

CAPRA

CENTRAL AMERICA PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT
EVALUACIÓN PROBABILISTA DE RIESGOS EN CENTRO AMÉRICA

GUATEMALA

TAREA I

**IDENTIFICACIÓN DE AMENAZAS, REVISIÓN
HISTÓRICA Y ANÁLISIS PROBABILISTA**

INFORME TÉCNICO SUBTAREA 1.3

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS
DATOS Y MODELACIÓN PROBABILISTA**





Evaluación de Riesgos Naturales
- América Latina -
Consultores en Riesgos y Desastres

Consortio conformado por:

Colombia

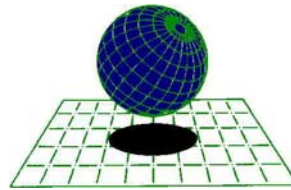
Carrera 19A # 84-14 Of 504
Edificio Torrenova
Tel. 57-1-691-6113
Fax 57-1-691-6102
Bogotá, D.C.



INGENIERIA TECNICA Y CIENTIFICA LTDA

España

Centro Internacional de Métodos Numéricos
en Ingeniería - CIMNE
Campus Nord UPC
Tel. 34-93-401-64-96
Fax 34-93-401-10-48
Barcelona



C I M N E

México

Vito Alessio Robles No. 179
Col. Hacienda de Guadalupe Chimalistac
C.P.01050 Delegación Álvaro Obregón
Tel. 55-5-616-8161
Fax 55-5-616-8162
México, D.F.



ERN Ingenieros Consultores, S. C.

ERN Evaluación de Riesgos Naturales - América Latina
www.ern-la.com

Dirección y Coordinación de Grupos de Trabajo Técnico – Consorcio ERN América Latina

Omar Darío Cardona A.
Dirección General del Proyecto

Luis Eduardo Yamín L.
Dirección Técnica ERN (COL)

Gabriel Andrés Bernal G.
Coordinación General ERN (COL)

Mario Gustavo Ordaz S.
Dirección Técnica ERN (MEX)

Eduardo Reinoso A.
Coordinación General ERN (MEX)

Alex Horia Barbat B.
Dirección Técnica CIMNE (ESP)

Martha Liliana Carreño T.
Coordinación General CIMNE (ESP)

Especialistas y Asesores – Grupos de Trabajo

Miguel Genaro Mora C.
Especialista ERN (COL)

César Augusto Velásquez V.
Especialista ERN (COL)

Karina Santamaría D.
Especialista ERN (COL)

Mauricio Cardona O.
Asistente Técnico ERN (COL)

Andrés Mauricio Torres C.
Asistente Técnico ERN (COL)

Diana Marcela González C.
Asistente Técnico ERN (COL)

Yinsury Sodel Peña V.
Asistente Técnico ERN (COL)

Andrei Garzón B.
Asistente Técnico ERN (COL)

Carlos Eduardo Avelar F.
Especialista ERN (MEX)

Benjamín Huerta G.
Especialista ERN (MEX)

Mauro Pompeyo Niño L.
Especialista ERN (MEX)

Isaías Martínez A.
Asistente Técnico ERN (MEX)

Edgar Osuna H.
Asistente Técnico ERN (MEX)

José Juan Hernández G.
Asistente Técnico ERN (MEX)

Marco Torres
Asesor Asociado (MEX)

Johner Venicio Correa C.
Asistente Técnico ERN (COL)

Mabel Cristina Marulanda F.
Especialista CIMNE(ESP)

Jairo Andrés Valcarcel T.
Especialista CIMNE(ESP)

Juan Pablo Londoño L.
Especialista CIMNE(ESP)

René Salgueiro
Especialista CIMNE(ESP)

Nieves Lantada
Especialista CIMNE(ESP)

Álvaro Martín Moreno R.
Asesor Asociado (COL)

Mario Díaz-Granados O.
Asesor Asociado (COL)

Liliana Narvaez M.
Asesor Asociado (COL)

Asesores Nacionales

Osmar E. Velasco
Guatemala

Sandra Zúñiga
Nicaragua

Alonso Brenes
Costa Rica

Banco Mundial – Gestión de Riesgo de Desastres / Región Latinoamérica y el Caribe

Francis Ghesquiere
Coordinador Regional

Oscar A. Ishizawa
Especialista

Joaquín Toro
Especialista

Fernando Ramírez C.
Especialista

Edward C. Anderson
Especialista

Stuart Gill
Especialista

Banco Interamericano de Desarrollo – Medio Ambiente / Desarrollo Rural / Desastres Naturales

Flavio Bazán
Especialista Sectorial

Cassandra T. Rogers
Especialista Sectorial

Hori Tsuneki
Consultor Interno

Tabla de contenido

1	Amenaza sísmica	1-1
1.1	Introducción	1-1
1.2	Entorno local de la amenaza.....	1-1
1.2.1	Sismotectónica de Guatemala	1-1
1.3	Información empleada en la modelación.....	1-2
1.3.1	Catálogo sísmico	1-2
1.3.2	Parámetros de sismicidad.....	1-3
1.3.3	Fuentes sísmicas empleadas	1-4
1.3.4	Modelo de atenuación de movimiento fuerte.....	1-8
1.4	Calidad de los datos disponibles	1-9
1.5	Mapas de amenaza sísmica para Guatemala.....	1-10
2	Amenaza por tsunami.....	2-1
2.1	Introducción.....	2-1
2.2	Información empleada en la modelación.....	2-1
2.2.1	Batimetría y topografía	2-1
2.3	Parámetros del modelo.....	2-3
2.3.1	Eventos	2-3
2.3.2	Puntos de cálculo y efectos en bahías	2-3
2.4	Calidad de los datos disponibles	2-4
2.5	Mapas de amenaza por tsunami en la costa pacífica de Guatemala.....	2-4
2.6	Mapas de amenaza por tsunami en la costa atlántica de Guatemala.....	2-9
3	Amenaza por huracán	3-1
3.1	Introducción	3-1
3.2	Información empleada en la modelación.....	3-1
3.2.1	Topografía.....	3-1
3.2.2	Batimetría.....	3-2
3.2.3	Áreas urbanas y uso de suelo.....	3-3
3.2.4	Registros de velocidad de viento y altura de marea	3-4
3.2.5	Catálogo de Huracanes	3-4
3.3	Parámetros del modelo.....	3-5
3.3.1	Depuración del catálogo de huracanes.....	3-5
3.3.2	Factores de exposición topográfica al viento para Guatemala	3-8
3.3.3	Variación de la velocidad del viento con la altura	3-9
3.4	Calidad de los datos disponibles	3-11
3.5	Mapas de amenaza por huracán en Guatemala	3-12

3.5.1	Mapas de amenaza por vientos fuertes	3-12
3.5.2	Mapas de amenaza por lluvias huracanadas	3-18
3.5.3	Mapas de amenaza por inundación asociada a lluvias huracanadas.....	3-24
4	Amenaza por lluvias intensas e inundación	4-1
5	Amenaza por deslizamientos	5-1
5.1	Introducción	5-1
5.2	Información empleada en la modelación.....	5-1
5.3	Parámetros del modelo.....	5-1
5.3.1	Información general	5-2
5.3.2	Información de eventos detonantes	5-3
5.4	Calidad de los datos disponibles	5-3
5.5	Mapas de amenaza por deslizamiento	5-4
6	Amenaza volcánica.....	6-1
6.1	Introducción	6-1
6.2	Calidad de los datos disponibles	6-1
6.3	Evaluación de la amenaza volcánica.....	6-1
6.3.1	Volcán Tajumulco	6-3
6.3.2	Volcanes Santa María y Santiaguito	6-4
6.3.3	Volcán Pacaya	6-5
6.3.4	Volcán Fuego.....	6-6
6.3.5	Volcán Tacana	6-7
6.3.6	Volcán Agua	6-8
6.3.7	Volcán Acatenango.....	6-9
6.3.8	Volcán Almolonga.....	6-10
6.3.9	Volcán Atitlán	6-11
6.3.10	Volcán Tolimán	6-12

Índice de figuras

FIGURA 1-1 ENTORNO SISMOTECTÓNICO DE GUATEMALA	1-2
FIGURA 1-2 CATÁLOGO SÍSMICO REGIONAL DEL PROYECTO RESIS II	1-3
FIGURA 1-3 FUENTES DE TIPO CORTICAL. PROYECTO RESIS II	1-6
FIGURA 1-4 FUENTES DE TIPO INTERFASE. PROYECTO RESIS II	1-7
FIGURA 1-5 FUENTES DE TIPO INTRAPLACA. PROYECTO RESIS II	1-8
FIGURA 1-6 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PGA [CM/S ²] PARA 500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	1-11
FIGURA 1-7 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PGA [CM/S ²] PARA 1000 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	1-12
FIGURA 1-8 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PGA [CM/S ²] PARA 2500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	1-13
FIGURA 1-9 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE SA(T=1SEG) [CM/S ²] PARA 500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	1-14
FIGURA 1-10 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE SA(T=1SEG) [CM/S ²] PARA 1000 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	1-15
FIGURA 1-11 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE SA(T=1SEG) [CM/S ²] PARA 2500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	1-16
FIGURA 2-1 IMAGEN DE LA BATIMETRÍA EMPLEADA PARA EL MODELO DE TSUNAMI EN GUATEMALA.....	2-2
FIGURA 2-2 IMAGEN DE LA TOPOGRAFÍA EMPLEADA PARA EL MODELO DE TSUNAMI EN GUATEMALA.	2-2
FIGURA 2-3 PUNTOS DE CÁLCULO PARA TSUNAMI.	2-3
FIGURA 2-4 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE INUNDACIÓN [M] PARA 50 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	2-5
FIGURA 2-5 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE INUNDACIÓN [M] PARA 100 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	2-6
FIGURA 2-6 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE INUNDACIÓN [M] PARA 500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	2-7
FIGURA 2-7 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE INUNDACIÓN [M] PARA 1000 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	2-8
FIGURA 2-8 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE INUNDACIÓN [M] PARA 50 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	2-9
FIGURA 2-9 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE INUNDACIÓN [M] PARA 100 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	2-10
FIGURA 2-10 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE INUNDACIÓN [M] PARA 500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	2-11
FIGURA 2-11 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE INUNDACIÓN [M] PARA 1000 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO	2-12
FIGURA 3-1 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN PARA GUATEMALA	3-2
FIGURA 3-2 IMAGEN DE LA BATIMETRÍA EMPLEADA PARA EL MODELO DE MAREA DE TORMENTA EN GUATEMALA	3-3
FIGURA 3-3 POLÍGONOS DE ÁREAS URBANAS Y USO DE SUELO PARA GUATEMALA	3-3
FIGURA 3-4 TRAYECTORIA DE CICLONES TROPICALES PARA LOS OCEANOS PACÍFICO (IZQ.) Y ATLÁNTICO (DER.) HASTA EL AÑO 2007 DE ACUERDO CON LA INFORMACIÓN DE LA BASE DE DATOS HURDAT DE LA NOAA.	3-4
FIGURA 3-5 FACTORES DE EXPOSICIÓN TOPOGRÁFICA POR VIENTO PARA GUATEMALA	3-9
FIGURA 3-6 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO CON LA ALTURA Y PARA DIFERENTES TIPOS DE TERRENO.	3-11

FIGURA 3-7 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL LA VELOCIDAD MÁXIMA DEL VIENTO [KM/H] PARA 20 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	3-13
FIGURA 3-8 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL LA VELOCIDAD MÁXIMA DEL VIENTO [KM/H] PARA 50 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	3-14
FIGURA 3-9 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL LA VELOCIDAD MÁXIMA DEL VIENTO [KM/H] PARA 100 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	3-15
FIGURA 3-10 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL LA VELOCIDAD MÁXIMA DEL VIENTO [KM/H] PARA 500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	3-16
FIGURA 3-11 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL LA VELOCIDAD MÁXIMA DEL VIENTO [KM/H] PARA 1000 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	3-17
FIGURA 3-16 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PROFUNDIDAD DE PRECIPITACIÓN [MM] PARA 20 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	3-19
FIGURA 3-17 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PROFUNDIDAD DE PRECIPITACIÓN [MM] PARA 50 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	3-20
FIGURA 3-18 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PROFUNDIDAD DE PRECIPITACIÓN [MM] PARA 100 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	3-21
FIGURA 3-19 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PROFUNDIDAD DE PRECIPITACIÓN [MM] PARA 500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	3-22
FIGURA 3-20 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PROFUNDIDAD DE PRECIPITACIÓN [MM] PARA 1000 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	3-23
FIGURA 3-21 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN [M] PARA 20 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	3-25
FIGURA 3-22 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN [M] PARA 50 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	3-26
FIGURA 3-23 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN [M] PARA 100 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	3-27
FIGURA 3-24 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN [M] PARA 500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	3-28
FIGURA 3-25 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN [M] PARA 1000 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	3-29
FIGURA 5-1 CAPAS DE INFORMACIÓN GENERAL DISPONIBLE PARA GUATEMALA.....	5-2
FIGURA 5-2 MAPA DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO EN CONDICIONES SECAS CON SISMO. CALCULADO CON EL MÉTODO DE MORA-VARHSON.....	5-5
FIGURA 5-3 MAPA DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO EN CONDICIONES HÚMEDAS CON SISMO. CALCULADO CON EL MÉTODO DE MORA-VARHSON.....	5-6
FIGURA 5-4 MAPA DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO EN CONDICIÓN SECA SIN SISMO. CALCULADO CON EL MÉTODO DE FALLA TRASLACIONAL.....	5-7
FIGURA 5-5 MAPA DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO EN CONDICIÓN SATURADA SIN SISMO. CALCULADO CON EL MÉTODO DE FALLA TRASLACIONAL.....	5-8
FIGURA 5-6 MAPA DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO EN CONDICIÓN SECA CON SISMO. CALCULADO CON EL MÉTODO DE FALLA TRASLACIONAL.....	5-9
FIGURA 5-7 MAPA DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO EN CONDICIÓN SATURADA CON SISMO. CALCULADO CON EL MÉTODO DE FALLA TRASLACIONAL.....	5-10
FIGURA 6-1 LOCALIZACIÓN DE PRINCIPALES VOLCANES EN GUATEMALA.....	6-2
FIGURA 6-2 GRANDES VOLCANES DE GUATEMALA.....	6-3
FIGURA 6-3 VOLCÁN TAJUMULCO.....	6-4
FIGURA 6-4 VOLCANES SANTA MARÍA (DERECHA) Y SANTIAGUITO (CENTRO).....	6-5
FIGURA 6-5 VOLCÁN PACAYA.....	6-6
FIGURA 6-6 VOLCÁN FUEGO.....	6-7
FIGURA 6-7 VOLCÁN TACANA (IZQUIERDA).....	6-8
FIGURA 6-8 VOLCÁN AGUA.....	6-9

FIGURA 6-9 VOLCÁN ACATENANGO (CENTRO), FUEGO (IZQUIERDA) Y AGUA (DERECHA) 6-10

FIGURA 6-10 VOLCÁN ALMOLONGA 6-11

FIGURA 6-11 VOLCÁN ATITLÁN..... 6-12

FIGURA 6-12 VOLCANES TOLIMÁN (DERECHA) Y ATITLÁN (IZQUIERDA), RODEADOS POR EL LAGO ATITLÁN
..... 6-13

Índice de tablas

TABLA 1-1 PARÁMETROS DE SISMICIDAD DE LAS FUENTES.....	1-4
TABLA 1-2 COEFICIENTES DEL MODELO DE ATENUACIÓN DE CLIMENT ET AL. 1994.....	1-9
TABLA 3-1 PARÁMETROS PRINCIPALES (VELOCIDAD MÁXIMA DEL VIENTO, CATEGORÍA, NOMBRE Y FECHA) DE LOS CICLONES TROPICALES CONSIDERADOS.....	3-5
TABLA 3-2 DISTRIBUCIÓN POR CATEGORÍA EN LA ESCALA SAFFIR-SIMPSON, DE LOS CICLONES TROPICALES CONSIDERADOS.....	3-7
TABLA 3-3 PARÁMETROS PRINCIPALES (VELOCIDAD MÁXIMA DE VIENTO, CATEGORÍA, NOMBRE Y FECHA) DE LOS CICLONES TROPICALES CONSIDERADOS.....	3-7
TABLA 3-4 DISTRIBUCIÓN POR CATEGORÍA EN LA ESCALA SAFFIR-SIMPSON, DE LOS CICLONES TROPICALES CONSIDERADOS.....	3-8
TABLA 3-5 FACTORES DE EXPOSICIÓN TOPOGRÁFICA AL VIENTO PARA GUATEMALA	3-8
TABLA 3-6 PARÁMETROS α Y δ PARA DIFERENTES TIPOS DE TERRENO	3-10
TABLA 5-1. ANÁLISIS DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO REALIZADOS.....	5-4

1 Amenaza sísmica

1.1 Introducción

Este capítulo presenta la reevaluación de la amenaza sísmica de Guatemala, empleando los avances presentados en el proyecto regional RESIS II (NORSAR et. al. 2008), el cual constituye el estudio más avanzado a la fecha con relación a evaluación de amenaza sísmica en América Central. A partir de la sismotectónica de la región, y la sismicidad registrada e histórica, se definieron una serie de fuentes sismogénicas, las cuales cubren la totalidad del territorio centroamericano, y conservan las condiciones de sismicidad generales y su variación regional.

1.2 Entorno local de la amenaza

1.2.1 *Sismotectónica de Guatemala*

El territorio de Guatemala se encuentra ubicado en la convergencia de tres placas tectónicas: Norteamérica, Caribe y Cocos. Los principales rasgos topográficos del país han sido determinados por el movimiento relativo de dichas placas, derivando así mismo en alta actividad sísmica y volcánica.

