ 994,167	\$ 520	0.52
Centro de Salud	Alto Verde. Don Demetrio Gómez	\$ 486,709	\$ -	0.00
Centro de Salud	Altos de Nogueras	\$ 2,777,059	\$ -	0.00
Centro de Salud	Altos del Valle	\$ 1,534,535	\$ -	0.00
Centro de Salud	B. Candioti	\$ 4,408,706	\$ -	0.00
Centro de Salud	B. Chalet	\$ 1,415,667	\$ 26,354	18.62
Centro de Salud	Baradero Sarsoti	\$ 903,549	\$ 2,014	2.23
Clínica	Boulevard	\$ 9,366,810	\$ -	0.00
Centro de Salud	Cabal	\$ 320,541	\$ 0.00	0.00
Centro de Salud	Cabaña Leiva	\$ 1,529,140	\$ 0.12	0.00
Centro de Salud	Callejón Roca	\$ 1,225,146	\$ -	0.00
Centro de Salud	Capilla San José	\$ 1,465,389	\$ 1	0.00
Centro de Salud	CAPS San José Nuevo	\$ 1,412,782	\$ -	0.00
Policlínico	Centenario	\$ 2,586,159	\$ -	0.00
Centro de Salud	Colastine Norte	\$ 2,179,323	\$ -	0.00
Centro de Salud	Colastine Sur	\$ 412,830	\$ -	0.00
Centro de Salud	Cristo Obrero	\$ 1,027,122	\$ 2,885	2.81
Hospital	Dr. Gumersindo Sayago	\$ 2,262,582	\$ 0.14	0.00
Hospital	Dr. J.M. Cullen	\$ 200,418,956	\$ -	0.00
Hospital Psiquiátrico	Dr. Mira y López	\$ 6,472,290	\$ 0.04	0.00
Hospital de niños	Dr. O. Alassia	\$ 136,135,437	\$ 1,569	0.01
Instituto de Rehabilitación	Dr. Vera Candioti	\$ 2,068,882	\$ -	0.00
Centro de Salud	El Pozo	\$ 650,942	\$ 0.00	0.00
Centro de Salud	Emaus	\$ 1,271,461	\$ 2,454	1.93
Centro de Salud	Estanislao López	\$ 706,751	\$ 0.01	0.00
Centro de Salud	Evita - Barrio Florida	\$ 918,480	\$ 8.29	0.01
Centro de Salud	Fonavi Cementerio	\$ 2,336,479	\$ 7,143	3.06
Centro de Salud	Guadalupe Central Padre	\$ 2,135,595	\$ 26,653	12.48
Centro de Salud	Gutiérrez Este	\$ 1,877,829	\$ -	0.00
Hospital	Italiano de Santa Fe	\$ 57,860,342	\$ -	0.00
Centro de Salud	Jerarquicoa Salud	\$ 1,840,515	\$ -	0.00
Hospital	José Bernardo Iturraspe	\$ 175,241,554	\$ -	0.00

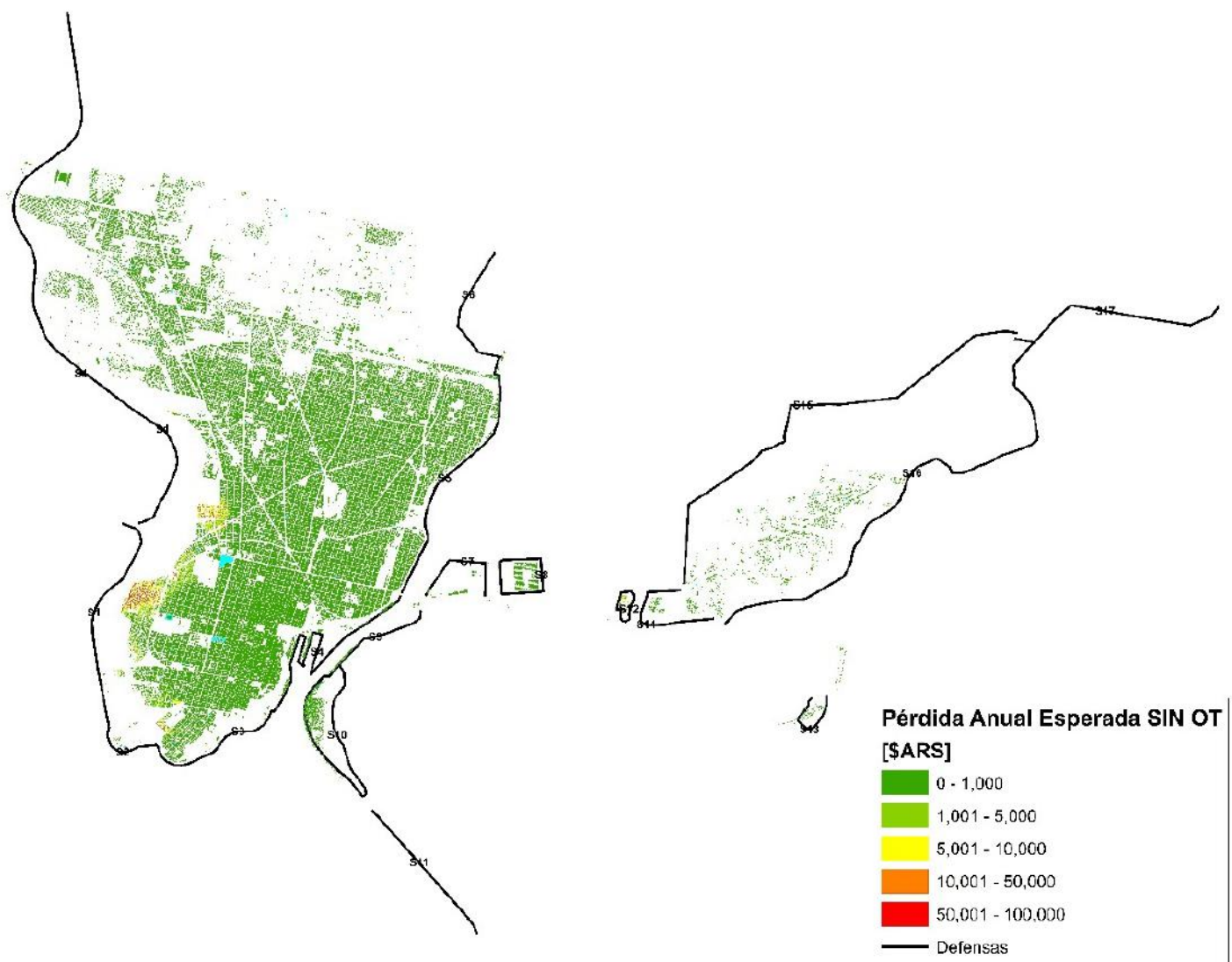
Tipo	Nombre	VALFIS	PAE	Prima
		Pesos [Millones]	Pesos [Millones]	[%]
Centro de Salud	Juv. Unida del Norte	\$ 1,449,757	\$ 0.05	0.00
Centro de Salud	La Guardia	\$ 1,851,135	\$ 0.78	0.00
Centro de Salud	La Loma	\$ 1,410,657	\$ 0.00	0.00
Centro de Salud	Las Delicias	\$ 516,082	\$ 0.04	0.00
Centro de Salud	Las Flores II	\$ 1,005,942	\$ 0.12	0.00
Centro de Salud	Los Hornos	\$ 1,868,206	\$ -	0.00
Centro de Salud	Los Troncos	\$ 436,959	\$ 0.00	0.00
Centro de Salud	Loyola Sur	\$ 710,100	\$ 0.00	0.00
Centro de Salud	M. Montes (Guad. Oeste)	\$ 2,795,929	\$ 10,636	3.80
Centro de Salud	María del Rosario	\$ 1,855,744	\$ -	0.00
Centro de Salud	Mendoza Oeste	\$ 844,823	\$ 22,722	26.90
Centro de Salud	Nueva Pompeya	\$ 811,312	\$ 0.03	0.00
Centro de Salud	Nuevo Horizonte	\$ 2,160,694	\$ 0.56	0.00
Centro de Salud	Oratorio San Lorenzo	\$ 934,365	\$ 5,310	5.68
Centro de Salud	Padre Cobos	\$ 714,048	\$ -	0.00
Centro de Salud	Quilmes	\$ 782,160	\$ -	0.00
Centro de Salud	San Agustín	\$ 3,539,566	\$ 0.00	0.00
Centro de Salud	San Martín (Asoc. Vecinal)	\$ 258,801	\$ 0.00	0.00
Centro de Salud	San Martín de Porres	\$ 1,373,208	\$ 0.04	0.00
Centro de Salud	Set.bal	\$ 1,299,248	\$ -	0.00
Centro de Salud	Unidad Terapia Oncológica	\$ 16,809,901	\$ -	0.00
Policlínico	Vecinal S. del Carril	\$ 1,225,283	\$ -	0.00
Centro de Salud	Villa Hipodromo	\$ 1,191,745	\$ 0.01	0.00
Centro de Salud	Yapey	\$ 1,201,853	\$ -	0.00



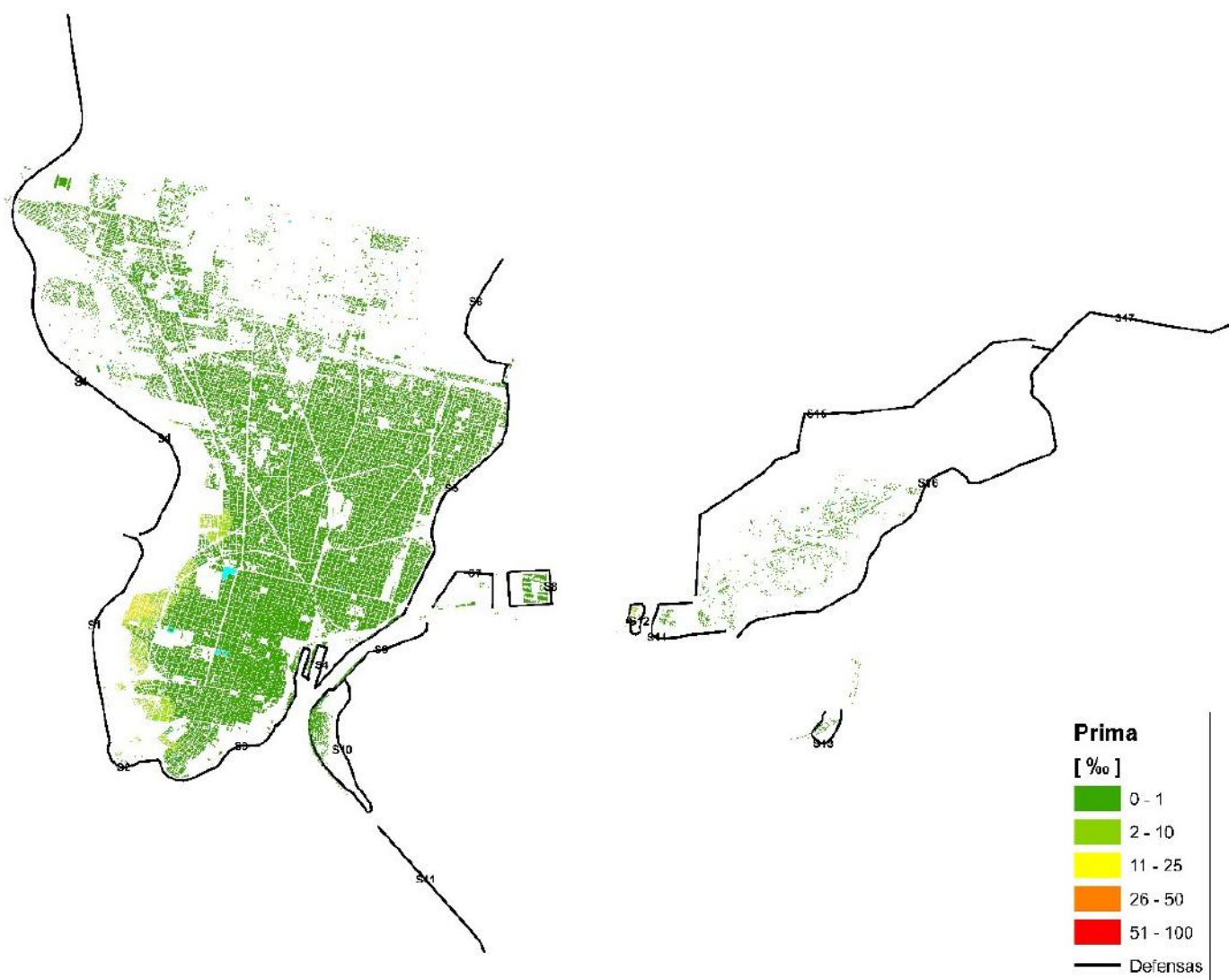
Anexo A1-6. Mapa de centros de salud analizados y amenaza integrada para un periodo de retorno de 100 años



Anexo A1-7. Mapa de centros de salud analizados y amenaza integrada para un periodo de retorno de 1000 años



Anexo A1-8. Mapa de pérdida anual esperada (millones de pesos) para amenaza sin escenarios de desbordamiento



Anexo A1-9. Mapa de pérdida anual esperada relativa (%) para amenaza sin escenarios de desbordamiento

Evaluación Probabilista del Riesgo Sísmico en la Gran Mendoza

Tabla de contenidos

1	Introducción	1
1.1	Alcance del informe.....	1
1.2	Información disponible y recibida.....	1
2	Metodología de la evaluación del riesgo.....	2
2.1	Introducción.....	2
2.2	Procedimiento general del análisis de riesgo.....	2
2.3	Procedimiento para el cálculo de riesgo	4
2.3.1	Ecuación básica para el cálculo de riesgo	4
2.3.2	Temporalidad de las amenazas.....	9
2.3.3	Incertidumbre en el proceso de cálculo de pérdidas	9
2.3.4	Métricas puntuales del riesgo	10
2.3.5	Análisis probabilista de riesgo para un solo escenario.....	12
2.3.6	Interpretación de los resultados.....	12
3	Caracterización de los elementos expuestos	13
3.1	Introducción.....	13
3.2	Información sobre la localización y geometría de los elementos expuestos	13
3.3	Sector de uso.....	14
3.4	Nivel socio-económico	16
3.5	Nivel de sismo resistencia	18
3.6	Sistema estructural.....	20
3.7	Valor de reposición.....	22
4	Vulnerabilidad física de los elementos expuestos.....	25
4.1	Introducción.....	25
4.2	Funciones de vulnerabilidad sísmica.....	26
5	Amenaza sísmica.....	30
5.1	Introducción.....	30
5.2	Amenaza sísmica en roca en Mendoza.....	30
5.3	Amenaza sísmica en superficie en Mendoza.....	32
6	Resultados del análisis probabilista de riesgo en el Gran Mendoza	42
6.1	Introducción.....	42
6.2	Resultados agrupados de riesgo por sismo en el Gran Mendoza	42
6.3	Resultados desagregados	45
6.3.1	Resultados desagregados por departamento.....	45
6.3.2	Resultados desagregados por sector de uso.....	46
6.3.3	Resultados desagregados por sistema estructural.....	48
6.3.4	Resultados desagregados por altura de la edificación.....	50
6.4	Resultados detallados por departamento	52
6.4.1	Resultados para el departamento Capital	52
6.4.2	Resultados para el departamento de Luján de Cuyo	53
6.4.3	Resultados para el departamento de Godoy Cruz	55
6.4.4	Resultados para del departamento de Guaymallén	56
6.4.5	Resultados para el departamento de Maipú.....	57
6.4.6	Resultados para el departamento de Las Heras.....	58
6.5	Resultados detallados por sector de uso	59

6.5.1	Resultados para el sector de uso residencial	59
6.5.2	Resultados para el sector de uso comercial	60
6.5.3	Resultados para el sector de uso industrial.....	61
6.5.4	Resultados para el sector administrativo	62
6.5.5	Resultados para el sector de educación	63
6.5.6	Resultados para el sector de uso de salud	64
6.6	Mapas de riesgo	65
7	ANEXO	81

1 Introducción

1.1 Alcance del informe

En el marco del proyecto de desarrollo del perfil de riesgo de desastres a nivel nacional para Argentina, se ha realizado una evaluación probabilista del riesgo sísmico para el Gran Mendoza. Esta se realizó con base en la información recibida y recolectada en términos de identificación, caracterización y valoración económica de los elementos expuestos, así como en la información existente relacionada con la amenaza sísmica y la respuesta dinámica del suelo en el área de estudio, de acuerdo a los diferentes trabajos que se han venido realizando en el marco del presente proyecto.

Este informe presenta los resultados de la evaluación del riesgo sísmico en términos de las métricas probabilistas como lo son la curva de excedencia de pérdidas, la pérdida anual esperada y las pérdidas máximas probables asociadas a diferentes períodos de retorno. Adicionalmente se han expresado los resultados de pérdidas a través de mapas que permiten una estimación geográfica de la localización de las pérdidas en el Mendoza.

Esta evaluación se ha realizado mediante la herramienta CAPRA-GIS, la cual constituye el módulo de cálculo de riesgo de la Plataforma CAPRA¹ la cual es mundialmente aceptada y reconocida para este tipo de evaluaciones.

1.2 Información disponible y recibida

El presente trabajo se ha realizado utilizando la mejor información disponible para cada uno de los insumos necesarios requeridos para este tipo de evaluaciones. La información disponible se puede clasificar en las siguientes categorías:

- Amenaza sísmica en roca
- Efectos de sitio (microzonificación sísmica)
- Elementos expuestos

La calidad de la información disponible para estas tres categorías se clasifica como de buena calidad dado que se cuenta con toda la información necesaria para la utilización o interpretación de ella. En las siguientes secciones se hace un resumen en términos de la información disponible para cada una de estas categorías incluyendo la manera en la que esta fue utilizada o interpretada para su utilización en el presente análisis probabilista de riesgo sísmico.

¹ Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment

2 Metodología de la evaluación del riesgo

2.1 Introducción

La gestión del riesgo comprende todo el conjunto de acciones que pueden ser ejecutadas con el fin de reducir el impacto negativo de los desastres en el desarrollo humano. Se trata entonces de una estrategia de desarrollo que debe ser concebida desde las esferas más altas de la administración pública y trascender a todos los niveles institucionales y territoriales de un país. Diversas son las acciones que hacen parte de una adecuada gestión del riesgo, desde la planificación del territorio, hasta la creación de mecanismos de protección financiera para el estado, pasando por la definición de códigos de construcción, la creación de sistemas de alerta y la preparación para la atención a emergencias. Todas estas son igualmente importantes dado que atienden diferentes niveles de riesgo. Sin embargo, el primer paso para una correcta gestión del riesgo es identificarlo y cuantificarlo. El conocimiento del riesgo es entonces un componente fundamental dentro del desarrollo sostenible.

La frecuencia de eventos catastróficos es particularmente baja por lo cual la información histórica, en general, es muy limitada. Considerando las posibilidades de eventos de alta capacidad destructiva en el futuro, la estimación del riesgo debe enfocarse en modelos probabilistas los cuales pueden utilizar la limitada información histórica disponible para pronosticar, de la mejor manera posible, las consecuencias de futuros eventos considerando en forma simultánea las inevitables altas incertidumbres involucradas en los análisis.

El análisis probabilista de riesgos naturales tiene como objetivo fundamental determinar las distribuciones de probabilidad de las pérdidas que pueden sufrir los activos expuestos como consecuencia de la ocurrencia de eventos naturales, integrando de manera adecuada las incertidumbres que existen en las diferentes partes del proceso. Para ello se requiere la representación probabilista tanto de la amenaza, en términos de valores esperados y su dispersión, como de las funciones de vulnerabilidad asociadas a cada amenaza.

La pregunta básica que un análisis probabilista de riesgo debe contestar es: dado que se tiene un conjunto de elementos expuestos a los efectos de una amenaza natural, ¿con qué frecuencias se presentarán pérdidas que superen valores monetarios dados? Dado que las frecuencias de eventos catastróficos son bajas, queda descartada la posibilidad de contestar la pregunta anterior formulando modelos puramente empíricos que dan cuenta únicamente de la valoración de daños observados. Esto obliga a la construcción de modelos probabilistas como el que aquí se describe y se utiliza para la cuantificación del riesgo de una manera prospectiva, es decir, considerando la posible ocurrencia de eventos que aún no han sucedido.

2.2 Procedimiento general del análisis de riesgo

El procedimiento de cálculo probabilista consiste en evaluar las pérdidas en el conjunto de elementos expuestos para cada uno de los escenarios (eventos descritos mediante características específicas) que colectivamente describen las amenazas, y luego agregar de manera probabilista

los resultados obtenidos utilizando como factores de ponderación las frecuencias de ocurrencia de cada uno de los escenarios.

La evaluación probabilista de riesgos naturales para requiere de los siguientes cuatro:

- *Evaluación de la amenaza:* definición de un conjunto estocástico de eventos (sísmicos o hidrometeorológicos, dependiendo del tipo de amenaza) donde cada uno se encuentra caracterizado con su respectiva frecuencia de ocurrencia. El conjunto de escenarios representa de manera integral la amenaza. Cada escenario contiene la distribución espacial de parámetros que permiten construir la distribución de probabilidad de las intensidades en superficie, entendidas como parámetros físicos medibles.
- *Evaluación de los efectos de sitio (únicamente para amenaza sísmica):* en el caso de la amenaza sísmica, se puede desear incluir los efectos locales del sitio de estudio, para lo cual para cada una de las zonas homogéneas de suelo identificadas se definen funciones de transferencia espectrales, las cuales dan cuenta de los efectos de la respuesta dinámica del suelo en el área bajo estudio. Estas consideran además la variación en el valor de amplificación de acuerdo al nivel de aceleración en el basamento rocoso. Esta información se relaciona únicamente con la amenaza sísmica.
- *Definición del inventario de elementos expuestos:* debe definirse el inventario de elementos expuestos el cual debe especificar como mínimo la localización geográfica, el valor de reposición y la clase estructural de cada elemento.
- *Definición de la vulnerabilidad física de los elementos expuestos:* debe asignarse a cada una de las clases estructurales una función de vulnerabilidad la cual relaciona la perspectiva física del elemento con su costo de reposición. Estas funciones caracterizan el comportamiento de cada elemento durante la ocurrencia de un evento (sismo o inundaciones por ejemplo), es decir, definen la distribución de probabilidad de las pérdidas como función de la intensidad producida durante un escenario específico. Las funciones se definen mediante funciones continuas que relacionan el valor esperado del daño con la intensidad del fenómeno. Estas funciones permiten una representación probabilista dado que para cada nivel de daño esperado es posible asignar un valor de desviación estándar que da cuenta de la incertidumbre inherente desde el punto de vista estructural. Para cada tipo de amenaza natural considerada se deben definir y asignar funciones de vulnerabilidad diferentes a cada tipología estructural que esté dentro de la base de datos.

Finalmente el modelo de riesgo probabilista, construido a partir de una secuencia de módulos, cuantifica las pérdidas potenciales tal como se ilustra en la Figura 2-1.

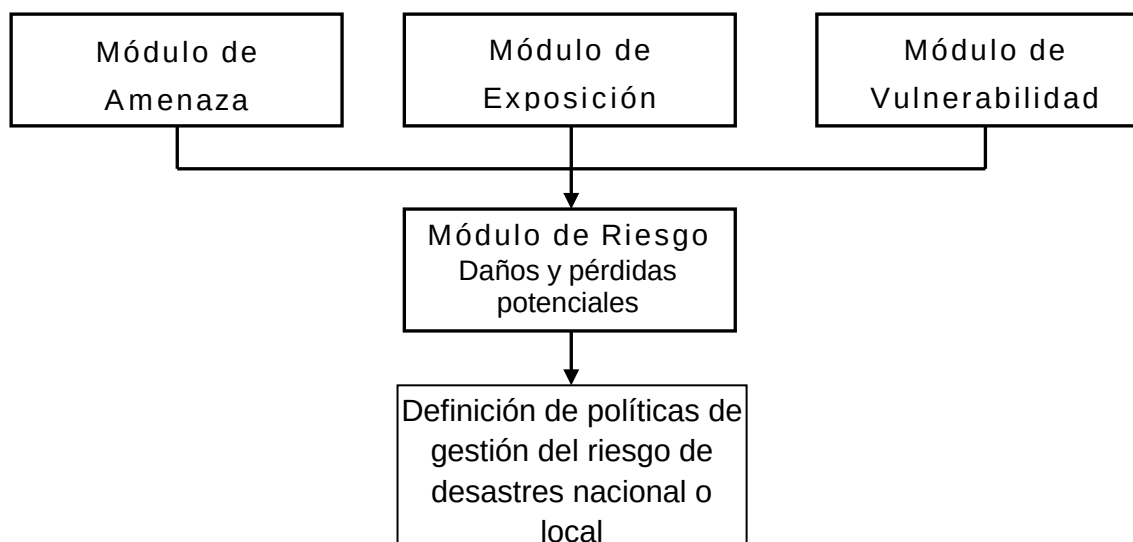


Figura 2-1
Esquema general del análisis de riesgo probabilista

2.3 Procedimiento para el cálculo de riesgo

Esta sección presenta el marco metodológico para la evaluación probabilista de riesgos naturales. A partir de ella se entiende la necesidad de representar la amenaza a partir de un conjunto estocástico de escenarios y cómo se realiza el proceso de convolución entre las amenazas y sus vulnerabilidades físicas asociadas.

2.3.1 Ecuación básica para el cálculo de riesgo

Considerando el objetivo básico del análisis probabilista de riesgos naturales explicado anteriormente, se presenta a continuación la metodología específica de cálculo de las frecuencias de ocurrencia de niveles específicos de pérdidas asociados a los elementos expuestos en períodos de tiempo determinados y ante la ocurrencia terremotos e inundaciones.

Dado que hay incertidumbre en la estimación de la pérdida, esta es entonces modelada como una variable aleatoria. En términos generales, interesa conocer lo siguiente acerca de la pérdida:

- El universo de todas las pérdidas posibles, es decir, el dominio de la variable aleatoria que describe la pérdida.
- La función de densidad de probabilidad de la pérdida, la cual está definida dentro del dominio de la variable.

En términos generales, un evento de pérdida A , definido dentro del universo de todas las pérdidas posibles (o espacio de muestreo) S , se puede representar en un diagrama de conjuntos como se muestra en la Figura 2-2. El evento A es un subconjunto de S , el cual es definido de manera totalmente arbitraria, es decir, su definición depende exclusivamente de a qué pregunta se quiere contestar. En este sentido, el evento A puede estar definido, por ejemplo, como el conjunto de pérdidas mayores a 10 millones, o como el conjunto de pérdidas menores a 100 millones, o incluso como el conjunto de pérdidas entre 10 y 100 millones. Esto significa que A es definido por el tomador de decisiones, en función del tipo de decisiones que quiera tomar. Ahora bien, la

definición de A en sí misma no es de interés; interesa conocer la probabilidad de A , denotada como $P(A)$. Entonces si, por ejemplo, A está definido como el conjunto de pérdidas mayores a 10 millones, lo que realmente interesa conocer es la probabilidad de que la pérdida sea mayor a 10 millones, es decir $P(A)$.

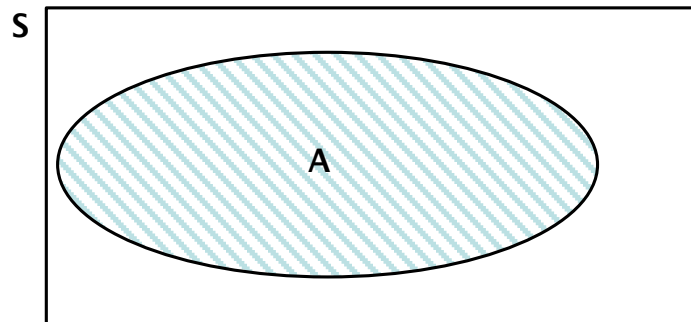


Figura 2-2

Representación gráfica de un evento arbitrario A dentro del espacio de muestreo de pérdidas S .

Dado que los eventos A son definidos de manera arbitraria, resulta inconveniente realizar el análisis de riesgo para un conjunto A específico. Se requiere encontrar una manera mediante la cual sea posible determinar $P(A)$ para cualquier evento A de interés. Esto se logra subdividiendo el espacio de muestreo S en un número finito de eventos base conocidos, B (Figura 2-3).

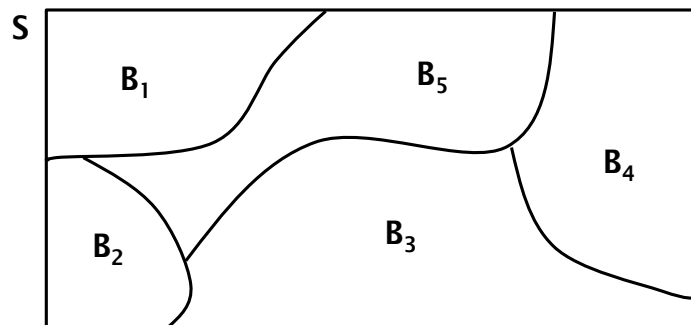


Figura 2-3

Subdivisión del espacio de muestreo S en eventos base B .

Los eventos base B deben cumplir las siguientes características:

- Ser *mutuamente excluyentes*. En términos matemáticos esto significa que los conjuntos nunca se intersectan, es decir, su intersección es el conjunto vacío. En términos del análisis de riesgo esto quiere decir que los eventos de pérdida B no pueden ocurrir simultáneamente.
- Ser *colectivamente exhaustivos*. En términos matemáticos esto implica que la unión de todos los conjuntos B es igual al espacio de muestreo S . En términos del análisis de riesgo esto significa que los eventos B , en conjunto, representan de manera integral el universo de todas las pérdidas posibles.

Ahora bien, para poder determinar $P(A)$, para un evento A cualquiera, hacemos uso de las intersecciones que se producen entre el evento A y los eventos base B (Figura 2-4).

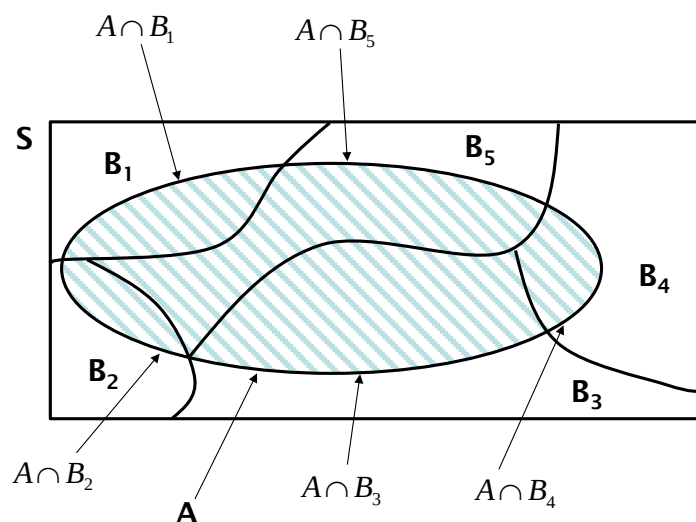


Figura 2-4
Intersecciones entre el evento A y los eventos base B .

Dado que el evento A se puede definir como la unión de sus intersecciones con los eventos base B , y recurriendo al tercer axioma de la teoría de la probabilidad², podemos definir a $P(A)$ como la suma, para todos los eventos base B , de la probabilidad de ocurrencia de las intersecciones:

$$P(A) = \sum_{j=1}^n P(A \cap B_j) \quad (\text{Ec. 2-1})$$

Para cualquier evento base B_j , definimos la probabilidad $P(A|B_j)$ como la probabilidad condicional de A , dado que B_j ha ocurrido. Esta probabilidad condicional está dada por:

² El tercer axioma de la probabilidad establece que, para una colección contable de eventos mutuamente excluyentes, la probabilidad de su unión es igual a la suma de las probabilidades individuales.

$$P(A|B_j) = \frac{P(A \cap B_j)}{P(B_j)}, \quad P(B_j) \neq 0 \quad (\text{Ec. 2-2})$$

Nótese que se asume que B_j ha ocurrido. Esto significa que el espacio de muestreo S es ahora reemplazado por un nuevo espacio de muestro, B_j , y $P(A|B_j)$ no es más que la probabilidad de A en ese nuevo espacio. De esta manera, reemplazando la Ec. 3-2 en la Ecuación 3-1, llegamos a la solución de $P(A)$, que no es más que la definición del teorema de la probabilidad total:

$$P(A) = \sum_{j=1}^n P(A|B_j) \cdot P(B_j) \quad (\text{Ec. 2-3})$$

Esta ecuación indica la probabilidad de ocurrencia de cualquier evento de pérdida sobre el espacio S .

Haciendo uso de la Ecuación 3-3 podemos calcular la probabilidad de cualquier evento A . La Tabla 2-1 muestra, a modo de ejemplo, tres eventos A arbitrarios y su medida de probabilidad calculada con la Ecuación 3-3.

Tabla 2-1
Eventos arbitrarios A y su medida de probabilidad.

Eventos arbitrarios A	Probabilidad
Pérdidas mayores a 10 millones	$P(p > 10) = \sum_{j=1}^n P(p > 10 B_j) \cdot P(B_j)$
Pérdidas menores a 100 millones	$P(p < 100) = \sum_{j=1}^n P(p < 100 B_j) \cdot P(B_j)$
Pérdidas entre 10 y 100 millones	$P(p > 10 \cap p < 100) = \sum_{j=1}^n P(p > 10 \cap p < 100 B_j) \cdot P(B_j)$

En resumen, dentro del contexto del análisis de riesgo, la definición de los eventos de interés A es totalmente arbitraria, por lo tanto su probabilidad $P(A)$ se calcula como función de la distribución de probabilidad de la pérdida para cada evento base B_j . Esto implica que los eventos base B no pueden ser definidos de manera arbitraria.

Dado que el número de escenarios que representan de manera integral la amenaza en un territorio cualquiera puede ser centenas, Torres et.al. (2013) proponen el uso de un formato computacional llamado .AME, el cual es un formato raster multicapa diseñado específicamente para amenazas naturales, y que permite un manejo adecuado, en términos computacionales, de la información asociada a los escenarios.

El riesgo físico es comúnmente descrito mediante la llamada *curva de excedencia de pérdidas* (*loss exceedance curve*) que permite calcular las frecuencias, expresada en número de veces por año, con las que ocurrirán eventos en los que se iguale o exceda un valor especificado de pérdida

monetaria. Esta frecuencia anual de excedencia se conoce también como tasa de excedencia, y se calcula mediante la siguiente ecuación, que es una de las formas que puede adoptar el teorema de la probabilidad total (Ordaz, 2000):

$$\nu(p) = \sum_{i=1}^{\text{Eventos}} \Pr(P > p | \text{Evento } i) \cdot F_A(\text{Evento } i) \quad (\text{Ec. 2-4})$$

En la ecuación anterior, $\nu(p)$ es la tasa de excedencia de la pérdida p , $F_A(\text{Evento } i)$ es la frecuencia anual de ocurrencia del evento i , mientras que $\Pr(P > p | \text{Evento } i)$ es la probabilidad de que la pérdida sea superior a p dada la ocurrencia del i -ésimo evento. La suma en la ecuación anterior se hace para todos los eventos contenidos en el conjunto de escenarios estocásticos, 677 en este caso para sismo y 250 para inundación. El inverso de la tasa de excedencia $\nu(p)$ es el período de retorno de la pérdida p , identificado como Tr .

La pérdida p a la que se refiere la Ecuación 3-4 es la suma de las pérdidas que acontecen en todos los elementos expuestos. Considerando lo anterior, es importante recordar que:

- La pérdida p es una cantidad incierta, cuyo valor, dada la ocurrencia de un evento, no puede conocerse con precisión. Debe por tanto ser tratada como una variable aleatoria y deben preverse mecanismos para conocer su distribución de probabilidad, condicionados a la ocurrencia de cierto evento.
- La pérdida p se calcula como la suma de las pérdidas que se presentan en cada uno de los bienes expuestos. Cada uno de los sumandos es una variable aleatoria y entre ellos existe cierto nivel de correlación el cual debe ser incluido en el análisis.