La interacción entre las placas Norteamérica y Caribe es de tipo transcurrente en territorio guatemalteco, con manifestación a nivel de superficie delimitada principalmente por los sistemas de falla Chixoy-Polochic y Motagua (ver Figura 1-1). En la costa pacífica, la interacción entre la placa Cocos y Caribe es de tipo convergente (zona de subducción). Los sistemas transcurrentes como Chixoy-Polochic y Motagua son capaces de generar terremotos de magnitud superior a 7, a profundidades relativamente bajas (e.g. terremoto de Guatemala de 1976). Por otra parte, la subducción es capaz de generar eventos sísmicos de muy alta magnitud (8+), a profundidades que son variables a medida que se adentra en el continente, siendo más probable la generación de un sismo relativamente superficial en cercanías a la costa Pacífica. Así mismo la actividad tectónica de la región ha generado deformaciones al interior de las placas Norteamérica y Caribe, produciendo sistemas secundarios de falla como Jalpatagua, Mixco, Santa Catarina Pinula, entre otros.

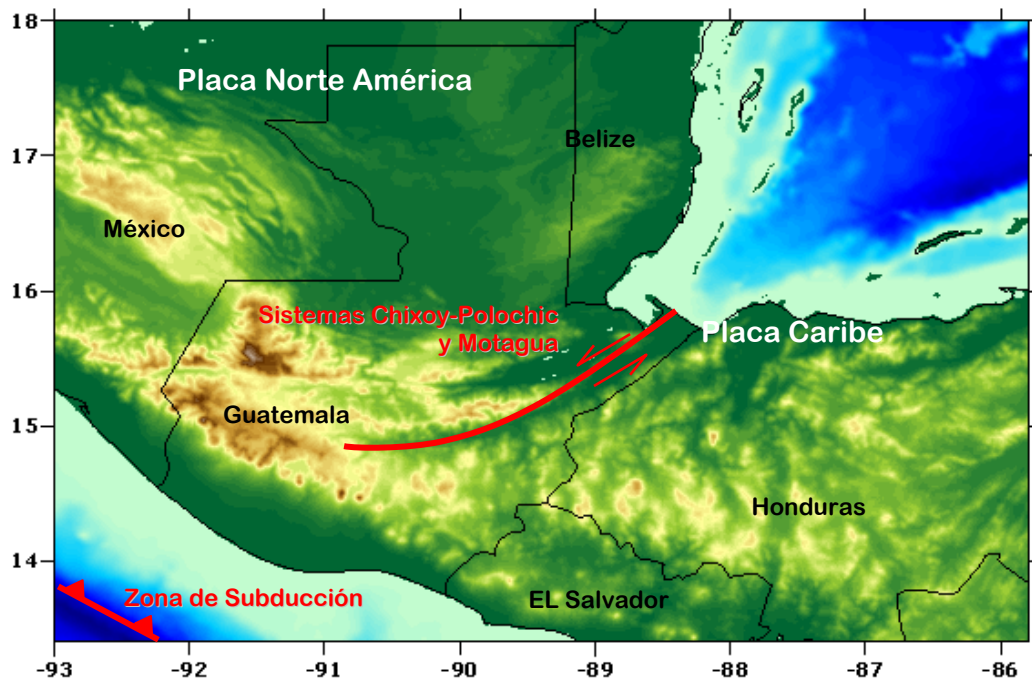


Figura 1-1
Entorno sismotectónico de Guatemala

1.3 Información empleada en la modelación

1.3.1 Catálogo sísmico

Se trabajó con un catálogo sísmico regional (RESIS II), compilado a partir de catálogos individuales recopilados del Centro sismológico para América Central (CASC), y catálogos nacionales de Guatemala, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica y Panamá, el cual cuenta con 29.918 sismos de magnitud M_w igual o superior a 3.5. La Figura 1-2 presenta el catálogo de eventos total para el proyecto RESIS II.

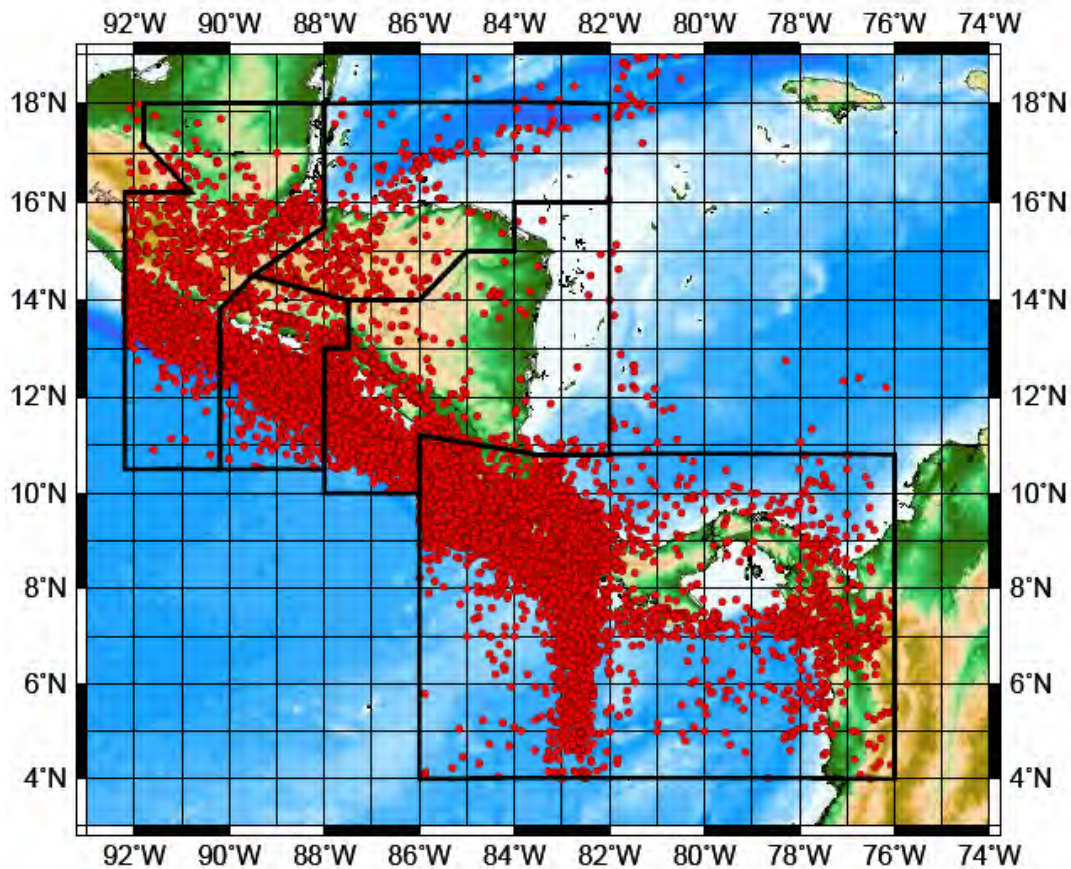


Figura 1-2

Catálogo sísmico regional del proyecto RESIS II

(Tomado de Proyecto RESIS II Evaluación de la Amenaza Sísmica en Centroamérica, 2008)

1.3.2 Parámetros de sismicidad

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. Estos parámetros son los siguientes:

- 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: se estima con base en la máxima longitud de ruptura posible de cada una de las fuentes y en otras características morfotectónicas.

- Tasa de recurrencia de sismos con magnitud mayor que 4.5: corresponde al número promedio de eventos por año de sismos con magnitud mayor que 4.5 que ocurren en una determinada fuente.

1.3.3 Fuentes sísmicas empleadas

El modelo de cálculo de la amenaza sísmica se basa en la información de fuentes sísmogénicas a nivel regional. Los parámetros de las fuentes sísmicas nacionales son los mismos que los determinados en el estudio RESIS II. El modelo de amenaza sísmica queda conformado por 53 fuentes regionales, 37 de las cuales son de tipo cortical, y 16 profundas. En la Tabla 1-1 se presentan los parámetros de caracterización de las fuentes empleadas en el presente estudio. En la Figura 1-3, Figura 1-4, y Figura 1-5 se presenta la distribución geográfica de las fuentes sísmogénicas a nivel regional.

Tabla 1-1
Parámetros de sismicidad de las fuentes.
(Se resaltan las fuentes particulares de Guatemala)

Nombre zona	Código	Prof (Km)	λ_0	β	Mu	Mo
Guat. Pacífico Ctral.	G1	20	3.51	2.05	7.5	4.5
Guat-El.Salv.Antearco.Ctrl	G2-S2	20	1.6	2.22	6.3	4.5
Guat. Acrc.Volc.Oeste	G3	10	0.18	1.35	6.7	4.5
Guat. Arc.Volc.Este	G4	10	0.65	1.63	7	4.5
Guat-Sal-Hon. Depresión ctral.	G5-S5-H1	10	0.97	1.94	6.8	4.5
Guat. Polich-Motagua Oeste	G6	10	1.32	1.88	7.8	4.5
Guat. Poloch-Motagoa NE	G7	10	0.93	1.8	7.8	4.5
Guat. Norte (Peten-Belice)	G8	10	0.75	1.71	6.7	4.5
Hond. Altiplano Central	H2	10	0.73	2.62	6.3	4.5
Hond-Nic.Zona Gayape	H3-N11	10	0.36	2.38	6.3	4.5
El Salv.Pacífico Central	S1	20	9.77	3.42	7.5	4.5
El Salv. Arco Volcánico ctral.	S3	10	1.18	1.92	7	4.5
Salv.Nic.ArcVolc (G.Fonsec)	S4-N5-H4	10	0.52	2.11	6.6	4.5
Nic. Pacífico Oeste	N1	10	13.73	2.67	8	4.5
Nic. Pacíf. SE- CR Papagayo	N2-C1	20	25.03	3.28	7.4	4.5
Nic. Antearco Oeste	N3	20	1.35	1.96	6.8	4.5
Nic. Antearco Este	N4	20	1.05	3.42	6.8	4.5
Nic. Arco Volc. O-Ctral	N6-N7	10	1.68	2.07	6.5	4.5
Nic. Arco Volc. SE	N8	10	0.27	1.4	6.8	4.5
Nic. Depres. Tras Arco	N9-N10	10	0.24	0.97	6.8	4.5
Nic. Caribe Sur	N12	10	0.44	2.53	6.2	4.5
Nic. Caribe Noroeste	N13-N14	10	0.57	2.2	6.2	4.5
CR. Antearco Noroeste	C2	20	2.2	2.27	7.2	4.5
CR. Ante Acto Pac. Ctral.	C3	15	4.56	2.11	7.3	4.5
Pan-CR.ZFP-Burica	P1-C4	5	19.61	2.37	7.5	4.5
CR. Arc.Voc.Guanacaste	C5	10	1	2.04	6.6	4.5

CR. Cord. Volc. Ctral	C6	10	1.09	2.02	7.1	4.5
CR-Talamanca.	C7	10	2.76	2.73	7.1	4.5
CR. Trascarco Norte	C9	10	0.25	1.99	6.3	4.5
CR. Carib.Ctral-Parismina	C10	20	0.44	2.41	6.2	4.5
Pan. Cint.Def.Sur-Pan	P2	10	2.97	2.05	7.1	4.5
Pan. Antearo Colombia	P3	20	0.73	1.95	7	4.5
Pan. Zona de Sutura Atrato	P4	10	1.93	2.2	7.2	4.5
Pan Occidental	P5	10	0.89	3.12	6.5	4.5
Pan. Central	P6	10	0.08	2.23	6.7	4.5
Pan. Este-Daríen	P7	10	1.12	1.61	7.4	4.5
Pan.Cint.Def.N.Pan-Limón	P8-C8	15	2.6	1.94	7.8	4.5
Guat. Interplaca	Gsi9	26 -70	2.14	1.89	7.9	4.5
El Salv. Interplaca	Ssi5	26 -70	3.93	2.27	7.9	4.5
Nic.Interplaca Noroeste	Nsi15	26 -70	4.32	3.09	7.9	4.5
Nic. Interplaca Sureste	Nsi16	26 -70	1.94	1.8	7.9	4.5
CR. Interplaca Nicoya	Csi11	26 -63	0.38	1.14	7.8	4.5
CR. Interplaca Quepos	Csi12	26 -51	0.65	2	7	4.5
CR. Interplaca Osa	Csi13	26 -52	0.14	1.02	7.4	4.5
Pan. Interplaca Sur.Pan	Psi9	26 -50	0.58	2.08	7.1	4.5
Pan.InterpS.Blas.Daríen -Chocó	Psi10	50 Fijo	1.16	1.72	7.5	4.5
Guat. Intraplaca	Gsp10	61- 250	5	2.11	7.9	4.5
El Salv. Intraplaca	Ssp6	61- 200	4.49	2.4	7.9	4.5
Nic. Intraplaca	Nsp17	61- 200	13.76	2.78	7.3	4.5
CR. Intraplaca NW	Csp14	40- 177	0.98	2.42	7	4.5
CR. Intraplaca Central	Csp15	40- 155	0.54	1.56	7.4	4.5
CR. Intraplaca SE	Csp16	40- 82	0.11	1.45	6.8	4.5
Pan. Intraplaca Sur	Psp11	50- 100	0.14	1.2	7.1	4.5

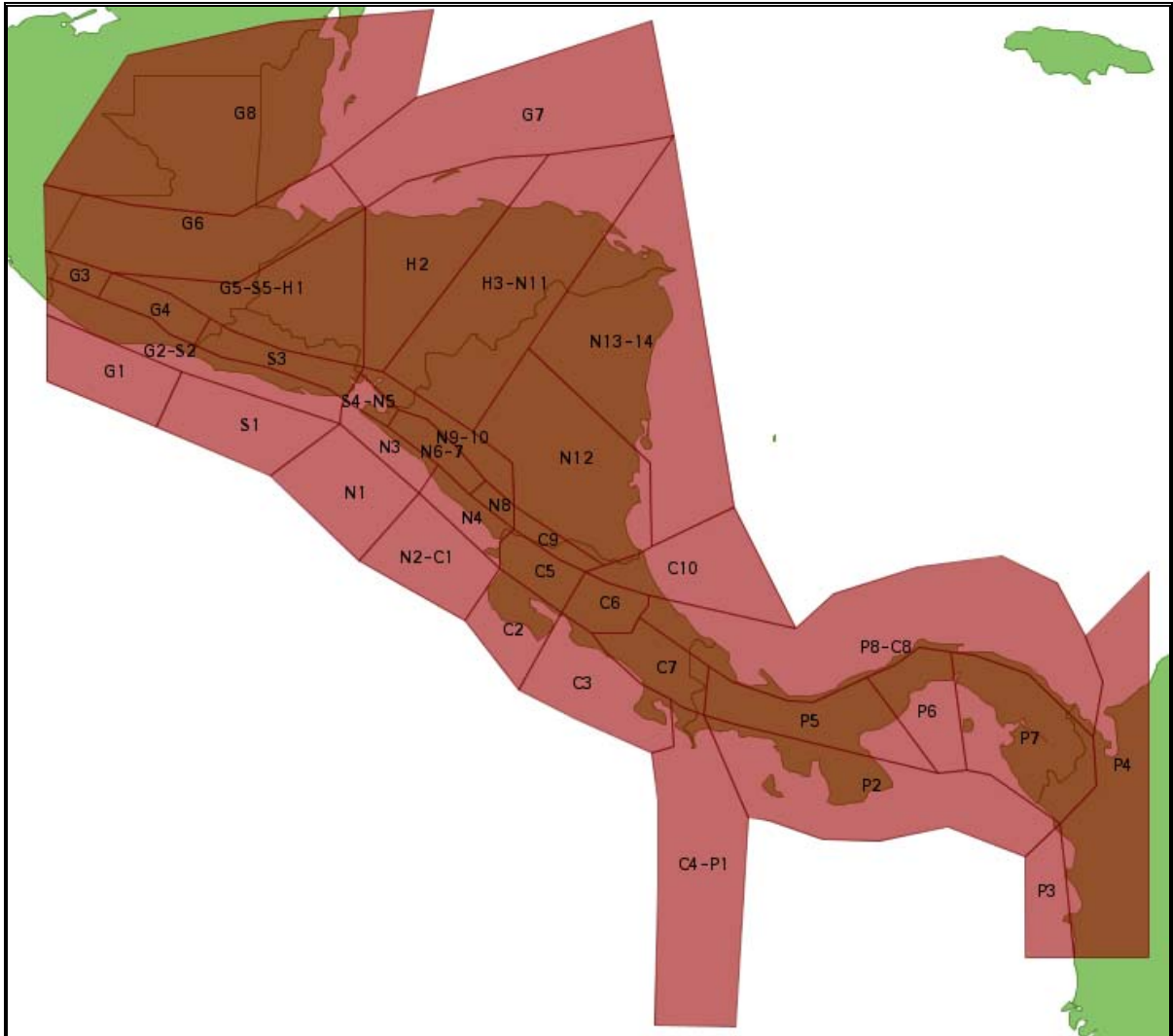


Figura 1-3
Fuentes de tipo cortical. Proyecto RESIS II



Figura 1-4
Fuentes de tipo interfase. Proyecto RESIS II



Figura 1-5
Fuentes de tipo intraplaca. Proyecto RESIS II

1.3.4 Modelo de atenuación de movimiento fuerte

Como modelo de atenuación de ondas sísmicas se adoptaron los modelos empleados en el proyecto RESIS II, los cuales son el propuesto por Climent et al. 1994 para sismos corticales, y el propuesto por Youngs et.al. para sismos de interfase e intraplaca profundos.

El modelo de Climent et.al. 1994 fue desarrollado a partir de registros acelerográficos de sismos ocurridos en la región y otras regiones tectónicamente similares. La función de atenuación se basa en la siguiente ecuación general.

$$\ln A = c_1 + c_2 M + c_3 \ln R + c_4 R + c_5 S \quad (\text{Ec. 1})$$

donde M es magnitud de momento, R es la distancia hipocentral, y S es un factor de suelo, que vale cero para sitios en roca y 1 para sitios en suelo blando. Los coeficientes c se definen como se muestra en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2
Coefficientes del modelo de atenuación de Climent et al. 1994

A	T [seg]	c1	c2	c3	c4	c5	σ
PSV	4	-7.441	1.007	-0.601	-0.0004	0.496	0.73
PSV	2	-7.348	1.128	-0.728	-0.00053	0.536	0.79
PSV	1	-6.744	1.081	-0.756	-0.00077	0.588	0.82
PSV	0.5	-5.862	0.917	-0.726	-0.00107	0.566	0.82
PSV	0.2	-4.876	0.642	-0.642	-0.00156	0.47	0.82
PSV	0.1	-4.726	0.483	-0.581	-0.00199	0.381	0.8
PSV	0.05	-5.487	0.447	-0.55	-0.00246	0.309	0.78
PGA		-1.687	0.553	-0.537	-0.00302	0.327	0.75

1.4 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 grilla de cálculo de tamaño arbitrario. La excesiva refinación de la grilla no implica necesariamente una mejora en los resultados. La resolución de la grilla 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 grilla de cálculo empleada. Todos los resultados de amenaza quedan expresados como valores puntuales en cada uno de los nodos de la grilla. La resolución final de la amenaza corresponde al tamaño de la grilla 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.

1.5 Mapas de amenaza sísmica para Guatemala

Se calculó la amenaza sísmica de Guatemala para varios periodos estructurales y varios periodos de retorno. Los mapas de amenaza uniforme 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 periodo 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.

A continuación se presentan los mapas de amenaza calculados para Guatemala, para aceleración máxima del terreno (PGA), y aceleración espectral para periodo estructural de 1 segundo, para periodos de retorno de 500, 1000 y 2500 años. Los cálculos fueron realizados empleando el programa CRISIS 2007 (Ordaz et. al. 2007)

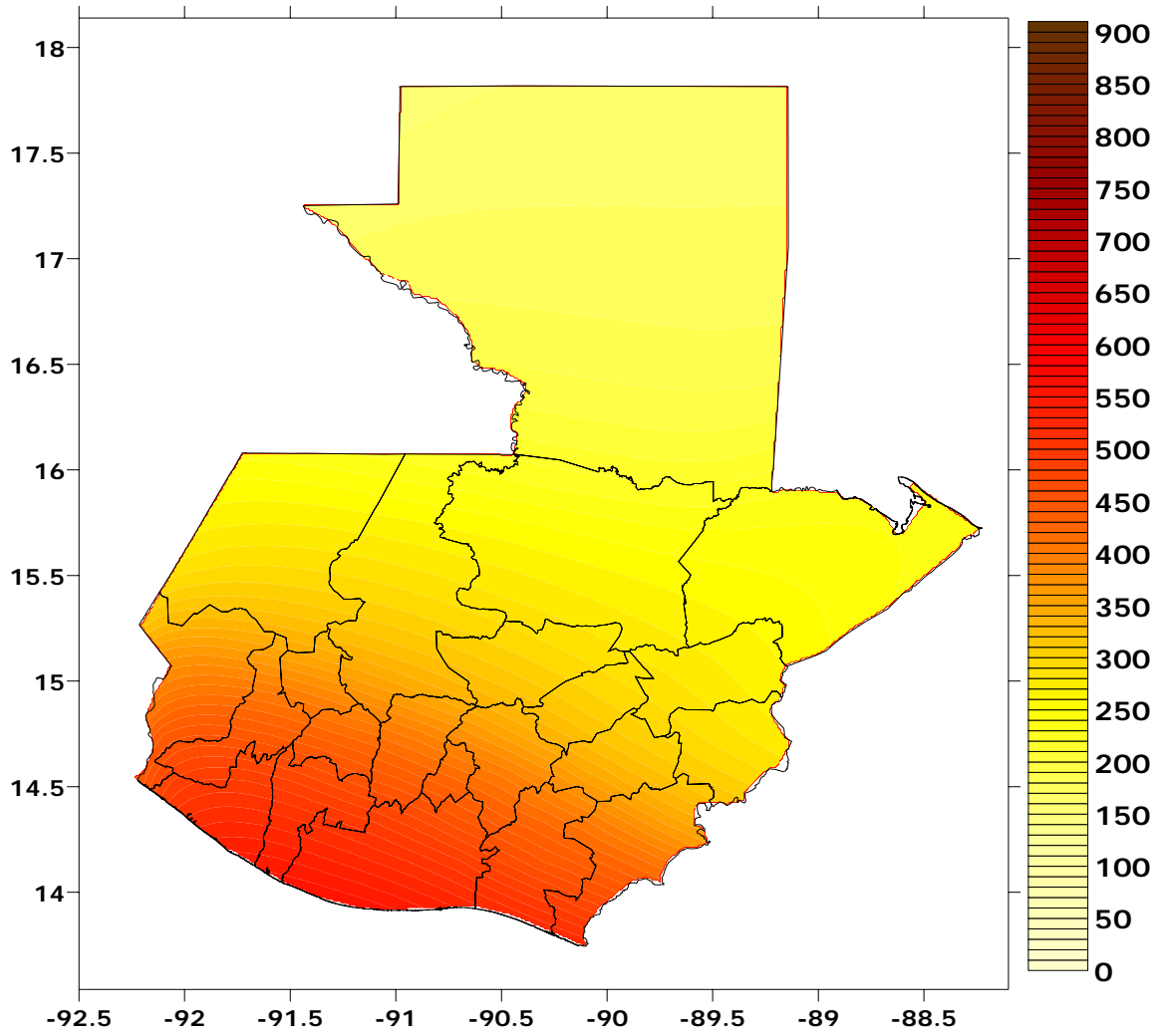


Figura 1-6
Mapa de distribución espacial de PGA [cm/s²] para 500 años de periodo de retorno

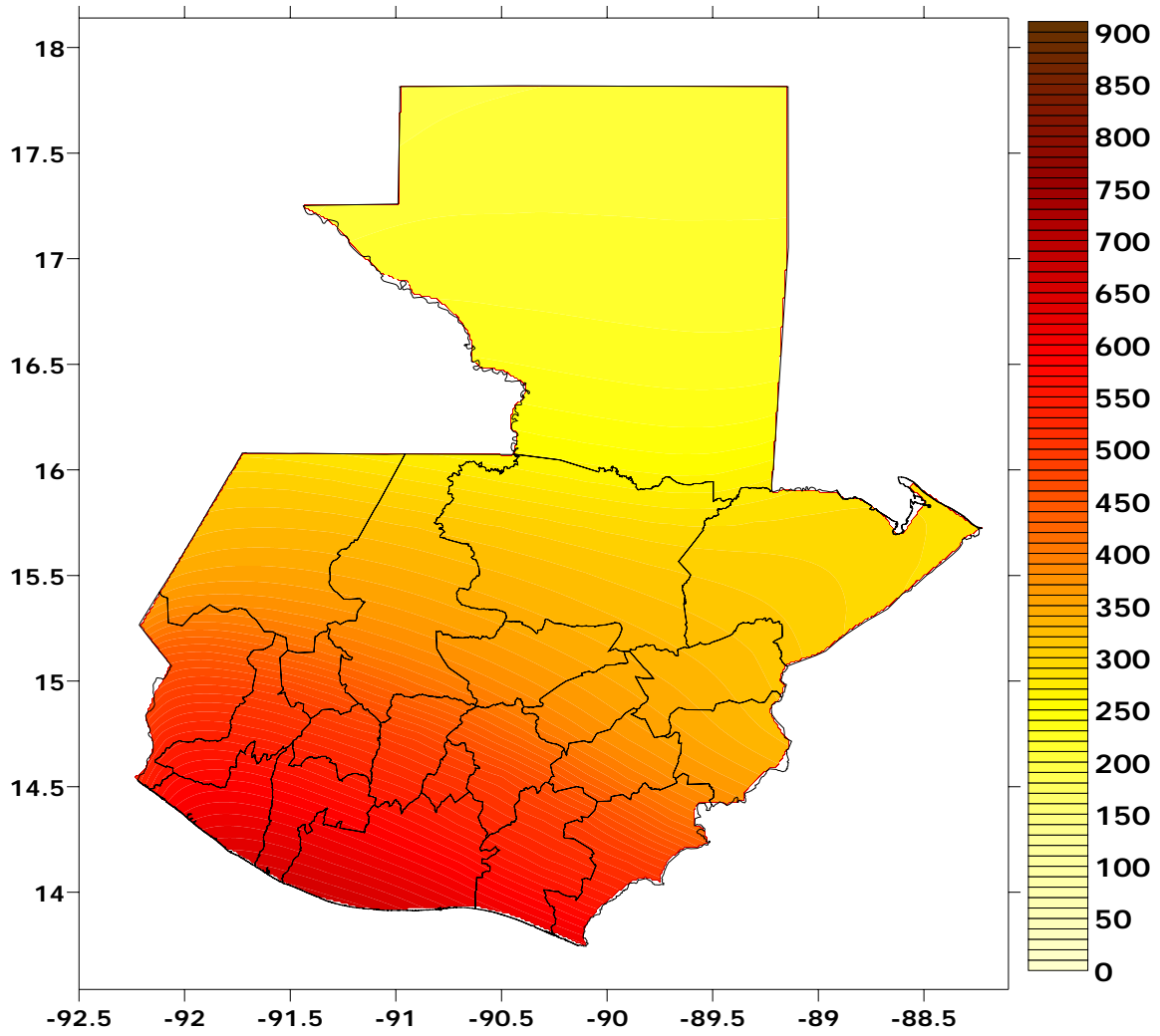


Figura 1-7
Mapa de distribución espacial de PGA [cm/s²] para 1000 años de periodo de retorno

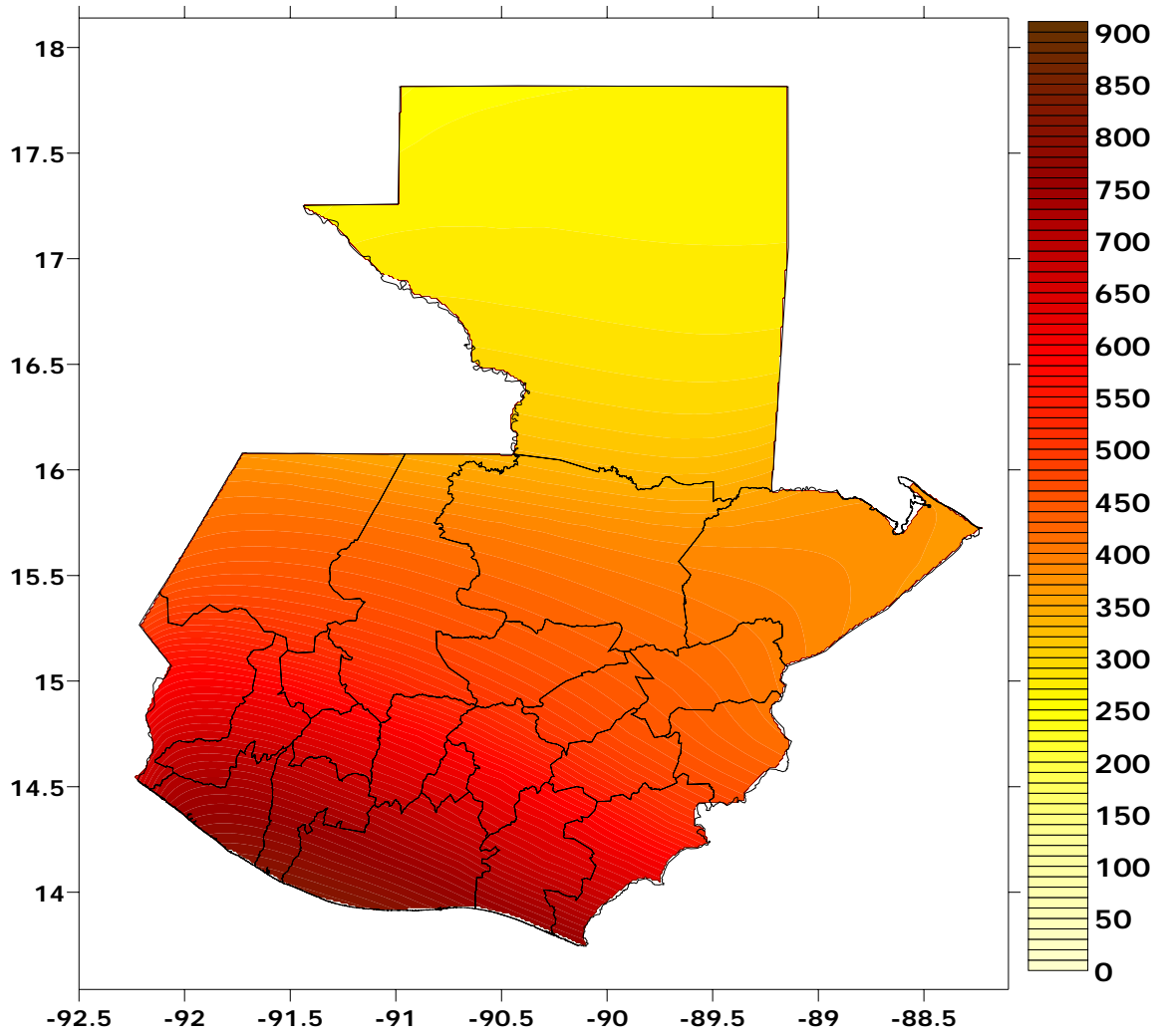


Figura 1-8
Mapa de distribución espacial de PGA [cm/s²] para 2500 años de periodo de retorno

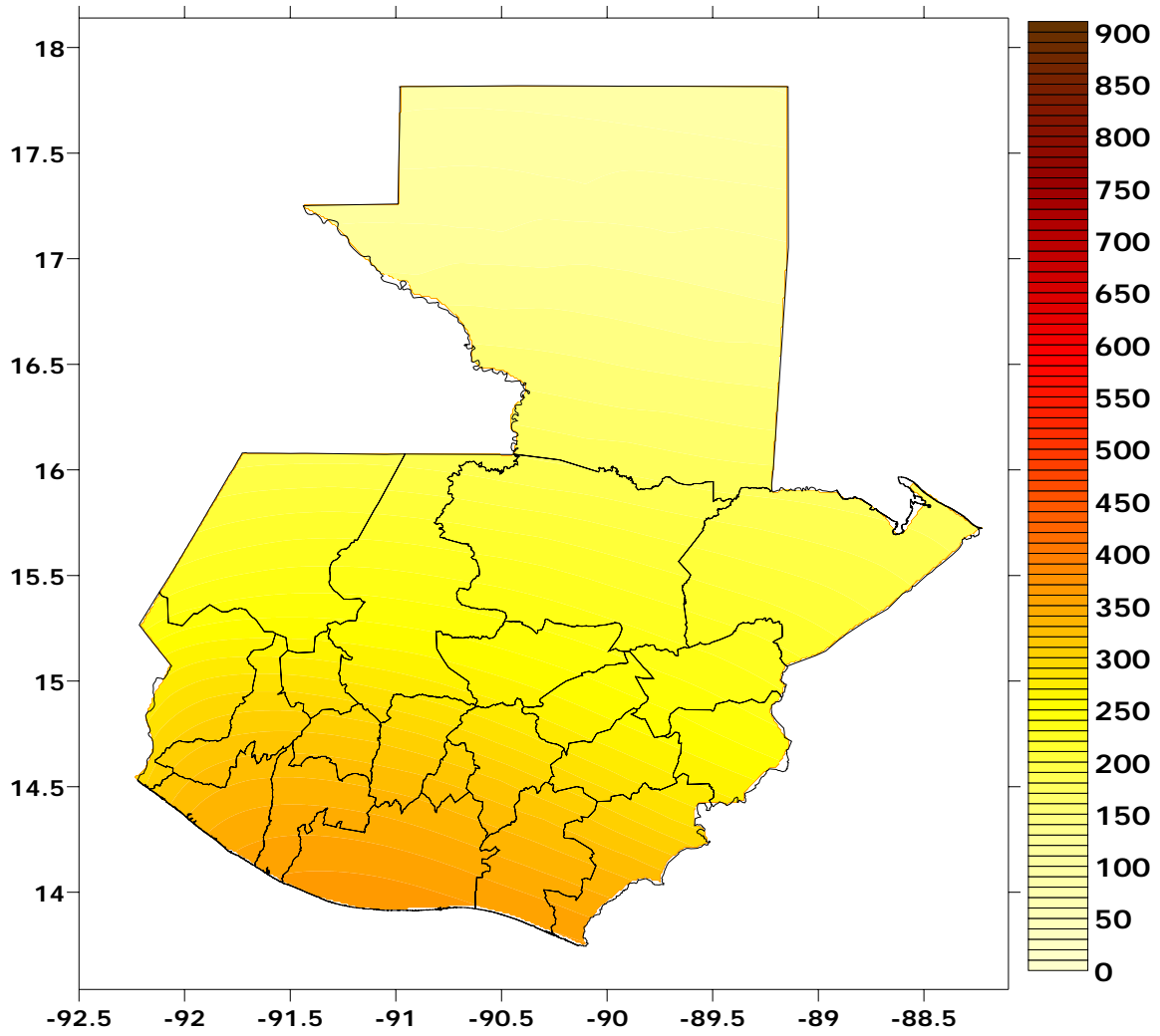


Figura 1-9
Mapa de distribución espacial de $S_a(T=1\text{seg})$ [cm/s^2] para 500 años de periodo de retorno