Teniendo en mente la Ecuación 3-4, la secuencia de cálculo probabilista de riesgo es la que se presenta a continuación:

1. Para cada escenario contenido en cada conjunto estocástico se determina la distribución de probabilidades de la pérdida en cada uno de los elementos expuestos.
2. A partir de las distribuciones de probabilidad de las pérdidas en cada elemento, se determina la distribución de probabilidad de la suma de estas pérdidas, tomando en cuenta la correlación que existe entre ellas.
3. Una vez determinada la distribución de probabilidad de la suma de las pérdidas para el evento considerado, se calcula la probabilidad de que esta pérdida exceda un valor determinado.
4. Se determina la contribución de cada evento a la tasa de excedencia de pérdidas p multiplicando (ponderando) la probabilidad determinada en el paso por la frecuencia anual de ocurrencia del evento.

El cálculo se repite para todos los eventos de ambos conjuntos estocásticos.

2.3.2 Temporalidad de las amenazas

Algunos de los fenómenos naturales producen pérdidas por varios conceptos que ocurren de manera simultánea. Por ejemplo, la ocurrencia de un sismo puede generar deslizamientos y detonar un tsunami; los daños por movimiento del suelo, por movimiento en masa y por inundación, entonces, ocurren casi al mismo tiempo, y no pueden considerarse eventos independientes.

El caso que se menciona en el párrafo anterior puede considerarse como uno en que tres amenazas diferentes (sismo, deslizamiento e inundación por marea de tormenta) ocurren simultáneamente, asociadas a la misma *temporalidad*.

La evaluación de pérdidas durante un escenario se realiza entonces considerando que las amenazas que pertenecen a una misma temporalidad ocurren de manera simultánea. No existe una manera sencilla y libre de ambigüedades para evaluar las pérdidas en estas condiciones (varias amenazas ocurriendo simultáneamente). Para este caso se usa la siguiente expresión para evaluar la pérdida en cada uno de los bienes expuestos, que corresponde a un modelo de daño en cascada, en el cual el orden de exposición a las diferentes intensidades es irrelevante:

$$P_i = \prod_{j=1}^M (1 - P_{ij}) \quad (\text{Ec. 2-5})$$

en donde P_i es la pérdida asociada al escenario i , P_{ij} es la pérdida asociada al escenario i por concepto de la amenaza j , y M es el número de amenazas simultáneas consideradas en la temporalidad a la que pertenece el escenario i .

Conviene recordar que P_{ij} son variables aleatorias y, por tanto, P_i también lo es. Sin embargo, si las distribuciones de probabilidad de las P_{ij} son conocidas, y se hacen suposiciones razonables sobre su nivel de correlación (que están perfectamente correlacionadas, por ejemplo) los momentos de la distribución de probabilidad de P_i pueden determinarse a partir de la Ecuación 3-2.

Con esto en mente, en este proyecto se tratan las dos amenazas, sísmica e inundación, cada una de forma individual (cada una en una única temporalidad) ya que se aplican en casos de estudio diferentes para lugares diferentes.

2.3.3 Incertidumbre en el proceso de cálculo de pérdidas

La pérdida que se presenta en un grupo de elementos expuestos durante un escenario es una cantidad incierta que debe ser tratada como una variable aleatoria. Generalmente no es práctico determinar de manera directa la distribución de probabilidad de la pérdida en un elemento expuesto condicionada a la ocurrencia de un escenario.

Por razones metodológicas, la probabilidad de excedencia de la pérdida p , condicionada a la ocurrencia de un evento, se expresa como se presenta en la Ecuación 3-3.

$$\Pr(P > p | Evento) = \int_I \Pr(P > p | I) \cdot f(I | Evento) dI \quad (\text{Ec. 2-6})$$

El primer término de la integral, $\Pr(P > p | I)$, es la probabilidad de que la pérdida exceda el valor p dado que la intensidad local fue I ; es evidente que este término toma en cuenta la incertidumbre que hay en las funciones de vulnerabilidad. Por otro lado, el término $f(I | Evento)$ es la densidad de probabilidad de la intensidad, condicionada a la ocurrencia del evento; este término toma en cuenta el hecho de que, dado que ocurrió un evento, la intensidad en el sitio de interés es incierta.

Para poder hacer uso de la metodología anteriormente explicada, se requiere que tanto la amenaza sísmica y por inundación, así como la vulnerabilidad estructural de los elementos bajo análisis sea representada mediante la manera que se explicó anteriormente, es decir, de manera integralmente probabilista.

2.3.4 Métricas puntuales del riesgo

La curva de excedencia de pérdidas calculada aplicando la Ecuación 3-1 tiene toda la información necesaria para caracterizar el proceso de ocurrencia de eventos que produzcan pérdidas. Sin embargo, en ocasiones no es necesario utilizar la curva completa y es preferible utilizar estimadores puntuales del riesgo que permitan expresarlo a través de un solo número, facilitando así el proceso de comunicación a los tomadores de decisiones. Se presentan a continuación los dos estimadores puntuales más comúnmente utilizados.

- (a) Pérdida anual esperada (PAE): se trata del valor esperado de la pérdida anual. Es una cantidad importante puesto que indica que si, por ejemplo, el proceso de ocurrencia de eventos catastróficos fuera estacionario de aquí a una ventana de observación suficientemente grande, su costo total acumulado equivaldría a haber pagado la PAE cada año. Por lo tanto, en un sistema simple de seguro (sin deducibles, coaseguro ni límites de aseguramiento) la PAE sería la prima pura anual justa. La PAE puede obtenerse mediante el cálculo del área bajo la curva de $v(p)$ o directamente mediante la Ecuación 3-4.

$$PAE = \sum_{i=1}^{Eventos} E(P | Evento i) \cdot F_A(Evento i) \quad (\text{Ec. 2-7})$$

Este valor es posible determinarlo para un portafolio completo de elementos expuestos (las edificaciones en el Gran Mendoza); para un conjunto de elementos (edificaciones industriales) o para un solo elemento (un colegio). Se considera la métrica más robusta y a la vez insensible a las incertidumbres inherentes en el análisis (Marulanda, 2013).

- (b) Pérdida máxima probable (PML por las iniciales en inglés): se trata de una pérdida que ocurre poco frecuentemente, es decir, que está asociada a un período de retorno muy largo (o alternativamente, a una tasa de excedencia muy baja). No existen estándares universalmente aceptados para definir qué quiere decir “poco frecuente”. De hecho, la elección de un periodo de retorno u otro para tomar cierta decisión depende de la aversión al riesgo de quien la está tomando. En la industria aseguradora, por ejemplo, los periodos de retorno utilizados para definir la PML de riesgo sísmico varían entre 200 y 2,500 años dependiendo del nivel de desarrollo económico y de penetración del seguro.

- (c) Probabilidad de quiebra (P_Q): la curva de pérdidas, $\nu(p)$ calculada con la Ecuación 3-4 indica con qué frecuencia ocurrirán eventos que producirán pérdidas iguales o superiores a una dada, p . Si suponemos que el proceso de ocurrencia de eventos en el tiempo obedece a un proceso de Poisson, entonces es posible calcular la probabilidad de que la pérdida p sea excedida en un lapso de tiempo T , es decir, en los próximos T años, con la siguiente expresión:

$$Pe(p, T) = 1 - e^{-\nu(p)T} \quad (\text{Ec. 2-8})$$

donde $Pe(p, T)$ es la probabilidad de que la pérdida p sea excedida en los próximos T años. Si se mira con detenimiento, se puede hacer una analogía directa con la Ecuación 3-1 presentada anteriormente.

Lo anterior permite el cálculo de la probabilidad de quiebra considerando diferentes períodos de exposición. Así entonces, esta información permite tener un panorama completo de las probabilidades de excedencia del mismo valor de pérdida de interés, considerando diferentes ventanas de exposición.

Otras métricas del riesgo

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

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

$$f(p) = -\frac{1}{\nu(0)} \frac{d\nu(p)}{dp} \quad (\text{Ec. 2-9})$$

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

$$\Pr(P > p) = \frac{\nu(p)}{\nu(0)} \quad (\text{Ec. 2-10})$$

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

$$f(t) = \nu(p)e^{-\nu(p)t} \quad (\text{Ec. 2-11})$$

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

$$\Pr(N = n) = \frac{(\nu(p)T)^n e^{-\nu(p)T}}{n!} \quad (\text{Ec. 2-12})$$

2.3.5 Análisis probabilista de riesgo para un solo escenario

El análisis probabilista de riesgo se realiza normalmente para el conjunto completo de escenarios especificados. Sin embargo, si así se desea, el análisis puede realizarse para un solo escenario. Si se hace que la frecuencia anual de ocurrencia de este escenario sea 1, la aplicación de la Ecuación 2-1 nos conduciría a las probabilidades de excedencia (ya no frecuencias anuales de excedencia) de valores de pérdida p , dado que el escenario en cuestión ocurrió. Este caso tiene aplicaciones importantes en el campo de la planeación territorial, ya que sus resultados, mapeados por ejemplo en términos del valor esperado de la pérdida, son fácilmente incorporables en los planes de ordenamiento territorial.

2.3.6 Interpretación de los resultados

Debido a que el análisis de riesgo con enfoque probabilista se basa en la ley de los grandes números, es importante resaltar que, a pesar de que los mapas de riesgo puedan realizarse de forma “elemento a elemento”, los valores que en esas figuras se indican dan cuenta de una estimación en conjunto para edificaciones con características tipología estructural similar. Con este enfoque resulta impreciso afirmar que por ejemplo, un edificio puntual es el más vulnerable porque así se ve en un mapa, sino que debe verse más bien si la clase estructural y otras características de ese edificio coinciden con las que se han identificado de alto riesgo. Análisis particulares de edificaciones están por fuera del alcance de este tipo de evaluaciones.

3 Caracterización de los elementos expuestos

3.1 Introducción

En este capítulo se presenta la información disponible, en el marco del presente proyecto, para la identificación y caracterización de edificaciones expuestas en el Gran Mendoza con fines de la conformación de una base de datos con fines de una evaluación probabilista de riesgo sísmico. Para el área bajo estudio únicamente se han incluido edificaciones, tanto públicas como privadas, dentro de la base de datos final; otros componentes de infraestructura urbana como puentes, sistemas de agua y saneamiento, transmisión de electricidad y comunicaciones, están por fuera del alcance de ella.

En esta sección se presenta inicialmente y para cada una de las temáticas relacionadas con la conformación de bases de datos de elementos expuestos, la información que se requiere. Seguido a ello, se presenta la disponibilidad de la información, la fuente y referencias de la información que ha sido suministrada y utilizada.

Para mayor claridad acerca de la información mínima necesaria, esta se clasifica en las siguientes cinco categorías:

- Información sobre la localización de los elementos expuestos (geo-referenciación)
- Información sobre la geometría de los elementos expuestos (para poder determinar áreas)
- Información sobre las características de los elementos expuestos
 - Altura o número de pisos
 - Sector de uso
 - Sistema estructural
 - Edad o fecha de construcción
- Información sobre la valoración económica de los elementos expuestos
- Información sobre la ocupación humana de los elementos expuestos

3.2 Información sobre la localización y geometría de los elementos expuestos

Se recibió por parte de la Dirección de Catastro de Mendoza una serie de tres archivos *shapefile* que contienen lo siguiente:

- Cub.shp: *shapefile* de polígonos que tiene las cuberitas de los predios en toda la ciudad de Mendoza y en las afueras. Incluye la georreferenciación y geometría de los predios, y características como el número de pisos y el número de identificación parcelario.
- Manzanas.shp: *shapefile* de polígonos que tiene las manzanas. Incluye la georreferenciación y geometría de las manzanas.
- Parcelas.shp: *shapefile* de polígonos que tiene las parcelas. Incluye la georreferenciación y geometría de las parcelas, y características como la superficie de la parcela, la superficie construida, un valor del suelo (aunque no se indicó unidades ni su explicación) y el número de identificación parcelario.

Adicional a lo anterior, también se recibió por parte de la Agencia Provincial de Ordenamiento Territorial (APOT) y el Sistema de Información Ambiental Territorial (SIAT) un paquete de capas georreferenciadas que incluyen lo siguiente: infraestructura de telefonía, colectores aluviales, curvas de nivel, densidad por departamentos, espacios verdes, distritos, ferrocarril, el límite urbano, parques industriales, puentes y zonificación del Gran Mendoza. Este último *shapefile* incluye una zonificación de usos agrupados en grandes polígonos para la ciudad.

A partir de lo anterior se utilizó la capa de cubiertas o predios como la capa de unidad de análisis, y fue con esta con la que se llevó a cabo la evaluación de riesgo sísmica para la Gran Mendoza. Aquí es importante notar que se encontraron las siguientes limitaciones y/o observaciones en esta base de datos de exposición:

- Dado que la geometría de la capa “Cubiertas Gran Mendoza” corresponde a precisamente las diferentes cubiertas que se ven desde imágenes aéreas, el número total de edificaciones está sobre estimado ya que para la mayoría de edificaciones se tiene más de un polígono que representan una sola edificación; esto ocurre cuando una misma edificación no tiene una altura uniforme, y tiene chimeneas u otras cubiertas con diferentes alturas. Para solucionar esto se eliminaron los polígonos con área menor a $10m^2$ (que en su mayoría correspondía a chimeneas como pudo ser comprobado con una imagen satelital), y se utilizó la herramienta *Repair geometry* del software ArcGis para eliminar otros polígonos pequeños que sean el resultado de errores en los bordes por ejemplo. Sin embargo, aún después de esta depuración aún queda un alto número de polígonos extras que no se pudieron remover o corregir dado que eran demasiado grandes para eliminar y no se pudieron añadir a polígonos vecinos porque no se podía saber a qué polígono correspondía.
- Dado que el único atributo que se tiene en esta base de datos es el número de pisos, las demás características como uso, sistema estructural, valor de reposición, y nivel socio económico tuvieron que ser asignados por medio de algoritmos aleatorios basados en distribuciones generales de estas características. En las siguientes secciones se describe cómo se hizo esto en cada caso.

3.3 Sector de uso

Como se mencionó anteriormente, siempre es deseable que una base de datos de exposición esté lo más completa posible, con el mayor número de características que sea posible obtener, esto con el fin de poder analizar los resultados desde diferentes perspectivas y así poder identificar esas características que pueden ser más o menos vulnerables que otras y que permite tomar decisiones de una manera más fácil.

En el caso de Mendoza la característica del uso es importante porque se usa para desagregar los resultados según estos usos, y también permite tener una diferenciación de los valores de reposición a ser asignados. Para este proyecto no se cuenta con información individual predio a predio del uso, pero utilizando el *shapefile* del APOT-SIAT que contiene una zonificación general de estos usos, fue posible asignar estos usos a cada predio. La Figura 3-1 muestra la zonificación incluida en esta capa. Para asignar el uso a cada predio primero se agruparon los

usos en los siguientes usos generales: residencial, comercial, industrial, administrativo, salud y educación, y simplemente a todos los que caigan dentro de cada polígono de la Figura 3-1 se les asignó ese uso, y para los usos mixtos se definió unos porcentajes de participación de los usos que lo componen y así cada uno fue asignado aleatoriamente. El algoritmo utilizado para la asignación de los usos se muestra en el Anexo (Figura A-1).

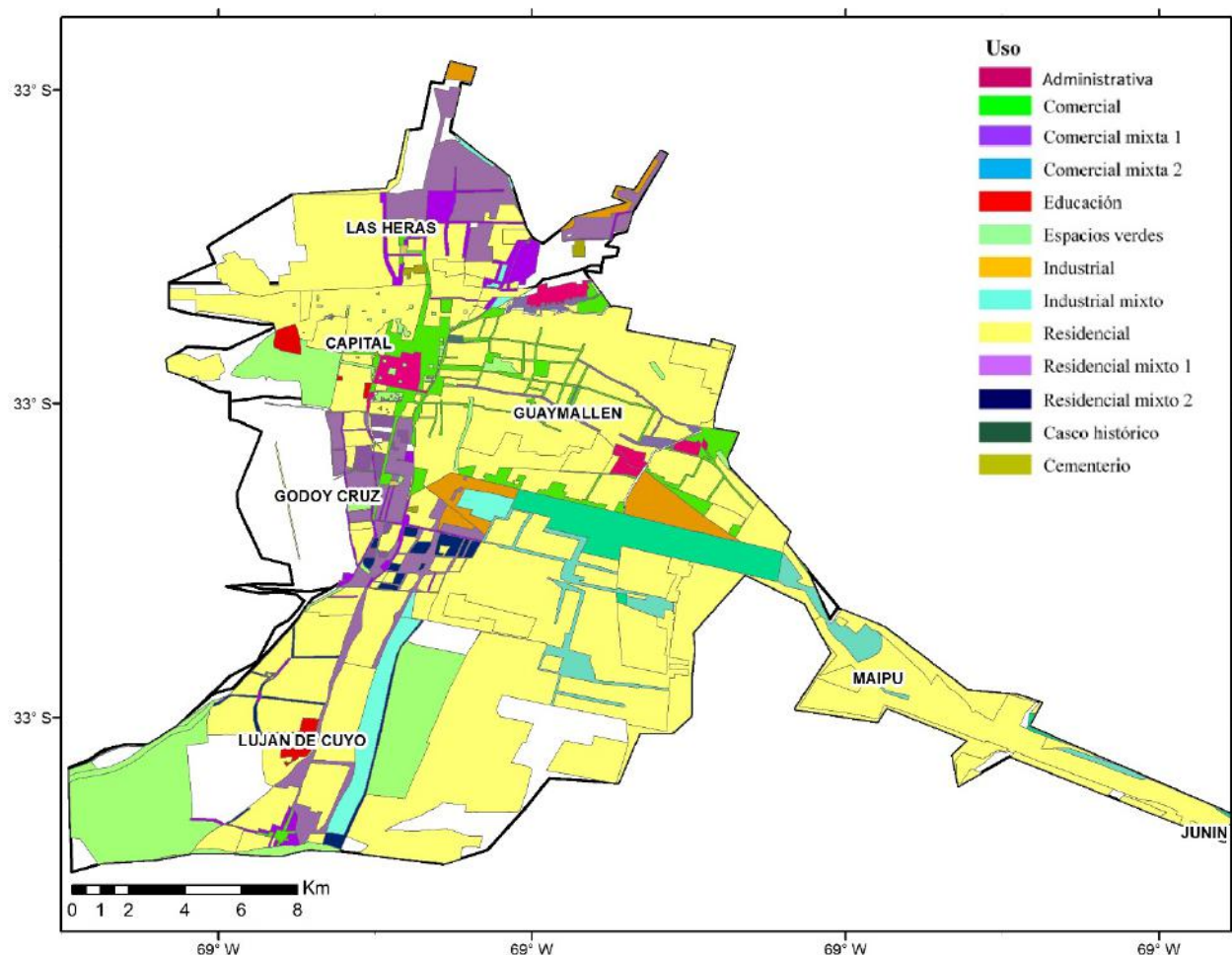


Figura 3-1
Zonificación por uso según la capa enviada por el APOT

Finalmente se cuenta entonces con información con resolución predio a predio relacionada con el uso principal de cada uno de los elementos expuestos. Mendoza está compuesta principalmente por unidades residenciales y comerciales, con una menor presencia de elementos de uso industrial y una presencia aún menor de uso administrativo. La Figura 3-2 muestra la distribución final de uso.

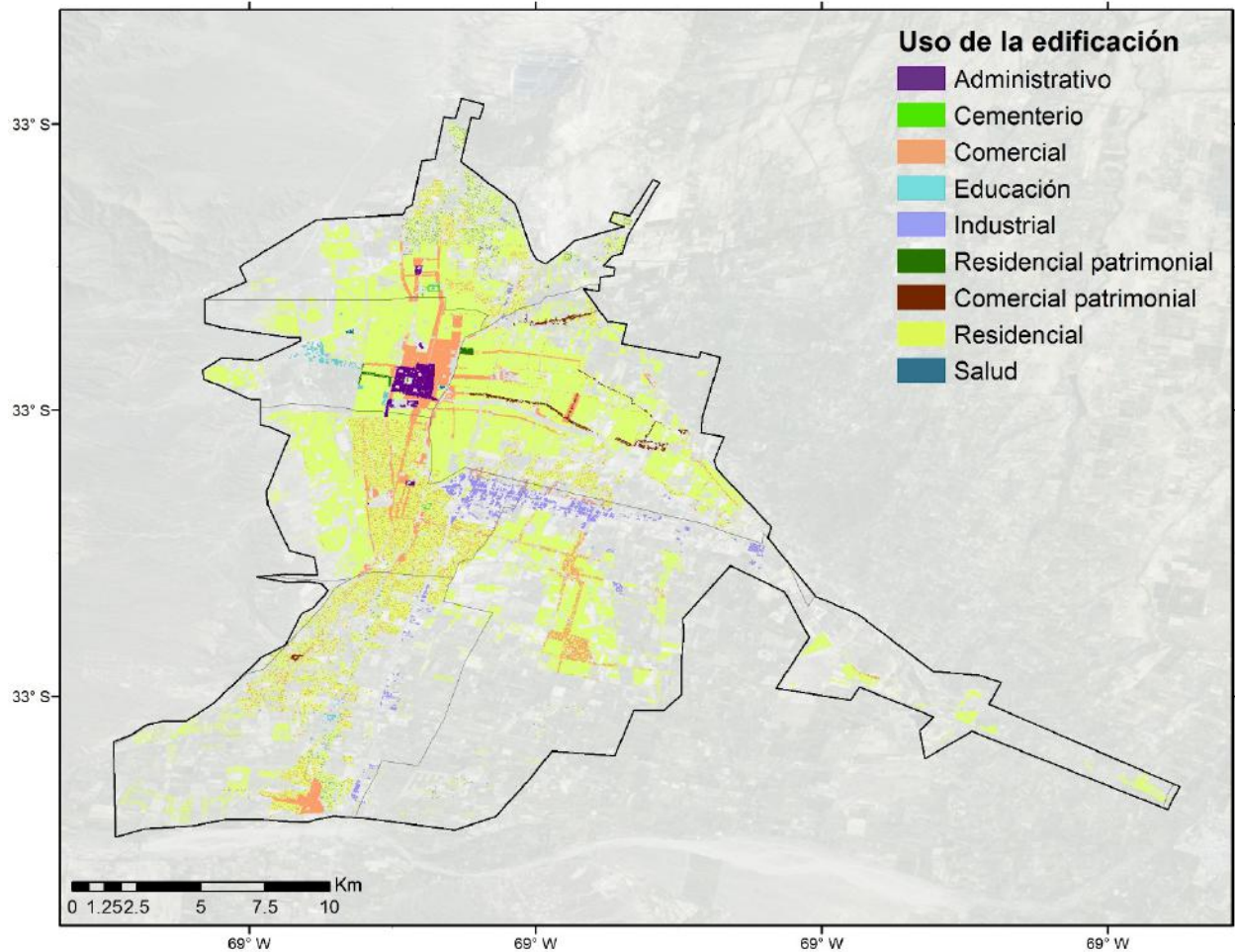


Figura 3-2
Uso asignado a cada predio individualmente

3.4 Nivel socio-económico

Otra de las características importantes que se desean tener en una base de datos es el nivel socio económico, el cual en este caso ayuda en la asignación del valor de reposición ya que se puede hacer una diferenciación según el estrato socio económico. Para asignar esta característica se utilizó un mapa realizado por Gudiño et al. (2001) a partir de la información del censo del 2001, el cual se muestra en la Figura 3-3. La Figura 3-4 muestra la asignación resultante de este nivel socio económico.

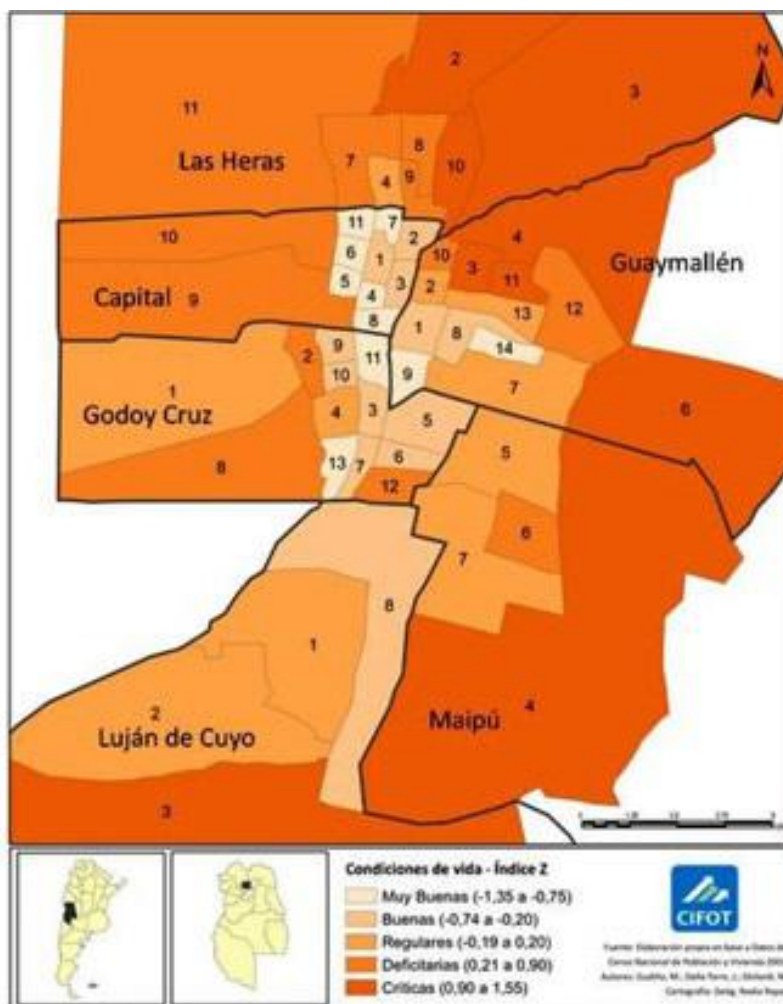


Figura 3-3
 Mapa de zonificación por nivel socio económico (Gudiño et al., 2011)

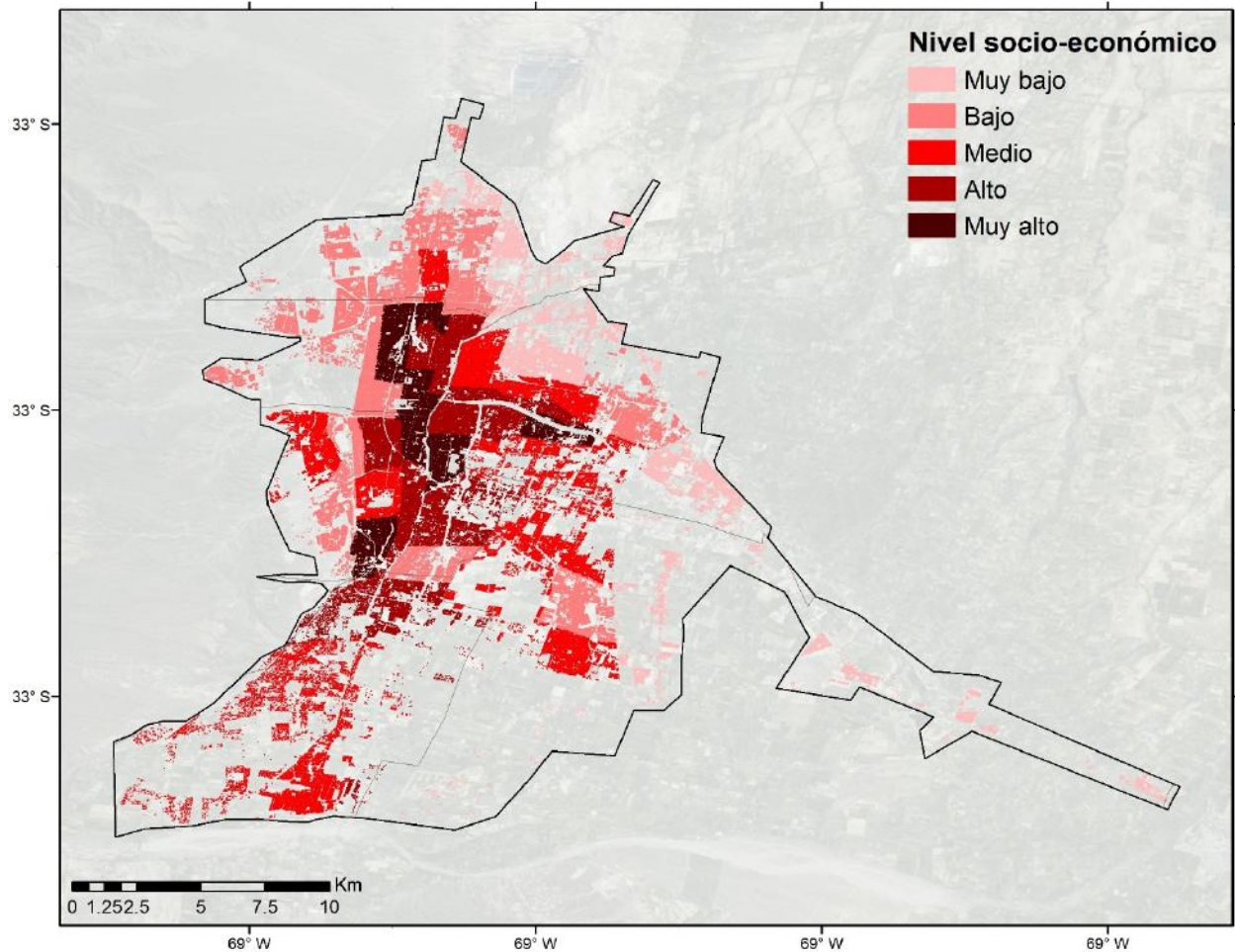


Figura 3-4
Nivel socio económico

3.5 Nivel de sismo resistencia

Adicional a las características anteriores es usual que se quiera conocer la calidad de la construcción, y esto se hace a veces a través de la edad o fecha de construcción, pero en este caso se logró hacer a través de la característica de si la edificación es sismo resistente o no. Para esto se utilizó una zonificación de sismo resistencia porcentual por distritos que se realizó como parte de la microzonificación de Mendoza en 1989 (INPRES, 1989). Dado que únicamente se tenían porcentajes por distrito, se utilizó un algoritmo para asignar esta característica aleatoriamente, y este algoritmo se muestra en el Anexo (Figura A-2). La Tabla 3-1 muestra la tabla que contiene esos porcentajes, y la Figura 3-5 muestra la asignación final de esta característica, la cual fue utilizada para la asignación del sistema estructural.

Tabla 3-1
Tabla de sismo-resistencia por distrito para Mendoza (INPRES, 1989)

DEPARTAMENTO	DISTRITO	CONSTRUCCIONES		
		N (°)	S (°)	N.S. (°)
GUAYMALLEN	Dorrego	7.494	62%	38%
	San José	3.681	45%	55%
	Pedro Molina	2.546	39%	61%
	Bermejo	866	57%	42%
	Gral. Belgrano	5.096	47%	53%
	Buena Nueva	1.115	31%	69%
	Nueva Ciudad	1.986	37%	63%
	Villa Nueva	8.990	79%	21%
	Arredondo	2.324	64%	36%
	San Fco. del Monte	196	29%	71%
	J.Nazareno	276	41%	59%
	Rodeo de la Cruz	2.795	46%	54%
	Paríal	37.367	57%	43%
	Ciudad	17.710	60%	40%
GUAYMALLEN GODOY CRUZ	San Fco. del Monte	2.457	93%	7%
	Las Tortugas	4.795	82%	18%
	Gober. Benegas	4.671	79%	21%
	Pre Sarmiento	2.147	97%	3%
GODOY CRUZ LAS HERAS	Paríal	31.780	71%	29%
	El Algarrobal	713	45%	55%
	El Resguardo	628	48%	52%
	El Chaleo	3.134	99%	1%
LAS HERAS LUJAN	La Cienaguita	354	74%	26%
	Panquehus	1.356	32%	68%
	Ciudad	7.678	47%	53%
	El Plumerillo	3.957	61%	39%
	El Zapallar	2.411	85%	15%
	Paríal	20.231	62%	38%
	Ciudad	4.262	64%	36%
	La Puntilla	426	53%	47%
LUJAN MAIPU	Chacras de Coria	982	54%	46%
	Mayor Drummond	370	54%	46%
	La Carrodilla	1.897	90%	10%
	Paríal	7.937	68%	32%
MAIPU CAPITAL	Ciudad	5.854	56%	44%
	Gutierrez+Luzuriaga	6.019	59%	41%
	Paríal	11.873	58%	42%
	PRIMERA	1.838	60%	40%
CAPITAL GRAN MENDOZA	SEGUNDA	2.789	74%	24%
	TERCERA	2.060	48%	52%
	CUARTA	5.616	51%	49%
	QUINTA	4.110	73%	27%
	SEXTA	6.575	72%	28%
	Paríal	22.988	64%	36%
	TOTAL	132.176	63%	37%

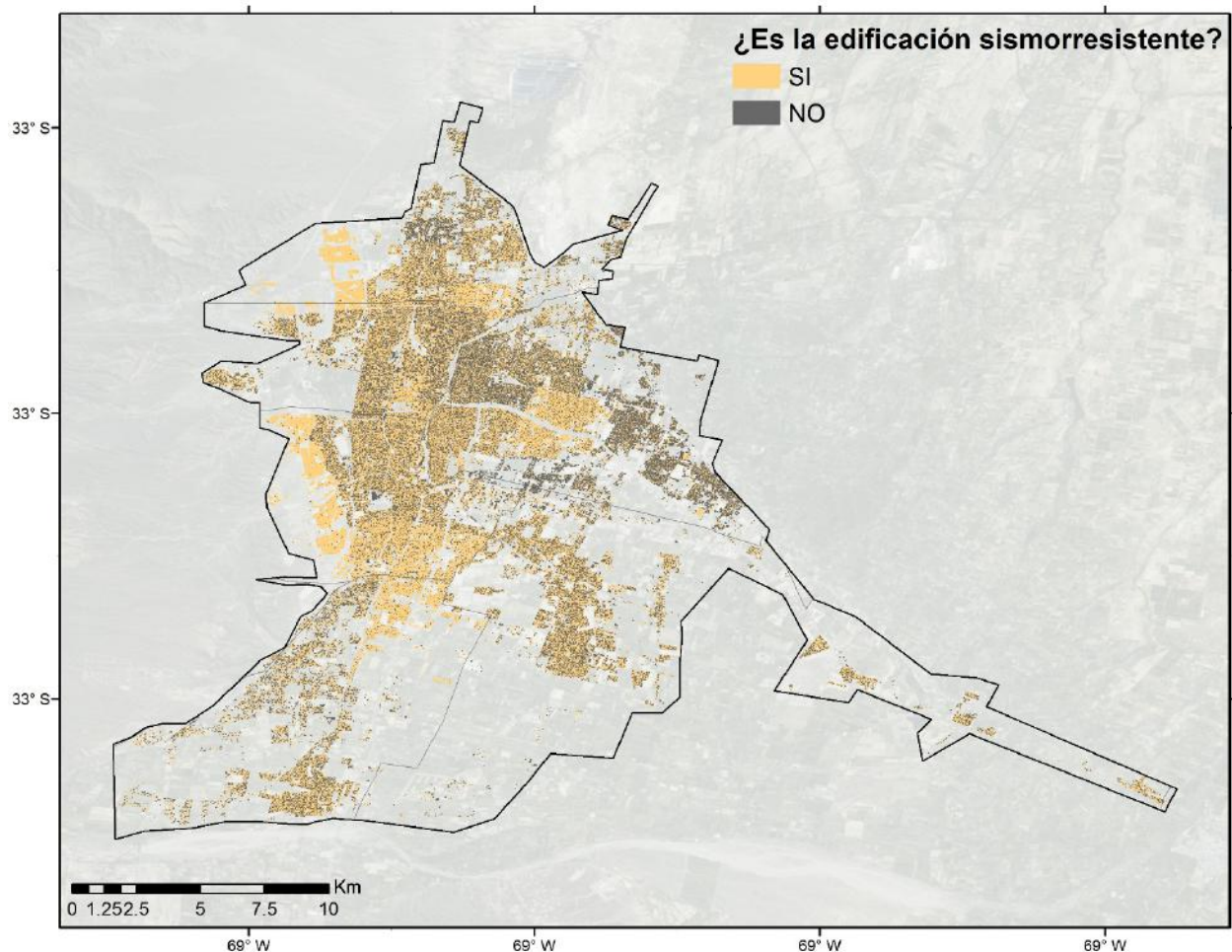


Figura 3-5
Sismo resistencia en el Gran Mendoza

3.6 Sistema estructural

Una de las características más importantes que debe tener la base de datos de exposición es el sistema estructural; este es el parámetro que finalmente representa el comportamiento de cada edificación frente a la acción de un sismo, y es lo que define el nivel de daño esperado ya que es lo que se conecta con las funciones de vulnerabilidad. Ya que no se tenía información directa predio a predio del sistema estructural de cada edificación, fue necesario asignarlo utilizando información de los materiales y sistemas constructivos del último censo (en el 2010) para la provincia de Mendoza y un algoritmo para la asignación aleatoria que respetara esos porcentajes. La tabla utilizada para esto es la Tabla H10-P del Censo del 2010, la cual contiene los hogares por tipo de vivienda, según material predominante de las paredes exteriores de la vivienda y presencia de revoque; de esta tabla se agruparon los sistemas seis: pórticos de concreto resistentes a momento, mampostería simple, mampostería confinada, madera, adobe y desecho, y se obtuvieron los porcentajes de participación que se muestran en la Tabla 3-2 Distribución de sistemas estructurales según el censo del 2010. El algoritmo utilizado para la

asignación del sistema estructural se basa en características asignadas previamente incluyendo la sismo resistencia y el uso, y este se muestra en el Anexo (Figura A-3). La Figura 3-6 muestra la asignación final del sistema estructural.