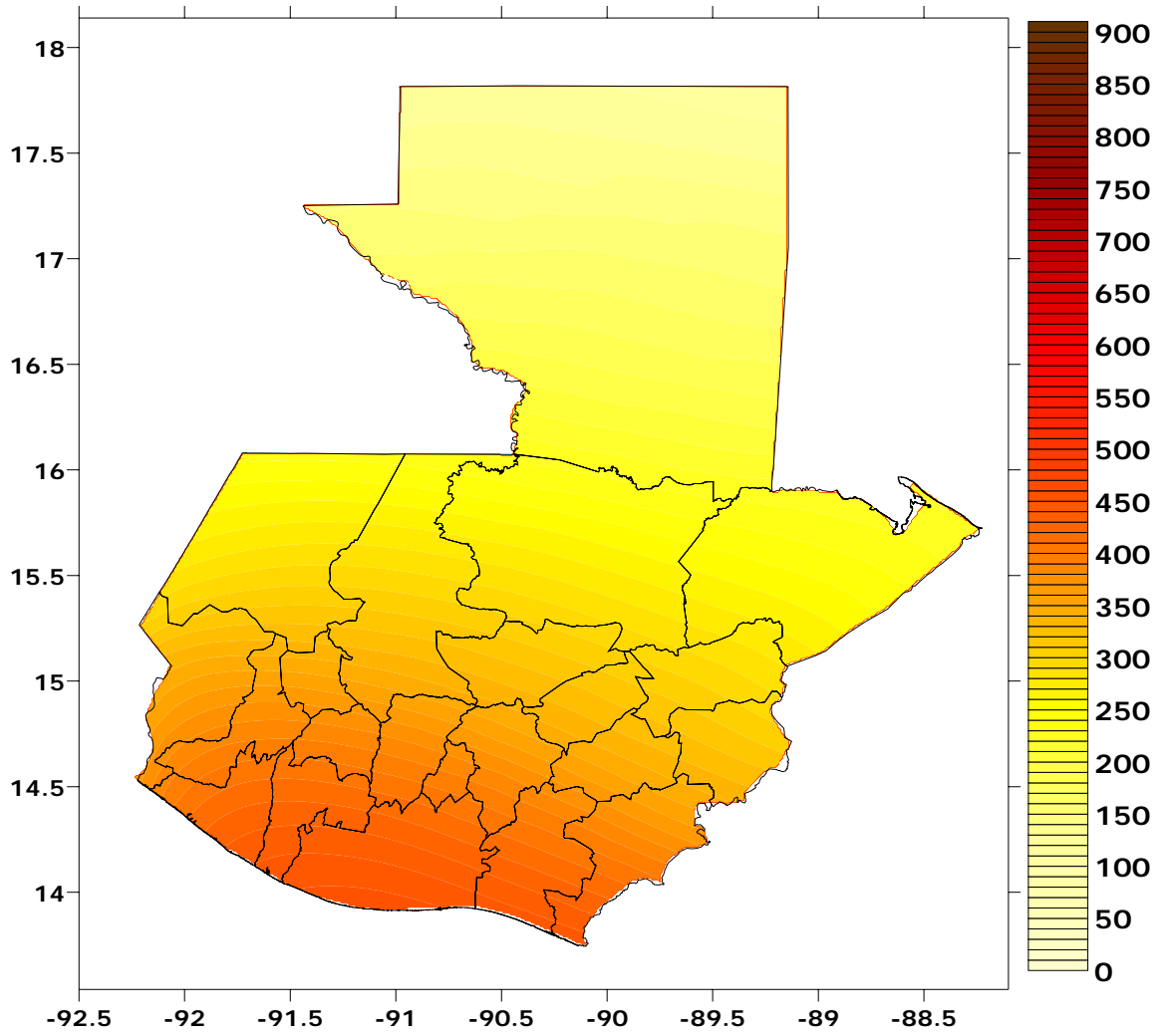


Figura 1-10
Mapa de distribución espacial de $S_a(T=1\text{seg})$ [cm/s^2] para 1000 años de periodo de retorno

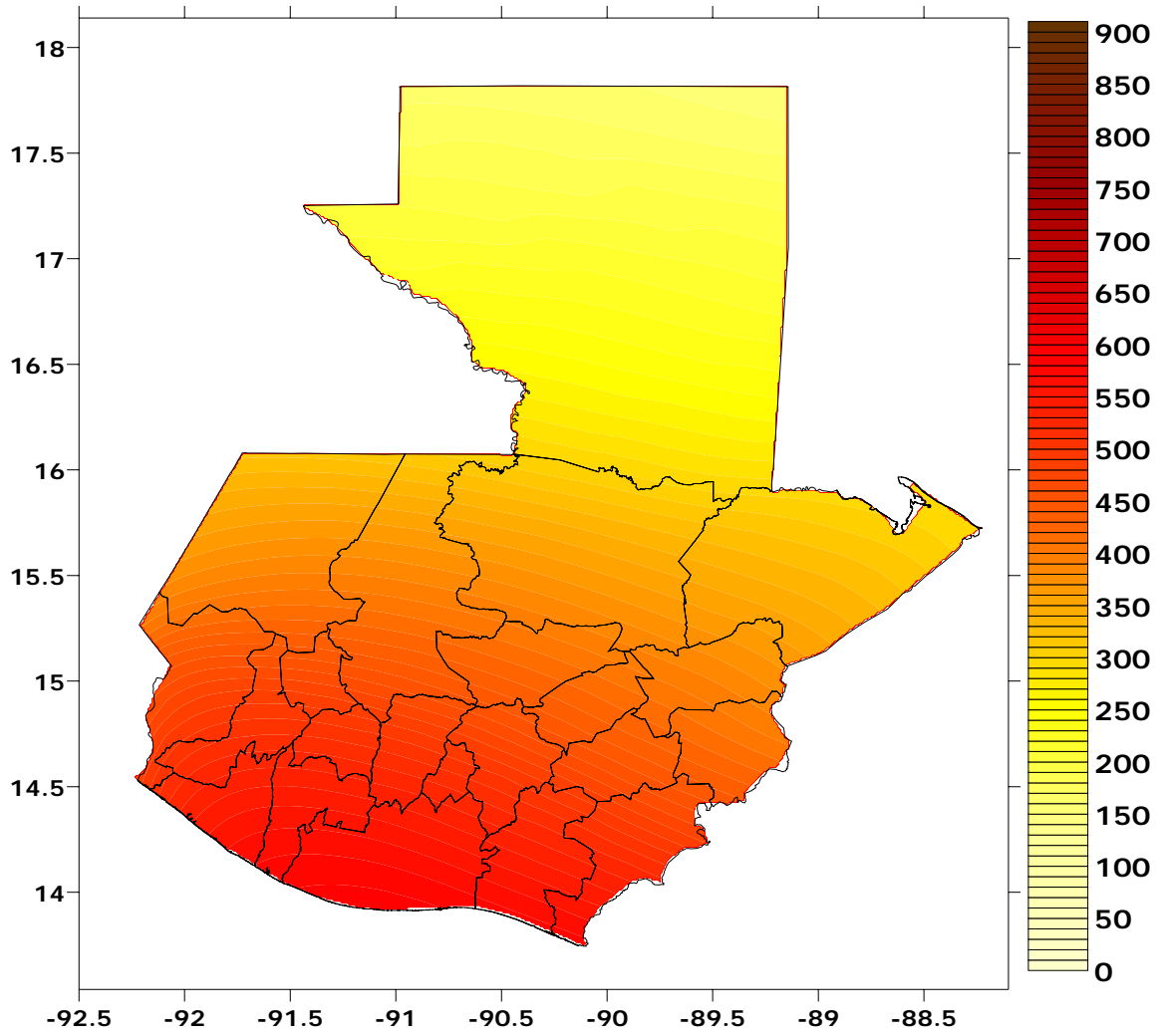


Figura 1-11

Mapa de distribución espacial de $S_a(T=1\text{seg})$ [cm/s^2] para 2500 años de periodo de retorno

2 Amenaza por tsunami

2.1 Introducción

Los tsunamis están directamente asociados a la actividad tectónica de la zona de subducción del Pacífico y de deslizamiento del Caribe en las costas guatemaltecas. Las condiciones propias de esta zona de interacción de placas, implican el potencial de generación de sismos altamente destructivos en el Pacífico, de magnitudes mayores a 7, y mecanismos de ruptura particulares en la zona de subducción que pueden genera un desnivel importante y relativamente repentino en el fondo del lecho marino, condición ideal de detonación de tsunami. En el Caribe se pueden tener sismos medianamente destructivos con magnitudes mayores a 6.

La generación de tsunami puede presentarse en cualquier punto a lo largo de la costa Pacífica y del Caribe de Centroamérica. El impacto de un tsunami particular depende en gran medida de las condiciones batimétricas y topográficas locales, así como de la localización exacta de la población o infraestructura expuesta con relación a la costa, y su vulnerabilidad a este tipo de amenaza.

El análisis de amenaza por tsunami se realiza en dos pasos principales. Inicialmente se definen las condiciones de *generación*, las cuales están asociadas a las tasas de ocurrencia de terremotos de magnitud alta en la subducción. Los sismos que detonen un tsunami serán aquellos que induzcan un levantamiento significativo del lecho marino. Una vez se conocen las condiciones de generación, se analiza la *propagación y arribo* del tsunami, fenómeno que está asociado al desplazamiento de las ondas gravitacionales por el océano, y la modificación de sus características de arribo en función de características batimétricas locales.

2.2 Información empleada en la modelación

2.2.1 Batimetría y topografía

La batimetría y topografía costera definen la manera como se verá amplificada la amplitud de la ola, o *Run-up*, con el fin de calcular las condiciones particulares de impacto del tsunami. Se empleo un modelo digital de batimetría con una resolución de 1 minuto, lo cual corresponde a un tamaño de píxel de 1.8 kilómetros. La información se obtuvo de la base de datos ETOPO1 Global Relief Model (2009), de la agencia estadounidense NOAA. La Figura 2-1 presenta el modelo digital de elevación empleado.

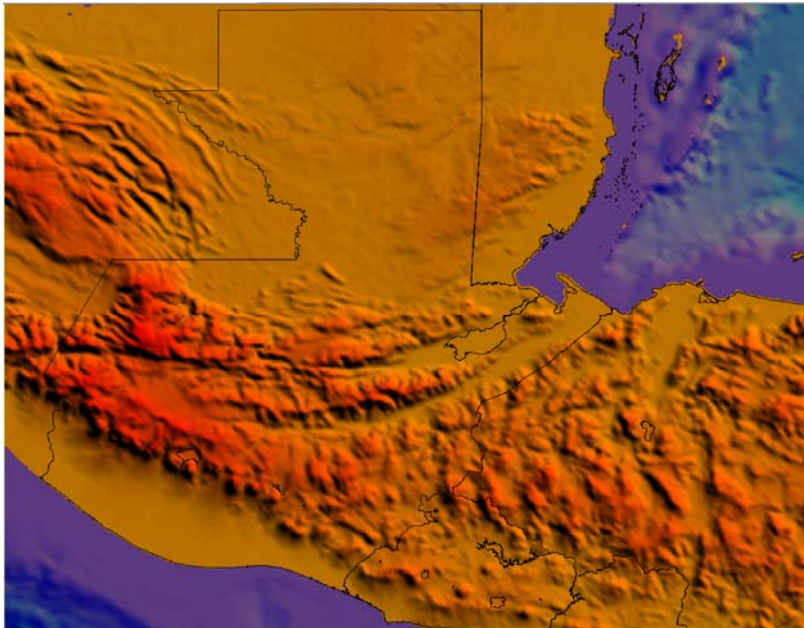


Figura 2-1
Imagen de la batimetría empleada para el modelo de tsunami en Guatemala.

Se empleó un modelo digital de topografía con una resolución de 30 metros. La información se obtuvo de la base de datos ASTER Global Digital Elevation Model (2009), de la agencia estadounidense NASA. La Figura 2-2 presenta el modelo digital de elevación empleado.

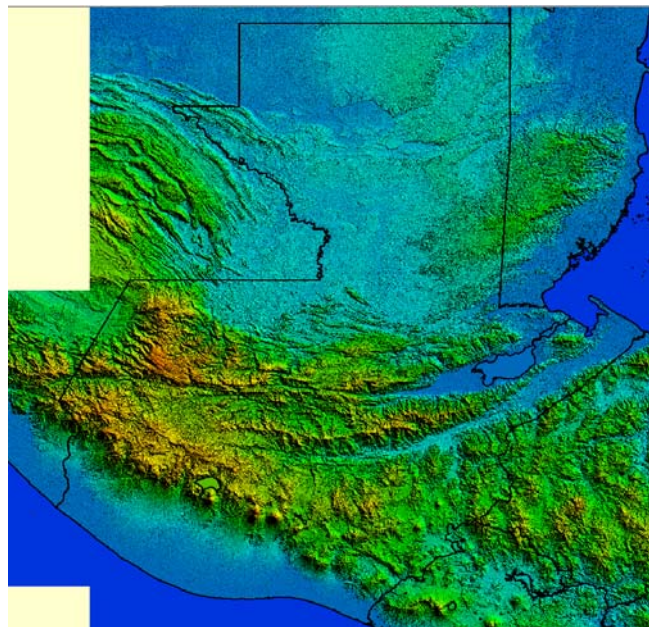


Figura 2-2
Imagen de la topografía empleada para el modelo de tsunami en Guatemala.

2.3 Parámetros del modelo

Con el fin de automatizar el proceso de cálculo, fue necesario precalcular las alturas de ola debido a cada uno de los escenarios.

2.3.1 Eventos

El modelo considera la presencia de un número suficiente de sismos con magnitudes de 6 a 8.2 grados los cuales representan sismos históricos y postulados obtenidos con el módulo CAPRA de amenaza sísmica. Las frecuencias de recurrencia de cada escenario se asignan de acuerdo a la actividad sísmica de la región. La modelación de la componente sísmica del análisis se realiza empleando el módulo CAPRA de amenaza sísmica *CRISIS 2007*.

2.3.2 Puntos de cálculo y efectos en bahías

Se eligieron 111 puntos en el Pacífico y 200 en el Caribe sobre las costas guatemaltecas para estimar las alturas máximas de tsunami. La ubicación de estos puntos se muestra en la Figura 2-3. Para simular adecuadamente la altura del tsunami en la costa y su penetración tierra adentro, se requiere emplear un procedimiento aproximado a partir de la isóbata 100, el cual consiste en aplicar un factor de amplificación al tsunami aguas adentro para calcular la altura del tsunami al aproximarse a la costa. Este factor debe ingresarse junto con la lista de puntos de cálculo.

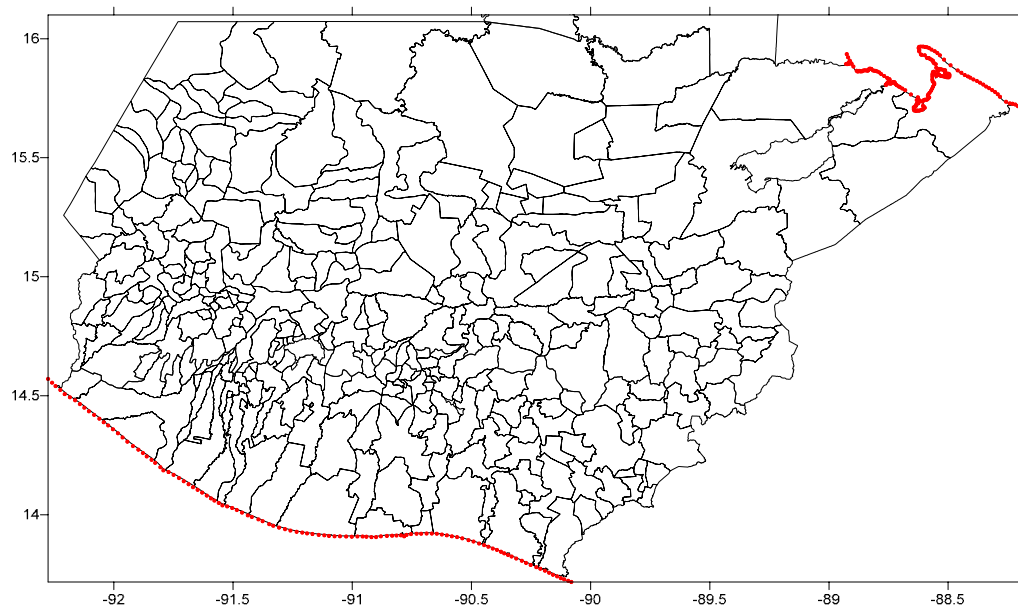


Figura 2-3
Puntos de cálculo para tsunami.

2.4 Calidad de los datos disponibles

La calidad y resolución de los datos disponibles se considera aceptable para análisis indicativos a nivel nacional. Un análisis detallado de amenaza por tsunami, empleando el modelo propuesto, requiere de información topográfica y batimétrica mayor de calidad y resolución. La resolución mínima deseable para la información topográfica es del orden de 5 metros, y para la batimétrica del orden de 90 metros. La resolución de la grilla de cálculo puede seleccionarse arbitrariamente, por lo que la resolución final de los resultados de amenaza depende exclusivamente de la resolución de la información de entrada al modelo, siempre y cuando se escoja una grilla de cálculo suficientemente fina.

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.

2.5 Mapas de amenaza por tsunami en la costa pacífica de Guatemala

Para la elaboración de los mapas se empleó la información mencionada anteriormente, y se asignó la frecuencia de ocurrencia de los diferentes escenarios, de acuerdo con la sismicidad propia de las fuentes generadoras. Se calcularon mapas de amenaza uniforme por tsunami, tomando como medida de intensidad el tirante de inundación, según lo explicado en el informe ERN-CAPRA-T1-2 (Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales y Selección, ERN 2009), y para periodos de retorno de 50, 100, 500 y 1000 años. Los cálculos fueron realizados empleando el programa CRISIS 2007 (Ordaz et. al. 2007).