Tabla 3-2
Distribución de sistemas estructurales según el censo del 2010

Sismo resiste nte	USO	Número de pisos																	
		<=2						3-5						>5					
		PCR	MS	MC	A	W	R	PCR	MS	MC	A	W	R	PCR	MS	MC	A	W	R
SI	Administrativo	50%		50%				100%						100%					
	Comercial	60%		40%				100%						100%					
	Cementerio	50%		50%				100%						100%					
	Educación	80%		20%				100%						100%					
	Industrial	100%		0%				100%						100%					
	Residencial			100%				100%						100%					
	R3			100%				100%						100%					
	R4			100%				100%						100%					
	Salud	100%						100%						100%					
	Verde	-						-						-					
NO	V1	-						-						-					
		PCR	MS	MC	A	W	R	PCR	MS	MC	A	W	R	NO EXISTE					
	Administrativo		90%		10%			100%											
	Comercial		80%			19%	1%	100%											
	Cementerio		100%					100%											
	Educación		100%					100%											
	Industrial		100%					100%											
	Residencial		65%		30%	3%	2%	100%											
	R3		65%		30%	3%	2%	100%											
	R4		65%		30%	3%	2%	100%											
	Salud		100%					100%											
	Verde	-						-						-					
	V1	-						-						-					

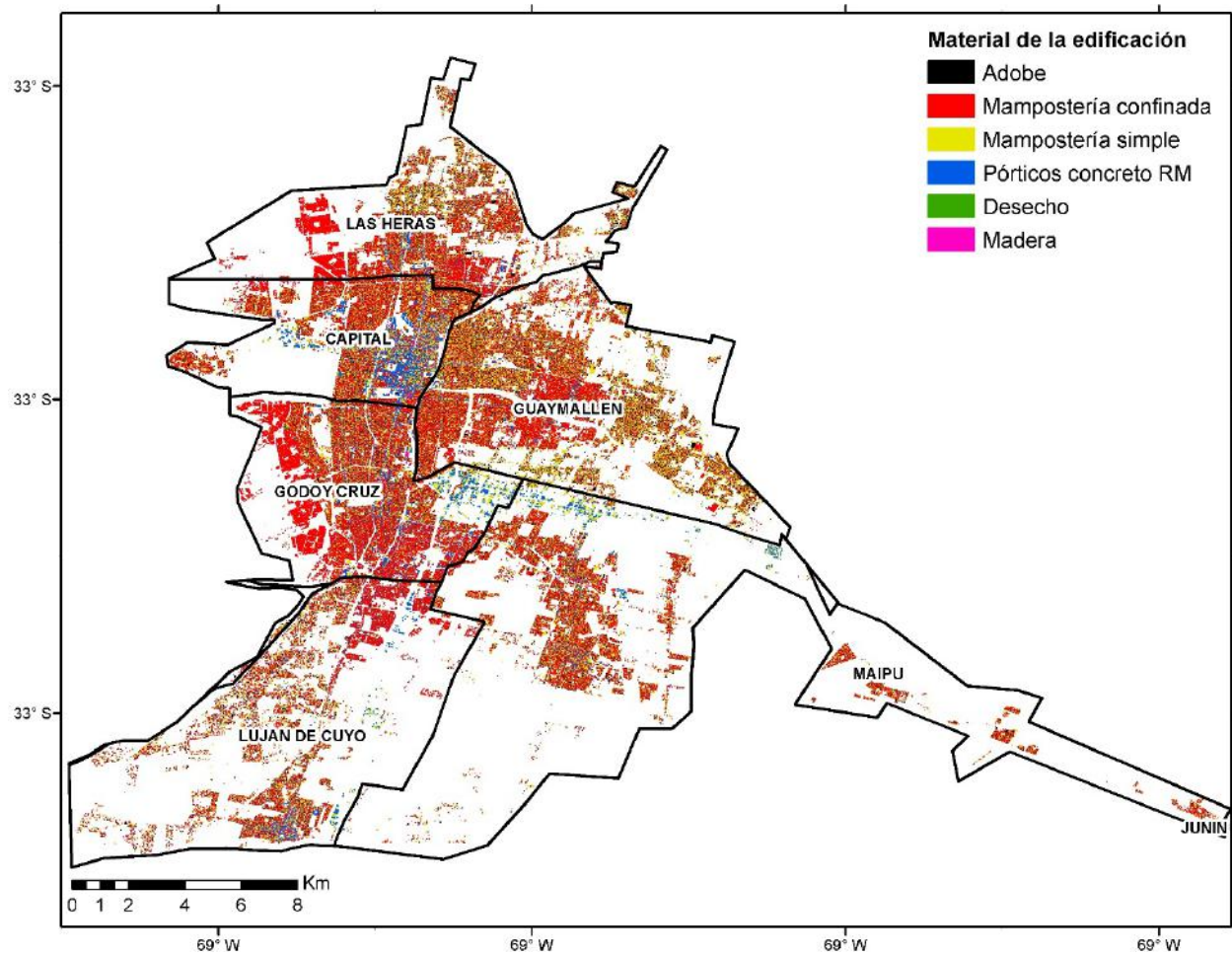


Figura 3-6
Sistema estructural en el Gran Mendoza

3.7 Valor de reposición

EL último paso para finalizar la base de datos de exposición es la asignación del valor de reposición el cual no sólo da el avalúo de cada edificación, si no que al final es lo que permite obtener los valores de las perdidas esperadas. Dado que no se tiene el valor directamente para cada edificación, fue necesario asignar este valor utilizando un algoritmo basado en el uso y el nivel socio económico. Para esto se utilizó un valor medio del metro cuadrado de construcción en Mendoza, y a partir de ahí usando factores estilo *proxy*, se definieron valores por uso y nivel socio económico para el uso residencial, como se muestra en la Tabla 3-3. El valor medio utilizado fue de \$7,583 pesos argentinos por metro cuadrado según los datos del colegio de arquitectos de Mendoza a la fecha del segundo trimestre del 2015 (Construirya, 2015). El algoritmo utilizado para la asignación del valor de reposición se muestra en el Anexo (Figura A-4), mientras que la Figura 3-7 muestra la asignación del valor de reposición.

Tabla 3-3
Factores de valoración

Valores de referencia (Residencial media = 1)							
Residencial baja	Residencial media	Residencial alta	Comercial	Industrial	Salud	Educación	Gobierno
0.40	1.00	1.60	1.00	1.60	1.44	1.00	1.00

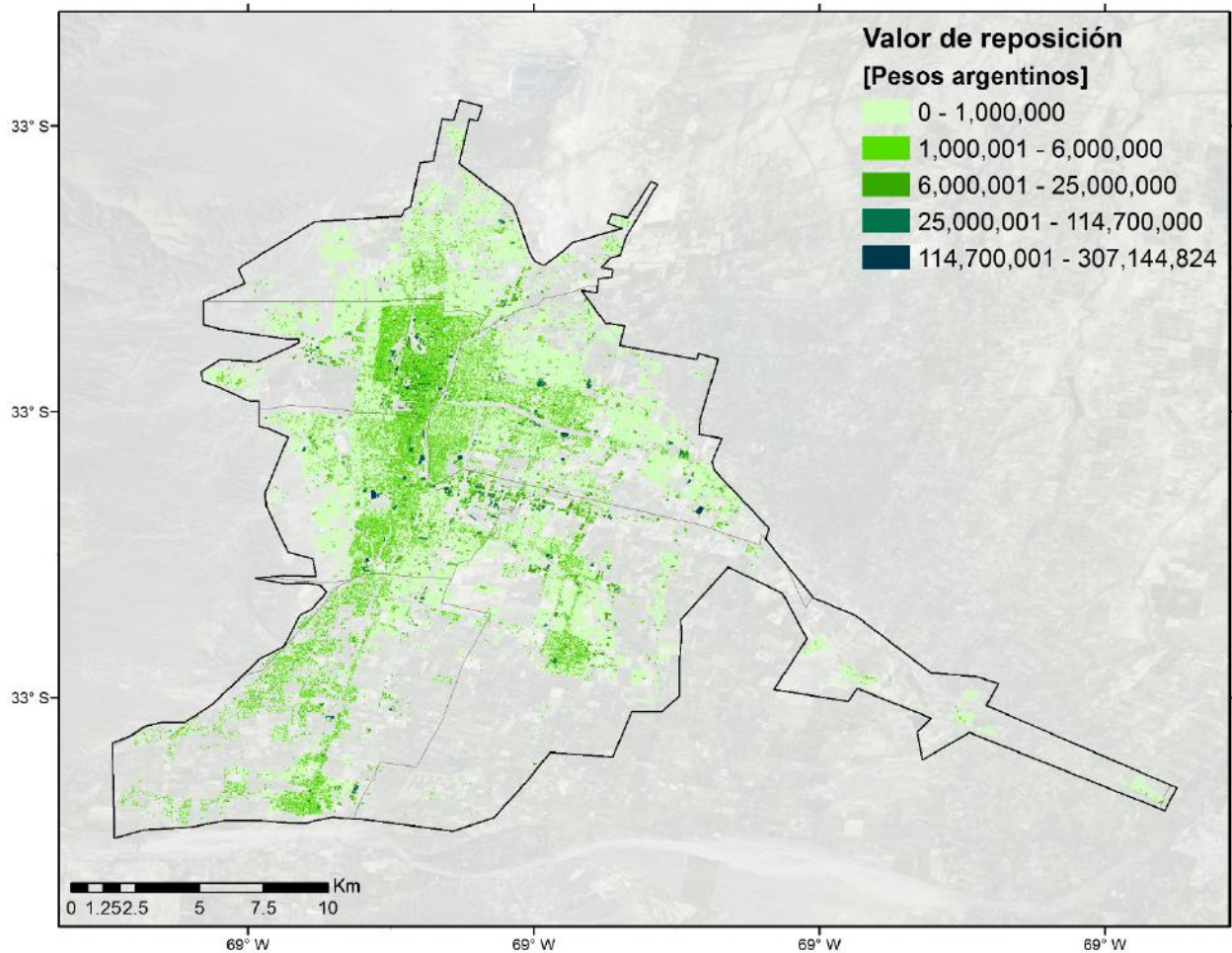


Figura 3-7
Valor de reposición en el Gran Mendoza

3.8 Ocupación humana de los elementos expuestos

Para poder evaluar el riesgo en términos de pérdidas de vidas humanas es necesario primero asignar a cada elemento expuesto una ocupación o cantidad de personas que habitan allí. Para eso se utilizó como base la información de población del Censo del 2010 (INDEC, 2010) y se siguieron los siguientes pasos:

1. De la página del INDEC se descargó un *shapefile* de los resultados del censo por radios censales para Mendoza.
2. Se realizó un cruce espacial utilizando herramientas SIG para asignarle a este *shapefile* del censo el valor total de área construida según la base de datos de catastro. De esta manera a cada polígono del *shapefile* del censo se le agrega la información de área total construida dentro de ese polígono.
3. Utilizando la información de población y área total construida para cada radio censal, se creó un nuevo campo de densidad de población.
4. Se realizó otro cruce espacial con herramientas SIG para asignarle este atributo de densidad de población a cada uno de los polígonos del catastro.
5. Finalmente utilizando la información de área construida y de densidad de población de cada edificación se determinó la población de cada edificación.

Hubo casos en los que en el *shapefile* del censo había polígonos que sin población pero que en el *shapefile* de catastro sí existen construcciones (probablemente posteriores al 2010); en estos casos para estos polígonos se asumió una densidad de población igual a la del polígono vecino. Tras este proceso se obtuvo una población total para el Gran Mendoza de 1,163,591 personas.

4 Vulnerabilidad física de los elementos expuestos

4.1 Introducción

Una función de vulnerabilidad define la distribución de probabilidad de las pérdidas como función de la intensidad, entendida como cualquier parámetro físico que pueda relacionarse con la amenaza bajo estudio, durante un evento específico. Estas funciones relacionan el valor esperado del daño, así como su desviación estándar, con el parámetro de amenaza sísmica seleccionado tal y como se presenta de manera esquemática en la Figura 2-1. Es importante resaltar que la incertidumbre es mínima en los valores extremos iniciales y esperados del daño esperado mientras que es máxima cuando el MDR es igual al 50%.

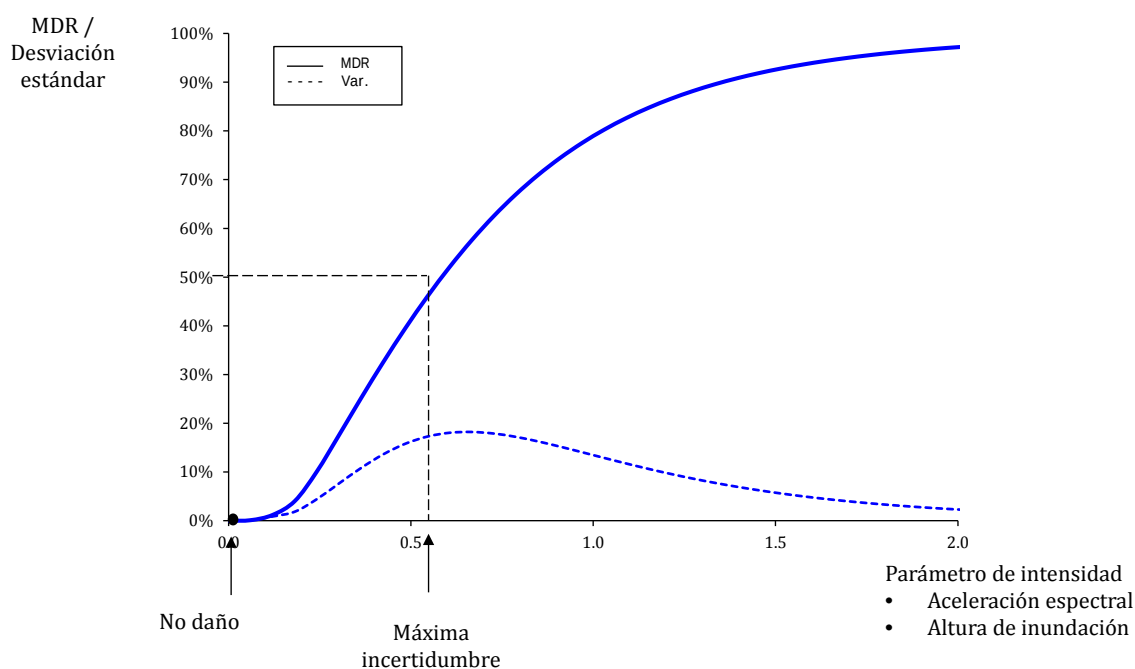


Figura 4-1
Composición de una función de vulnerabilidad

El daño generalmente se mide a partir de la relación media de daño (MDR por sus siglas en inglés) que representa el costo de reposición del elemento para llevarlo a un estado igual, con las mismas condiciones y características, a las que había antes de la ocurrencia del terremoto. Este valor suele expresarse de manera relativa a su valor de reposición total; de allí la importancia de la definición de la valoración en términos de este tipo de indicador para cada elemento en el proceso de identificación y caracterización de los elementos expuestos.

La selección de la medida de intensidad para la evaluación del riesgo sísmico depende del elemento y de aquel parámetro que se haya observado correlacione de mejor manera los niveles medidos con los daños observados ya sea en eventos anteriores, en modelaciones analíticas o en análisis experimentales. Dado que en esta base de datos de elementos expuestos sólo se han incluido edificaciones, excluyendo otros componentes de infraestructura urbana como puentes,

vías y redes de líneas vitales, la definición de las funciones de vulnerabilidad estarán relacionadas con un mismo parámetro de intensidad, la aceleración espectral.

4.2 Funciones de vulnerabilidad sísmica

Para este tipo de análisis se requiere realizar el agrupamiento de elementos con características similares en clases estructurales para la asignación de una función de vulnerabilidad común a cada categoría. Es conceptualmente incorrecto asignar funciones de vulnerabilidad únicas a elementos particulares, es decir, para cada una de las edificaciones en la Gran Mendoza.

Tras la caracterización de elementos expuestos realizada anteriormente, se han agrupado los mismos en clases estructurales que dependen del sistema estructural, la altura y si es o no sismorresistente. Los sistemas estructurales existentes incluyen adobe, mampostería confinada, mampostería simple, pórticos de concreto resistente a momento, desecho y madera. Por otro lado, se han definido tres grupos de altura de las edificaciones como sigue: baja hasta 2 pisos, media hasta 5 pisos y alta de 6 pisos o más. Finalmente se utilizó información de la microzonificación sísmica de Mendoza en cuanto a la distribución porcentual de construcciones sismorresistentes y no sismorresistentes por distrito.

Las Figura 4-2 a Figura 4-6 muestran las curvas de vulnerabilidad agrupadas por sistema estructural, mientras que la Figura 4-7 muestra todas las funciones de vulnerabilidad graficadas al mismo tiempo para permitir una comparación directa; de allí se puede notar que las construcciones en adobe en general son las más vulnerables, le siguen las de mampostería simple, mampostería confinada, madera y finalmente los pórticos de concreto resistentes a momento las cuales son las curvas más resistentes.

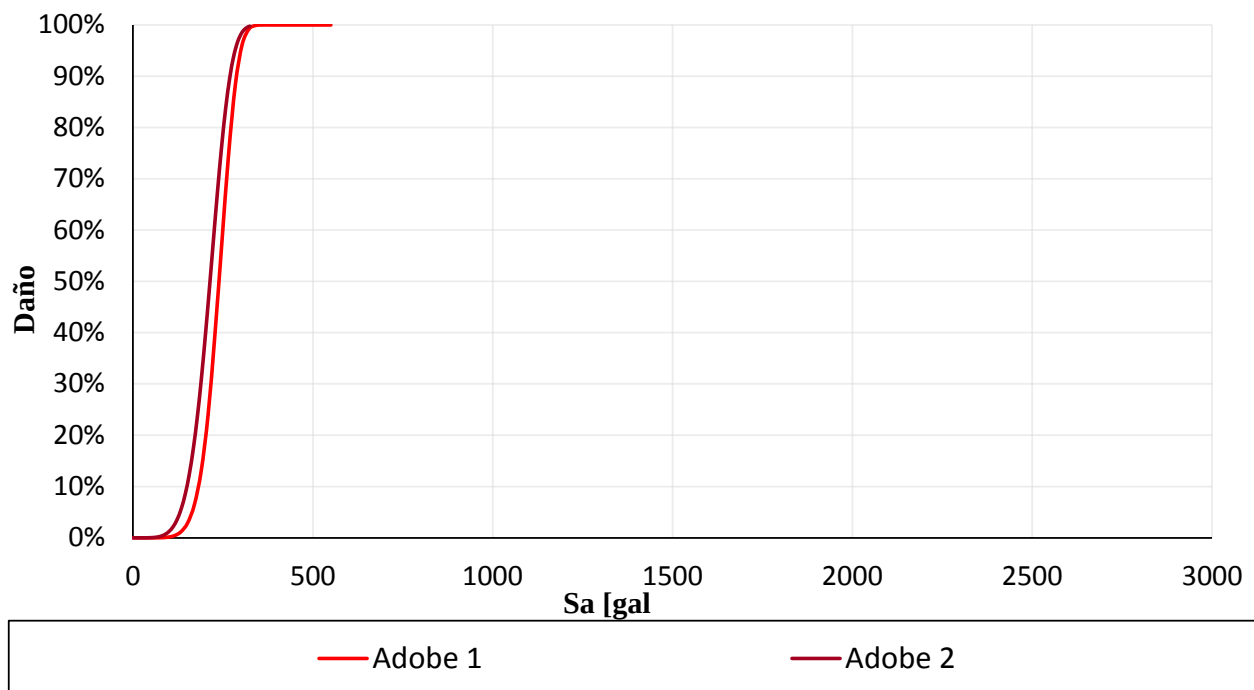


Figura 4-2
Funciones de vulnerabilidad sísmica para los pórticos en concreto

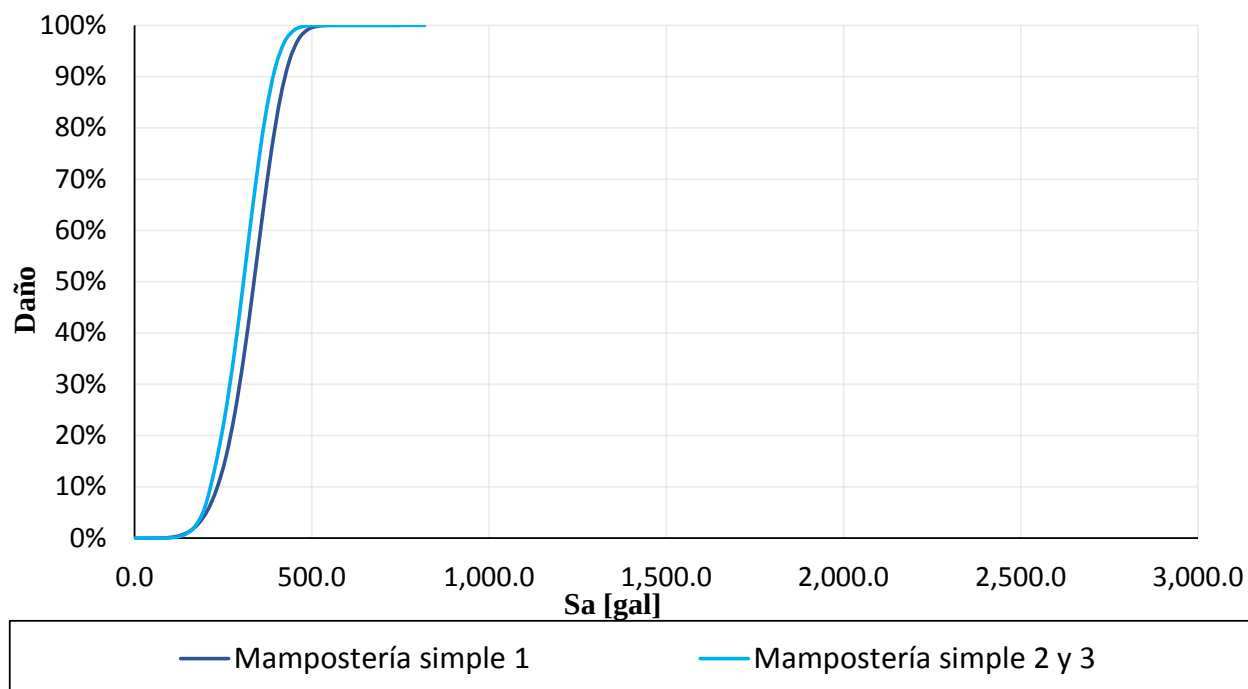


Figura 4-3
Funciones de vulnerabilidad sísmica para los pórticos en concreto no dúctiles.

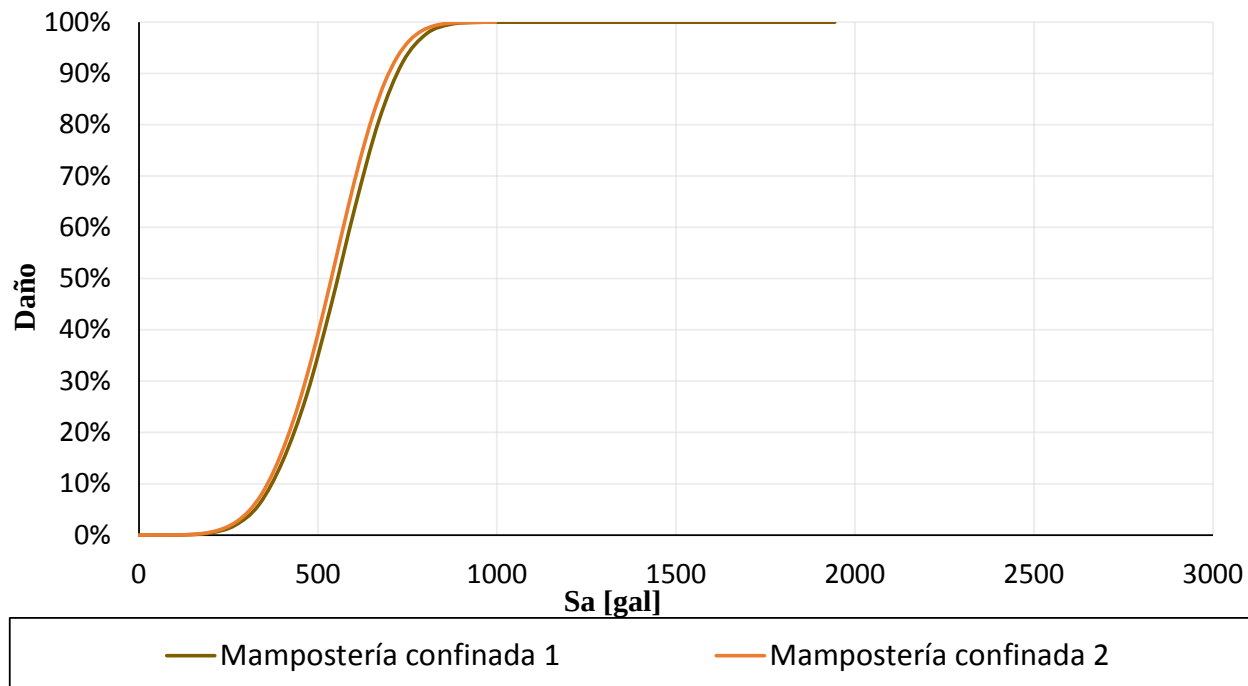
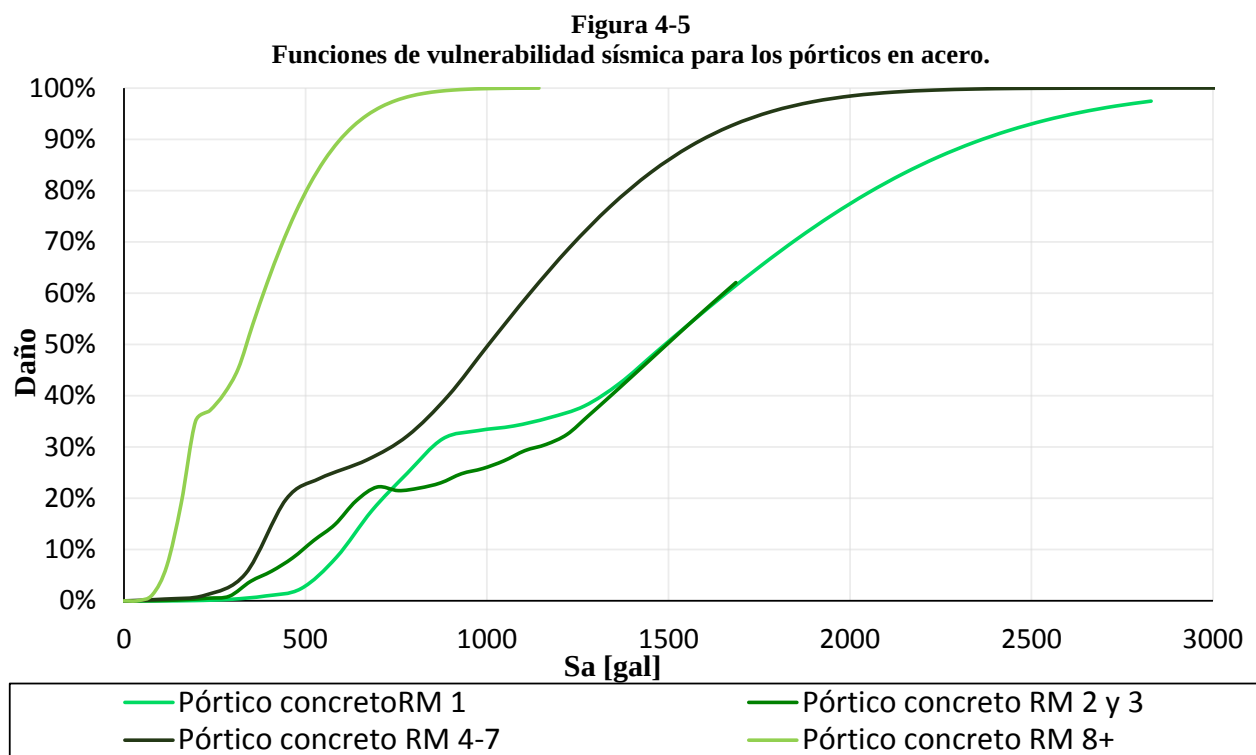
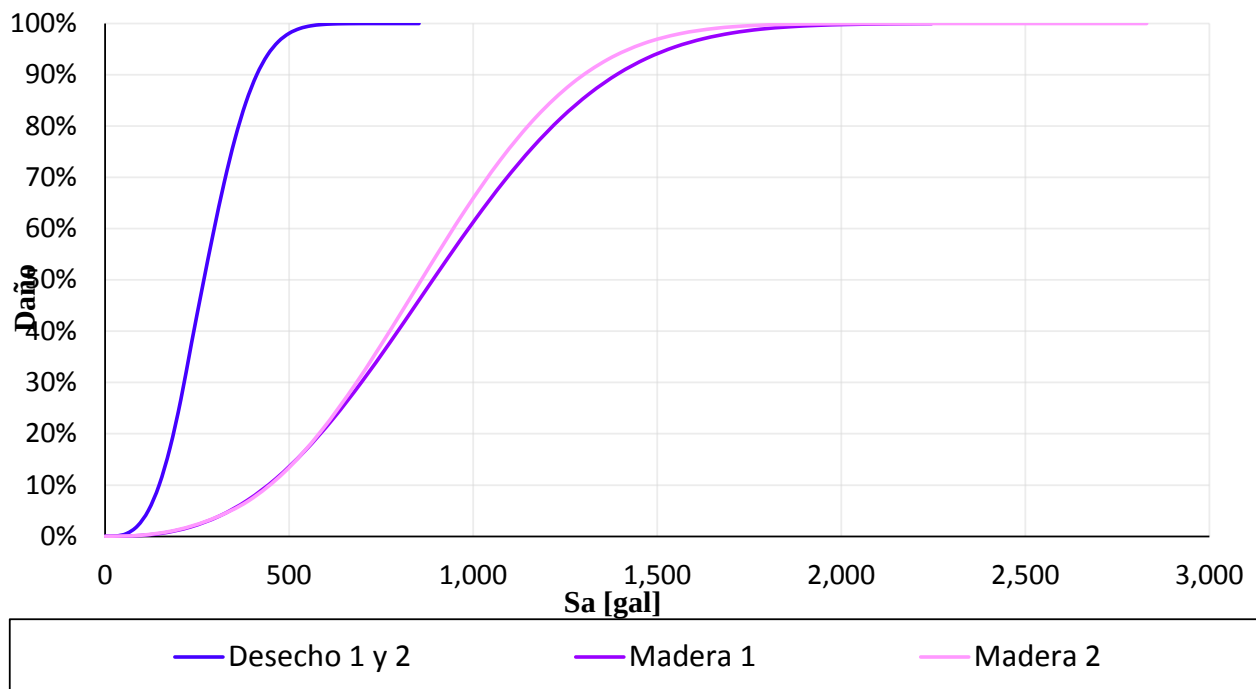


Figura 4-4
Funciones de vulnerabilidad sísmica para los sistemas duales.



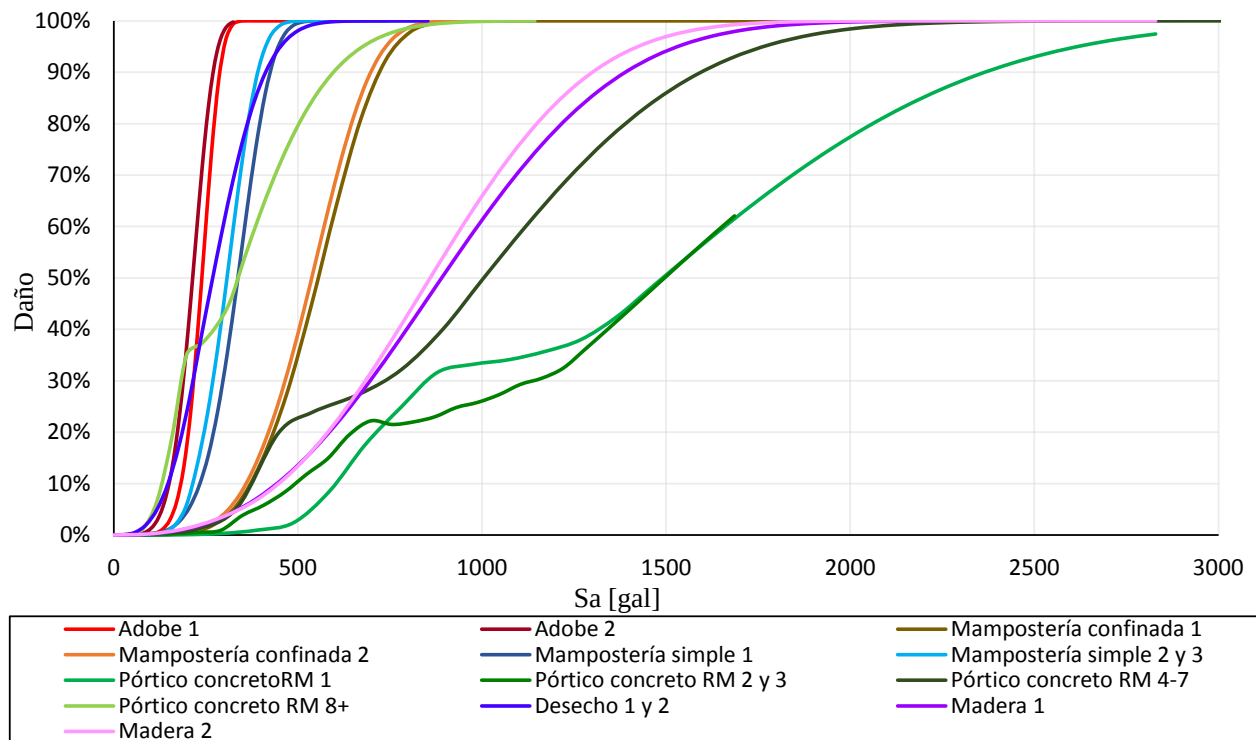


Figura 4-7
Funciones de vulnerabilidad sísmica para la Gran Mendoza

5 Amenaza sísmica

5.1 Introducción

Para el análisis de riesgo es necesario contar con el módulo de amenaza sísmica, que es el que describe las características del movimiento fuerte en términos de niveles de intensidad (como lo puede ser la aceleración) y sus frecuencias de ocurrencia. Este módulo consiste en este caso de dos partes, una que evalúa la amenaza a nivel de roca y otra que evalúa la amenaza a nivel de superficie específicamente para la ciudad de Mendoza. Para la primera parte se ha realizado un estudio probabilista de amenaza sísmica para toda la República de Argentina, el cual puede ser encontrado en el informe *Evaluación probabilista de la amenaza sísmica*. Para la segunda parte se ha utilizado el estudio de microzonificación sísmica de Mendoza realizada por el INPRES en 1989, el cual da cuenta de los efectos locales de sitio específicos de la ciudad. A continuación se muestran los resultados que componen este módulo de amenaza.