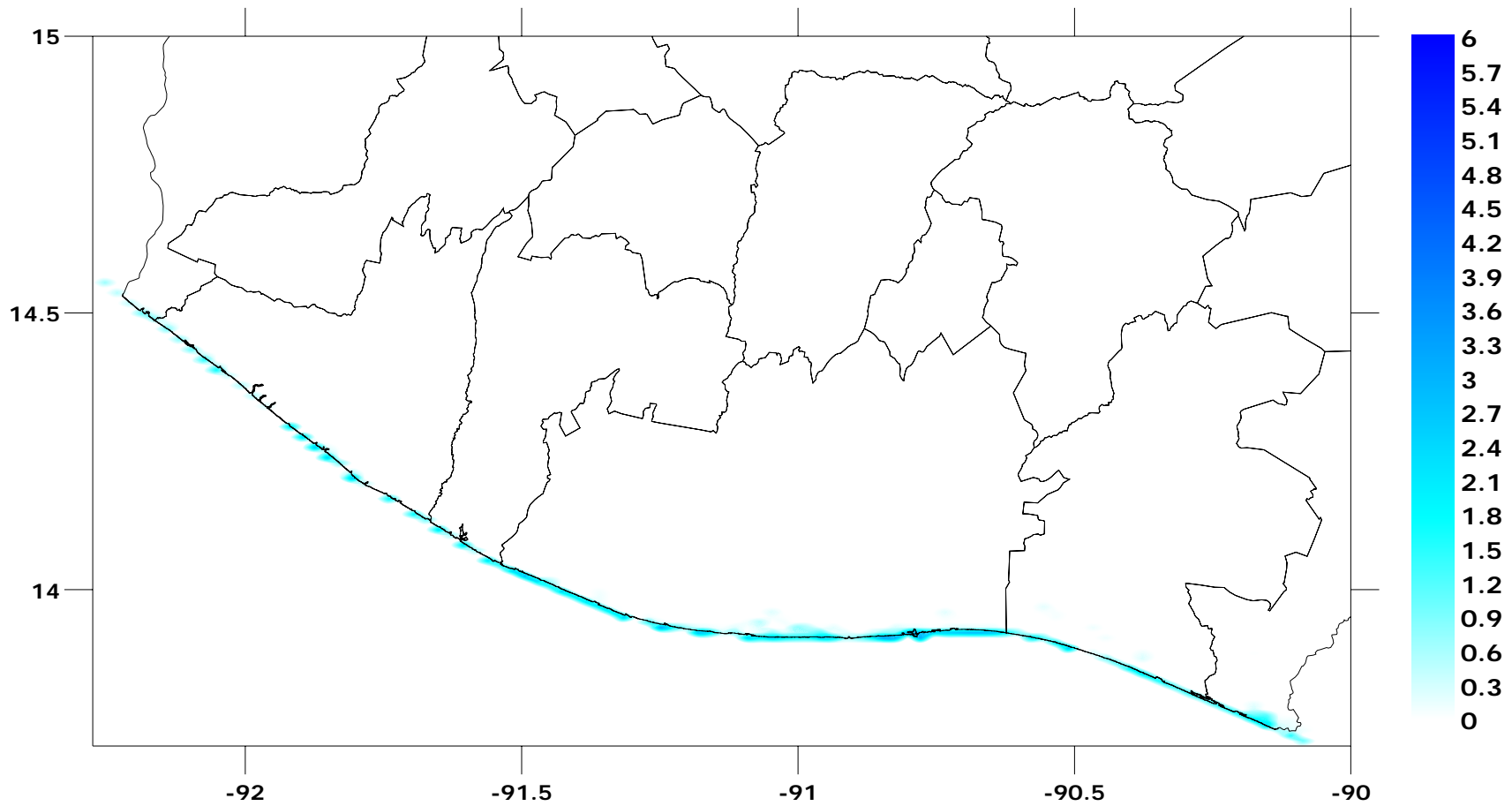


Figura 2-4
Mapa de distribución espacial de inundación [m] para 50 años de periodo de retorno

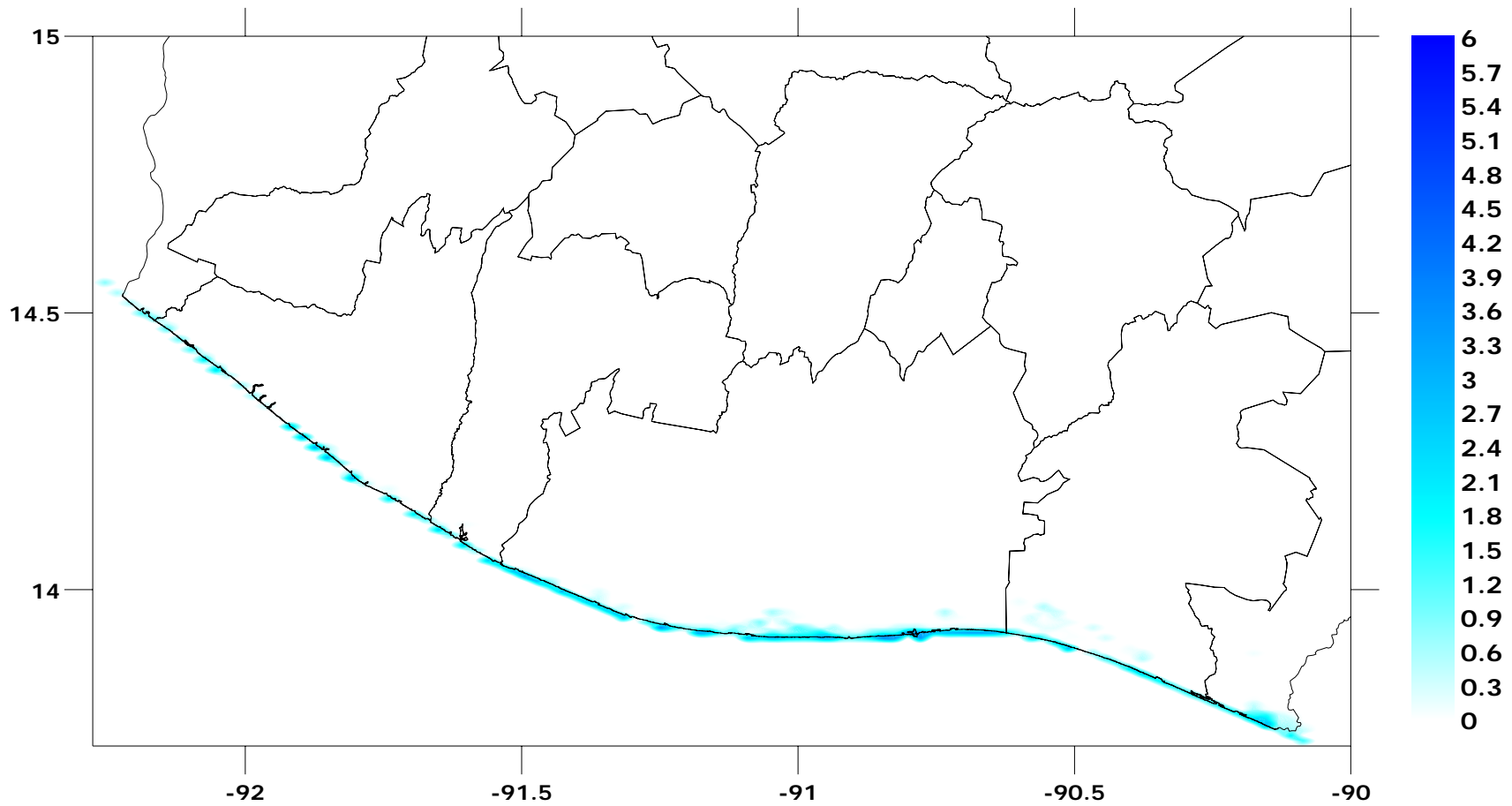


Figura 2-5
Mapa de distribución espacial de inundación [m] para 100 años de periodo de retorno

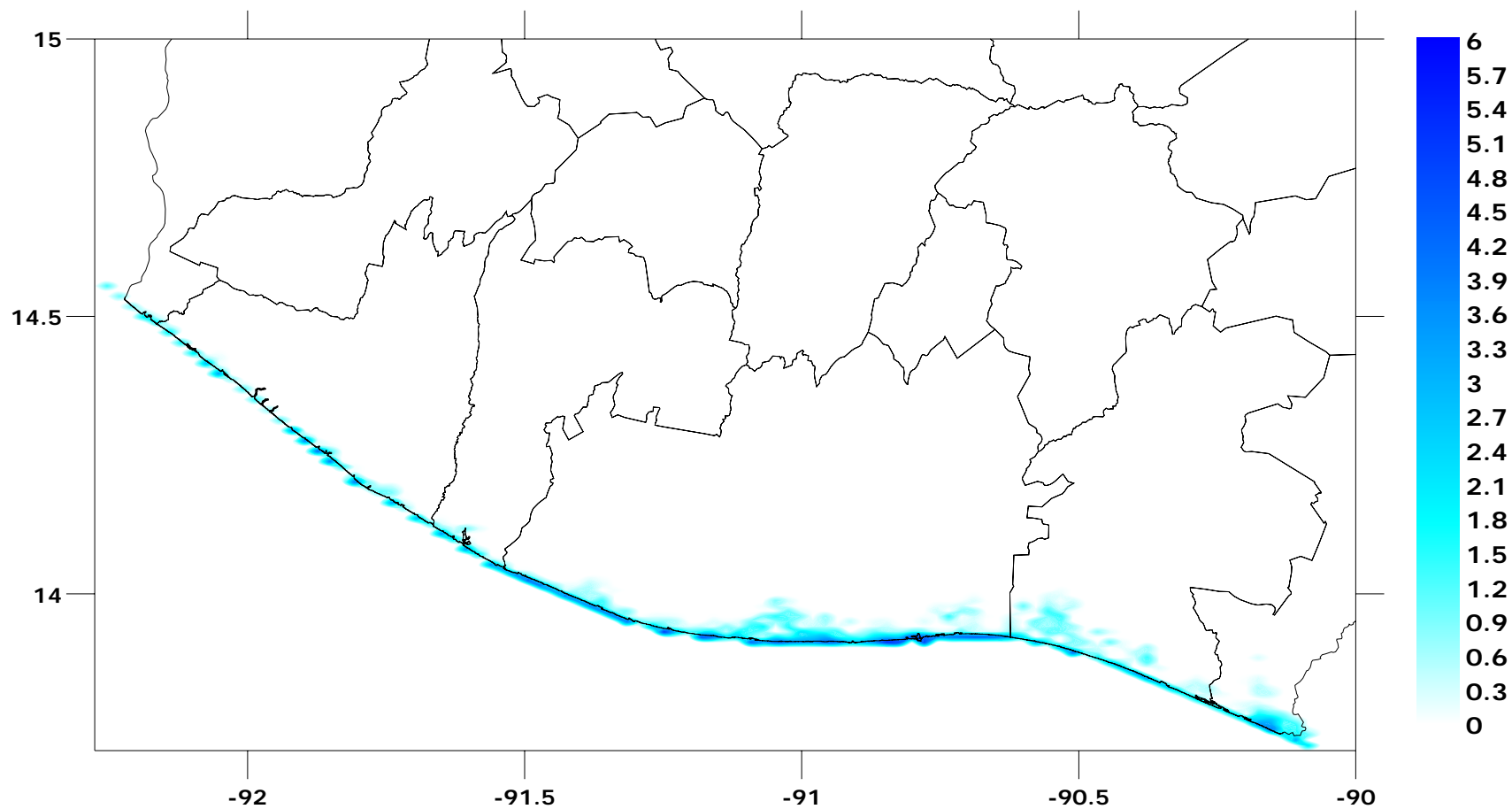


Figura 2-6
Mapa de distribución espacial de inundación [m] para 500 años de periodo de retorno

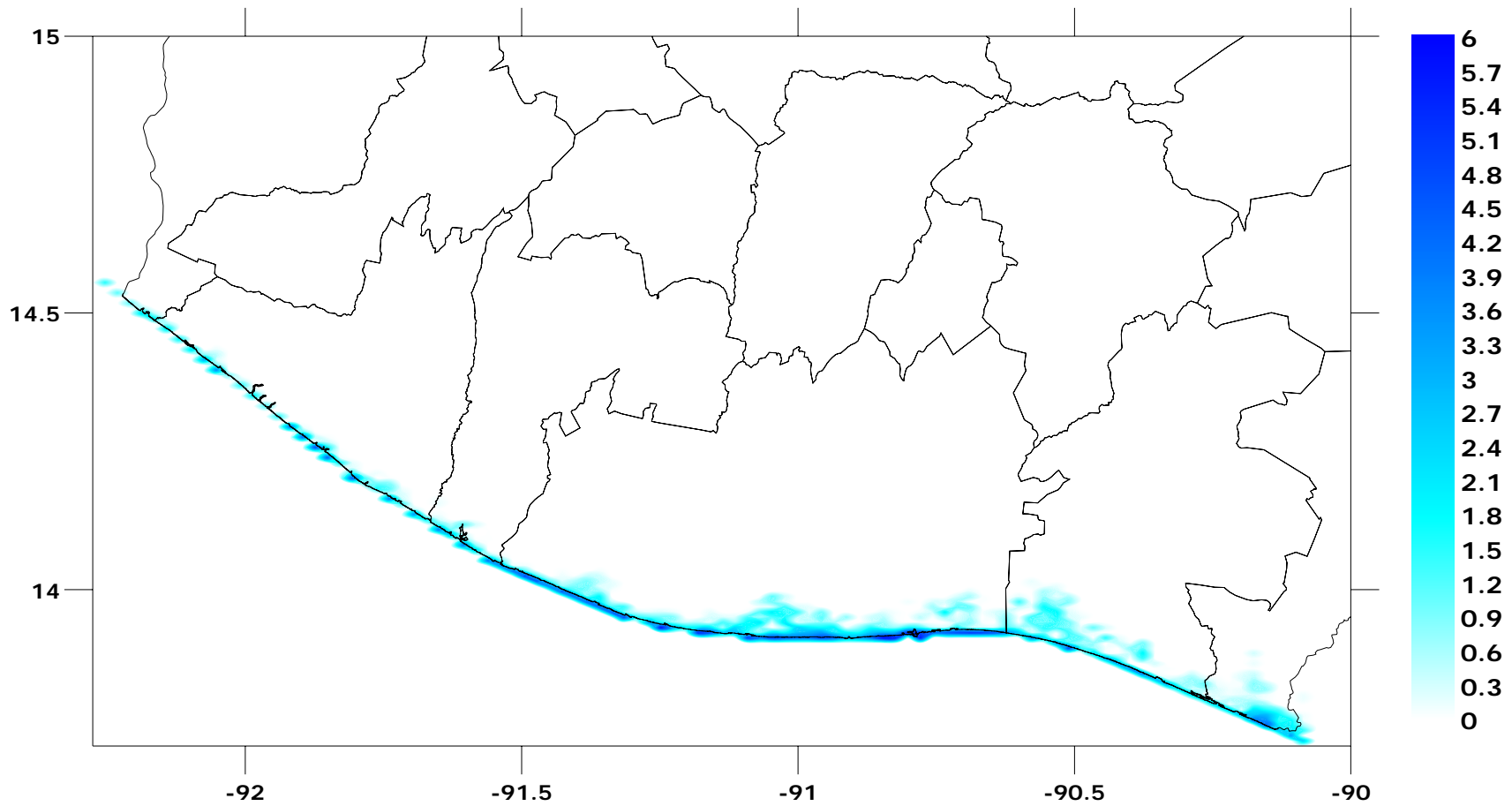


Figura 2-7
Mapa de distribución espacial de inundación [m] para 1000 años de periodo de retorno

2.6 Mapas de amenaza por tsunami en la costa atlántica de Guatemala

Para la elaboración de los mapas de amenaza por tsunami en la Costa Caribe, al igual que para la costa Pacífica, se empleó la información mencionada anteriormente, y se asignó la frecuencia de ocurrencia de los diferentes escenarios, de acuerdo con la sismicidad propia de las fuentes generadoras. Se calcularon mapas de amenaza uniforme por tsunami, para la misma intensidad y periodos de retorno que para la costa Pacífica. Los cálculos fueron realizados empleando el programa CRISIS 2007 (Ordaz et. al. 2007).