5.2 Amenaza sísmica en roca en Mendoza

Los resultados completos de la amenaza sísmica a nivel de roca para toda la Argentina pueden encontrarse en el informe *Evaluación probabilista de la amenaza sísmica*; sin embargo, aquí se muestran algunas figuras pertinentes a la ciudad de Mendoza que permiten caracterizar el nivel de amenaza a nivel de basamento rocoso. La Figura 5-1 muestra varios mapas de amenaza uniforme para la Gran Mendoza, en donde se pueden ver las diferentes variaciones que se tienen a medida que se cambia el periodo de retorno y el periodo estructural; a medida que aumenta el periodo de retorno (y se deja fijo la ordenada espectral) el nivel de intensidad aumenta, mientras que a medida que aumenta el periodo estructural (y se deja fijo el periodo de retorno) el nivel de intensidad primero aumenta hasta llegar a un pico, y luego disminuye. Esto también se refleja en la curva de amenaza, una curva que relaciona el nivel de aceleración con la tasa de excedencia de dicha aceleración, y el espectro de amenaza uniforme, una curva que relaciona el periodo estructural con un nivel de aceleración (Figura 5-2 y Figura 5-3 respectivamente). De estos mapas se puede ver que el nivel de amenaza en roca para la ciudad de Mendoza varía gradualmente del noroeste al sureste, en donde la esquina noroccidental tiene el mayor nivel de amenaza mientras que la esquina suroriental tiene el menor nivel de amenaza; esto se debe a la presencia de la fuente sismogénica Cerro La Cal – Divisadero Largo, la cual pasa por el noroeste de la ciudad y cuyo buzamiento es hacia el oeste. En consecuencia se tiene una aceleración alrededor de los 370 cm/s^2 en el noroeste de la ciudad y 250 cm/s^2 en el sureste para un periodo de retorno de 475 años y PGA. De las curvas de amenaza y espectros de amenaza uniforme se pueden obtener valores de aceleración para diferentes periodos de retorno y periodos estructurales.

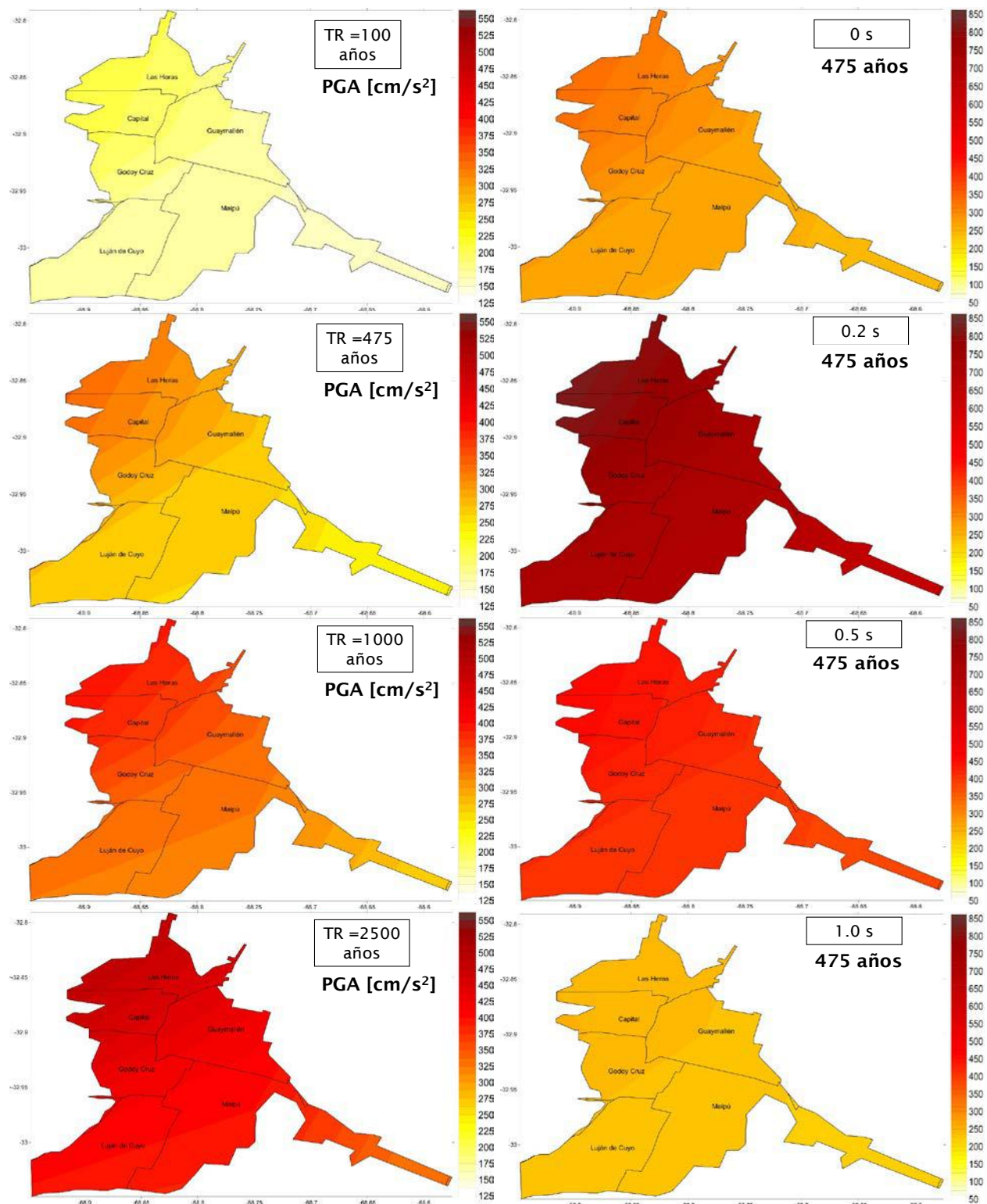


Figura 5-1. Mapas de amenaza, para PGA y varios periodos de retorno (izquierda) y para 475 años de periodo de retorno y varios periodos estructurales (derecha)

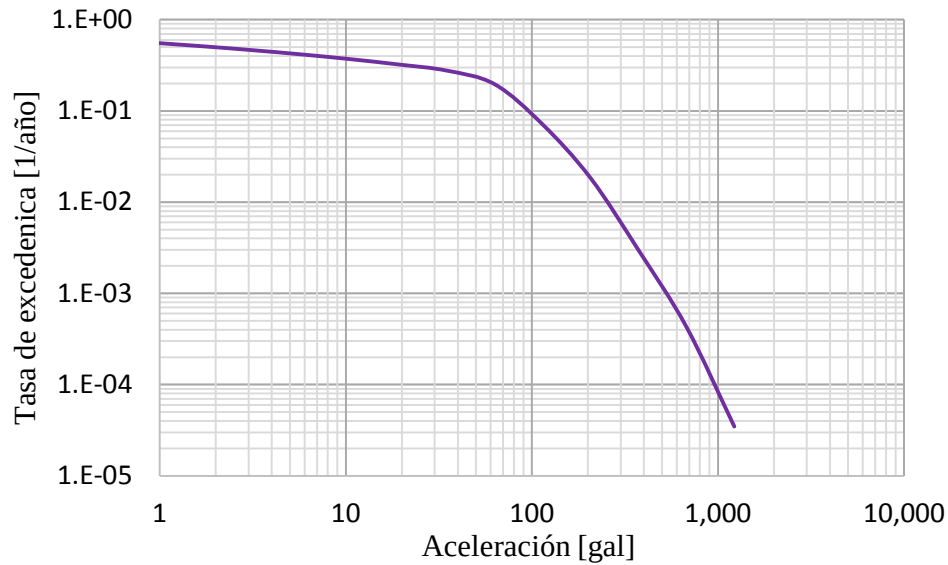


Figura 5-2. Curva de amenaza para PGA en Mendoza

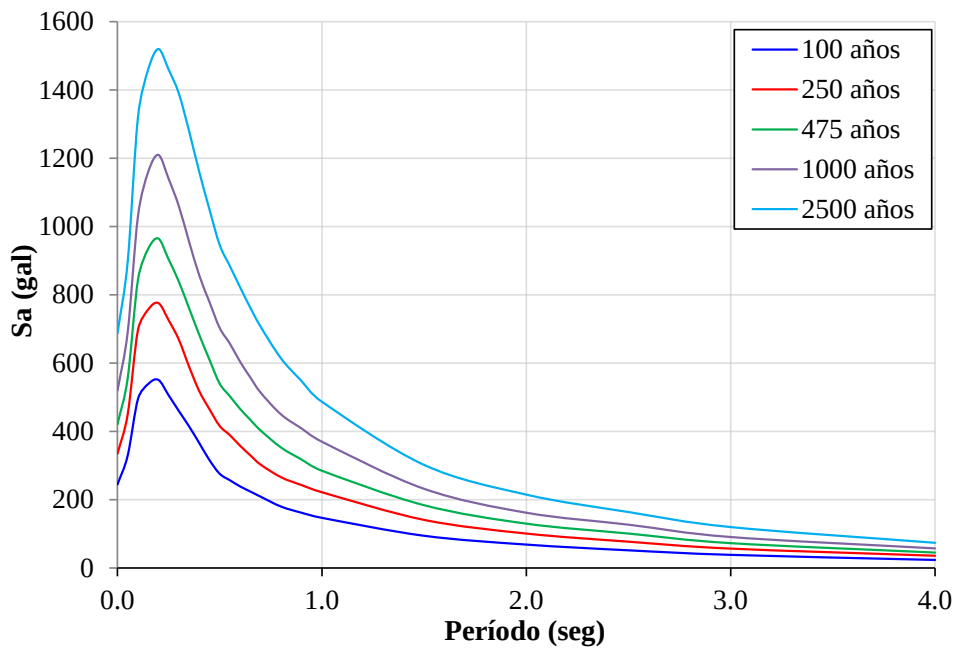


Figura 5-3. Espectros de amenaza uniforme para varios periodos de retorno para Mendoza

5.3 Amenaza sísmica en superficie en Mendoza

Después de tener los resultados de la amenaza sísmica en roca es necesario considerar también los efectos que pueden generar los depósitos de suelo presentes en la ciudad, ya que los suelos son capaces de distorsionar las ondas sísmicas las cuales en ciertos casos pueden llegar a amplificarse y generar aceleraciones mayores a las esperadas en roca. Para incorporar estos efectos se hizo uso del estudio de microzonificación sísmica realizado para la Gran Mendoza en 1989 por el Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) liderado por Juan Carlos

Castano (INPRES, 1989). A continuación se describen los resultados de ese estudio y cómo fueron utilizados y adaptados para poder ser incorporados a la plataforma CAPRA.

La microzonificación sísmica cuenta, entre otras cosas, con los siguientes estudios:

- Estudios geotectónicos: se definieron mapas geológicos en los cuales se identificaron lineamientos principales.
- Estudios sismológicos: se compiló un catálogo sísmico histórico a partir del catálogo SISRA para Argentina.
- Estudios geotécnicos: se realizaron estudios de suelo donde se obtuvieron perfiles de suelo. Para recopilar esta información se usaron tres fuentes:
 - o 164 pozos de agua existentes
 - o Estudios de suelos de construcciones públicas y privadas
 - o Exploración geotécnica para el estudio de la microzonificación, en la cual se hicieron 517m en sondeos abiertos entre 10—20m de profundidad en la zona del piedemonte y el abanico aluvial, 411m en sondeos manuales en la zona transicional, y 92m en pozos entre 10m-50m de profundidad en la zona transicional.

A partir de esta información se realizaron estratigrafías, se determinó el nivel freático, se clasificó el suelo, se realizaron ensayos de penetración estándar, los límites de Atterberg, el contenido de humedad y peso específico. Adicionalmente se hicieron ensayos *downhole* y de refacción los cuales sirvieron para hacer un análisis de respuesta dinámica usando 17 perfiles de suelo y el programa SHAKE, del cual se obtuvieron curvas de la relación entre el espectro en suelo y en roca para los 17 perfiles.

A pesar de que se realizaron numerosos sondeos y ensayos, la información cruda correspondiente a ellos no se encontró en el documento de la microzonificación, razón por lo que no fue posible tener acceso a toda esta información. La microzonificación incluye un mapa de los sondeos pero no indica el número o nombre de cada sondeo por lo que es imposible identificarlos, además la información estratigráfica sólo se tiene para dos secciones transversales y tres sondeos, y la información de todos los parámetros geotécnicos y los análisis dinámicos simplemente no se tiene. Por esta razón no fue posible realizar un estudio de efectos de sitio detallado y riguroso como inicialmente se quería hacer como parte de este proyecto, y fue necesario realizar un análisis simplificado utilizando los mapas resultantes de la microzonificación, como se describe a continuación.

La Figura 5-4 muestra el mapa de las grandes unidades geomórficas en la región, de las cuales tres se encuentran en el territorio de la Gran Mendoza: abanico aluvial de Maipú, piedemonte y

planicie aluvial transicional. Dado que hacia el oeste de la ciudad se encuentra la Precordillera a corta distancia, la unidad de piedemonte alcanza a introducirse en el Gran Mendoza en el borde oeste de la misma. Por su parte el Río Mendoza, localizado al sur de la ciudad, da origen a un gran abanico aluvial (abanico aluvial de Maipú) que se abre hacia el noreste cubriendo toda la parte sur y suroriental del Gran Mendoza, el cual hacia la parte norte de la ciudad se convierte en una planicie aluvial de transición donde el espesor de sedimentos como arcilla y limo es de hasta más de 20 metros.

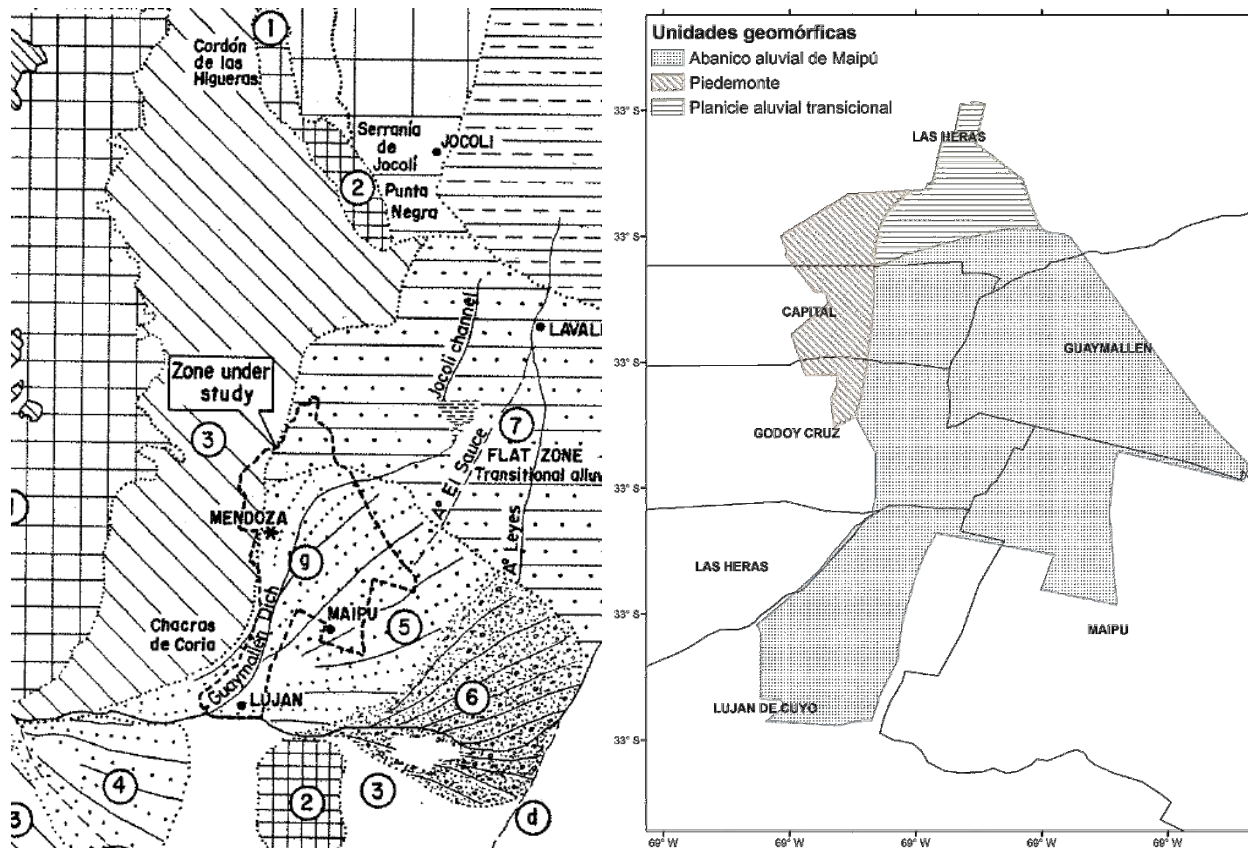


Figura 5-4. Mapa de unidades geomórficas según la microzonificación sísmica (INPRES, 1989)

A partir de estos tres grupos el estudio de microzonificación determina una zonificación por tipo de suelo en donde la ciudad se agrupa en dos grandes grupos: suelo superficial duro y suelos profundos. La Figura 5-5 muestra este mapa de zonificación por tipo de suelo, en donde se puede ver que la parte nororiental de la ciudad se clasifica como suelo profundo, mientras que el resto se clasifica como suelo superficial duro. Para cada uno de estos tipos de suelo se define un espectro de amplificación para el diseño con un amortiguamiento del 5% del crítico (Figura 5-5).

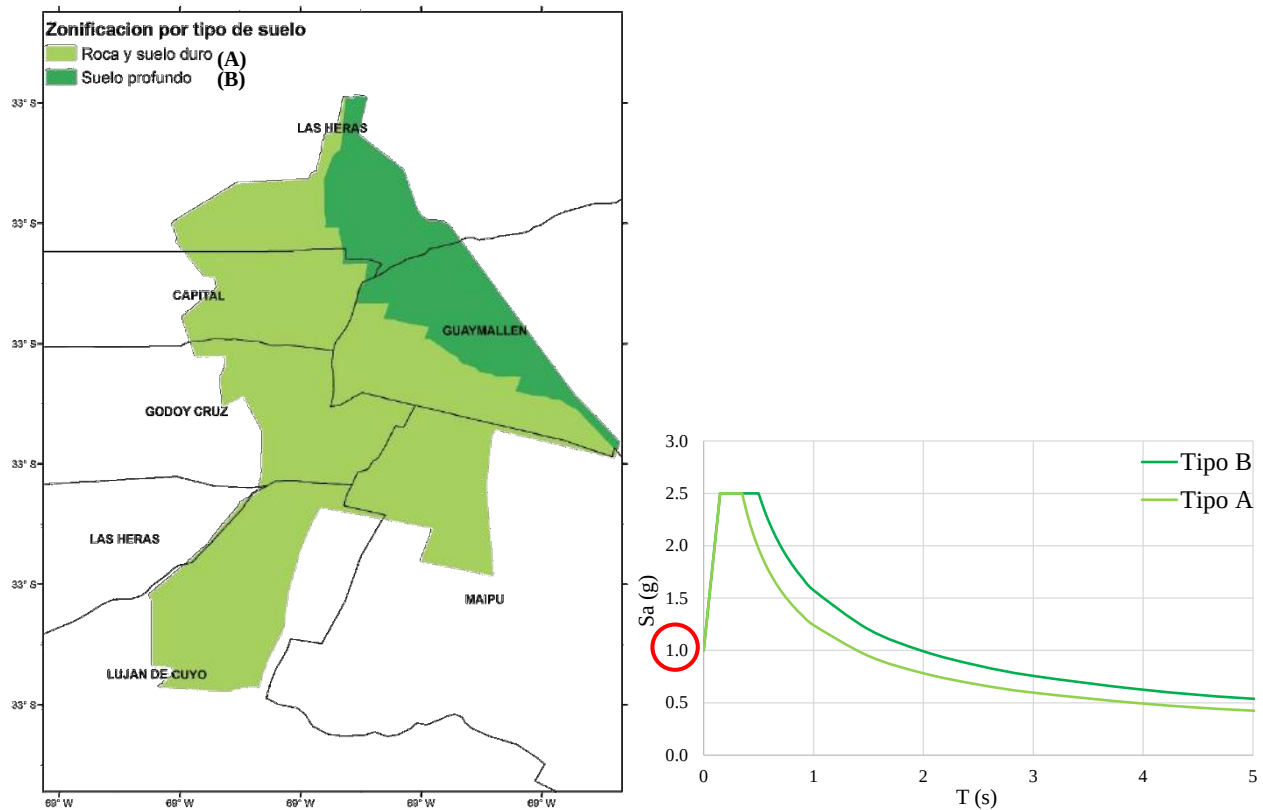


Figura 5-5. Mapa de zonificación por tipo de suelo y espectros de amplificación por tipo de suelo (INPRES, 1989)

Estos espectros de amplificación son utilizados junto con los resultados de un análisis probabilista de amenaza sísmica que se realizó dentro del estudio de la microzonificación, para obtener finalmente espectros de diseño. Este análisis probabilista de amenaza sísmica se realizó a nivel de superficie, y arroja los resultados que se ven en la Figura 5-6, en donde el mapa de la izquierda muestra la aceleración máxima resultante, y el de la derecha muestra la aceleración efectiva que se calculó como el 85% de la aceleración máxima. Estas líneas de isoaceleraciones dan como resultado el mapa de zonificación por nivel de amenaza que se muestra en la Figura 5-7. En este punto es importante resaltar que el estudio de microzonificación define un periodo de retorno de 200 años (10% de probabilidad de excedencia en 20 años) como el nivel aceptado de seguridad para el diseño estructural, por lo que las aceleraciones que se ven en las Figura 5-6 y Figura 5-7 corresponden a este periodo de retorno.

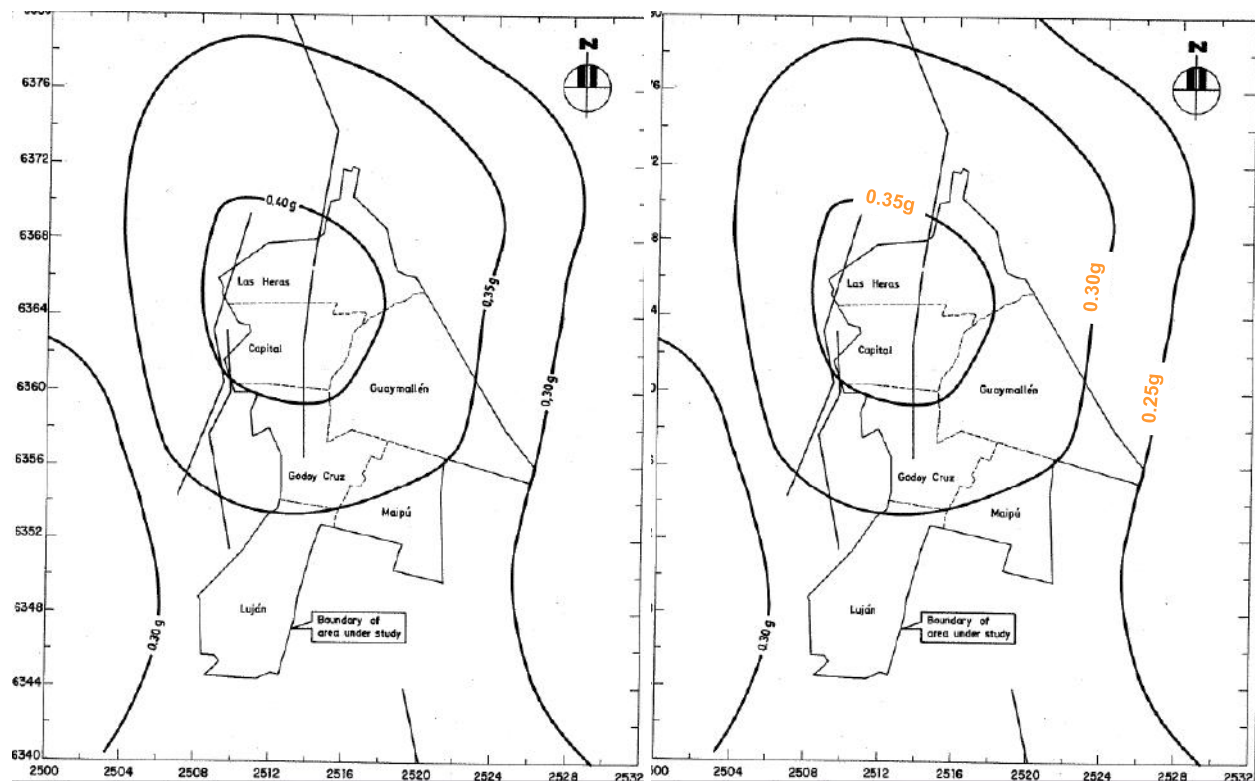


Figura 5-6. Mapa de la aceleración máxima (izquierda) y de aceleración efectiva (derecha) (INPRES, 1989)

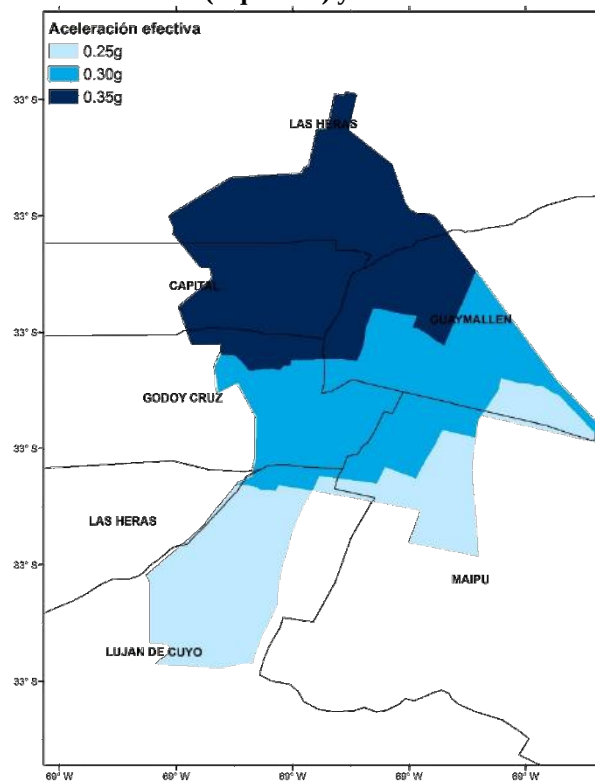


Figura 5-7. Mapa de zonificación según la aceleración efectiva (INPRES, 1989)

Finalmente, la zonificación por tipo de suelo es combinada con la zonificación por nivel de amenaza para dar como resultado la zonificación final para el diseño estructural. Esta zonificación cuenta con un total de 5 zonas, en donde cada una tiene asociado un valor de aceleración máxima y un espectro de amplificación; de esta manera el valor de la aceleración efectiva es utilizado para reemplazar el valor de 1 en el espectro de amplificación, dando como resultado un espectro de diseño en superficie único para cada zona. Este resultado se muestra en la Figura 5-8.

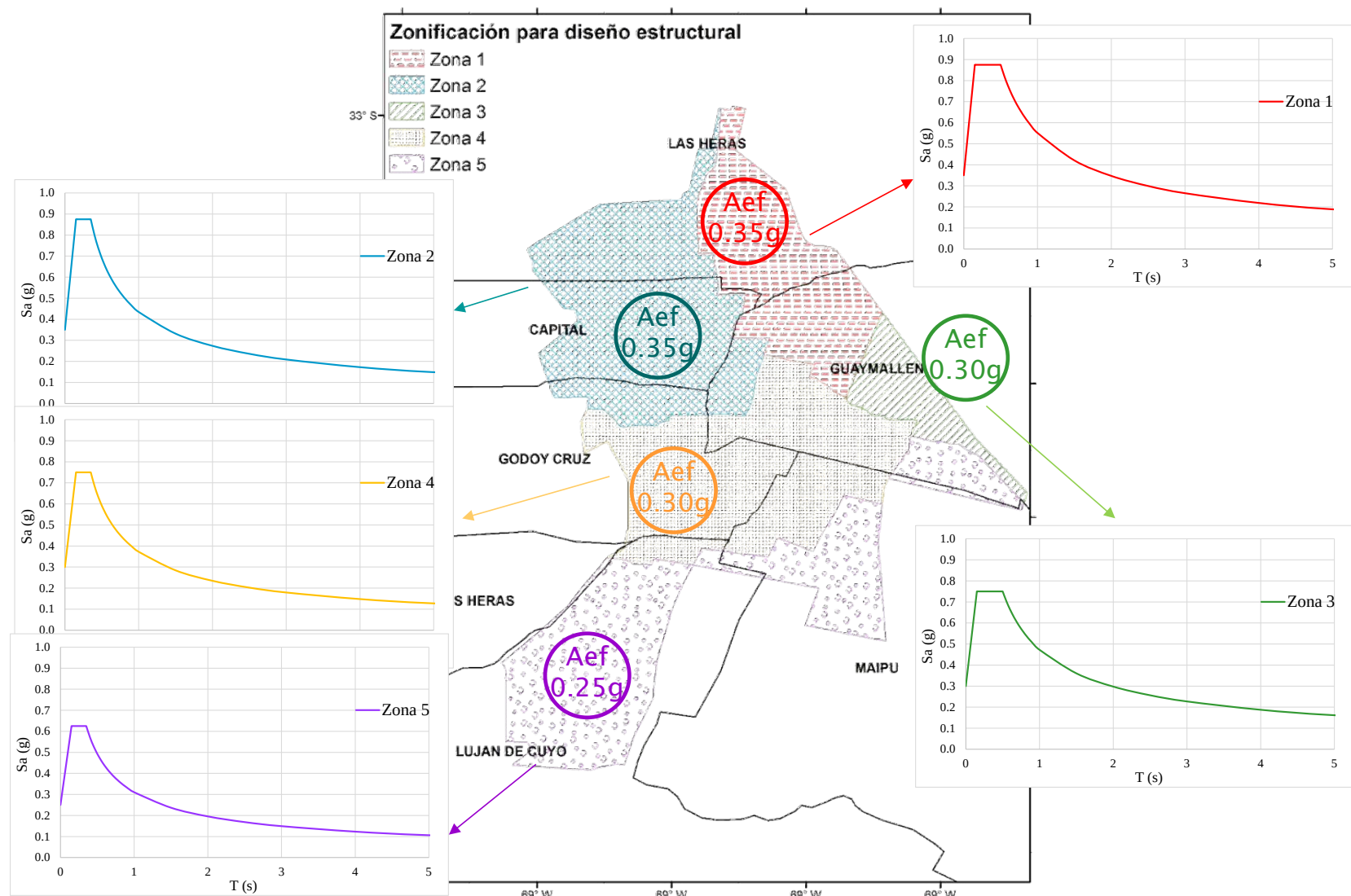


Figura 5-8. Mapa de la microzonificación sísmica resultante para La Gran Mendoza (INPRES, 1989)

Estos espectros de diseño en superficie dados por el estudio de microzonificación sísmica fueron usados entonces como insumos para generar funciones de amplificación en el formato de la plataforma CAPRA. Estas funciones de amplificación son simplemente funciones que dan factores de afectación para todo el rango espectral (diferentes periodos estructurales) que son multiplicados por nivel de aceleración en roca para así obtener el nivel real de aceleración que se sentiría en la superficie. Como se mencionó antes, esto se hace porque los depósitos de suelo pueden cambiar y afectar las ondas sísmicas lo que puede llevar a que las aceleraciones que se calcularon a nivel de roca (por el modelo nacional para Argentina) se amplifiquen o se atenúen. Para construir estas funciones se siguió el siguiente procedimiento:

(1) Dado que los espectros de diseño a nivel de superficie están dados para un periodo de retorno de 200 años (10% de excedencia en 20 años), se tomó el espectro de amenaza uniforme en roca a partir del estudio de amenaza sísmica en roca para toda la Argentina para el mismo periodo de retorno. Estos espectros se muestran graficados simultáneamente en la Figura 5-9.

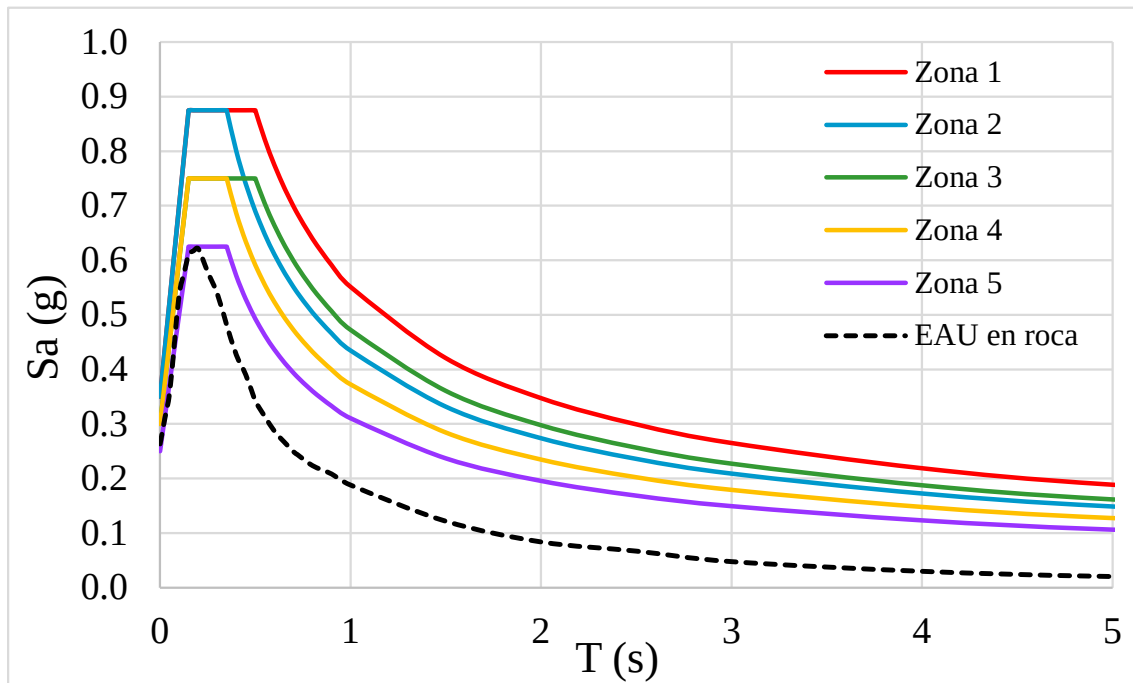


Figura 5-9. Espectros de diseño en suelo para las 5 zonas de la microzonificación y espectro de amenaza uniforme en roca

(2) Dado que las funciones de amplificación representan la razón entre la aceleración en superficie y en roca, se realizó la división aritmética entre cada espectro de diseño en superficie y el de roca, como lo muestra la siguiente ecuación:

$$FT_{zona\ i} = \frac{ED\ en\ suelo_{zona\ i}}{EAU\ en\ roca}$$

Donde FT es el valor de la función de amplificación o transferencia, ED es el espectro de diseño y EAU es el espectro de amenaza uniforme.

Tras haber realizado esta conversión, finalmente se obtuvieron cinco funciones de transferencia para cada una de las cinco zonas de la microzonificación, la cuales se muestran en la Figura 5-10. Allí también se puede apreciar que dado que la microzonificación contemplaba el área urbana de 1989, este límite fue modificado y ampliado para considerar el perímetro urbano actual. Estas funciones de transferencia son las que finalmente se le añaden a la plataforma CAPRA y se introducen como un insumo más, el cual junto con el modelo de amenaza sísmica en roca, permiten caracterizar esta amenaza de forma completa para el caso de la ciudad de Mendoza.