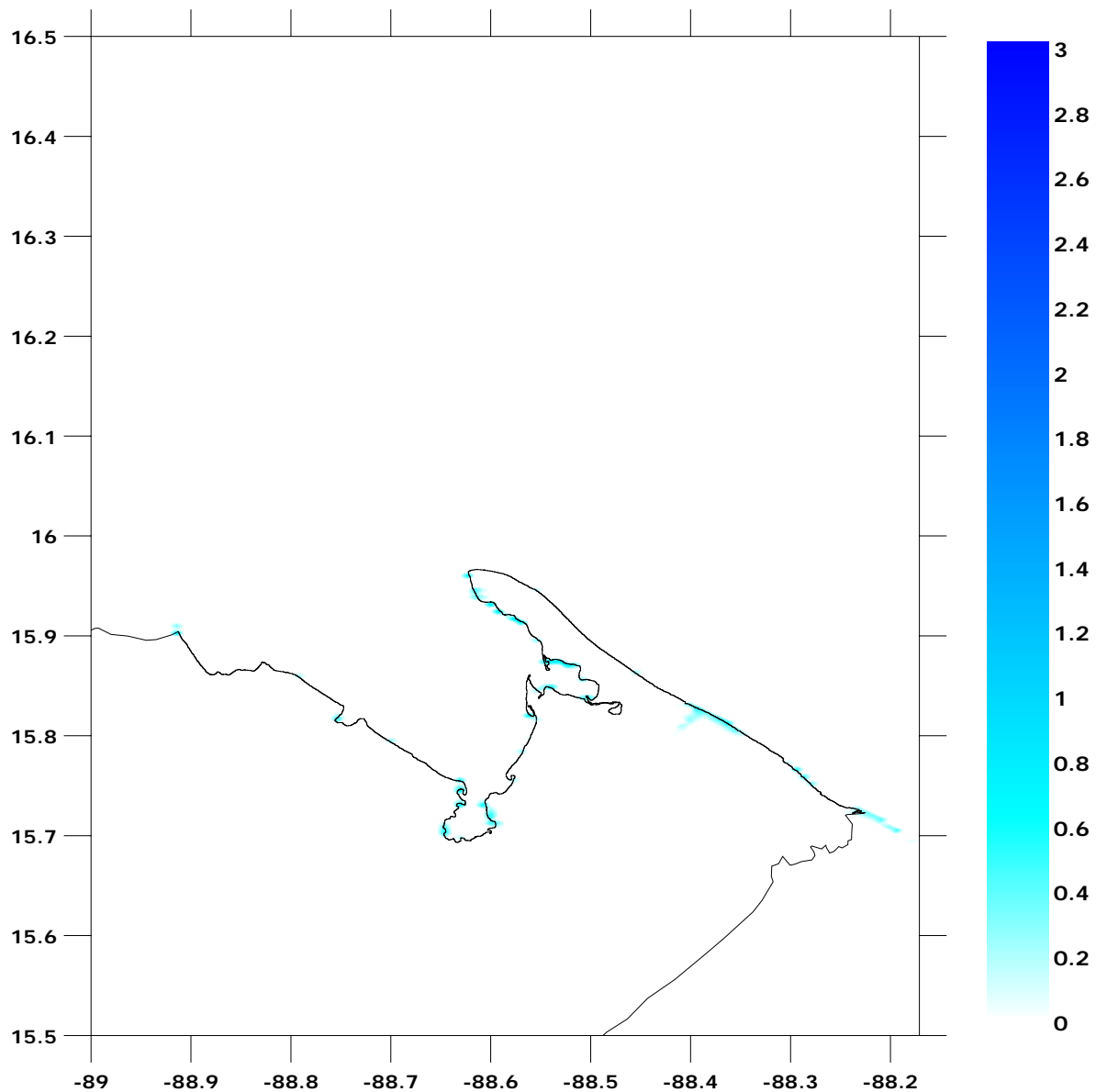


Figura 2-8
Mapa de distribución espacial de inundación [m] para 50 años de periodo de retorno

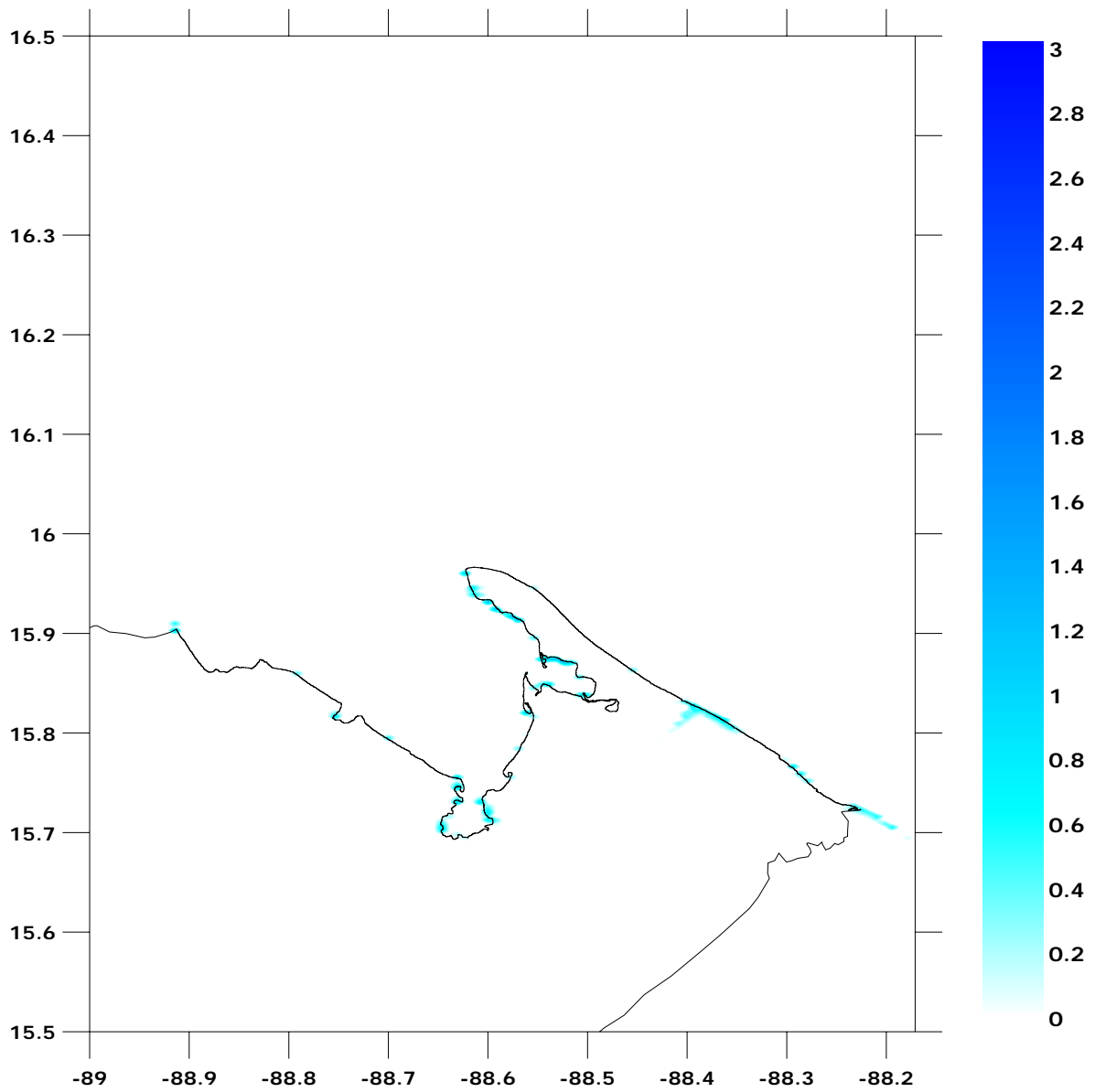


Figura 2-9
Mapa de distribución espacial de inundación [m] para 100 años de periodo de retorno

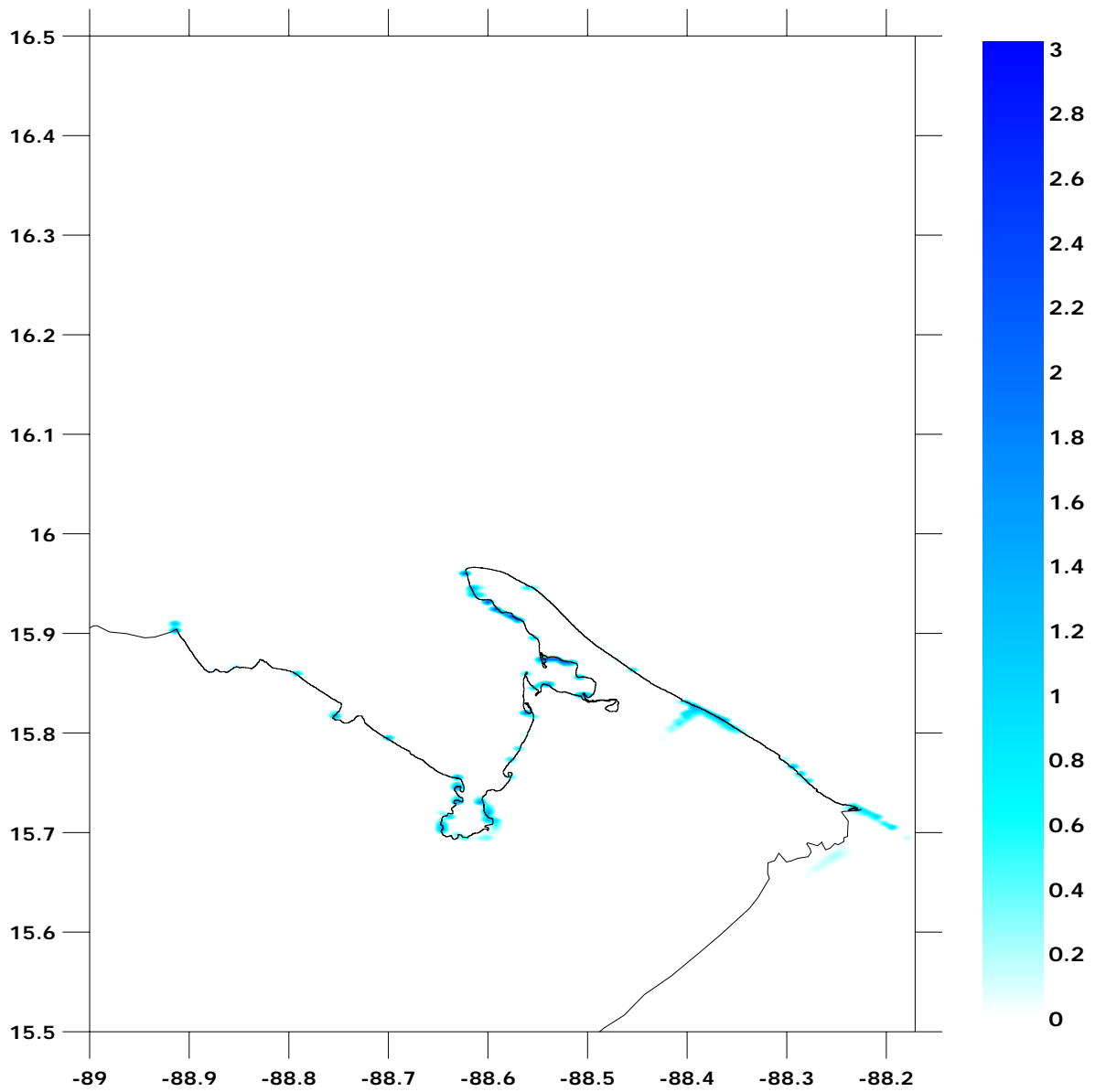


Figura 2-10
Mapa de distribución espacial de inundación [m] para 500 años de periodo de retorno

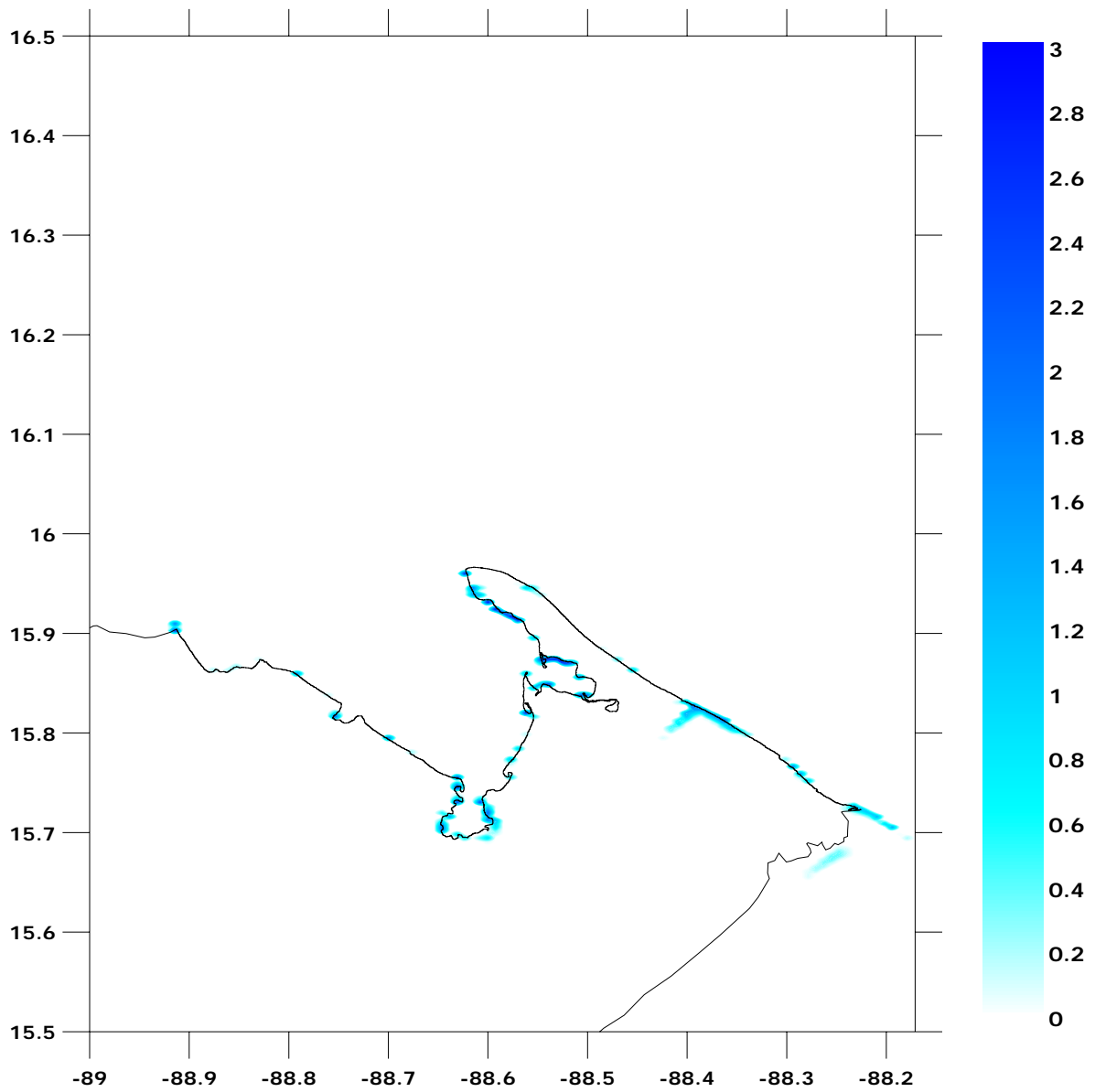


Figura 2-11
Mapa de distribución espacial de inundación [m] para 1000 años de periodo de retorno

3 Amenaza por huracán

3.1 Introducción

Los huracanes tiene la particularidad de ser fenómenos altamente destructivos, con frecuencias altas de ocurrencia. La modelación de la amenaza por huracán tiene en cuenta los efectos relacionados con la velocidad del viento y la altura de marea de tormenta. El modelo estima las intensidades máximas asociadas a la posible ocurrencia y paso de un huracán por el territorio de análisis (territorio que comprende al país y 200km en todas direcciones alrededor de la costa), a partir de un procedimiento estadístico conocido como *perturbación*, el cual permite generar trayectorias aleatorias que conservan las características principales de las trayectorias históricas identificadas. La amenaza se representa entonces como un conjunto de eventos estocásticos con intensidad y frecuencias medias de ocurrencia compatibles con la información histórica disponible.

3.2 Información empleada en la modelación

El modelo de amenaza por huracán requiere de información específica, que puede encontrarse disponible para cierto nivel de detalle. La calidad de la modelación dependerá del detalle con que se cuente en toda la información recolectada. Se requieren las siguientes capas de información geográfica para la aplicación del modelo de amenaza por huracán en Guatemala:

- a) Topografía.
- b) Batimetría.
- c) Áreas urbanas y uso de suelo.
- d) Registros de velocidad de viento y altura de marea.
- e) Catálogo de huracanes

La información que fue posible obtener para la modelación de la amenaza de huracán se describe a continuación.

3.2.1 Topografía

Las corrientes de viento se ajustan a la topografía de la zona, pasando alrededor de los obstáculos orográficos existentes. De esta manera, se modifica la uniformidad del campo de velocidad, generando zonas con velocidades mayores o menores a la promedio establecida en una zona hipotética sin obstáculos. La capacidad del modelo para detectar mayores detalles en la variación de la velocidad del viento, depende fuertemente de la calidad de la información topográfica con que se cuenta. El modelo digital de elevación para el territorio guatemalteco se obtuvo de la base de datos ASTER Global Digital Elevation Model (2009), de la agencia estadounidense NASA, y cuenta con una resolución de 30 metros, lo cual es

una resolución aceptable para un análisis nacional y subnacional. En la Figura 3-1 se presenta el modelo digital de elevación empleado para la modelación.

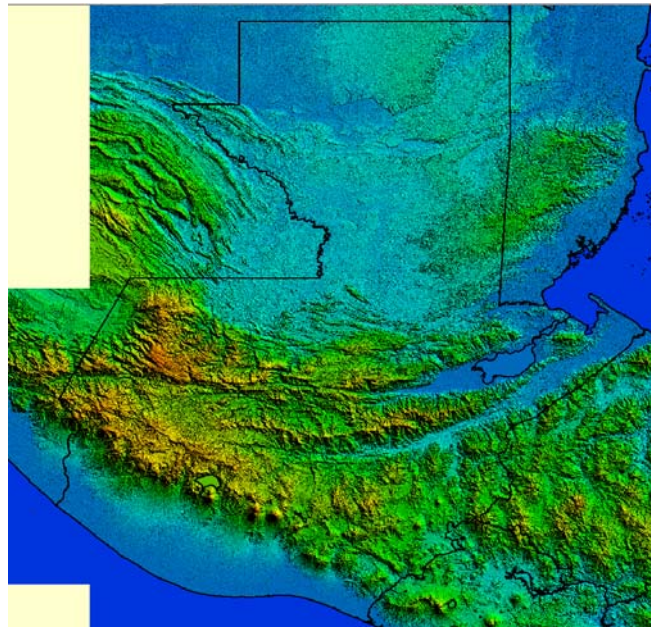


Figura 3-1
Modelo Digital de Elevación para Guatemala

3.2.2 Batimetría

La batimetría es necesaria para el cálculo de la sobre elevación del mar y la consecuente marea de tormenta que se origina durante el paso de un huracán por una zona costera. La información batimétrica corresponde a un modelo digital de batimetría-topografía con una resolución de 1 minuto, lo cual corresponde a un tamaño de píxel de 1.8 kilómetros. La información se obtuvo de la base de datos ETOPO1 Global Relief Model (2009), de la agencia estadounidense NOAA. Si bien la información no cuenta con la resolución deseada, es común que la información batimétrica no sea de calidad comparable a la información topográfica disponible, razón por la cual la resolución se considera igualmente aceptable. La Figura 3-2 presenta el modelo digital de batimetría empleado.