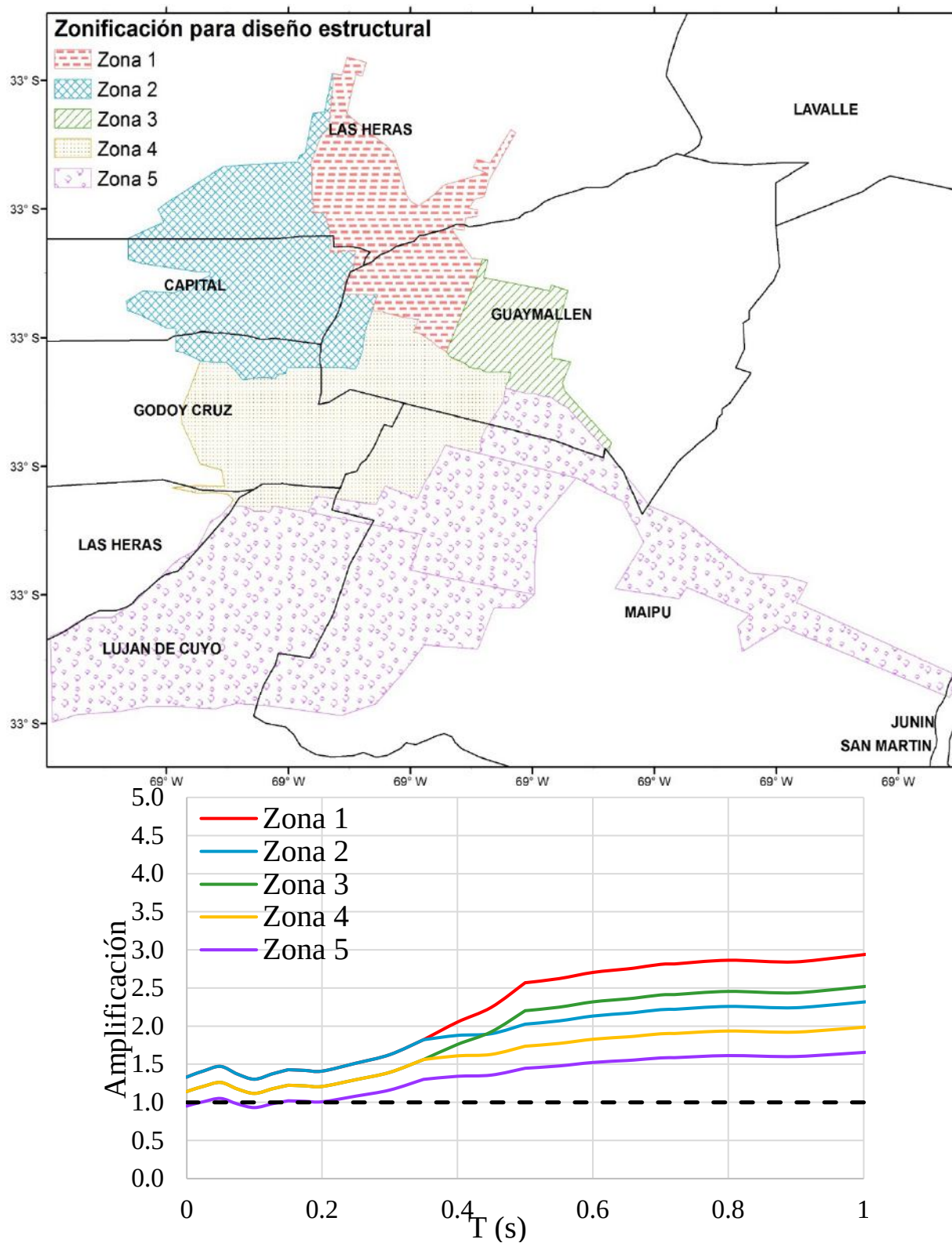


Figura 5-10. Microzonificación sísmica del Gran Mendoza (Arriba) y funciones de amplificación (abajo)

6 Resultados del análisis probabilista de riesgo en el Gran Mendoza

6.1 Introducción

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos para el Gran Mendoza tras la utilización de la metodología expuesta anteriormente. En todos los casos los resultados tienen enfoques de carácter probabilista en donde inicialmente se calcula el riesgo considerando la totalidad de los escenarios incluidos en el conjunto estocástico de terremotos.

6.2 Resultados agrupados de riesgo por sismo en el Gran Mendoza

A continuación se presentan los resultados del análisis de riesgo sísmico para el área de estudio. Los resultados se presentan en términos PAE y PML, estas últimas para diferentes períodos de retorno.

Estos resultados consideran el modelo de amenaza sísmica en roca presentado con detalle en un informe anterior así como los efectos de sitio expresados a partir de las funciones de transferencia para cada una de las diferentes zonas de suelo homogéneo identificadas en el Gran Mendoza.

El presente análisis no se realiza únicamente para un escenario sino para la totalidad de escenarios contenidos en los dos conjuntos estocásticos que han sido considerados en este proyecto. Para cada evento se calcula el valor esperado de la pérdida y este valor se pondera con la frecuencia anual de ocurrencia de cada escenario tal y como se presentó en la sección metodológica además de la asignación de la temporalidad correspondiente.

La Tabla 6-1 presenta el resumen de los resultados mientras la Figura 6-1 y la Figura 6-2 presentan la curva de excedencia de pérdidas y de PML. Por último, la Figura 6-3 presenta la probabilidad de excedencia de valores de pérdida para diferentes valores de vida útil.

Tabla 6-1
Resumen de resultados

Resultados		
Valor Expuesto	ARS\$ x10 ⁶	277,827
Pérdida anual esperada	ARS\$ x10 ⁶	1,637.917
	‰	5.895
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	ARS\$ x10 ⁶	%
100	\$37,850.00	13.62
250	\$68,839.13	24.78
500	\$95,187.36	34.26
1000	\$119,643.76	43.06

En cuanto al valor de la pérdida anual esperada, este suma aproximadamente 1,600 millones de pesos argentinos, lo que equivale al 5.9 por mil con respecto al valor total expuesto del Gran Mendoza. Este nivel alto de riesgo sísmico, expresado a través de la pérdida anual esperada relativa, se puede explicar por características propias de la amenaza sísmica, los efectos de sitio y la vulnerabilidad física de los elementos en el Gran Mendoza. En primer lugar, y tal como se presentó en el informe de amenaza sísmica, se cuenta en promedio con una aceleración cercana a 0.37g en roca para la aceleración máxima del terreno y 475 años de período de retorno. Adicionalmente, considerando las funciones de transferencia propuestas de acuerdo a las zonas homogéneas de suelo, para ordenadas espectrales mayores a 0.3 segundos existen amplificaciones de entre 1.5 y hasta 3 veces, lo que complementando con la vulnerabilidad de las edificaciones, principalmente aquellas de adobe y mampostería sin reforzamiento dan cuenta de estos resultados.

Por el lado de las PML, estos valores varían entre el 14% para un periodo de retorno de 100 años, hasta el 43% para un periodo de retorno de 1000 años.

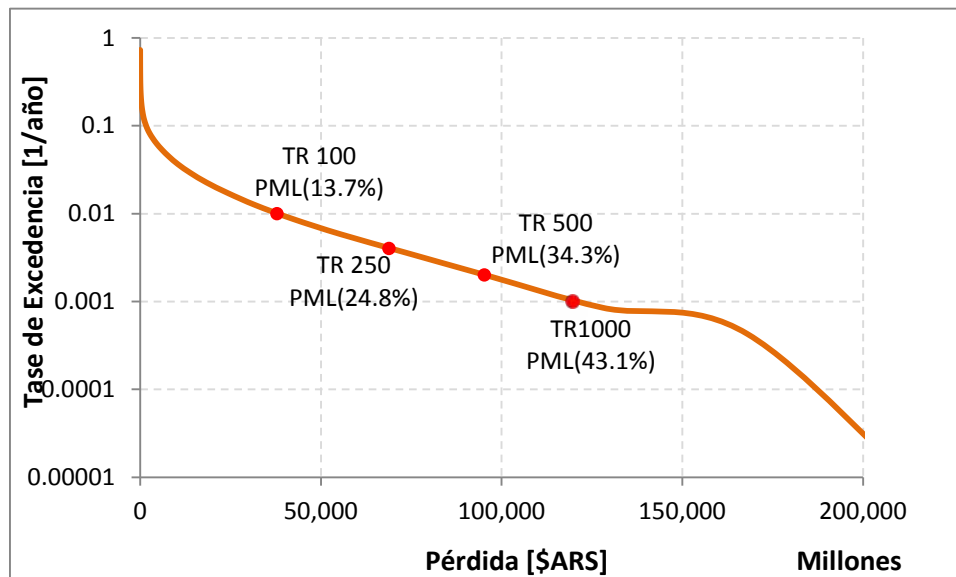


Figura 6-1
Curva de excedencia de pérdidas

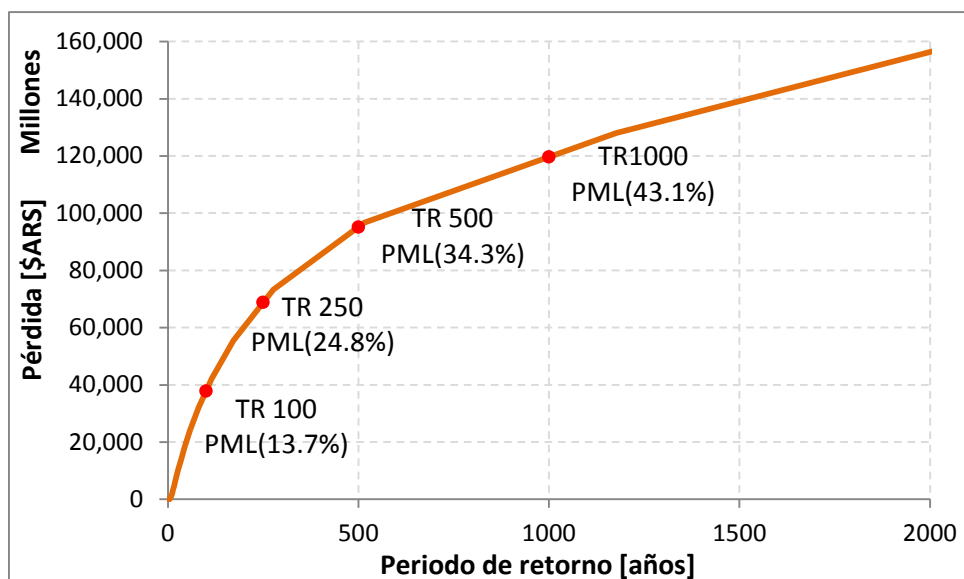


Figura 6-2
Curva de PML

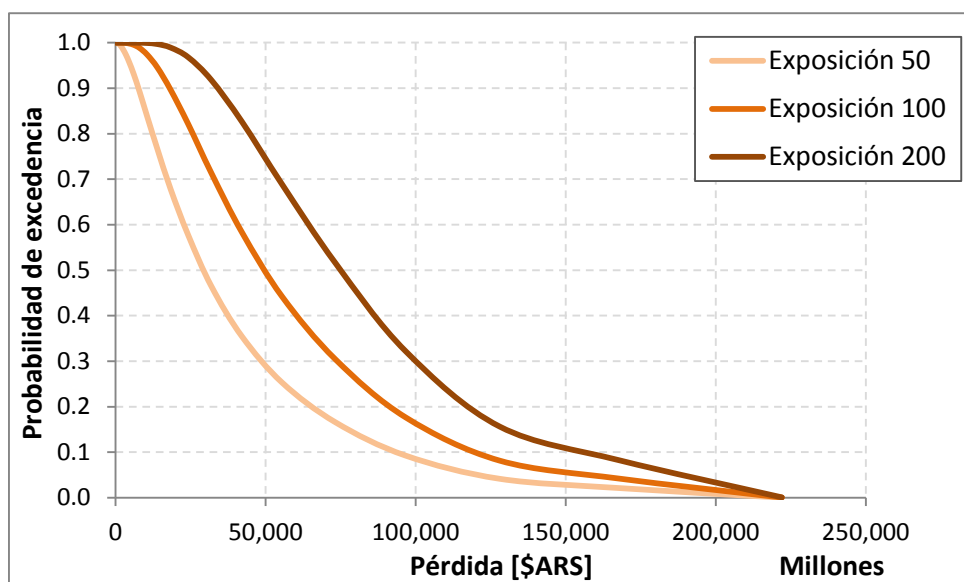


Figura 6-3
Probabilidad de excedencia para diferentes ventanas de vida útil.

Considerando que la base de datos de exposición incluye una caracterización de la misma por categorías como el departamento al que pertenecen, el uso principal de las edificaciones, altura, sistema estructural, nivel socio-económico, y si es sismorresistente o no, esto permite que los resultados de riesgo sean expresados y desagregados según estos distintos atributos. En las secciones siguientes se presenta esta desagregación de resultados, lo que permite identificar los atributos específicos o combinación de atributos que concentran el menor y el mayor riesgo.

6.3 Resultados desagregados

6.3.1 Resultados desagregados por departamento

La Tabla 6-2 presenta un resumen de los resultados mostrando únicamente las pérdidas anuales esperadas por departamento, al igual que las Figura 6-4 a Figura 6-6. De allí se puede ver que Guaymallén concentra la mayor cantidad de edificaciones tanto en cantidad como en valor expuesto (26% y 25% respectivamente); por otra parte Godoy Cruz ocupa el segundo lugar en cantidad pero Capital toma su lugar en cuanto a valor expuesto, indicando que el valor de las edificaciones en Capital es mayor que en Godoy Cruz. Lo contrario ocurre con Las Heras, en cuyo caso su participación en el valor expuesto disminuye considerablemente con respecto a su participación en cantidad. En cuanto a la pérdida esperada, Capital es el departamento con la pérdida anual esperada relativa (o prima) más alta (9.8%) lo que hace que sea el departamento con condiciones de mayor vulnerabilidad, y por lo tanto su participación en la pérdida total sea la más grande (39%). Por el contrario, Maipú es el departamento con la prima relativa más baja (2.1%) y la participación en la pérdida total más baja (3.6%).

Tabla 6-2
Resultados de riesgo sísmico por departamento

Departamento	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
Capital	70320	14.3	\$ 65,325.9	23.5	\$ 643.1	9.84	39.3
Luján	45675	9.3	\$ 29,943.2	10.8	\$ 95.9	3.20	5.9
Godoy Cruz	103996	21.2	\$ 62,273.4	22.4	\$ 340.8	5.47	20.8
Guaymallén	128095	26.1	\$ 68,863.3	24.8	\$ 350.6	5.09	21.4
Maipú	61381	12.5	\$ 28,116.8	10.1	\$ 59.7	2.12	3.6
Las Heras	81335	16.6	\$ 23,304.3	8.4	\$ 147.8	6.34	9.0
TOTAL	490,802	100.0	\$ 277,827	100.0	\$ 1,637.9	5.90	100.0

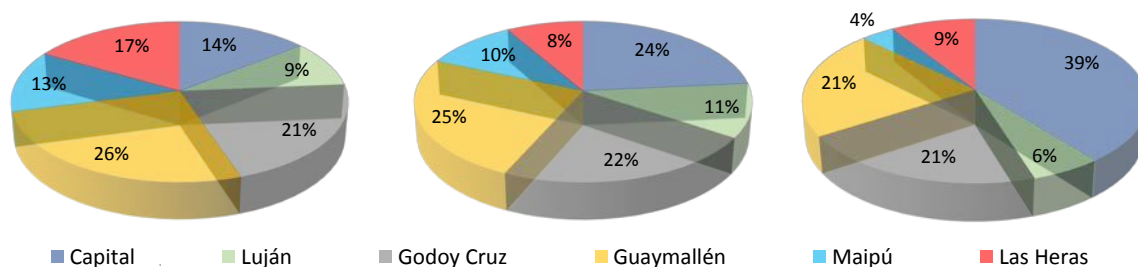


Figura 6-4
Participación del número de edificaciones (izquierda), valor expuesto (centro) y pérdida esperada (derecha)

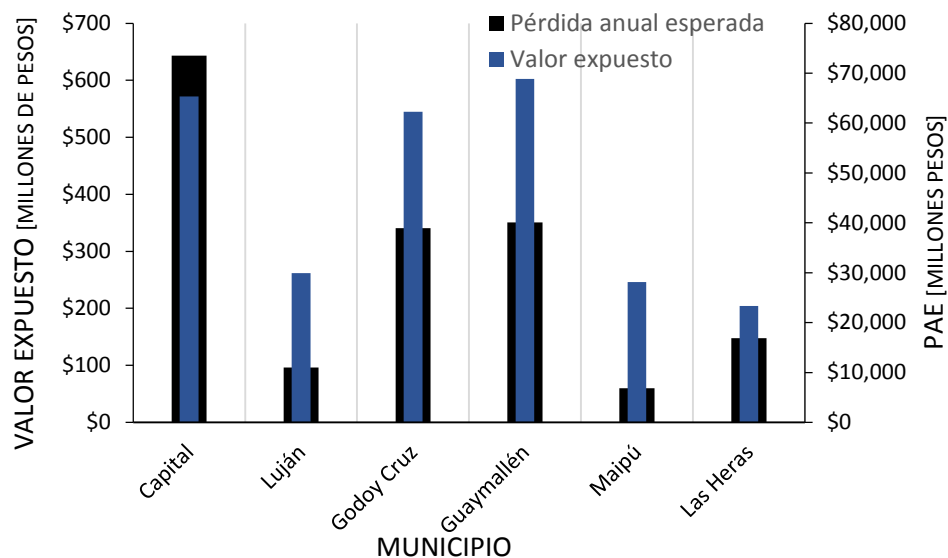


Figura 6-5
Valor expuesto y pérdida esperada por departamento

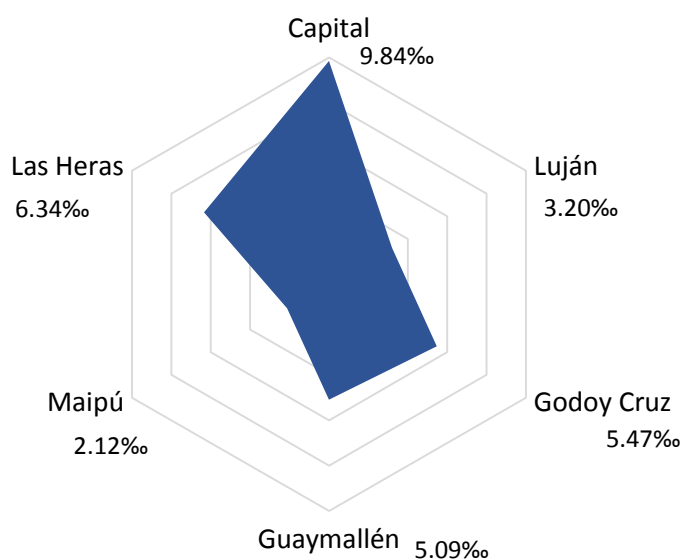


Figura 6-6
Prima por departamento

6.3.2 Resultados desagregados por sector de uso

La Tabla 6-3 presenta un resumen de los resultados mostrando únicamente las pérdidas anuales esperadas por uso, al igual que las Figura 6-7 y Figura 6-8. De allí se puede ver que el uso residencial concentra la mayor cantidad de edificaciones tanto en cantidad como en valor expuesto y en pérdida (84%, 70.3% y 70% respectivamente); esto no es sorpresa ya que como es común en las ciudades, la gran mayoría de las construcciones son de vivienda. Por otra parte el uso comercial ocupa el segundo lugar en los tres casos, aunque con porcentajes mucho menores (13%-16%), mientras que el resto de usos tienen participaciones muy bajas, siendo industrial el uso con mayor número de edificaciones, llegando a un 2% únicamente. En cuanto a pérdidas, el sector administrativo es el que se identifica como el más vulnerable al tener la prima relativa más

alta (11%), sin embargo la pérdida correspondiente sólo representa el 11% de la pérdida total, lo cual se da por la poca cantidad de edificaciones existentes de este uso. El segundo y tercer lugar del sector más vulnerable lo ocupa el sector de educación y salud respectivamente, pero nuevamente la cantidad de edificaciones es tan pequeña que la pérdida de estos sectores no representa casi nada. El uso residencial por su parte tiene una prima relativa moderada con respecto a los demás usos, y esto hace que mantenga la mayor participación en la pérdida total.

Tabla 6-3
Resultados de riesgo sísmico por departamento

Uso	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
Comercial	62325	12.7	\$ 48,882.1	17.6	\$ 259.2	5.30	15.8
Educacion	766	0.2	\$ 1,900.3	0.7	\$ 16.0	8.42	1.0
Industrial	9253	1.9	\$ 14,765.1	5.3	\$ 51.2	3.47	3.1
Administrativa	7638	1.6	\$ 16,361.5	5.9	\$ 175.0	10.69	10.7
Residencial	410759	83.7	\$ 195,396.3	70.3	\$ 1,132.9	5.80	69.2
Salud	61	0.0	\$ 521.3	0.2	\$ 3.6	6.95	0.2
TOTAL	490,802	100	\$ 277,827	100	\$ 1,637.9	5.9	100

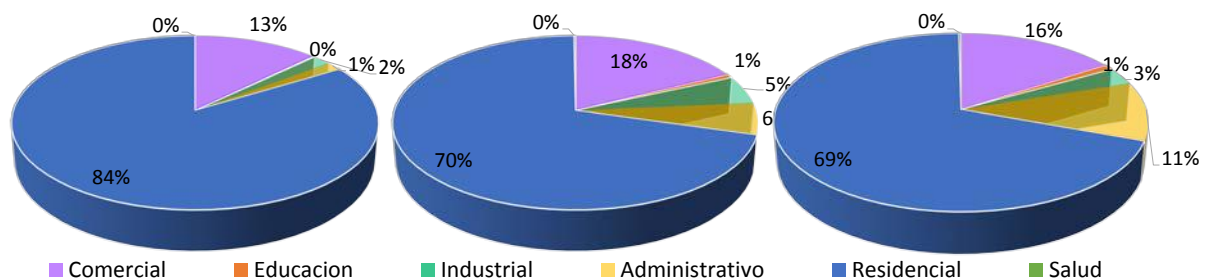


Figura 6-7
Participación del número de edificaciones (izquierda), valor expuesto (centro) y pérdida esperada (derecha)

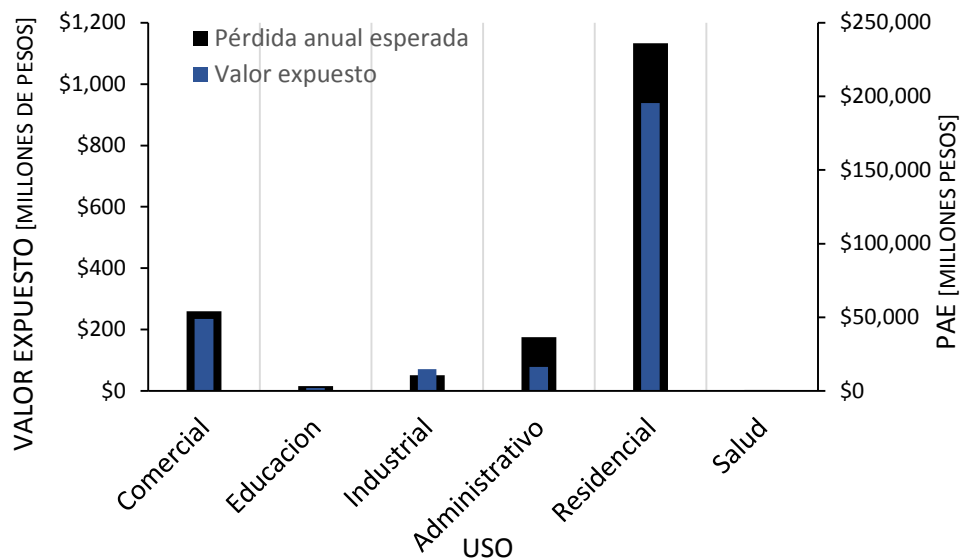


Figura 6-8
Valor expuesto y pérdida esperada por uso

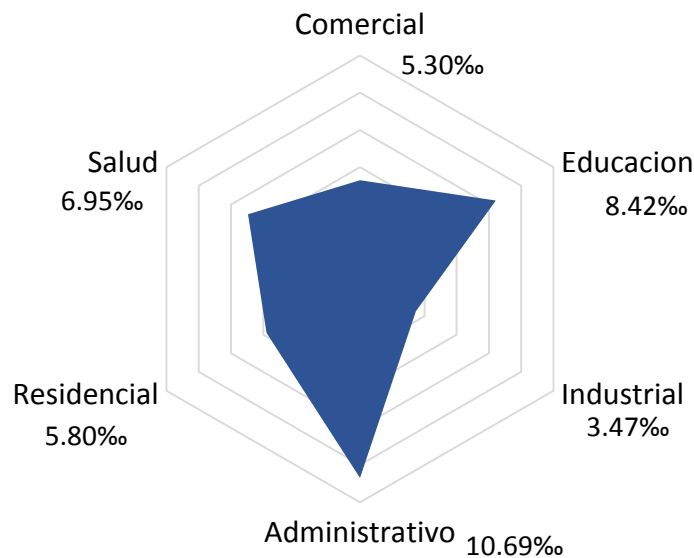


Figura 6-9
Prima por uso

6.3.3 Resultados desagregados por sistema estructural

La Tabla 6-4 muestra los resultados desagregados por sistema estructural, al igual que las Figura 6-10, Figura 6-11 y Figura 6-12. De allí se puede ver que son dos los sistemas que concentran el 80.3% de las construcciones de Mendoza, mampostería confinada y mampostería simple, mientras que los sistemas de adobe y pórticos en concreto resistentes a momento casi que completan ese 20% faltante (existen sistemas estructurales como desecho y madera que representan una minoría en las construcciones). En términos de valor expuesto estos cuatro sistemas siguen siendo los que mayor participación tienen, en casi la misma distribución, con excepción de los pórticos de concreto los cuales al tener un valor más alto que las demás construcciones, concentra un porcentaje mayor que el adobe en el valor expuesto total. En términos de la pérdida anual esperada el sistema estructural de desecho es el que tienen una mayor vulnerabilidad, como lo corrobora el valor de la prima relativa, la cual es la más alta; sin embargo, este valor alto de prima relativa no es suficiente para hacer que la pérdida de este sistema contribuya de forma importante en la pérdida total. El segundo sistema más vulnerable es el adobe, como es de esperar, ya que este sistema no se comporta de manera adecuada frente a un sismo, y cuya prima relativa es de 15.4‰ y que representa el 20.5% de la pérdida total. La mampostería simple es el siguiente sistema de peor comportamiento, con una prima relativa de 8.4‰ y la mayor participación en la pérdida total (35.7%). Los pórticos de concreto, por otra parte, también concentran gran parte de la pérdida esperada (19.5%) pero esto se debe principalmente al alto valor expuesto que representan. Por último, el sistema de madera es el menos vulnerable con la prima relativa más baja (1.9‰) y la menor participación en la pérdida total.

Tabla 6-4
Resultados de riesgo sísmico por sistema estructural

Sistema estructural	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
ADOBE	47782	9.7	\$ 21,821	7.9	\$ 335.9	15.39	20.5
MAMPOSTERÍA CONFINA	265826	54.2	\$ 126,319	45.5	\$ 343.0	2.72	20.9
MAMPOSTERÍA SIMPLE	128119	26.1	\$ 70,096	25.2	\$ 585.0	8.35	35.7
PÓRTICOS CONCRETO	36370	7.4	\$ 52,261	18.8	\$ 318.6	6.10	19.5
DESECHO	3320	0.7	\$ 1,629	0.6	\$ 44.7	27.47	2.7
MADERA	9388	1.9	\$ 5,700	2.1	\$ 10.6	1.87	0.6
TOTAL	490,805	100.0	\$ 277,827	100	\$ 1,637.9	5.90	100

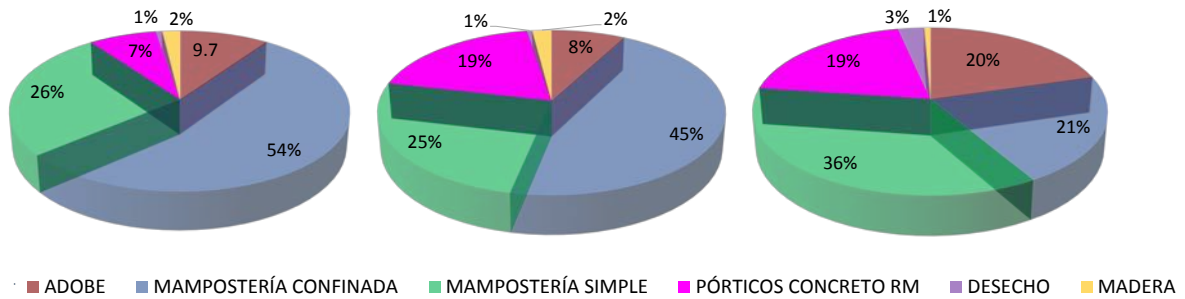


Figura 6-10
Participación del número de edificaciones (izquierda), valor expuesto (centro) y pérdida esperada (derecha)

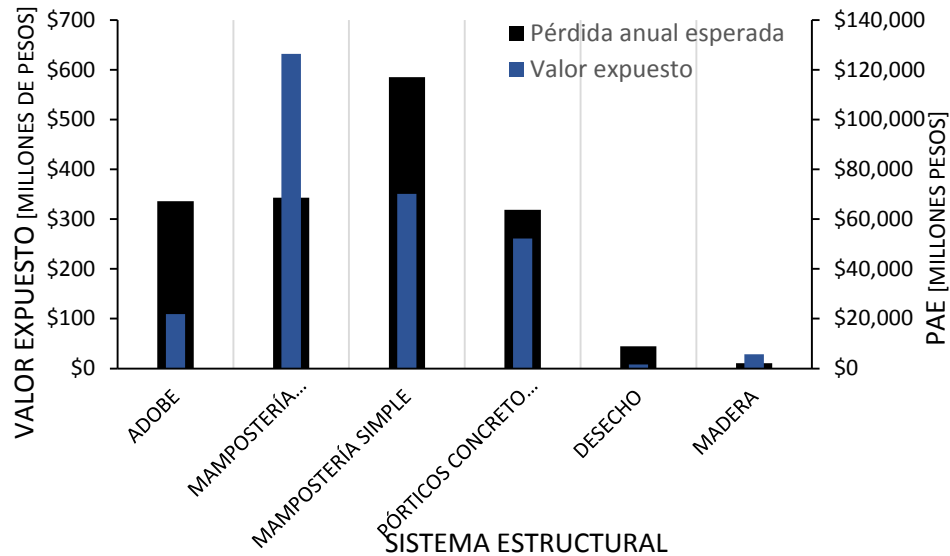


Figura 6-11
Valor expuesto y pérdida esperada por sistema estructural

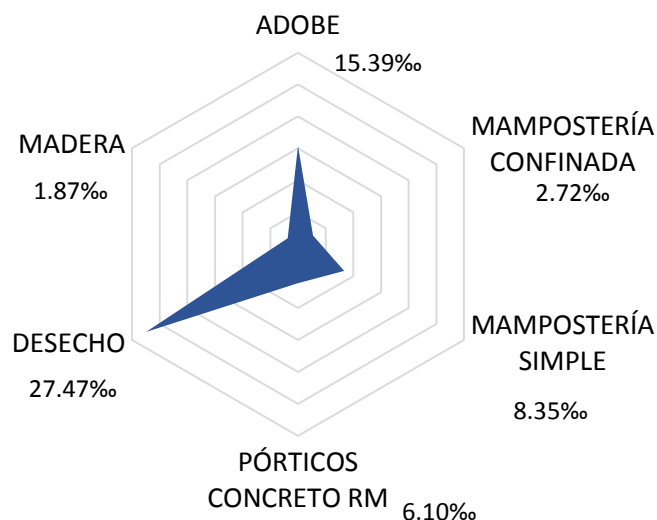


Figura 6-12
Prima por sistema estructural

6.3.4 Resultados desagregados por altura de la edificación

La Tabla 6-5 muestra los resultados desagregados por altura de la edificación, así como las Figura 6-13, Figura 6-14 y Figura 6-15. De allí se ve que casi la totalidad de las edificaciones en Mendoza son bajas, es decir, de 1 y 2 pisos; estas concentran el 98.5% de las construcciones, el 90.7% del valor expuesto y el 84.6% de la pérdida esperada. La participación en valor expuesto disminuye un poco debido a que las construcciones de mayor altura son más costosas, entonces a pesar de que hay pocas en cantidad, estas valen más. En cuanto a la pérdida, son las construcciones de mayor altura las que tienen la prima relativa más alta (14.6%), lo que hace que su participación en la pérdida total supere la participación de las edificaciones de altura media.

Tabla 6-5
Resultados de riesgo sísmico por altura de la edificación

Altura (Núm. pisos)	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
BAJA (1-2)	483410	98.5	\$ 251,947.5	90.69	\$ 1,385.6	5.50	84.59
MEDIA (3-5)	5996	1.2	\$ 15,379.6	5.54	\$ 98.7	6.42	6.03
ALTA (5+)	1399	0.3	\$ 10,499.9	3.78	\$ 153.6	14.63	9.38
TOTAL	490805	100	\$ 277,827.0	100	\$ 1,637.9	5.90	100

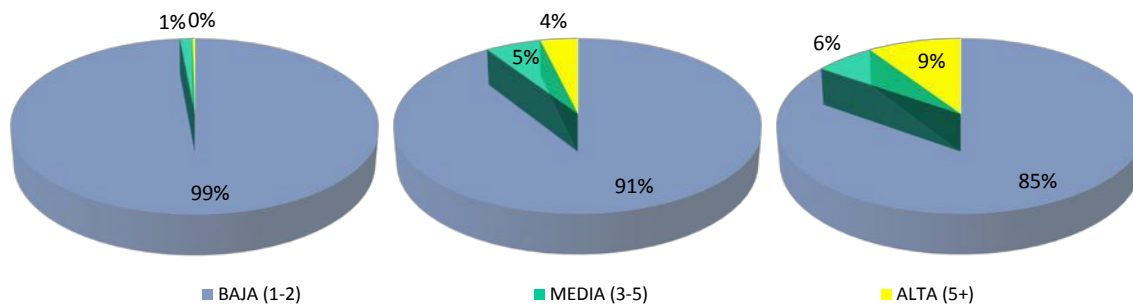


Figura 6-13
Participación del número de edificaciones (izquierda), valor expuesto (centro) y pérdida esperada (derecha)

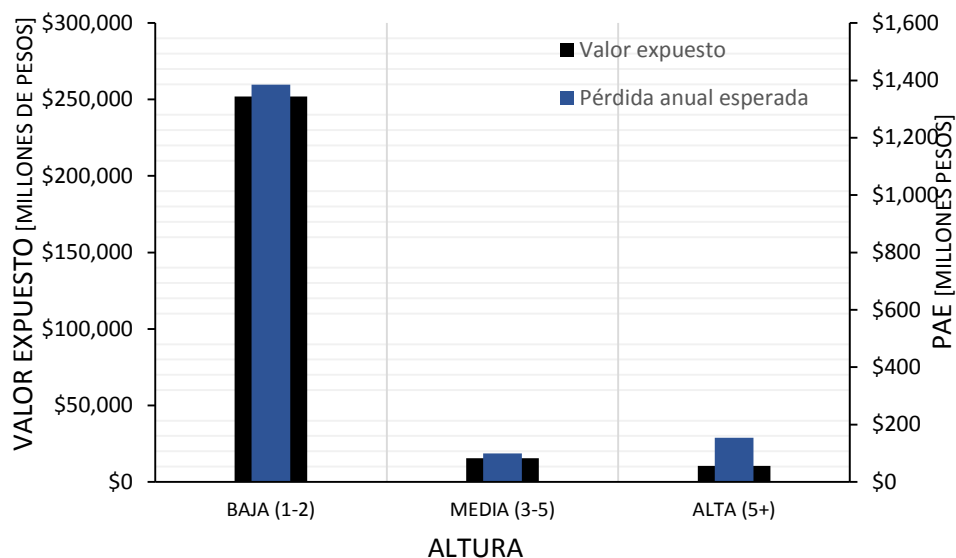


Figura 6-14
Valor expuesto y pérdida esperada por altura de la edificación

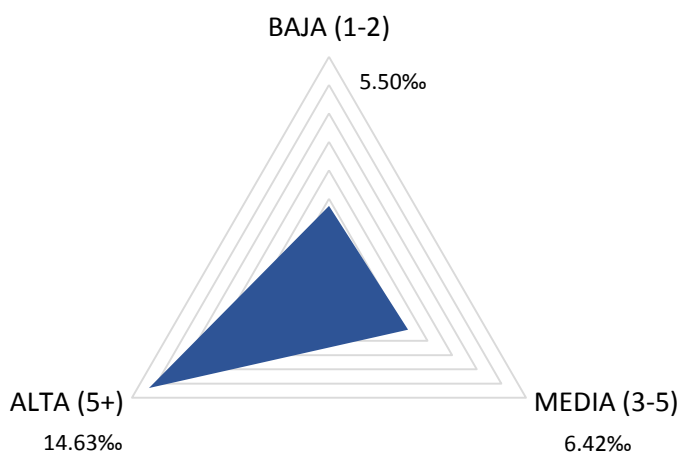


Figura 6-15
Prima por altura de la edificación

6.4 Resultados detallados por departamento

Para comenzar se presenta en esta sección un análisis de los resultados de riesgo específicos para cada departamento; para cada departamento se muestra la composición de la base de datos de exposición en términos de cuáles son los usos y sistemas estructurales que predominan, así como su comportamiento y resultados en pérdidas esperadas.