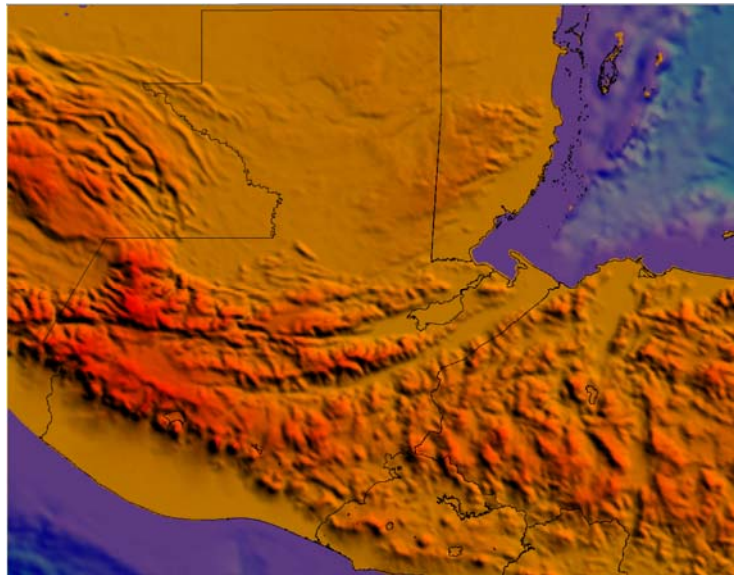


Figura 3-2

Imagen de la batimetría empleada para el modelo de marea de tormenta en Guatemala

3.2.3 Áreas urbanas y uso de suelo

La rapidez con que la velocidad del viento aumenta con la altura es función de la rugosidad del terreno. Por lo tanto, el gradiente de velocidad debe encontrarse a partir de información geográfica de usos del suelo, la cual permite establecer las condiciones de rugosidad específicas. La información de polígonos de áreas urbanas y usos del suelo se obtuvo de la Base de datos SIG para Mesoamérica de la *Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo CCAD*. La Figura 3-3 muestra los polígonos de áreas urbanas y uso de suelo.

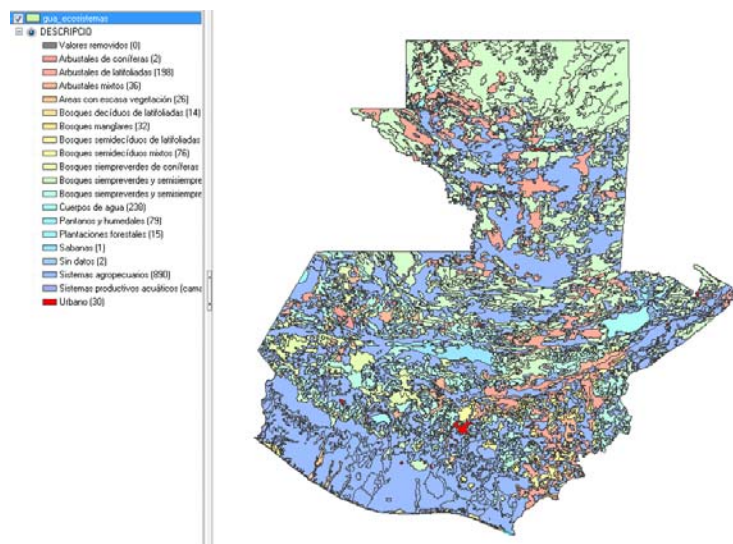


Figura 3-3

Polígonos de áreas urbanas y uso de suelo para Guatemala

3.2.4 Registros de velocidad de viento y altura de marea

Los registros de intensidades históricas son altamente útiles para la calibración de los modelos de cálculo. En el caso de Guatemala, no fue posible encontrar registros históricos con información de este tipo, por lo cual no se incluyeron consideraciones particulares en la modelación del fenómeno.

3.2.5 Catálogo de Huracanes

Las trayectorias de los huracanes históricos, al igual que los diferentes parámetros de intensidad asociados y su variación con la trayectoria, se obtuvieron de la base de datos HURDAT, del *National Hurricane Center*, de la agencia estadounidense NOAA. Ésta base de datos cuenta con la siguiente información:

- Fecha (hora, día, mes y año)
- Presión central del ciclón (en milibares)
- Posición geográfica (latitud, longitud)
- Velocidad máxima sostenida de viento promediada a 1 min

Para el Océano Atlántico, la base de datos HURDAT cuenta con 1394 ciclones tropicales del año 1851 a 2008. Para el Océano Pacífico la base de datos cuenta con 853 ciclones tropicales de 1949 a 2008. En la Figura 3-4 se muestran las trayectorias de los ciclones tropicales para los Océanos Atlántico y Pacífico contenidas en la base de datos HURDAT hasta el año 2008.

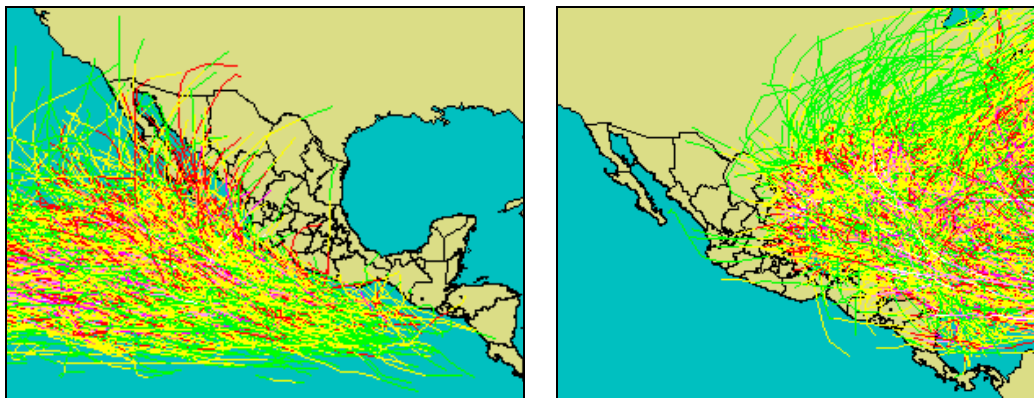


Figura 3-4

Trayectoria de ciclones tropicales para los Océanos Pacífico (izq.) y Atlántico (der.) hasta el año 2007 de acuerdo con la información de la base de datos HURDAT de la NOAA.

3.3 Parámetros del modelo

3.3.1 Depuración del catálogo de huracanes

A partir de la base de datos HURDAT de la NOAA, se depuró el catálogo de huracanes de manera que sólo se tomaran en cuenta aquellos ciclones tropicales que han afectado el territorio guatemalteco. Los criterios de depuración empleados fueron los siguientes:

- Eventos con categoría \geq H1 (119 km/h) en la escala Saffir-Simpson (SS).
- Que en algún momento de su trayectoria, el ojo del huracán se localizara a menos de 200 km de las costas guatemaltecas.

3.3.1.1 Océano Atlántico

Los criterios anteriores aplicados a la base de datos de ciclones tropicales para el Océano Atlántico, permiten obtener un total de 65 huracanes con categoría \geq H1 SS. En la Tabla 3-1 se presentan los parámetros principales (velocidad máxima de viento, categoría, nombre y fecha) de cada uno de los 65 escenarios de huracán, específicos del Océano Atlántico, que se consideraron para el estudio en territorio guatemalteco.

Tabla 3-1
Parámetros principales (velocidad máxima del viento, categoría, nombre y fecha) de los ciclones tropicales considerados.

#	Nombre	Fecha	Vel Máx [Km/h]	Cat Máx
1	NOT NAMED	25/08/1864	129.5245	H1
2	NOT NAMED	12/08/1866	166.5315	H2
3	NOT NAMED	29/10/1870	129.5245	H1
4	NOT NAMED	24/09/1874	148.028	H1
5	NOT NAMED	18/08/1879	166.5315	H2
6	NOT NAMED	04/10/1880	129.5245	H1
7	NOT NAMED	15/08/1881	129.5245	H1
8	NOT NAMED	19/07/1887	157.2798	H2
9	NOT NAMED	11/09/1889	175.7832	H2
10	NOT NAMED	30/10/1890	148.028	H1
11	NOT NAMED	04/10/1892	157.2798	H2
12	NOT NAMED	04/07/1893	157.2798	H2
13	NOT NAMED	04/09/1893	157.2798	H2
14	NOT NAMED	08/10/1906	194.2867	H3
15	NOT NAMED	22/06/1913	157.2798	H2
16	NOT NAMED	27/08/1916	157.2798	H2
17	NOT NAMED	12/10/1916	194.2867	H3
18	NOT NAMED	22/08/1918	129.5245	H1
19	NOT NAMED	16/09/1920	166.5315	H2
20	NOT NAMED	14/06/1921	157.2798	H2

#	Nombre	Fecha	Vel Máx [Km/h]	Cat Máx
21	NOT NAMED	05/09/1931	203.5385	H3
22	NOT NAMED	08/09/1931	157.2798	H2
23	NOT NAMED	25/09/1932	194.2867	H3
24	NOT NAMED	10/09/1933	138.7762	H1
25	NOT NAMED	16/09/1933	175.7832	H2
26	NOT NAMED	04/06/1934	129.5245	H1
27	NOT NAMED	18/10/1935	138.7762	H1
28	NOT NAMED	28/08/1936	129.5245	H1
29	NOT NAMED	23/08/1938	157.2798	H2
30	NOT NAMED	23/09/1941	194.2867	H3
31	NOT NAMED	04/11/1942	157.2798	H2
32	NOT NAMED	16/08/1944	194.2867	H3
33	NOT NAMED	20/06/1945	185.035	H3
34	NOT NAMED	02/10/1945	157.2798	H2
35	NOT NAMED	05/10/1946	212.7903	H4
36	NOT NAMED	09/08/1947	175.7832	H2
37	CHARLIE	12/08/1951	212.7903	H4
38	HILDA	10/09/1955	203.5385	H3
39	JANET	21/09/1955	277.5525	H5
40	FLOSSY	21/09/1956	148.028	H1
41	ABBY	09/07/1960	157.2798	H2
42	ANNA	19/07/1961	185.035	H3
43	HATTIE	27/10/1961	259.049	H5
44	ISBELL	08/10/1964	203.5385	H3
45	FRANCELIA	28/08/1969	185.035	H3
46	LAURIE	16/10/1969	166.5315	H2
47	ELLA	08/09/1970	203.5385	H3
48	EDITH	05/09/1971	259.049	H5
49	AGNES	14/06/1972	138.7762	H1
50	CARMEN	29/08/1974	240.5455	H4
51	FIFI	14/09/1974	175.7832	H2
52	GRETA	13/09/1978	212.7903	H4
53	DIANA	03/08/1990	157.2798	H2
54	GERT	14/09/1993	157.2798	H2
55	OPAL	27/09/1995	240.5455	H4
56	ROXANNE	07/10/1995	185.035	H3
57	DOLLY	19/08/1996	129.5245	H1
58	MITCH	21/10/1998	286.8043	H5
59	GORDON	14/09/2000	129.5245	H1
60	KEITH	28/09/2000	222.042	H4
61	IRIS	04/10/2001	231.2937	H4
62	EMILY	10/07/2005	250.02	H5
63	STAN	01/10/2005	129.64	H1
64	DEAN	13/08/2007	268.54	H5
65	FELIX	31/08/2007	268.54	H5

En la Tabla 3-2 se presenta la distribución, por categoría en la escala Saffir-Simpson, de los 65 huracanes que forman la base de datos depurada para el Océano Atlántico, cuya trayectoria ha circulado a menos de 200 km de la costa Atlántica de Guatemala con categoría \geq H1 SS.

Tabla 3-2
Distribución por categoría en la escala Saffir-Simpson, de los ciclones tropicales considerados.

Categoría	Número de huracanes
H1	16
H2	22
H3	13
H4	7
H5	7

3.3.1.2 Océano Pacífico

Los criterios anteriores aplicados a la base de datos de ciclones tropicales para el Océano Pacífico, permiten obtener un total de 11 huracanes con categoría \geq H1 SS. En la Tabla 3-3 se presentan los parámetros principales (velocidad máxima de viento, categoría, nombre y fecha) de cada uno de los 11 escenarios de huracán, específicos del Océano Pacífico que se consideraron para el estudio en territorio guatemalteco.

Tabla 3-3
Parámetros principales (velocidad máxima de viento, categoría, nombre y fecha) de los ciclones tropicales considerados.

#	Oceano	Nombre	Fecha	Vel Máx	Cat Máx
1	Pcf	NOT NAMED	26/10/1954	138.7762	H1
2	Pcf	ESTELLE	28/08/1960	138.7762	H1
3	Pcf	BRIDGET	14/06/1971	157.2798	H2
4	Pcf	OLIVIA	19/09/1971	185.035	H3
5	Pcf	OLIVIA	19/09/1978	120.2728	H1
6	Pcf	PAUL	18/09/1982	175.7832	H2
7	Pcf	DOUGLAS	28/07/1996	212.7903	H4
8	Pcf	RICK	06/11/1997	157.2798	H2
9	Pcf	LESTER	14/10/1998	185.035	H3
10	Pcf	JULIETTE	21/09/2001	231.2937	H4
11	Pcf	ADRIAN	17/05/2005	138.9	H1

En la Tabla 3-4 se presenta la distribución por categoría en la escala Saffir-Simpson de los 11 escenarios de huracán que forman la base de datos depurada para el Océano Pacífico, cuya trayectoria ha circulado a menos de 200 km de la costa Pacífica de Guatemala con categoría \geq H1 SS.

Tabla 3-4
Distribución por categoría en la escala Saffir-Simpson, de los ciclones tropicales considerados.

Categoría	Número de huracanes
H1	4
H2	3
H3	2
H4	2
H5	0

3.3.2 Factores de exposición topográfica al viento para Guatemala

Debido al efecto de la topografía del sitio en que se ubica una construcción, se presentan variaciones en la velocidad del viento generada por un huracán. Los factores de topografía permiten tomar en cuenta el incremento o decremento en la velocidad del viento debido a las características topográficas del sitio en que se ubica una construcción, por ejemplo en la cima de promontorios, terrenos inclinados, islas o valles cerrados. En este estudio, para tomar en cuenta las modificaciones a la velocidad de viento debido al efecto de la topografía circundante al sitio en que se ubica la construcción, se define un factor de incremento en la velocidad, el cual actúa como un multiplicador de la velocidad de viento considerada en terreno plano; estos factores de topografía se asignaron a partir de la determinación de áreas de exposición por viento (Avelar, 2006).

Para el cálculo de las áreas de exposición por viento se planteó un procedimiento que permite, a partir de Modelos Digitales de Elevación (MDE), obtener mapas digitales con valores del factor de topografía para Guatemala (ver Figura 3-5). Estos factores se calculan para cada uno de los píxeles que conforman el MDE de acuerdo con su exposición al flujo de viento, localizados por las coordenadas geográficas de su centroide. Este tipo de información permite conocer el factor de topografía particular de la infraestructura a evaluar, solo con conocer su ubicación geográfica. La definición y características de exposición al flujo de viento se indican en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5
Factores de exposición topográfica al viento para Guatemala

Sitio	Topografía	F_T
Protegido	Valles cerrados	0.8
Plano	Terreno prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores que 5%	1.0
Expuesto	Cimas de promontorios, colinas o montañas, islas, terrenos con pendientes mayores que 5%	1.2

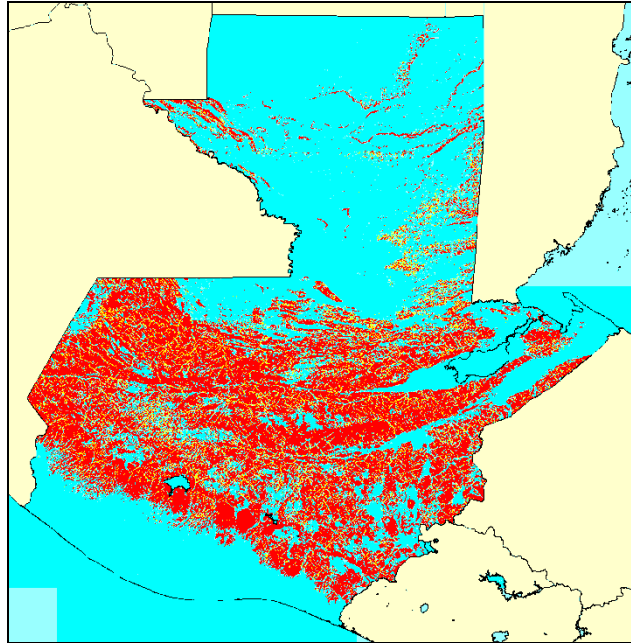


Figura 3-5
Factores de exposición topográfica por viento para Guatemala

3.3.3 Variación de la velocidad del viento con la altura

El movimiento de las masas de aire se ve restringido por la fricción con la superficie del terreno, lo cual origina que la velocidad sea prácticamente nula en contacto con el mismo, y aumente con la altura hasta alcanzar la velocidad del flujo no perturbado, llamada *velocidad gradiente*.