6.4.1 Resultados para el departamento Capital

Como se mencionó anteriormente, para cada departamento se analizó los resultados en términos de los usos y sistemas estructurales que conforman dicho departamento. La Tabla 6-6 presenta los resultados de las pérdidas esperadas para el departamento Capital por uso general. De allí se puede ver que el uso residencial agrupa la mayor parte de construcciones y por lo tanto también del valor expuesto (aunque en menor proporción) y la pérdida total. Por otro lado, las construcciones administrativas, que ocupan el tercer lugar en cantidad y el tercero en valor expuesto, tienen la pérdida relativa al valor expuesto (prima) más alta (10.8%), lo que lo convierte en el sector más vulnerable. El sector salud es el que tiene la prima relativa más baja (7‰), que igualmente es un valor alto, siendo aún más alto que el valor del portafolio completo de edificaciones en Mendoza (5.9‰). Cabe recordar que de los seis departamentos, Capital es el que tiene la prima relativa más alta, y es por esto que las primas relativas de todos los sectores de uso son elevadas.

Tabla 6-6
Resultados desagregado por uso principal para el departamento Capital

Uso	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [‰]	Part. Relativa [%]
ADMINISTRATIVO	7195	10.2	\$ 15,626	23.92	\$ 169.4	10.84	26.34
COMERCIAL	12565	17.9	\$ 14,140	21.65	\$ 117.7	8.32	18.30
EDUCACION	686	1.0	\$ 1,739	2.66	\$ 15.5	8.89	2.40
RESIDENCIAL	49813	70.8	\$ 33,299	50.97	\$ 336.9	10.12	52.39
SALUD	61	0.1	\$ 521	0.80	\$ 3.6	6.95	0.56
TOTAL	70320	100	\$ 65,326	100.00	\$ 643.1	9.84	100

La Tabla 6-7 muestra los resultados de las pérdidas esperadas para el departamento Capital por sistema estructural. De allí se puede ver que son cuatro los sistemas estructurales que concentran la mayoría de las edificaciones: mampostería confinada y simple, pórticos de concreto resistentes a momento y adobe. Aquí la mampostería confinada agrupa la mayor parte de construcciones, mientras que los pórticos de concreto resistentes a momento concentran la mayoría del valor expuesto, lo cual es consistente con el hecho de que las construcciones en concreto valen más que las de mampostería. Cabe resaltar el hecho que Capital es el departamento con la mayor concentración de edificaciones en pórticos de concreto (15.4%), lo que se debe principalmente a que es aquí donde se encuentra el centro administrativo y económico de la ciudad, y por lo tanto las edificaciones de mayor altura. Por otro lado, las construcciones en material de desecho tienen la prima relativa más elevada (37‰), pero al ser una cantidad baja estas sólo representan el 0.6% de la pérdida total. En cuanto a la pérdida total, los pórticos en concreto nuevamente concentran la mayoría, pero esto nuevamente se debe al alto valor de reposición, ya que la prima relativa es la tercera más baja.

Tabla 6-7
Resultados desagregados por sistema estructural en el departamento Capital

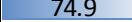
Sistema Estructural	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
ADOBE	6351	 9.0	\$ 3,854.0	 5.90	\$ 95.4	24.76	 14.84
MAMPOSTERÍA CONFINA	31708	 45.1	\$ 20,463.0	 31.32	\$ 99.1	4.84	 15.42
MAMPOSTERÍA SIMPL	19336	 27.5	\$ 14,004.1	 21.44	\$ 194.1	13.86	 30.18
PÓRTICOS CONCRETO	10848	 15.4	\$ 25,354.1	 38.81	\$ 238.6	9.41	 37.10
DESECHO	460	 0.7	\$ 325.5	 0.50	\$ 12.1	37.15	 1.88
MADERA	1617	 2.3	\$ 1,325.2	 2.03	\$ 3.8	2.87	 0.59
TOTAL	70320	100	\$ 65,326	100	\$ 643.1	9.84	100

6.4.2 Resultados para el departamento de Luján de Cuyo

El departamento de Luján de Cuyo es el departamento que menor número de edificaciones tiene (9% de las construcciones totales del Gran Mendoza), aunque no es el que menor valor expuesto tiene ni menor pérdida esperada; Luján tiene un valor expuesto superior al de Maipú y Las Heras y una prima relativa superior sólo a la de Maipú, lo que hace que su participación en la pérdida total sea la segunda más baja.

La Tabla 6-8 presenta los resultados de las pérdidas esperadas por uso para el departamento de Luján de Cuyo. Cabe notar que en Luján ya no hay construcciones administrativas como en Capital, y que aparecen construcciones industriales. De allí se puede ver que el 75% de las edificaciones son residenciales, el 21% son comerciales y tan sólo existe un 3.5% de construcciones industriales. Esta distribución se mantiene en cuanto al valor expuesto, a pesar de que las construcciones industriales tienen un valor alto por lo que su participación aumenta. En cuanto a la pérdida esperada, el sector residencial es el que nuevamente tiene la prima relativa más alta, lo que lo convierte en el sector más vulnerable.

Tabla 6-8
Resultados desagregado por uso para el departamento de Luján de Cuyo

Uso	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
COMERCIAL	9824	 21.5	\$ 6,559.3	 21.91	\$ 17.5	2.67	 18.28
EDUCACION	76	0.2	\$ 151.5	0.51	\$ 0.5	3.41	 0.54
INDUSTRIAL	1581	 3.5	\$ 2,469.8	 8.25	\$ 5.2	2.09	 5.39
RESIDENCIAL	34194	 74.9	\$ 20,762.6	 69.34	\$ 72.7	3.50	 75.79
TOTAL	45675	100.0	\$ 29,943	100.00	\$ 95.9	3.20	100.00

La Tabla 6-9 muestra los resultados por sistema estructural para el departamento de Luján de Cuyo. Las construcciones en mampostería confinada concentran el 55% de las edificaciones, seguidas de mampostería simple con el 23.4% y pórticos en concreto con el 11%; sin embargo, en cuanto a pérdidas, la mampostería simple tiene la mayor participación (40%), seguido del adobe y la mampostería confinada. En este caso el adobe tiene una prima relativa alta (10%), aunque no es la más alta (la más alta corresponde al sistema de desecho), y esto es lo que hace que la contribución a la pérdida total incremente considerablemente.

Tabla 6-9
Resultados desagregado por sistema estructural para el departamento de Luján de Cuyo

Sistema estructural	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
ADOBE	3572	 7.8	\$ 2,333.5	 7.79	\$ 23.6	10.10	 24.57
MAMPOSTERÍA CONFINA	25161	 55.1	\$ 14,684.7	 49.04	\$ 22.9	1.56	 23.86
MAMPOSTERÍA SIMPL	10678	 23.4	\$ 7,440.4	 24.85	\$ 38.0	5.10	 39.58
PÓRTICOS CONCRETO	4950	 10.8	\$ 4,569.3	 15.26	\$ 7.3	1.60	 7.60
DESECHO	262	 0.6	\$ 174.5	 0.58	\$ 3.3	19.00	 3.46
MADERA	1052	 2.3	\$ 740.7	 2.47	\$ 0.9	1.20	 0.93
TOTAL	45675	100	\$ 29,943	100	\$ 95.9	3.20	100

6.4.3 Resultados para el departamento de Godoy Cruz

El departamento de Godoy Cruz es el segundo más grande en cantidad de construcciones, sólo superado por Guaymallén, pero el valor de la prima relativa es moderada con respecto a los demás departamentos, por lo que baja al tercer lugar del departamento que más contribuye a la pérdida total.

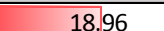
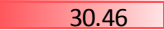
La Tabla 6-10 presenta los resultados de las pérdidas esperadas por uso. Como se puede ver, las construcciones residenciales nuevamente concentran la gran mayoría de edificaciones, esta vez de forma más pronunciada (81%), seguidas de las comerciales (17%); entre estos dos usos se concentra el 98% de las edificaciones. En Godoy Cruz nuevamente parecen edificaciones administrativas, pero en menor cantidad y proporción que en Capital. Sin embargo, en cuanto a las pérdidas, las administrativas tienen la prima relativa más alta, lo que hace que su participación en la pérdida total aumente con respecto a su participación en el valor expuesto, aunque alcanza tan sólo el 0.35%. Por otro lado, las edificaciones educativas son las que tienen la prima relativa más bajita (3‰), siendo el sector menos vulnerable. El resto de sectores tienen primas relativas ente el 3.5‰ y el 6‰, haciendo que el residencial concentre el 76% de la pérdida total, seguido del comercial con el 19%.

Tabla 6-10
Resultados desagregados por uso para el departamento de Godoy Cruz

Uso	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [‰]	Part. Relativa [%]
ADMINISTRATIVO	110	0.1	\$ 172.0	0.28	\$ 1.2	7.03	0.35
CEMENTERIO	30	0.0	\$ 77.2	0.12	\$ 0.5	5.92	0.13
COMERCIAL	17635	17.0	\$ 12,995.8	20.87	\$ 63.9	4.91	18.74
EDUCACION	4	0.0	\$ 9.9	0.02	\$ 0.0	3.01	0.01
INDUSTRIAL	1571	1.5	\$ 5,004.8	8.04	\$ 17.3	3.46	5.08
RESIDENCIAL	84646	81.4	\$ 44,013.5	70.68	\$ 257.9	5.86	75.68
TOTAL	103996	100.0	\$ 62,273	100.00	\$ 340.8	5.47	100.00

La Tabla 6-11 muestra los resultados desagregados por sistema estructural, donde se ve que el 64% de las edificaciones son de mampostería confinada, seguidas de mampostería simple con el 19%, y esta distribución se mantiene para el valor de reposición; por otro lado, las construcciones de material de desecho tienen la prima relativa más elevada (32‰), seguidas de las construcciones de adobe (18‰), y las de mampostería simple (9‰) las cuales tienen la mayor participación en la pérdida total.

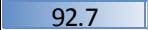
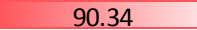
Tabla 6-11
Resultados desagregados por sistema estructural para el departamento de Godoy Cruz

Sistema estructural	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
ADOBE	6689	 6.4	\$ 3,633.5	 5.83	\$ 64.6	17.78	 18.96
MAMPOSTERÍA CONFINA	66612	 64.1	\$ 33,030.1	 53.04	\$ 103.8	3.14	 30.46
MAMPOSTERÍA SIMPL	19420	 18.7	\$ 13,788.3	 22.14	\$ 124.6	9.03	 36.55
PÓRTICOS CONCRETO	9095	 8.7	\$ 10,354.5	 16.63	\$ 36.1	3.48	 10.59
DESECHO	481	 0.5	\$ 288.3	 0.46	\$ 9.4	32.48	 2.75
MADERA	1699	 1.6	\$ 1,178.7	 1.89	\$ 2.4	2.03	 0.70
TOTAL	103996	100	\$ 62,273	100	\$ 340.8	5.47	100

6.4.4 Resultados para del departamento de Guaymallén

El departamento de Guaymallén es el más grande en cantidad de edificaciones y en valor expuesto; sin embargo, el valor de su prima relativa es superado ampliamente por Capital, razón por la cual baja al segundo lugar de los departamentos que más contribuyen a la pérdida total. La Tabla 6-12 presenta los resultados de las pérdidas esperadas por uso para el departamento de Guaymallén. De allí se ve que sólo existen tres posibles usos en este departamento: residencial, comercial e industrial. Las residenciales concentran el 93% de las edificaciones, seguido del sector comercial con el 7%; esta distribución se mantiene en el valor expuesto, a pesar de que el aporte de lo residencial disminuye un poco y lo comercial aumenta. Con respecto a la pérdida, las residenciales también cuentan con el mayor aporte (90.3%) y también tienen la prima relativa más elevada, siendo el sector más vulnerable.

Tabla 6-12
Resultados desagregado por uso para Guaymallén

Uso	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
COMERCIAL	9055	 7.1	\$ 6,858.4	 9.96	\$ 31.7	4.62	 9.04
INDUSTRIAL	317	0.2	\$ 556.5	0.81	\$ 2.2	3.90	0.62
RESIDENCIAL	118723	 92.7	\$ 61,448.3	 89.23	\$ 316.7	5.15	 90.34
TOTAL	128095	100.0	\$ 68,863	100.00	\$ 350.6	5.09	100

La Tabla 6-13 muestra los resultados desagregados por sistema estructural; de allí se puede ver que prácticamente son sólo tres sistemas los que tienen participación, mampostería confinada y simple y adobe, en donde las mamposterías se llevan la gran mayoría en cantidad (81% entre las dos) y en valor expuesto (79%). Sin embargo, no son estos sistemas los más vulnerables, como es el caso del material de desecho el cual tiene la prima relativa más alta (23.5‰), un valor considerablemente más alto que los demás sistemas, e incluso más alto que el valor del portafolio completo de Mendoza (5.9‰). Por su parte el adobe le sigue con el segundo valor de prima relativa más alta, lo que hace que su participación en la pérdida total alcance un 30% y se convierta en el segundo sistema que más contribuye a la pérdida total.

Tabla 6-13
Resultados desagregados por sistema estructural para Guaymallén

Sistema estructural	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
ADOBE	17532	13.7	\$ 7,869.5	11.43	\$ 105.2	13.37	30.00
MAMPOSTERÍA CONFINA	61265	47.8	\$ 34,416.0	49.98	\$ 70.7	2.05	20.17
MAMPOSTERÍA SIMPLE	42092	32.9	\$ 20,068.4	29.14	\$ 138.9	6.92	39.63
PÓRTICOS CONCRETO	3457	2.7	\$ 4,573.0	6.64	\$ 20.5	4.48	5.85
DESECHO	1156	0.9	\$ 513.6	0.75	\$ 13.0	25.35	3.71
MADERA	2593	2.0	\$ 1,422.7	2.07	\$ 2.2	1.58	0.64
TOTAL	128095	100	\$ 68,863	100	\$ 350.6	5.09	100

6.4.5 Resultados para el departamento de Maipú

El departamento de Maipú es el segundo más pequeño en cuanto a cantidad de edificaciones, y es el que menor condición de vulnerabilidad tiene, al tener el valor de la prima relativa más bajo, por lo que los valores de prima relativa para sus diferentes usos y sistemas estructurales son lo más bajos de Mendoza.

La Tabla 6-14 presenta los resultados de las pérdidas esperadas para cada sector de uso. Lo primero que se puede observar es que al igual que en Guaymallén, sólo existen tres usos en Maipu, residencial, comercial e industrial. Nuevamente el sector residencial representa la mayoría de construcciones, en valor expuesto y en pérdida anual esperada, pero en este caso el sector industrial tiene una participación más importante que en los demás departamentos; a pesar de que sigue siendo el sector con menor cantidad de construcciones (2.6%), estas tienen un valor alto por lo que representan el 12.5% del valor total expuesto, ya no tan lejano del valor expuesto que representa el sector comercial (16%). En cuanto a pérdidas los tres sectores tienen primas relativas bastante cercanas, todas alrededor del 2%, lo cual indica un nivel de vulnerabilidad relativamente uniforme entre los sectores, aunque la prima relativa del comercial es levemente más baja lo que hace que la participación en la pérdida total sea casi igual al del industrial.

Tabla 6-14
Resultados desagregados por uso para Maipú

Uso	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
COMERCIAL	6660	10.9	\$ 4,530.4	16.11	\$ 7.6	1.68	12.75
INDUSTRIAL	1580	2.6	\$ 3,500.5	12.45	\$ 7.3	2.08	12.20
RESIDENCIAL	53141	86.6	\$ 20,085.9	71.44	\$ 44.8	2.23	75.05
TOTAL	61381	100.0	\$ 28,117	100	\$ 59.7	2.12	100

La Tabla 6-15 muestra los resultados desagregados por sistema estructural; al igual que la mayoría de departamentos las construcciones en mampostería confinada y simple y en adobe representan casi la totalidad. La mampostería confinada representa poco más del 50% de las edificaciones y el 44% del valor expuesto total, mientras que la mampostería simple y el adobe mantienen sus porcentajes casi iguales (30% y 9% respectivamente) en cantidad y en valor. En el caso de los pórticos de concreto su participación en el valor expuesto aumenta bastante (pasa del 5% en cantidad al 13.5% en valor) dado que vale más que las demás construcciones. Las

construcciones en material de desecho nuevamente tienen la mayor vulnerabilidad, expresada a través del valor de su prima relativa del 15%, a pesar de que sólo logra representar el 5% de la pérdida total, dado que representa sólo el 0.8% de las construcciones. La mampostería simple en este caso tiene una prima relativa mucho más alta que la mampostería confinada (que de hecho es la tercera más alta), por lo que se convierte en el sistema que más contribuye a la pérdida total con el 44.6%. El adobe, por su parte, es el segundo sistema más vulnerable al tener la segunda prima relativa más alta (6.5%), lo que de una forma similar a la mampostería confinada, hace que se convierta en el segundo sistema que más contribuye a la pérdida total.

Tabla 6-15
Resultados desagregados por sistema estructural para Maipú

Sistema estructural	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
ADOBE	6651	10.8	\$ 2,475.6	8.80	\$ 16.2	6.54	27.11
MAMPOSTERÍA CONFINA	32490	52.9	\$ 12,510.7	44.50	\$ 9.4	0.75	15.72
MAMPOSTERÍA SIMPLE	17354	28.3	\$ 8,498.6	30.23	\$ 26.6	3.13	44.55
PÓRTICOS CONCRETO	3190	5.2	\$ 3,796.7	13.50	\$ 4.1	1.07	6.83
DESECHO	475	0.8	\$ 208.4	0.74	\$ 3.0	14.49	5.05
MADERA	1221	2.0	\$ 626.9	2.23	\$ 0.4	0.70	0.74
TOTAL	61381	100	\$ 28,117	100	\$ 59.7	2.12	100

6.4.6 Resultados para el departamento de Las Heras

Finalmente, los resultados para el departamento de Las Heras se presentan en la Tabla 6-16 la cual muestra los resultados para cada sector. En este caso Las Heras cuenta con más sectores de uso incluyendo el sector administrativo y un cementerio, aunque estos dos representan la minoría (entre los dos representan el 0.4% de las construcciones). El sector es nuevamente el que tiene la mayor participación en número, valor expuesto y pérdida anual esperada (86%, 68% y 70% respectivamente). El sector comercial ocupa el segundo lugar en los tres casos, y el industrial el tercer lugar en los tres casos. Esta distribución se mantiene dado que los valores de las primas relativas de estos tres sistemas son parecidos (alrededor de 6%); por otro lado, el sector administrativo tiene la prima relativa más alta (9%), seguida del cementerio, lo que hace que su participación en la pérdida total incremente ligeramente aunque sólo logra llegar a un 1.3% de la pérdida total.

Tabla 6-16
Resultados desagregados por uso en Las Heras

Uso	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
ADMINISTRATIVO	204	0.3	\$ 215.5	0.92	\$ 1.9	9.03	1.32
CEMENTERIO	99	0.1	\$ 270.6	1.16	\$ 2.0	7.24	1.33
COMERCIAL	6586	8.1	\$ 3,797.8	16.30	\$ 20.8	5.48	14.08
INDUSTRIAL	4204	5.2	\$ 3,233.6	13.88	\$ 19.3	5.97	13.06
RESIDENCIAL	70242	86.4	\$ 15,786.8	67.74	\$ 103.8	6.57	70.22
TOTAL	81335	100.0	\$ 23,304.3	100	\$ 147.8	6.34	100

La Tabla 6-17 muestra los resultados desagregados por sistema estructural. Aquí nuevamente son tres los sistemas que predominan (mampostería confinada y simple y adobe), aunque los pórticos de concreto aumentan su presencia llegando a concentrar el 6% de las construcciones, el 16% del valor expuesto y el 8% del valor esperado de pérdida. Como sucede para todo el Gran Mendoza, las construcciones de desecho son las más vulnerables con la prima relativa más alta, y en segundo lugar son las de adobe, que en este caso llegan a representar el 21% de la pérdida total. Adicionalmente, la mampostería simple tiene la tercera prima relativa más alta (10%), lo que hace que sea el sistema que más aporta a la pérdida total. Las construcciones de madera tienen la condición de menor vulnerabilidad reflejada por tener la prima relativa más baja (2%).

Tabla 6-17
Resultados desagregados por sistema estructural en Las Heras

Sistema estructural	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
ADOBE	6987	8.6	\$ 1,655.1	7.10	\$ 30.9	18.70	20.94
MAMPOSTERÍA CONFINA	48589	59.7	\$ 11,214.8	48.12	\$ 37.1	3.31	25.11
MAMPOSTERÍA SIMPLE	19237	23.7	\$ 6,296.2	27.02	\$ 62.8	9.98	42.52
PÓRTICOS CONCRETO	4830	5.9	\$ 3,613.1	15.50	\$ 12.1	3.34	8.18
DESECHO	486	0.6	\$ 119.0	0.51	\$ 3.9	33.11	2.67
MADERA	1206	1.5	\$ 406.1	1.74	\$ 0.9	2.13	0.59
TOTAL	81335	100	\$ 23,304.3	100	\$ 147.8	6.34	100

6.5 Resultados detallados por sector de uso

En esta sección se presenta un análisis de los resultados de riesgo específicos para cada sector de uso; para cada sector se muestra la composición de la base de datos de exposición en términos de cuáles son los departamentos en los que están y los sistemas estructurales que predominan, así como su comportamiento y resultados en pérdidas esperadas.

A continuación se presentan los resultados individuales por sector de uso.

6.5.1 Resultados para el sector de uso residencial

Como se discutió anteriormente, el uso residencial es el que predomina con creces en Mendoza, concentrando la mayoría en cantidad, valor expuesto y pérdida del portafolio.

La Tabla 6-18 presentan los resultados de las pérdidas esperadas para cada departamento. Para empezar se puede ver que la mayor cantidad de edificaciones residenciales se encuentra en el departamento de Guaymallén y la menor cantidad en Luján de Cuyo. En cuanto a pérdidas, Capital nuevamente es el departamento en mayor condición de vulnerabilidad con el valor de prima relativa más alto (y la mayor parte de las pérdidas totales), seguido de Las Heras y Godoy Cruz. Por otro lado, a pesar de que el valor de prima relativa de Guaymallén no sea tan alto, por la gran cantidad de edificaciones el valor absoluto de la pérdida representa el 29% de la pérdida total.

Tabla 6-18
Resultados desagregado por departamento para el uso residencial

Departamento	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
CAPITAL	49813	12.1	\$ 33,299	17.04	\$ 336.9	10.12	29.74
GODOY CRUZ	84646	20.6	\$ 44,014	22.53	\$ 257.9	5.86	22.77
GUAYMALLEN	118723	28.9	\$ 61,448	31.45	\$ 316.7	5.15	27.96
LAS HERAS	70242	17.1	\$ 15,787	8.08	\$ 103.8	6.57	9.16
LUJAN	34194	8.3	\$ 20,763	10.63	\$ 72.7	3.50	6.42
MAIPU	53141	12.9	\$ 20,086	10.28	\$ 44.8	2.23	3.96
TOTAL	410759	100	\$ 195,396	100	\$ 1,132.9	5.80	100

La Tabla 6-19 muestra los resultados por sistema estructural; como se puede ver, el 61% de las construcciones residenciales son en mampostería confinada, y casi que todo lo restante en mampostería simple (26%) con una pequeña presencia de adobe (12%). Esta distribución tiene sentido ya que las construcciones residenciales en Mendoza tienden a ser viviendas unifamiliares de 1 o 2 pisos, y en pocos casos viviendas multifamiliares de poca altura. Se notan algunas edificaciones en pórticos de concreto las cuales corresponden a edificios de vivienda de mayor altura, y otras más en materiales de desecho y madera. Son precisamente estas edificaciones de desecho las que son más vulnerables (tienen la prima relativa más alta), pero que por ser pocas la pérdida absoluta no representa mucho. Las viviendas de madera, por otro lado, son las menos vulnerables, y al tener una prima relativa tan baja la pérdida en términos absolutos no llega a representar el 0.4% de la pérdida total. Las viviendas de mampostería simple, mampostería confinada y adobe son las que más aportan a la pérdida total, en el caso de mampostería simple por tener un gran número de construcciones y una prima relativa moderada a alta, en el caso del adobe por tener la segunda prima relativa más alta, y en el caso de la mampostería confinada por la gran cantidad de edificaciones, ya que tiene el segundo valor más bajo de prima relativa.

Tabla 6-19
Resultados desagregados por sistema estructural para el uso residencial

Sistema estructural	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
ADOBE	47590	11.6	\$ 21,613.5	11.06	\$ 329.9	15.27	29.12
MAMPOSTERÍA CONFI	249417	60.7	\$ 114,195.4	58.44	\$ 304.5	2.67	26.88
MAMPOSTERÍA SIMPL	102806	25.0	\$ 46,909.5	24.01	\$ 380.7	8.12	33.60
PÓRTICOS CONCRETO	3101	0.8	\$ 9,066.7	4.64	\$ 75.6	8.34	6.67
DESECHO	3049	0.7	\$ 1,383.2	0.71	\$ 38.2	27.63	3.37
MADERA	4799	1.2	\$ 2,228.3	1.14	\$ 4.0	1.77	0.35
TOTAL	410762	100	\$ 195,396.6	100	\$ 1,132.9	5.80	100

6.5.2 Resultados para el sector de uso comercial

El uso comercial es el segundo uso de mayor importancia en Mendoza, y tiene una vulnerabilidad relativamente baja con respecto a los demás usos.

La Tabla 6-20 presenta los resultados de las pérdidas esperadas para cada departamento. A diferencia del sector residencial, el departamento con mayor presencia de edificaciones comerciales es Godoy Cruz, seguido de Capital. Las edificaciones comerciales de Capital tienen la prima relativa más alta, lo que las hace las más vulnerables, y son también las que concentran

la mayor parte de la pérdida total. Por el contrario, las edificaciones comerciales en Maipú son las menos vulnerables ya que tienen la prima relativa más baja y la menor participación en la pérdida total.

Tabla 6-20
Resultados desagregado por departamento para el sector de uso comercial

Departamento	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
CAPITAL	12565	20.2	\$ 14,140.4	28.93	\$ 117.7	8.32	45.40
GODOY CRUZ	17635	28.3	\$ 12,995.8	26.59	\$ 63.9	4.91	24.64
GUAYMALLEN	9055	14.5	\$ 6,858.4	14.03	\$ 31.7	4.62	12.23
LAS HERAS	6586	10.6	\$ 3,797.8	7.77	\$ 20.8	5.48	8.03
LUJAN	9824	15.8	\$ 6,559.3	13.42	\$ 17.5	2.67	6.76
MAIPU	6660	10.7	\$ 4,530.4	9.27	\$ 7.6	1.68	2.94
TOTAL	62325	100.0	\$ 48,882.1	100	\$ 259.2	5.30	100

La Tabla 6-21 muestra los resultados desagregados por sistema estructural; como se puede ver, en el caso de las construcciones comerciales la mayoría (38%) son en pórticos de concreto resistentes a momento, lo cual es consistente con el hecho que las construcciones comerciales tienden a ser edificios de mayor altura que requieren de este tipo de sistema estructural. Claramente también se tiene una cantidad importante en mampostería, en cuyo caso corresponde a los comercios de menor escala que suelen ser de menor altura. Las pocas construcciones en desecho cuentan con la prima relativa más alta, mientras que las de madera, que representan tan sólo el 7.4% de las construcciones, tienen la prima relativa más baja. Dado que la prima relativa de las construcciones en mampostería simple es la segunda más alta, estas concentran el 50% de la pérdida total, mientras que las de pórticos de concreto tienen una prima moderada y una concentración del 34% de la pérdida total.

Tabla 6-21
Resultados desagregados por sistema estructural para el sector de uso comercial

Sistema estructural	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
MAMPOSTERÍA CONF	14717	23.6	\$ 10,347	21.17	\$ 29.2	2.82	11.26
MAMPOSTERÍA SIMPL	19039	30.5	\$ 14,239	29.13	\$ 129.4	9.09	49.93
PÓRTICOS CONCRETO	23709	38.0	\$ 20,577	42.10	\$ 87.4	4.25	33.71
DESECHO	271	0.4	\$ 246	0.50	\$ 6.5	26.53	2.52
MADERA	4589	7.4	\$ 3,472	7.10	\$ 6.7	1.93	2.58
TOTAL	62325	100	\$ 48,882	100	\$ 259	5.30	100

6.5.3 Resultados para el sector de uso industrial

El uso industrial es el tercer sector con mayor número de edificaciones, aunque representa tan sólo el 1.9% del total de las construcciones y el 5.3% del valor expuesto, y es el sector menos vulnerable con la prima relativa más baja (3.5‰). La Tabla 6-22 muestra los resultados para las construcciones industriales según el departamento. Lo primero que se observa es que no hay construcciones industriales en el departamento Capital, mientras que la mayoría de construcciones industriales se encuentran en Las Heras (Maipú, Luján y Godoy aproximadamente la misma cantidad de construcciones). En este caso Las Heras también cuenta con la prima

relativa más alta (6‰), siendo las construcciones más vulnerables, y con la mayor participación en la pérdida total. En el caso de Godoy Cruz, las edificaciones en este departamento tienen el mayor valor expuesto, lo que causa que la pérdida absoluta sea la segunda más grande. Algo similar ocurre en Maipú, donde el valor expuesto es mayor en proporción a la cantidad de construcciones, por lo que la pérdida absoluta representa un considerable pedazo.

Tabla 6-22
Resultados desagregados por departamento para el uso industrial

Departamento	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
CAPITAL	0	0.0	\$ -	0.00	\$ -	0.00	0.00
GODOY CRUZ	1571	17.0	\$ 5,004.8	33.90	\$ 17.3	3.46	33.80
GUAYMALLEN	317	3.4	\$ 556.5	3.77	\$ 2.2	3.90	4.24
LAS HERAS	4204	45.4	\$ 3,233.6	21.90	\$ 19.3	5.97	37.65
LUJAN	1581	17.1	\$ 2,469.8	16.73	\$ 5.2	2.09	10.09
MAIPU	1580	17.1	\$ 3,500.5	23.71	\$ 7.3	2.08	14.22
TOTAL	9253	100.0	\$ 14,765.1	100	\$ 51.2	3.47	100

La Tabla 6-23 muestra los resultados desagregados por sistema estructural; lo primero que se observa es que las construcciones industriales únicamente tienen dos sistemas estructurales, mampostería simple y pórticos de concreto resistentes a momento. De estos dos sistemas los pórticos representan el 55% de las construcciones, el 57% del valor expuesto, y tan sólo el 27% de la pérdida total; este cambio en la distribución de pérdidas se da porque el valor de la prima relativa de la mampostería simple es mucho mayor al de los pórticos, es decir, que la mampostería es mucho más vulnerable.

Tabla 6-23
Resultados desagregados por sistema estructural para el uso industrial

Sistema estructural	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
MAMPOSTERÍA SIMPLE	4185	45.2	\$ 6,374	43.17	\$ 37.3	5.85	72.80
PÓRTICOS CONCRETO	5068	54.8	\$ 8,391	56.83	\$ 13.9	1.66	27.20
TOTAL	9253	100	\$ 14,765	100	\$ 51	3.47	100

6.5.4 Resultados para el sector administrativo

El sector administrativo es el sector más vulnerable, al tener el valor de prima relativa más alto (11‰); en este caso en el sector administrativo se han incluido las construcciones que tenían como sub-uso de cementerio. La Tabla 6-24 muestra los resultados desagregados por departamento; las construcciones administrativas se concentran únicamente en tres departamentos, Capital, Godoy Cruz y Las Heras, en donde Capital concentra el 94% de las construcciones administrativas, el 97.6% del valor expuesto y el 98% de la pérdida total. Las construcciones en Capital también tienen la prima relativa más alta.

Tabla 6-24

Resultados desagregado por departamento para el sector de uso administrativo

Departamento	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
CAPITAL	7195	94.2	\$ 15,626.1	97.58	\$ 169.4	10.84	98.17
GODOY CRUZ	140	1.8	\$ 172.0	1.07	\$ 1.2	7.03	0.70
GUAYMALLEN	0	0.0	\$ -	0.00	\$ -	0.00	0.00
LAS HERAS	303	4.0	\$ 215.5	1.35	\$ 1.9	9.03	1.13
LUJAN	0	0.0	\$ -	0.00	\$ -	0.00	0.00
MAIPU	0	0.0	\$ -	0.00	\$ -	0.00	0.00
TOTAL	7638	100.0	\$ 16,013.6	100.00	\$ 172.6	10.78	100.00

La Tabla 6-25 muestra los resultados desagregados por sistema estructural; en este caso el 53% de las construcciones comerciales son pórticos en concreto resistentes a momento, las cuales representan el 76.5% del valor expuesto y el 74.6% de la pérdida total. A pesar de concentrar la mayoría de la pérdida total, son las construcciones en adobe las que tienen la prima relativa más alta, seguidas de las construcciones en mampostería simple, las cuales a su vez son el segundo sistema que mayor participación tiene en la pérdida total.

Tabla 6-25

Resultados desagregados por sistema estructural para el sector de uso administrativo

Sistema estructural	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
ADOBE	192	2.5	\$ 207.8	1.30	\$ 6.0	28.91	3.48
MAMPOSTERÍA CONFI	1612	21.1	\$ 1,625.2	10.15	\$ 8.6	5.31	5.00
MAMPOSTERÍA SIMPL	1778	23.3	\$ 1,928.3	12.04	\$ 29.1	15.08	16.85
PÓRTICOS CONCRETO	4056	53.1	\$ 12,252.3	76.51	\$ 128.9	10.52	74.67
TOTAL	7638	100	\$ 16,013.6	100	\$ 172.6	10.78	100

6.5.5 Resultados para el sector de educación

El sector de educación representa una minoría en cuanto a cantidad, valor expuesto y pérdida esperada, el cual solo concentra el 0.2%, 0.7% y 1% respectivamente. La Tabla 6-26 muestra los resultados de las edificaciones de educación por departamento; de allí se ve que únicamente hay presencia de construcciones educativas en los departamentos Capital, Godoy Cruz y Luján de Cuyo, con el 90% de estas construcciones en Capital. De forma similar, el 91.5% del valor expuesto y el 96.6% de la pérdida total corresponde a Capital, cuya prima relativa también es la más alta (8.9%).

Tabla 6-26

Resultados desagregados por departamento para el sector de uso de educación

Departamento	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
CAPITAL	686	89.6	\$ 1,738.9	91.50	\$ 15.5	8.89	96.59
GODOY CRUZ	4	0.5	\$ 9.9	0.52	\$ 0.0	3.01	0.19
GUAYMALLEN	0	0.0	\$ -	0.00	\$ -	0.00	0.00
LAS HERAS	0	0.0	\$ -	0.00	\$ -	0.00	0.00
LUJAN	76	9.9	\$ 151.5	7.97	\$ 0.5	3.41	3.23
MAIPU	0	0.0	\$ -	0.00	\$ -	0.00	0.00
TOTAL	766	100.0	\$ 1,900.3	100	\$ 16.0	8.42	100

La Tabla 6-27 muestra los resultados desagregados por sistema estructural; en este caso únicamente existen tres posibles sistemas estructurales, mampostería confinada y simple y pórticos de concreto resistentes a momento. La mayoría de edificaciones son pórticos de concreto (51%), los cuales también acumulan la mayoría del valor expuesto (66.6%) y de la pérdida esperada aunque en menor proporción (53%). Las construcciones de mampostería simple son las que tienen la prima relativa más alta, y esto es lo que hace que llegue a acumular el 43% de la pérdida total.

Tabla 6-27

Resultados desagregados por sistema estructural para el sector de uso de educación

Sistema estructural	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
MAMPOSTERÍA CONFINA	80	10.4	\$ 103.8	5.46	\$ 0.6	5.74	3.72
MAMPOSTERÍA SIMPLE	294	38.4	\$ 529.9	27.89	\$ 6.9	13.03	43.16
PÓRTICOS CONCRETO	392	51.2	\$ 1,266.6	66.65	\$ 8.5	6.71	53.12
TOTAL	766	100	\$ 1,900.3	100	\$ 16.0	8.42	100

6.5.6 Resultados para el sector de uso de salud

El sector de salud es el sector con el menor número de edificaciones, como también con el menor valor expuesto y menor pérdida absoluta. La Tabla 6-28 muestra los resultados desagregados por departamento, donde se puede ver que únicamente se tienen construcciones de salud en Capital, cuyo valor de prima relativa es alto si se compara con el valor de portafolio completo de Mendoza (5.9%).

Tabla 6-28
Resultados desagregados por departamento para el sector de uso de salud

Departamento	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
CAPITAL	61	100.0	\$ 521.3	100.00	\$ 3.6	6.95	100.00
GODOY CRUZ	0	0.0	\$ -	0.00	\$ -	0.00	0.00
GUAYMALLEN	0	0.0	\$ -	0.00	\$ -	0.00	0.00
LAS HERAS	0	0.0	\$ -	0.00	\$ -	0.00	0.00
LUJAN	0	0.0	\$ -	0.00	\$ -	0.00	0.00
MAIPU	0	0.0	\$ -	0.00	\$ -	0.00	0.00
TOTAL	61	100.0	\$ 521.3	100.00	\$ 3.6	6.95	100.00

La Tabla 6-29 muestra los resultados desagregados por sistema estructural donde se puede ver que únicamente hay dos posibilidades de sistema estructural, mampostería confinada y pórticos de concreto resistentes a momento, cuya distribución es 28% - 72% respectivamente. En cuanto al valor expuesto esta distribución es más marcada (5% - 95%), y en cuanto a la pérdida también (10% - 90%) a pesar de que la prima relativa de la mampostería es más alta.

Tabla 6-29
Resultados desagregados por sistema estructural para el sector de uso de salud

Sistema estructural	Número de edificaciones		Valor expuesto		Pérdida anual esperada		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	[pesos x10 ⁶]	Prima [%]	Part. Relativa [%]
MAMPOSTERÍA SIMPLE	17	27.9	\$ 22.2	4.25	\$ 0.4	16.11	9.86
PÓRTICOS CONCRETO	44	72.1	\$ 499.2	95.75	\$ 3.3	6.54	90.14
TOTAL	61	100	\$ 521.3	100	\$ 3.6	6.95	100

6.6 Mapas de riesgo

Para finalizar, los resultados de riesgo se han expresado en mapas que ilustran la distribución espacial de pérdidas. La Figura 6-16 y la Figura 6-17 presentan los mapas de riesgo sísmico en función de la pérdida anual esperada. La primera lo hace en términos del valor monetario de la pérdida mientras que la segunda lo hace en términos de dicho valor, normalizado por el valor expuesto de cada elemento, es decir, lo que se conoce como prima pura de riesgo. La segunda es para fines comparativos la métrica más adecuada para la comparación de resultados mediante mapas, dado que permite la mejor visualización de la distribución geográfica de estos resultados.

De la Figura 6-16 se puede ver que las pérdidas más bajas se encuentran hacia las afueras del centro de la ciudad, es decir, los valores más altos están en el centro de la ciudad y estos van bajando a medida que se aleja de ahí. Esto se puede explicar porque es precisamente en el centro de la ciudad donde se concentra el mayor valor expuesto, entonces ahí los valores de pérdida porque los valores expuestos también son altos. La Figura 6-17 muestra un cambio en el patrón de la Figura 6-16 ya que en este mapa las pérdidas están normalizadas con el valor expuesto de cada elemento, donde se puede ver que ahora las zonas en colores rojos se extienden un poco más hacia Las Heras y Godoy Cruz, del lado occidental de la ciudad; esto indica que son estas zonas las que tienen un mayor riesgo sísmico dado que son las que más valor pierden con respecto a lo que valen.

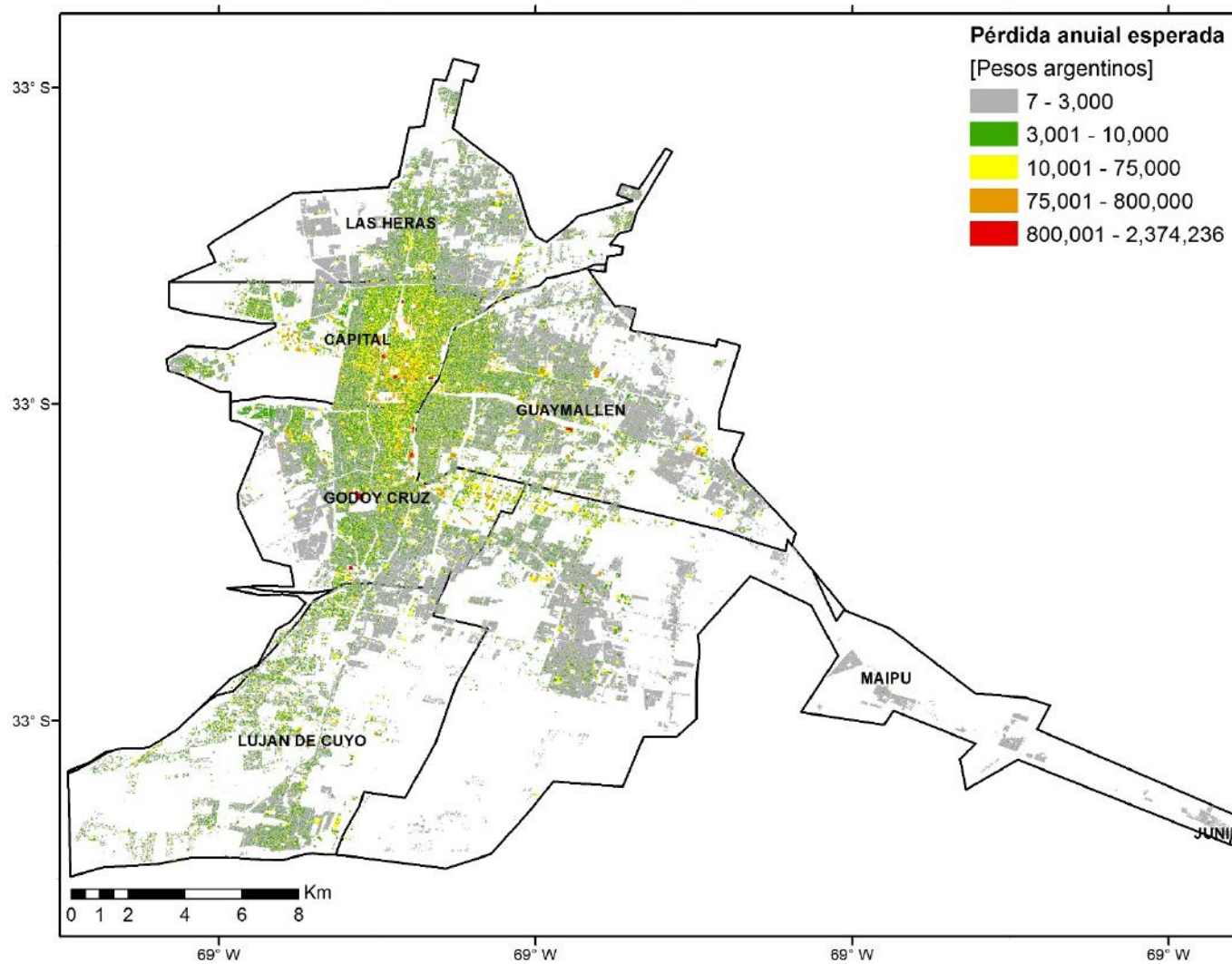


Figura 6-16
PAE absoluta

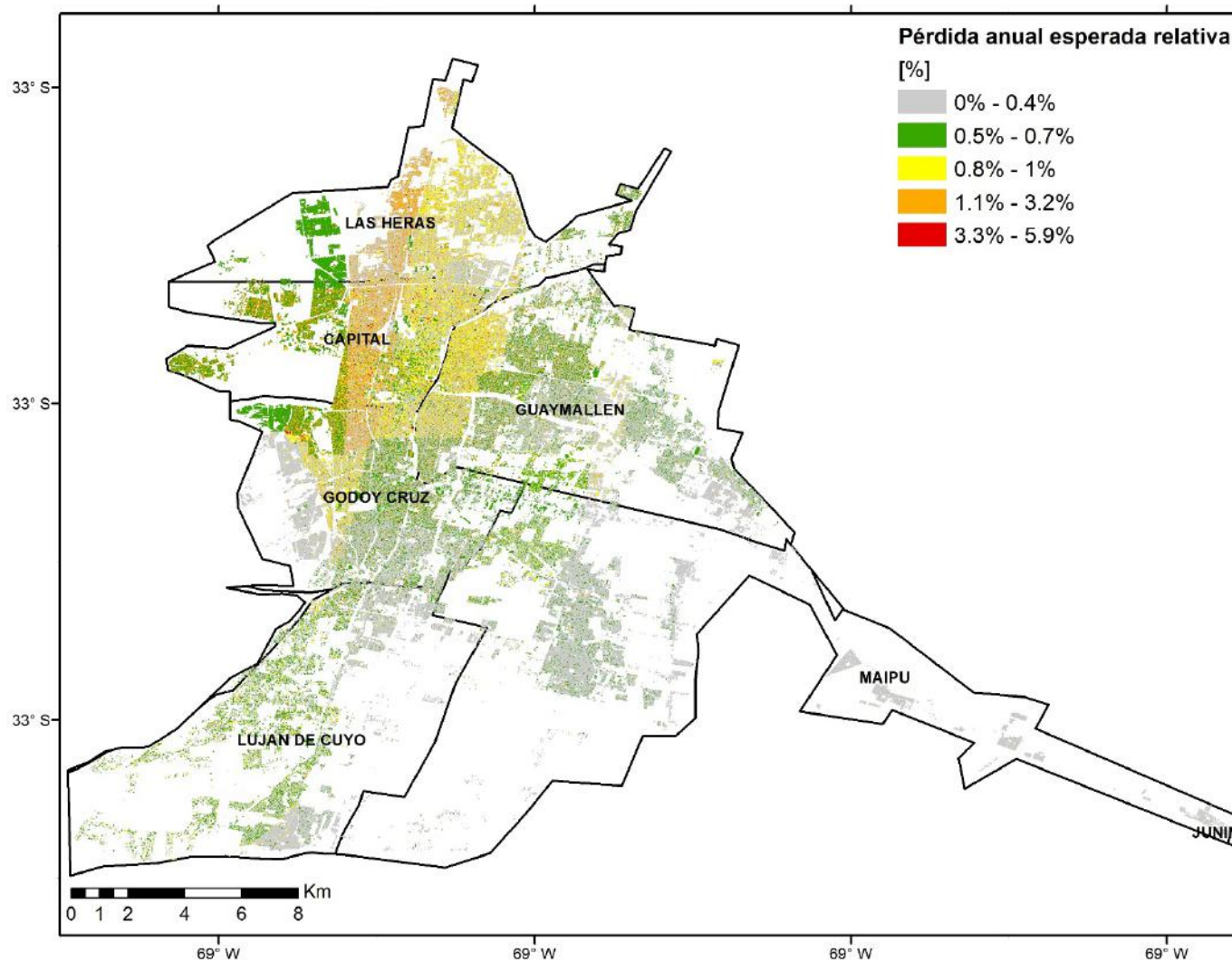


Figura 6-17 PAE relativa

6.7 Análisis probabilista de riesgo sísmico en términos físicos y humanos para un solo escenario

El análisis probabilista para un solo escenario permite la obtención de los daños y pérdidas asociadas ante la ocurrencia de un evento con características únicas en términos de magnitud y localización considerando los efectos de sitio. Los resultados de este tipo de análisis consisten en la estimación media de las pérdidas asociadas a la ocurrencia de este y únicamente de este.

6.7.1 Selección de escenario crítico

De acuerdo con la información obtenida del estudio de amenaza sísmica realizado en el marco del presente proyecto que se presentó en el Capítulo 5 y con base en la selección de un escenario que genere un nivel de pérdida similar que tenga un período de retorno de 500 años, a partir de la información presentada en la Tabla 6-30, se ha seleccionado un único evento con las características que se indican en la Tabla 20.

Tabla 6-30
Características del escenario crítico

Característica	Valor
Magnitud	6.6
Profundidad [km]	13
Longitud	-68.874
Latitud	-32.733
Frecuencia anual de ocurrencia [veces/año]	0.000475
Período de retorno [años]	2105
Aceleración máxima del terreno en roca [cm/s ²]	613

Es importante notar de la información de la tabla, que el período de retorno del evento con estas características no corresponde al mismo período de retorno de la pérdida. Lo anterior se explica porque la frecuencia del evento depende exclusivamente de la sismicidad de la fuente, y dependiendo de dónde se genere el evento puede causar efectos diferentes en la ciudad; siguiendo esta misma línea, pueden haber varios escenarios con la misma frecuencia de ocurrencia que ocurren en lugares diferentes (dentro de la misma fuente), y que por consiguiente causan efectos diferentes en la ciudad, en un caso generando pérdidas mucho mayores y en otro caso pérdidas mucho menores sólo por la ubicación del hipocentro. Acá, a pesar de que como se mencionó se ha seleccionado un escenario que genere una pérdida con orden de magnitud similar a la calculada a partir del PML de 500 años, un escenario con dichas características, de acuerdo a los parámetros de sismicidad de la fuente sismogénica Cerro La Cal, tiene un período de retorno de 2,105 años. La Figura 6-18 presenta el mapa de intensidades para aceleración espectral del escenario seleccionado. Este escenario corresponde a un evento con magnitud 6.6 asociado al sistema de fallamiento Cerro La Cal.

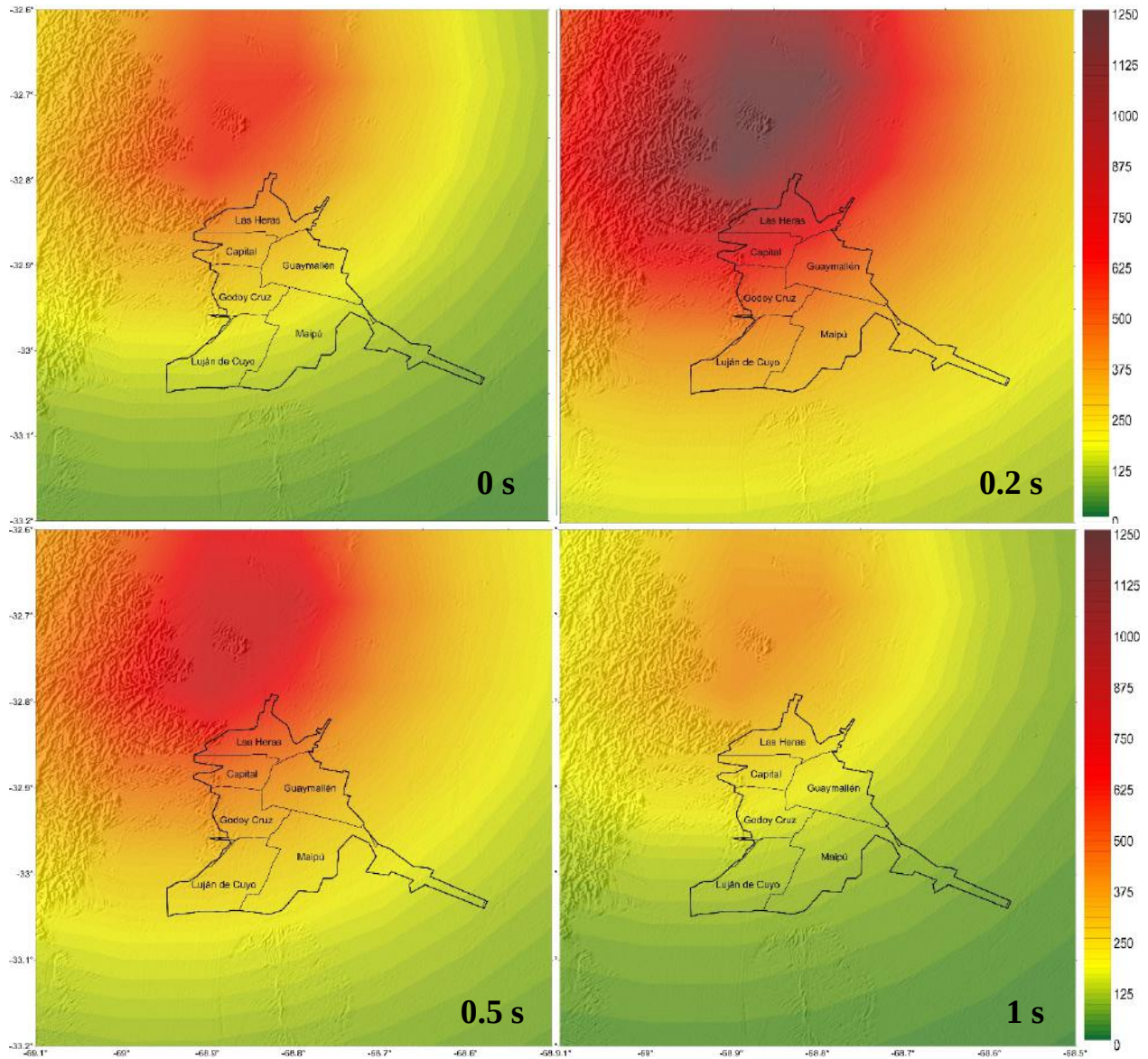


Figura 6-18
Aceleración espectral en roca para el escenario seleccionado (cm/s^2)

6.7.2 Estimación de víctimas

El primer paso para estimar las víctimas probables ante la ocurrencia de un sismo es calcular el daño de cada estructura. Para ello se deberá tomar en cuenta la intensidad sísmica y las características de vulnerabilidad. Una vez que se estima el daño se puede asociar este a una cierta probabilidad de colapso. La probabilidad de colapso puede estimarse directamente desde la función de vulnerabilidad como (en términos de pérdida relativa):

$$\Pr(P > p) = \int_p^1 f(p|s) dp \quad (\text{Ec. 6-1})$$

El número de víctimas, NV_i , para el edificio i se puede calcular como:

$$NV_i = Ocupantes \times Atrapados \times Fatalidad \times PC \quad (\text{Ec. 6-2})$$

En donde *Ocupantes* es el número total de personas que están presentes en el edificio i ; este dato es único en esta evaluación dado que no se cuenta con distribución de población por día y noche, *Atrapados* es el porcentaje de ocupantes del edificio que quedan atrapados con vida debajo de los escombros de la edificación, este factor depende del tipo estructural, *Fatalidad* es la relación porcentual del número estimado de atrapados que eventualmente mueren por el colapso o los daños en la edificación y *PC* es la probabilidad de colapso de la edificación. La Tabla 6-31 muestra valores de % de atrapados y de fatalidad típicos para diferentes tipos de edificaciones.

Es importante notar que se asumen las siguientes hipótesis para el cálculo de víctimas mortales tras la ocurrencia de un evento sísmico:

- No habrá incendios que aumenten el número de víctimas.
- Se considera que el clima será templado, sin heladas ni calores excesivos que aumenten el número de víctimas.
- Se considera que las labores de emergencia no se verán rebasadas y que siempre habrá atención inmediata y hospitales suficientes.
- No se consideran explícitamente muertos por causas de pánico (infartos, caídas, suicidio) ni muertos por impacto de los contenidos de las edificaciones.

Tabla 6-31
. Factores de atrapados y fatalidad para diferentes tipos estructurales.

ID	Valor	ATRAPADOS [%]	FATALIDAD [%]
0	LOTES O SIN ÁREA CONSTRUIDA	0%	0%
1	ADOBE O TAPIA PISADA	5%	15%
2	BAHAREQUE	2%	10%
3	MAMPOSTERÍA SIMPLE	5%	15%
4	MAMPOSTERÍA CONFINADA	5%	15%
5	MAMPOSTERÍA REFORZADA	5%	15%
6	PÓRTICOS DE CONCRETO + MAMPOSTERÍA	30%	50%
7	PÓRTICOS DE CONCRETO + DIVISIONES LIGERAS	30%	50%
8	PÓRTICOS DE CONCRETO + MUROS CONCRETO	20%	40%
9	RETICULAR CELULADO	50%	50%
10	MUROS DE CONCRETO	15%	30%
11	PREFABRICADO DE CONCRETO	10%	15%
12	PÓRTICOS DE ACERO	2%	10%
13	BODEGAS LUCES CORTAS	7%	20%
14	BODEGAS LUCES MEDIAS	7%	30%
15	BODEGAS LUCES LARGAS	7%	30%
16	IGLESIAS	20%	40%
17	COLISEOS Y ESTADIOS	20%	40%
18	MAMPOSTERÍA SEMICONFINADA	5%	15%

6.7.3 Resultados de la evaluación

La Tabla 6-32 muestra un resumen de los resultados en términos de la pérdida física esperada en pesos argentinos y el número de víctimas esperado. En este caso, los resultados se encuentran expresados en términos del valor esperado de la pérdida física y del número de víctimas dado que el análisis se realizó para un único escenario, entonces no es posible calcular ni la curva de excedencia de pérdidas ni se puede hablar de una pérdida anual esperada (se ha asumido una frecuencia anual de ocurrencia igual a 1.0 para este escenario).

Tabla 6-32
Resumen efectos causados por el escenario en la fuente Cerro La Cal de Mw=6.6 y profundidad de 13km

Efectos del escenario seleccionado			
Población	1,163,590	Valor expuesto ARS ($\times 10^6$)	277,827
Víctimas	3,989	Pérdida esperada ARS ($\times 10^6$)	94,777
‰	3.4	%	34.1

Como se puede ver de la tabla anterior, para este evento generado en la fuente Cerro La Cal, a una profundidad aproximada de 13km y de magnitud Mw=6.6 se espera que se tengan pérdidas de alrededor de 95 mil millones de pesos argentinos lo cual corresponde al 34% del valor expuesto total. De igual forma se estima que se tendrían casi 4 mil víctimas, lo que corresponde a 3.4 víctimas cada 1000 habitantes. Estos resultados claramente indican un escenario catastrófico para el Gran Mendoza, pero cabe recordar que este evento sísmico tiene un periodo de retorno extremadamente alto, 2105 años.

La Tabla 6-33 presenta los resultados desagregados por departamento; de esta tabla se puede ver que Godoy Cruz y Guaymallén tienen las mayores participaciones en la población total (23% y 24% respectivamente), seguidos de Las Heras (17%) y Capital (15%). En cuanto a las pérdidas físicas para este escenario, es Capital el que tiene mayor participación en la pérdida total, seguido de Guaymallén; sin embargo, es Las Heras el que tiene la mayor pérdida relativa a su valor expuesto (57%) seguido de Capital (54%). Este cambio ocurre por lo discutido anteriormente y que la localización del epicentro está hacia el noroeste de la ciudad y por lo tanto los departamentos de Las Heras y Capital son los que se ven gravemente afectados, con más del 50% de su valor expuesto perdido en cada caso. El departamento de Luján es en este caso el que menos se ve afectado con el 10% de su valor expuesto perdido, y esta pérdida tan solo representa el 3.2% de la pérdida total. En cuanto a pérdidas de vida humana, Capital sigue concentrando la mayor parte de la pérdida total con 1,450 víctimas (36%) pero esta vez le sigue Las Heras con 966 víctimas (24%); por otro lado, esta vez Capital tiene la pérdida humana relativa a su población más alta (8.2 víctimas cada 1000 habitantes), seguido de Las Heras (5 víctimas cada 1000 habitantes). Finalmente, y de igual forma que para la pérdida física, Luján es el departamento menos afectado con 84 víctimas, lo que equivale a 0.8 víctimas cada 1000 habitantes, lo cual tan sólo representa el 2% de la pérdida humana total.

Tabla 6-33

Pérdidas físicas y humanas para el escenario en la Fuente Cerro La Cal por departamento

Departamento	# de edificaciones		Valor expuesto		Población		Pérdida física esperada			Víctimas esperadas		
	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	[%]	---	[%]	[pesos x10 ⁶]	Pérdida/Expuesto	Part. Relativa [%]	---	Víctimas/Población	Part. Relativa [%]
Capital	70323	14.3	\$ 65,326	23.5	175,775	15.1	\$ 35,168	54%	37.1	1,450	8.2‰	36.4
Luján	45675	9.3	\$ 29,943	10.8	102,023	8.8	\$ 3,027	10%	3.2	84	0.8‰	2.1
Godoy Cruz	103996	21.2	\$ 62,273	22.4	261,508	22.5	\$ 16,292	26%	17.2	716	2.7‰	18.0
Guaymallén	128095	26.1	\$ 68,863	24.8	283,406	24.4	\$ 23,703	34%	25.0	669	2.4‰	16.8
Maipú	61381	12.5	\$ 28,117	10.1	144,264	12.4	\$ 3,346	12%	3.5	103	0.7‰	2.6
Las Heras	81335	16.6	\$ 23,304	8.4	196,615	16.9	\$ 13,241	57%	14.0	966	4.9‰	24.2
TOTAL	490,805	100	\$ 277,827	100	1,163,591	100	\$ 94,777	34%	100	3,987	3.4‰	100

La Figura 6-19 y la Figura 6-20 muestran los resultados de las pérdidas físicas esperadas para este escenario (la Figura 6-20 muestra la pérdida relativa al valor expuesto) mientras que la Figura 6-21 y la Figura 6-22 muestra la cantidad de víctimas esperadas (la Figura 6-22 muestra la cantidad de víctimas relativo a la ocupación de cada edificación). De la Figura 6-19 se ve que las mayores pérdidas económicas se concentran en el centro de la ciudad, pero la Figura 6-20 muestra mejor los efectos del sismo ya que es precisamente en el centro donde están las construcciones más altas y por lo tanto las que más valen, entonces el valor de la pérdida relativo al valor expuesto da una idea más clara de dónde el riesgo es mayor, en este caso hacia el noroeste de la ciudad (consistente con la localización del epicentro del sismo). Por otro lado, la Figura 6-21 muestra nuevamente que hacia el centro se tiene mayor número de víctimas, pero esto es de nuevo porque en el centro al tener los edificios más altos y concentrados tiene una mayor ocupación; la Figura 6-22 muestra otra vez el cambio en la distribución del riesgo, con un patrón similar al de la Figura 6-20 en el cual el mayor riesgo está localizado hacia el noreste de la ciudad, a pesar de que en el centro sigue habiendo un alto porcentaje de pérdidas humanas.

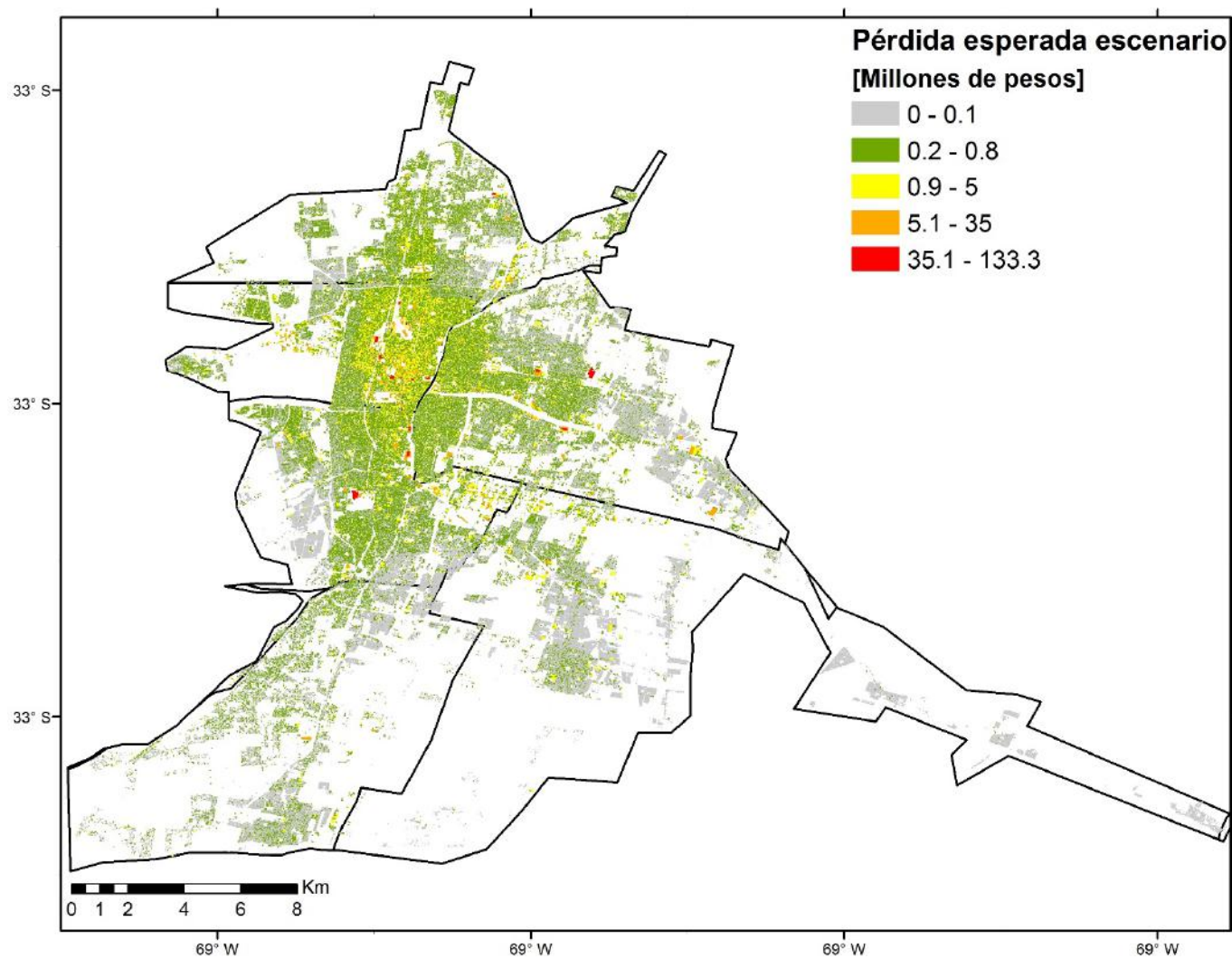


Figura 6-19
Pérdida en millones de pesos para el escenario en la fuente Cerro La Cal

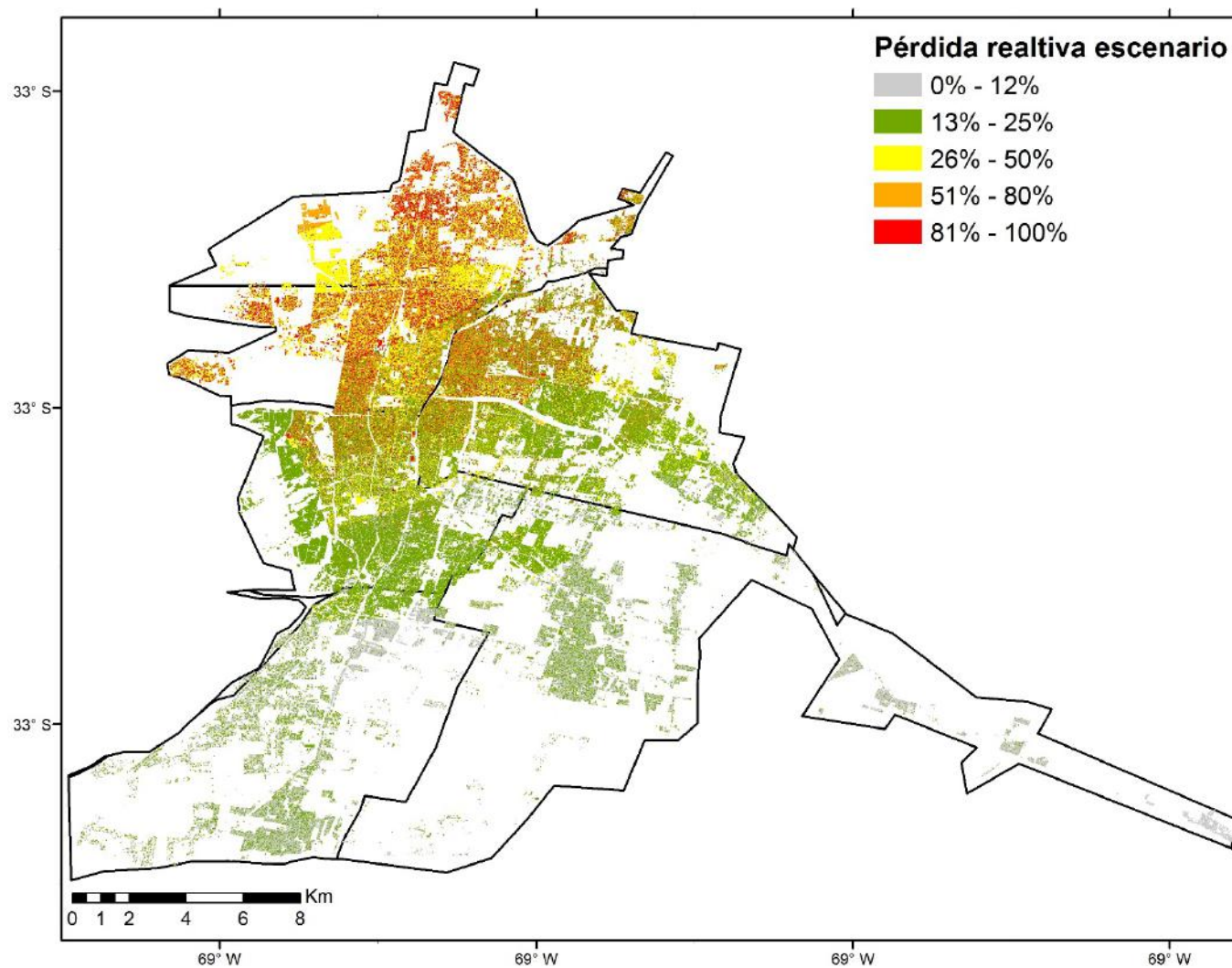


Figura 6-20
Pérdida relativa al valor expuesto para el escenario en la Fuente Cerro La Cal

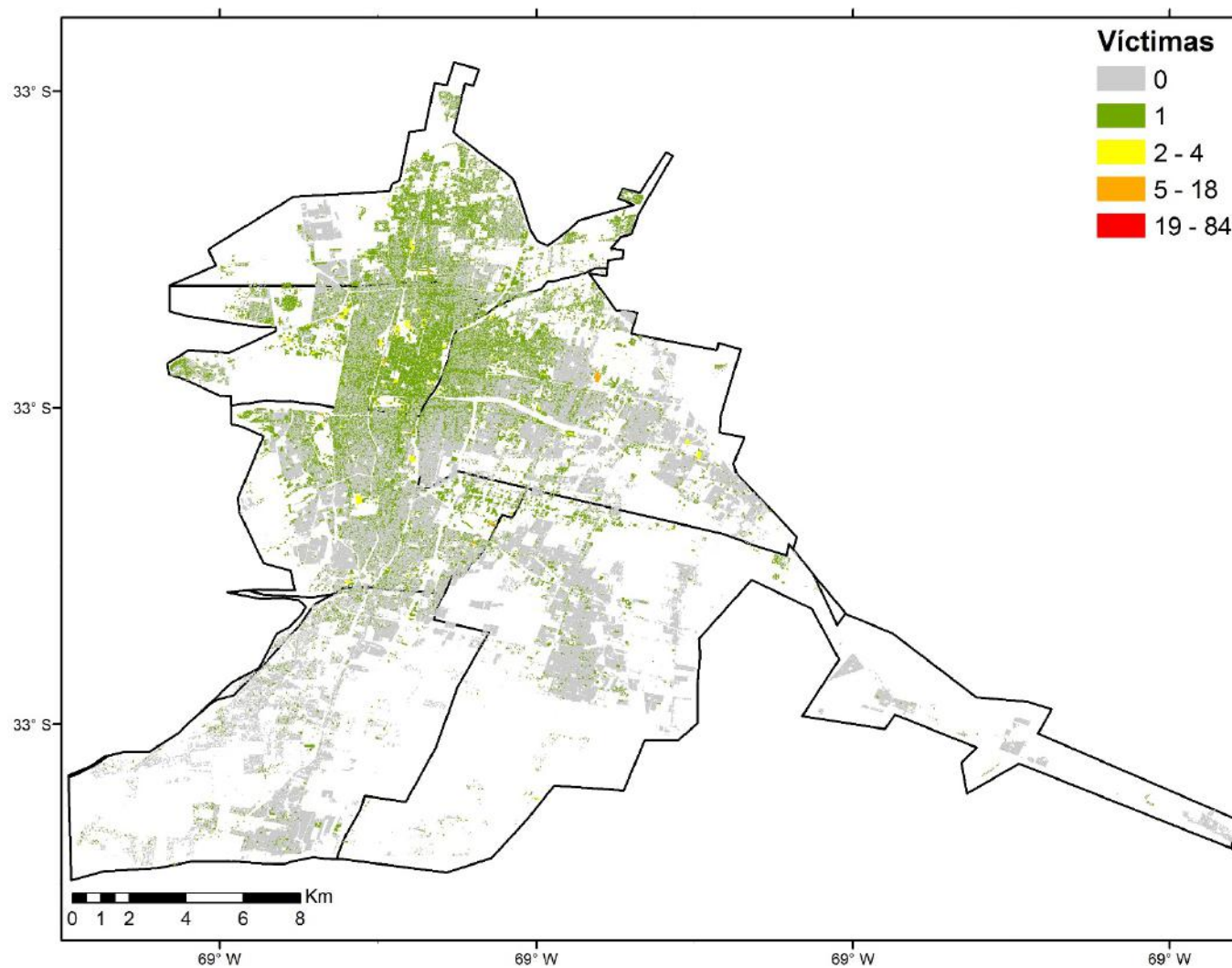


Figura 6-21
Número de víctimas para el escenario en la fuente Cerro La Cal

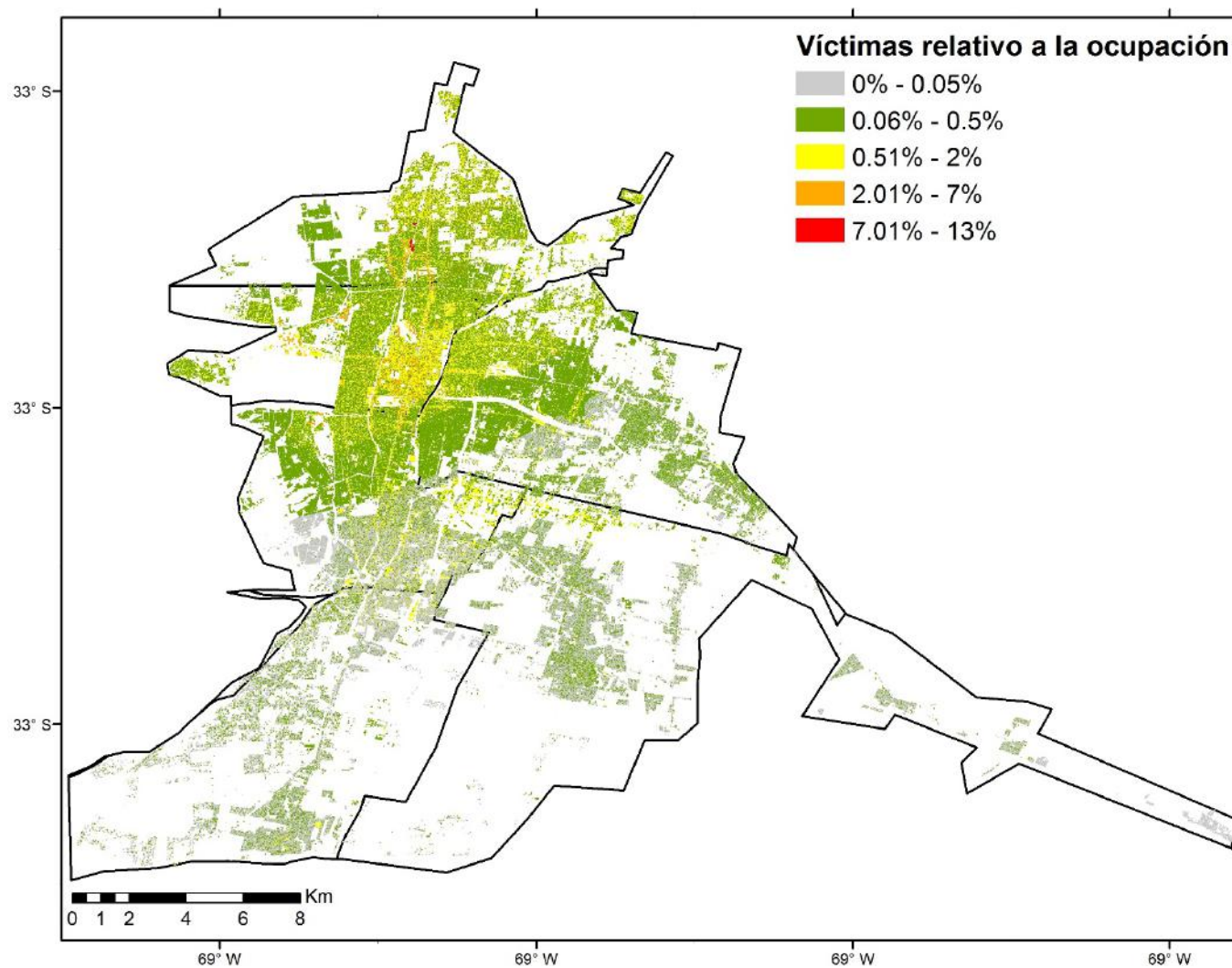


Figura 6-22
Víctimas relativo a la ocupación para l escenario de la fuente Cerro La Cal

5. Referencias

- Construirya. (2015). Valor del metro cuadrado de construcción en Mendoza. Disponible en http://www.construirya.com/index.php?id_menu=77&id_categoria=27&F_id_item=301
- Gudiño, M., Ghilardi, M., y Dalla Torre, J. (2001). *El territorio como expresión de las condiciones de vida y las políticas sociales*. Disponible en [http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/bitacora/article/view/35853/html_3#\(fig2\)](http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/bitacora/article/view/35853/html_3#(fig2))
- INPRES (Instituto Nacional de Prevención Sísmica). (1989). *Seismic microzonation of Gran Mendoza, Argentina*.
- INDEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos). (2010). *Censo Nacional de población, hogares y viviendas*. Disponible en <http://www.censo2010.indec.gov.ar/>
- Marulanda, M. (2013). *Modelación probabilista de pérdidas económicas por sismo para la estimación de la vulnerabilidad fiscal del Estado y la gestión financiera del riesgo soberano* [Tesis doctoral]. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España.
- Ordaz, M. (2000). Metodología para la evaluación del riesgo sísmico enfocada a la gerencia de seguros por terremoto. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.

7 ANEXO

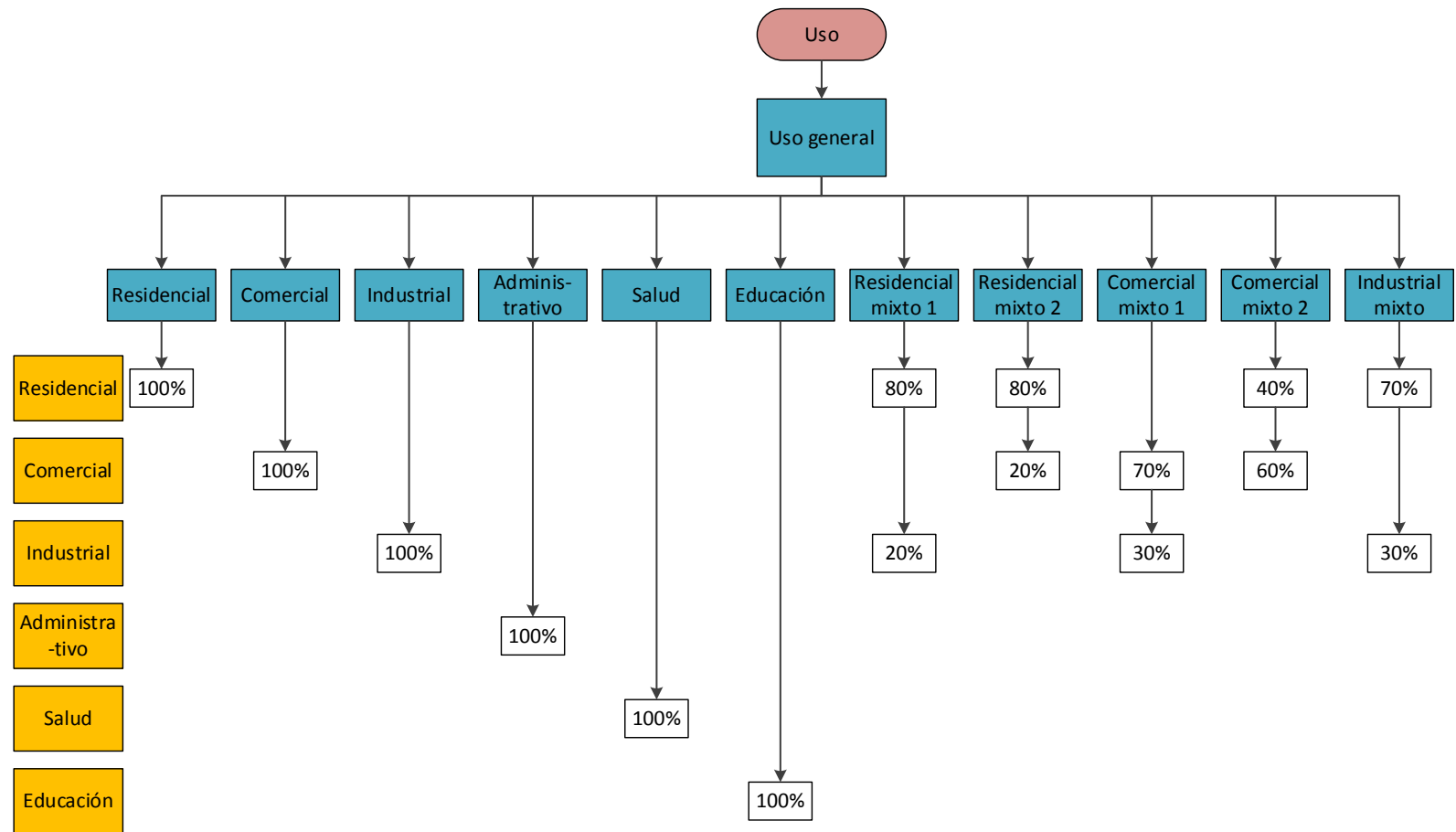


Figura A-1. Distribución del uso según los usos generales

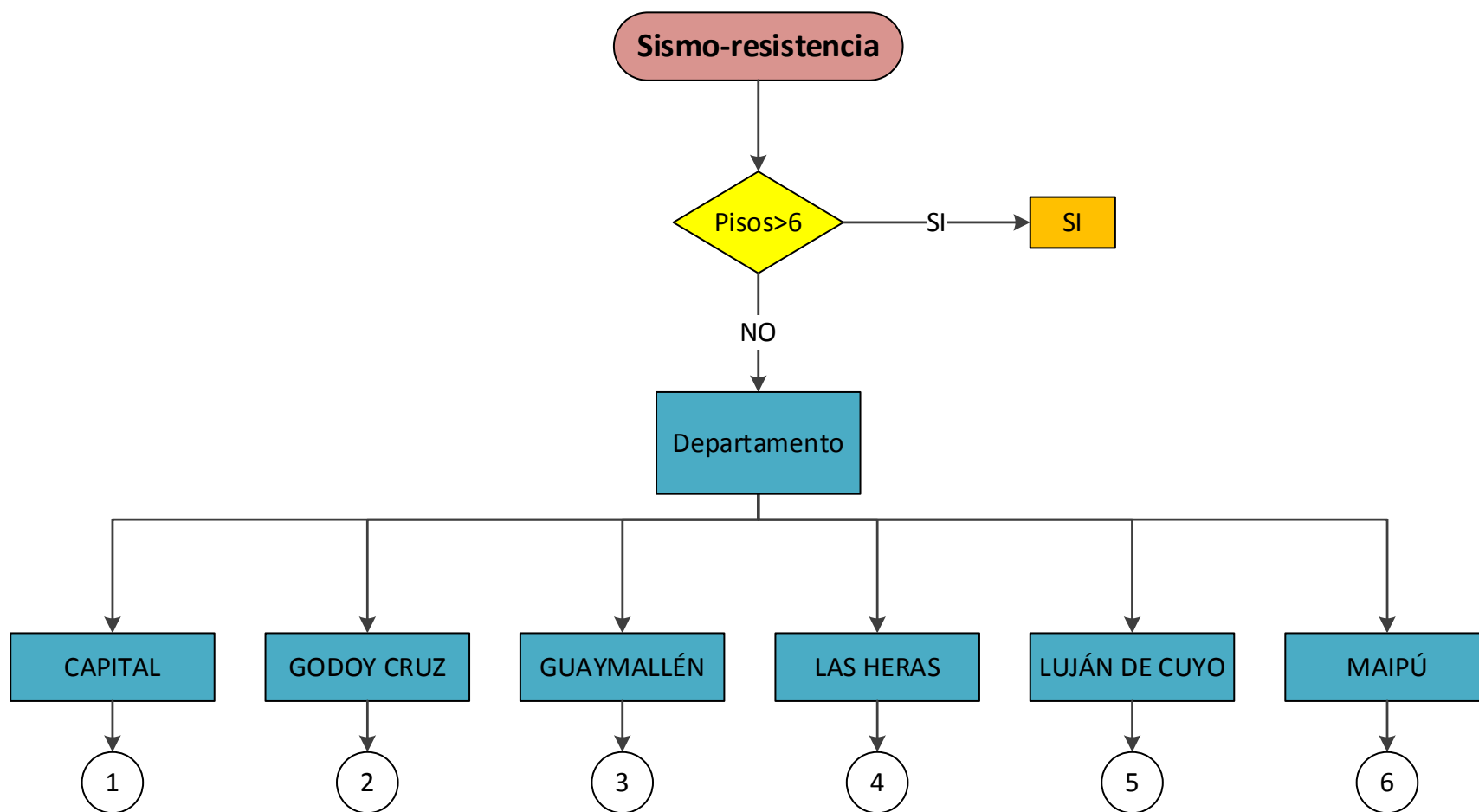


Figura A-2. Distribución de la sismo resistencia, general

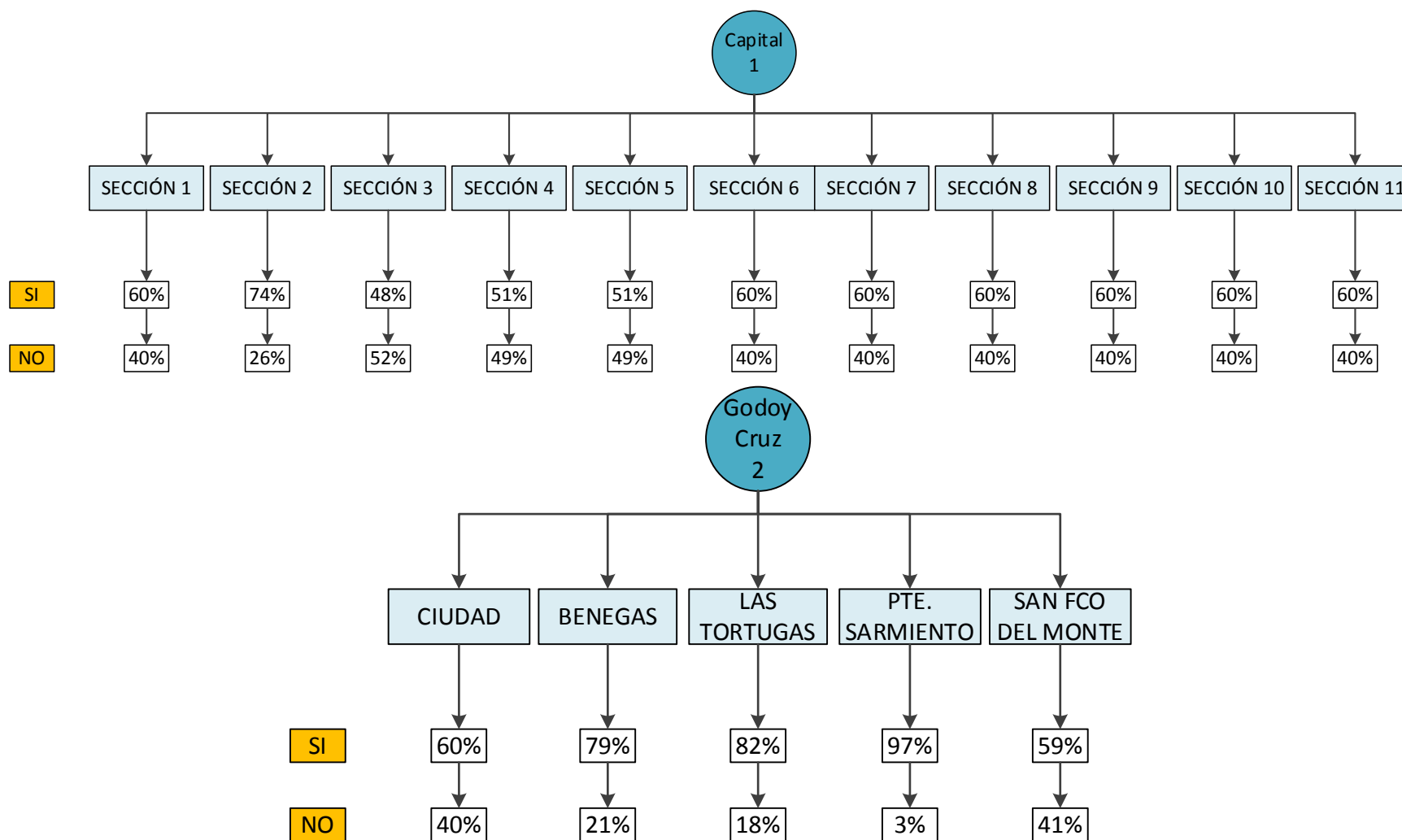


Figura A-2 (continuación). Distribución de la sismo resistencia para los departamentos Capital y Godoy Cruz.

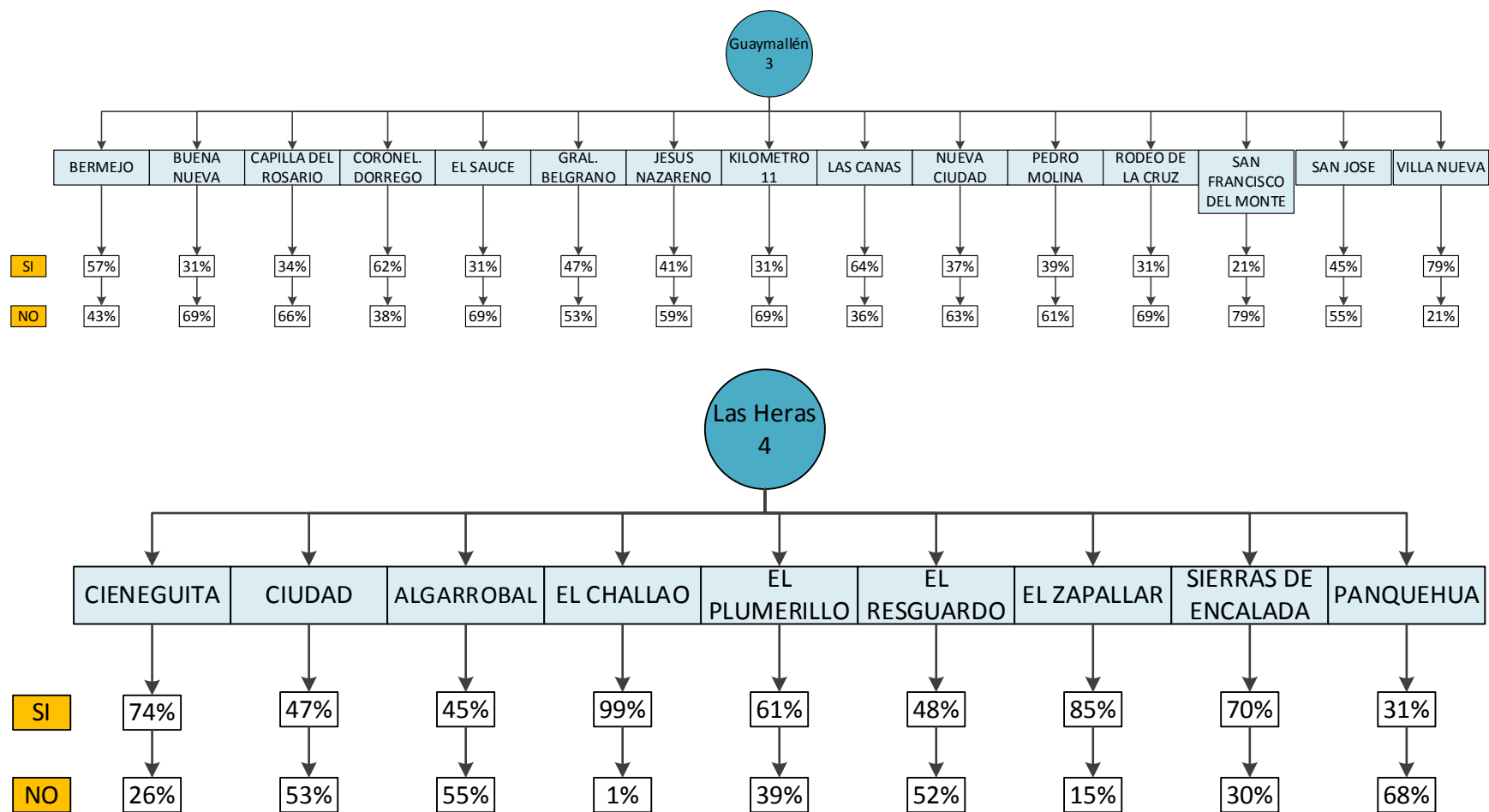


Figura A-2 (continuación). Distribución de la sismo resistencia para los departamentos Guaymallén y Las Heras

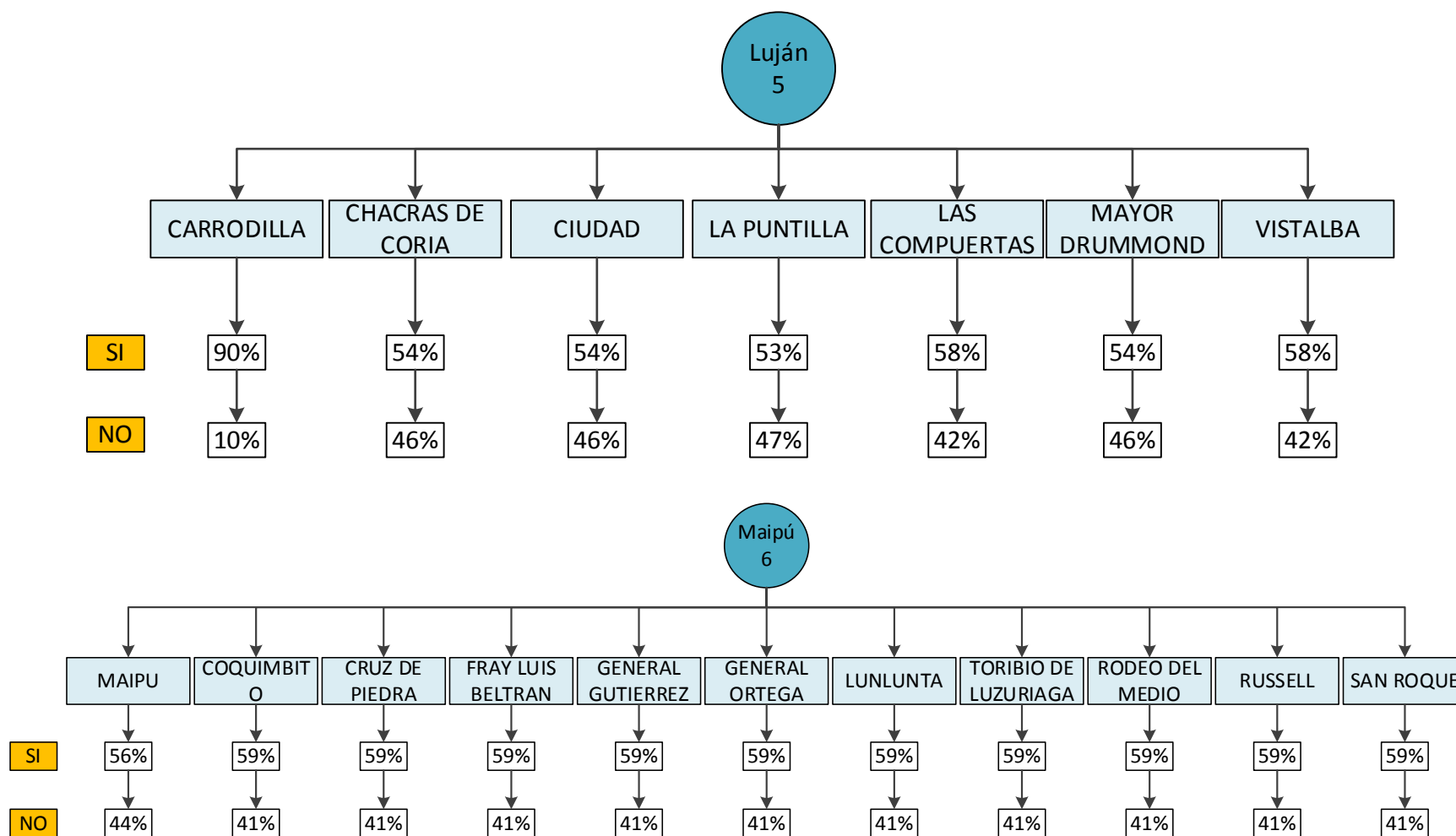


Figura A-2 (continuación). Distribución de la sismo resistencia para los departamentos Luján de Cuyo y Maipú

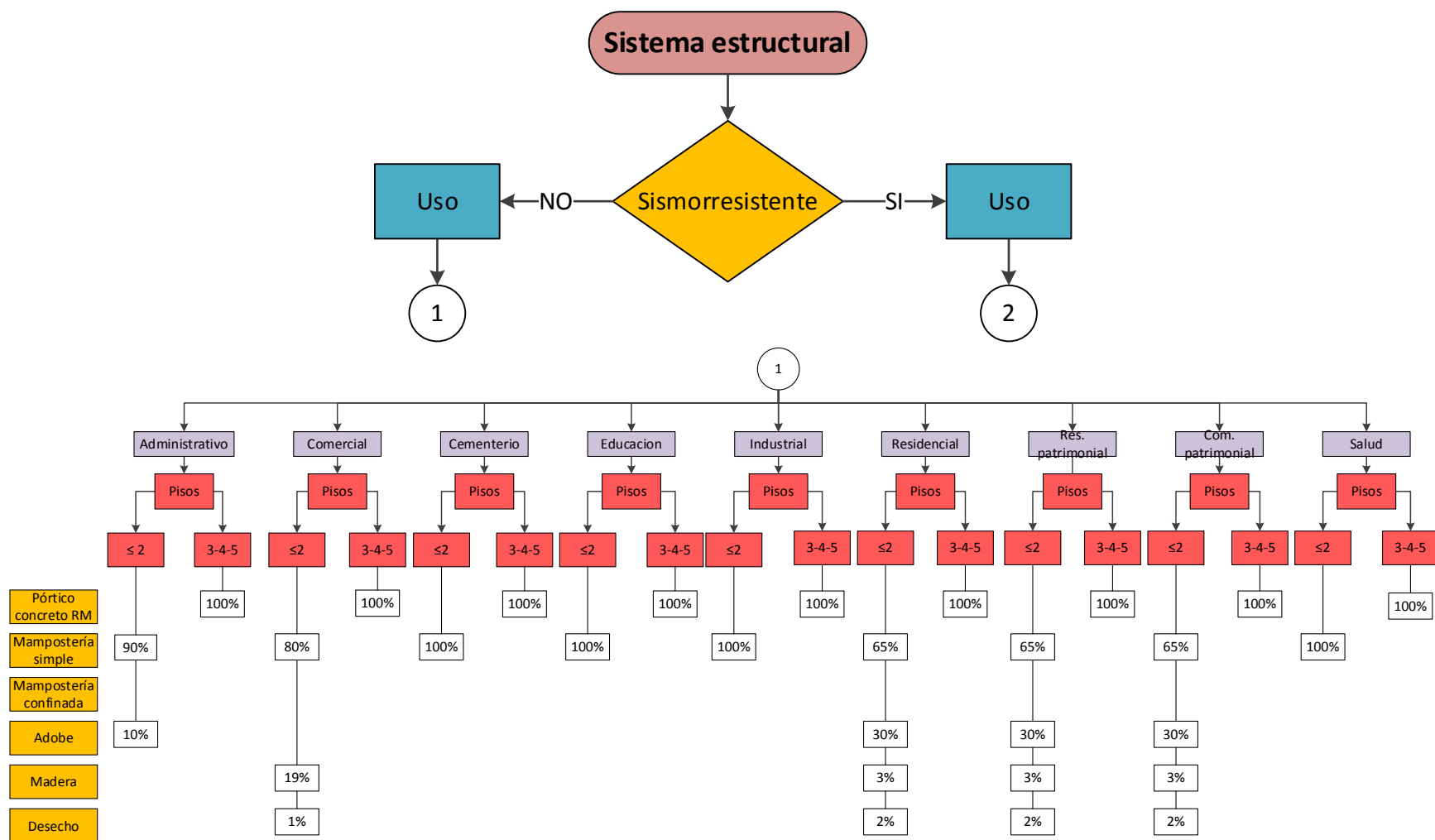


Figura A-3. Distribución del sistema estructural, general (arriba) y para las estructuras no sismo resistentes (abajo)

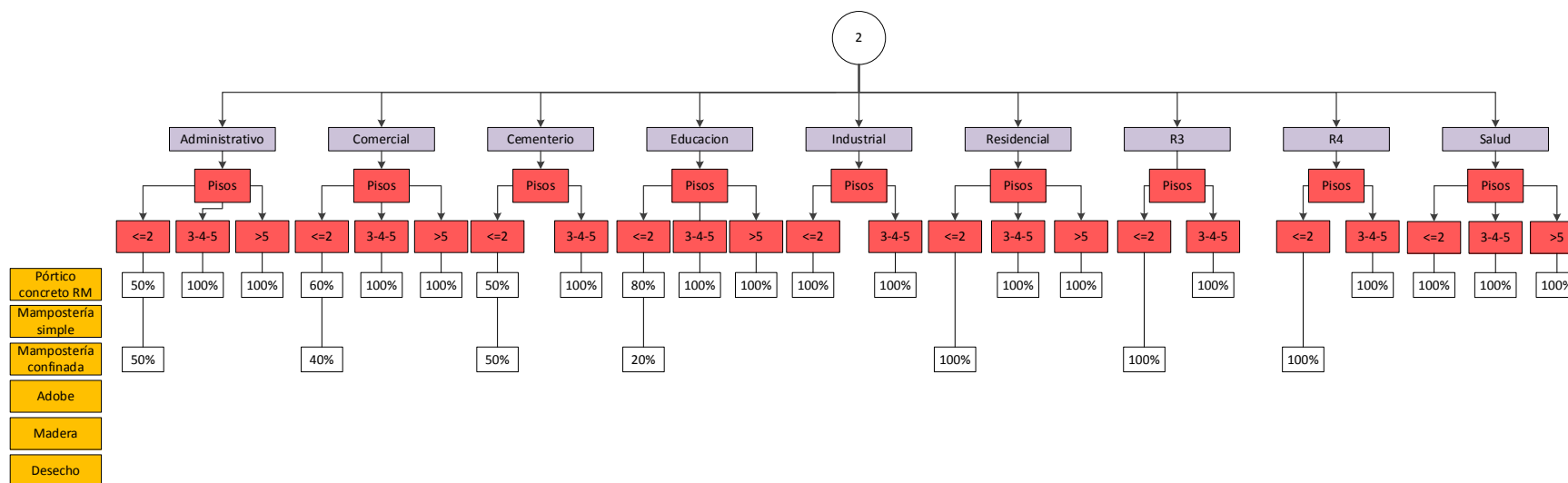


Figura A-3 (continuación). Distribución del sistema estructural para las estructuras sismo resistentes

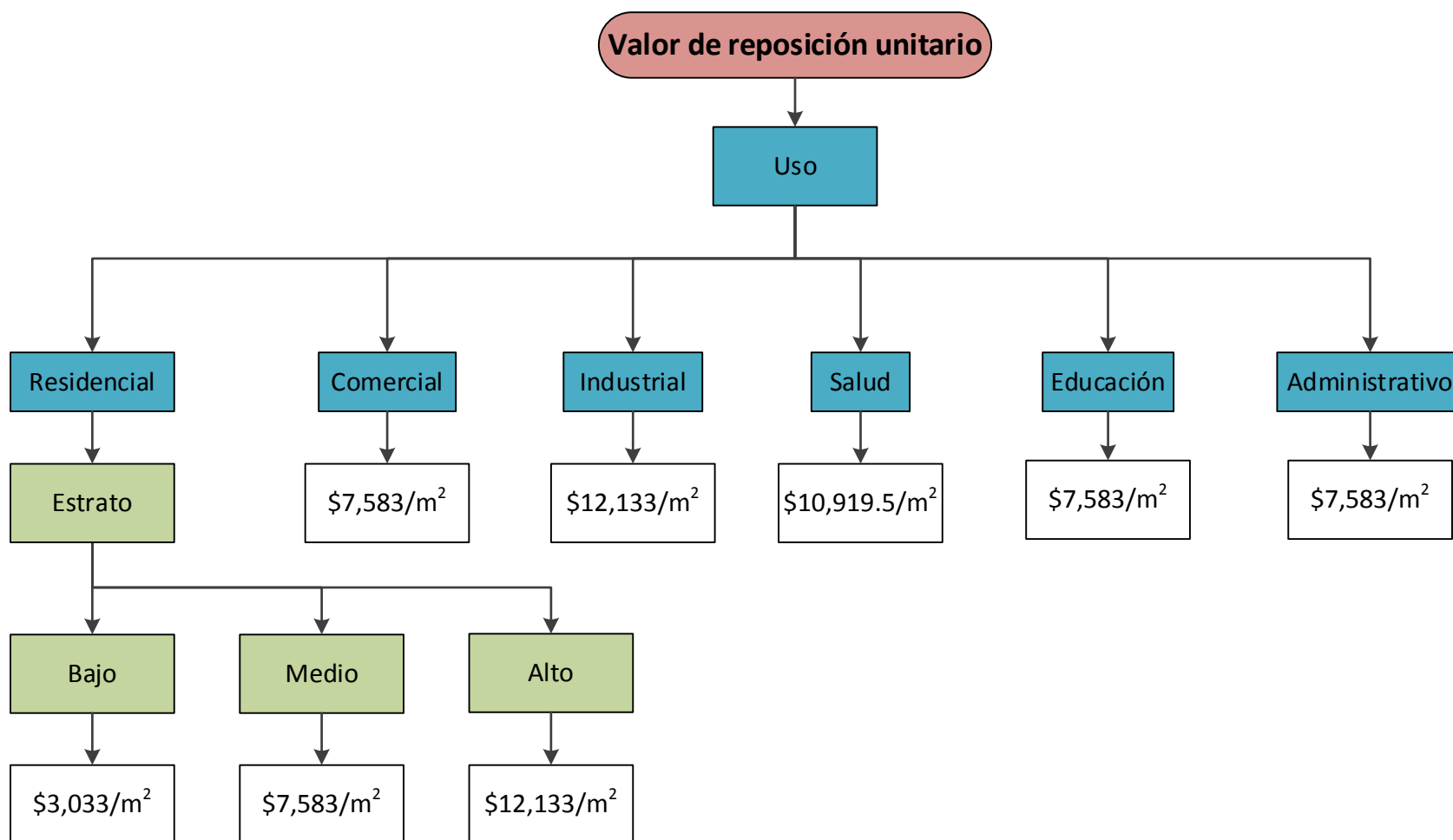


Figura A-4. Distribución del valor de reposición