Para un terreno muy liso, como es el caso de campo abierto con vegetación muy baja, el viento mantiene una velocidad muy alta aún muy cerca de la superficie, mientras que en el centro de grandes ciudades, con edificaciones altas, la velocidad disminuye rápidamente desde una altura de varias decenas de metros hasta la superficie del terreno. La expresión que permite obtener una estimación de la variación de la velocidad de viento con la altura y para diferentes tipos de terreno, se representa de la siguiente manera:

$$Fr_z = 1.56 \left(\frac{Z}{\delta} \right)^\alpha \quad \text{si } 10 < Z < \delta$$

$$Fr_z = 1.56 \left(\frac{10}{\delta} \right)^\alpha \quad \text{si } Z \leq 10 \text{ m}$$

$$Fr_z = 1.56 \quad \text{si } Z \geq \delta$$

(Ec. 2)

donde: Z es la altura en metros a la cual se desea determinar la velocidad de viento. Los parámetros α y δ para diferentes tipos de terreno se presentan en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6
Parámetros α y δ para diferentes tipos de terreno

Tipo	Descripción	α	δ (m)
1	Campo abierto plano (terreno abierto, prácticamente plano y sin obstrucciones, por ejemplo franjas costeras planas, zonas de pantanos, campos aéreos, pastizales y tierras de cultivo sin bardas alrededor)	0.099	245
2	Árboles o construcciones dispersas (campos de cultivo o granjas con pocas obstrucciones, por ejemplo bardas, árboles y construcciones dispersas)	0.128	315
3	Arbolado, barrio residencial (terreno cubierto por numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas, por ejemplo áreas urbanas, suburbanas y de bosques; el tamaño de las construcciones corresponde al de casas y viviendas)	0.156	390
4	Muy accidentada, centro de ciudad (terreno con numerosas obstrucciones largas, altas y estrechamente espaciadas como el centro de grandes ciudades y complejos industriales desarrollados)	0.170	455

En la figura siguiente se muestra la variación con la altura sobre la superficie del terreno del factor Fr_z . Se observa que para una altura de 10m sobre la superficie del terreno el mayor valor del factor Fr_z es de 1.137, el cual se presenta en terreno tipo 1 (terreno abierto, prácticamente plano y sin obstrucciones). El menor factor para una altura de 10m corresponde a 0.815, el cual se presenta en terreno tipo 4 (terreno con numerosas obstrucciones).

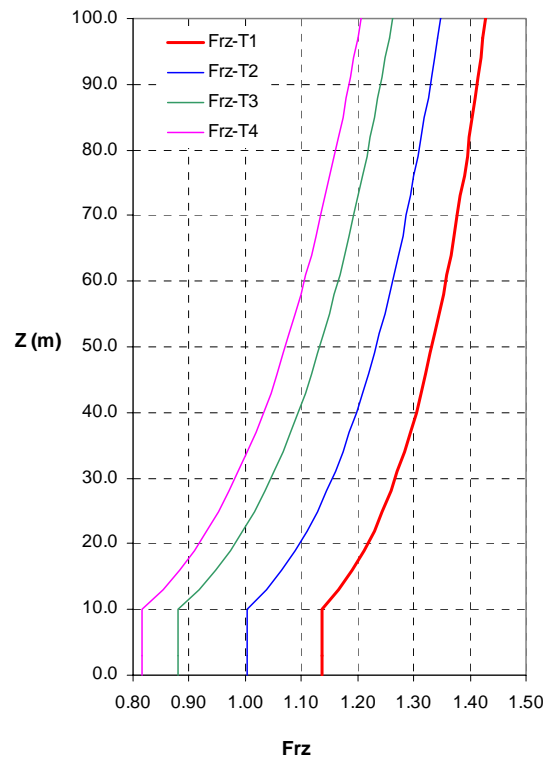


Figura 3-6
Variación de la velocidad del viento con la altura y para diferentes tipos de terreno.

3.4 Calidad de los datos disponibles

En lo que se refiere a información topográfica, batimétrica y de distribución de usos del suelo, la calidad y resolución de los datos disponibles se considera aceptable para análisis indicativo de amenaza a nivel nacional. No se cuenta con parámetros de calibración a partir de mediciones históricas de intensidad, por lo cual los resultados de amenaza no han sido calibrados a nivel local.

Particularmente para el cálculo de los valores de intensidad por vientos y lluvias huracanadas, la información cuenta con una calidad y resolución buena dada la extensión de orden nacional de la distribución de las intensidades asociadas. Por otra parte, para el caso de marea de tormenta, la información disponible permite realizar análisis solo de tipo indicativo, dado que un análisis detallado de amenaza por marea de tormenta, empleando el modelo propuesto, requiere de información topográfica y batimétrica de mayor calidad y resolución. La resolución mínima deseable para la información topográfica es del orden de 5 metros, y para la batimétrica del orden de 90 metros.

La resolución de la grilla de cálculo puede seleccionarse arbitrariamente, por lo que la resolución final de los resultados de amenaza depende exclusivamente de la resolución de

la información de entrada al modelo, siempre y cuando se escoja una grilla de cálculo suficientemente fina.

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.

3.5 Mapas de amenaza por huracán en Guatemala

Se calcularon de manera independiente los mapas de amenaza por vientos fuertes, marea de tormenta, precipitación huracanada e inundación. Los resultados se presentan a continuación.

3.5.1 *Mapas de amenaza por vientos fuertes*

Se calcularon mapas de amenaza uniforme por vientos fuertes, tomando como medida de intensidad la velocidad pico de ráfagas de viento de 3 segundos de duración, según lo explicado en el informe ERN-CAPRA-T1.2 (Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales, ERN 2009), y para periodos de retorno de 20, 50, 100, 500 y 1000 años. Los cálculos fueron realizados empleando el programa ERN-Huracán (ERN 2009).

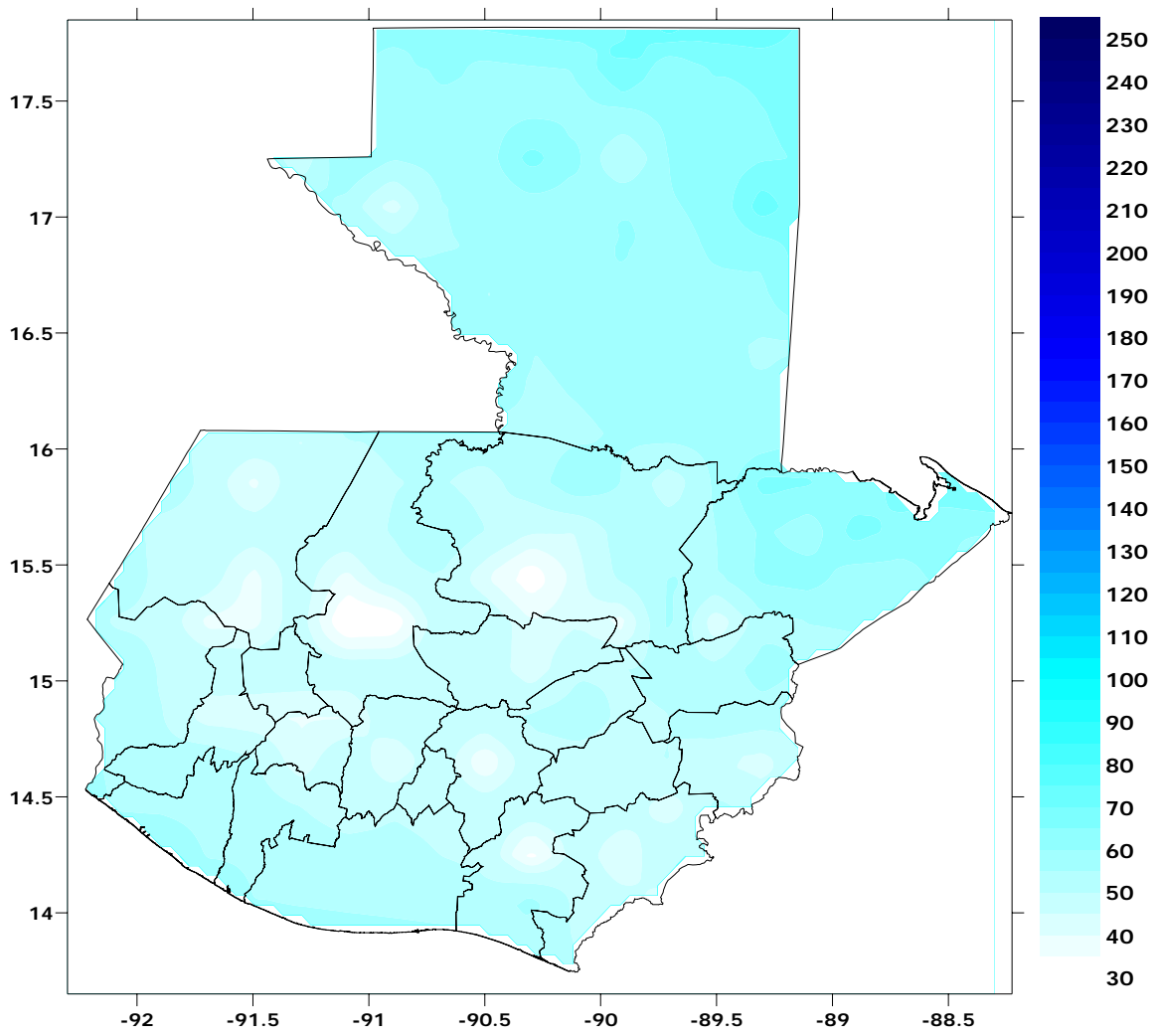
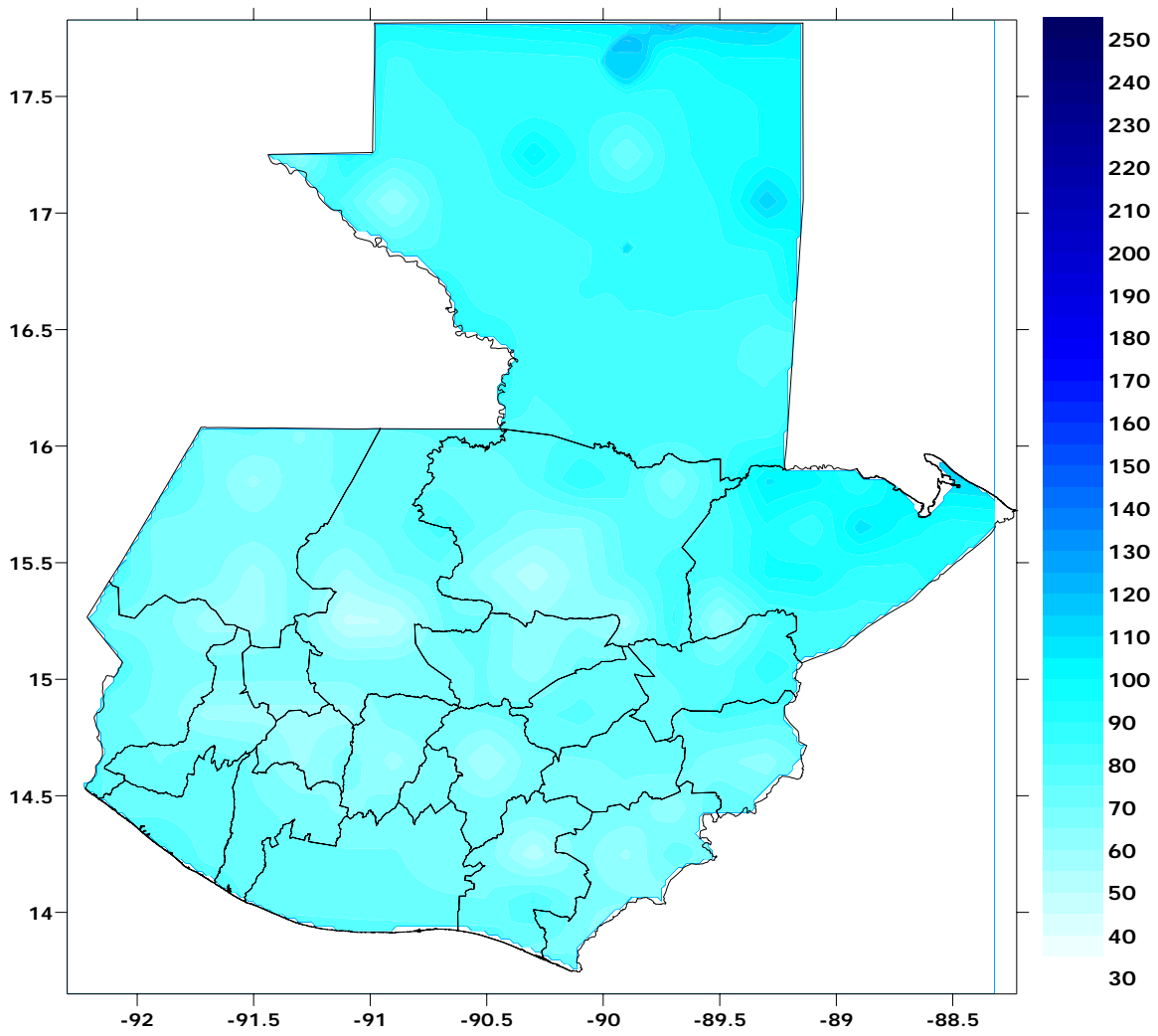


Figura 3-7
Mapa de distribución espacial la velocidad máxima del viento [km/h] para 20 años de periodo de retorno



*Figura 3-8
Mapa de distribución espacial la velocidad máxima del viento [km/h] para 50 años de periodo de retorno*

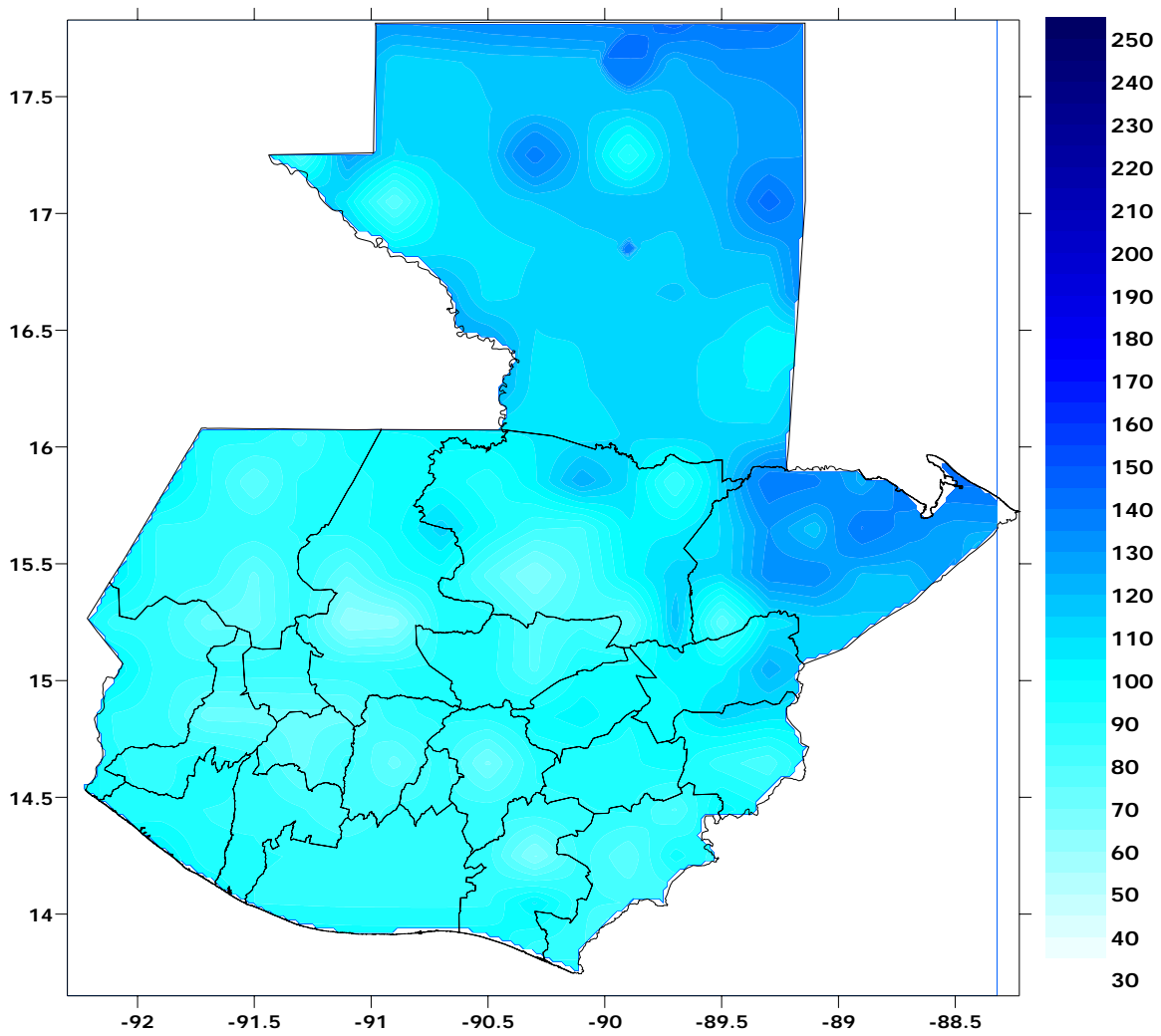


Figura 3-9
Mapa de distribución espacial la velocidad máxima del viento [km/h] para 100 años de periodo de retorno

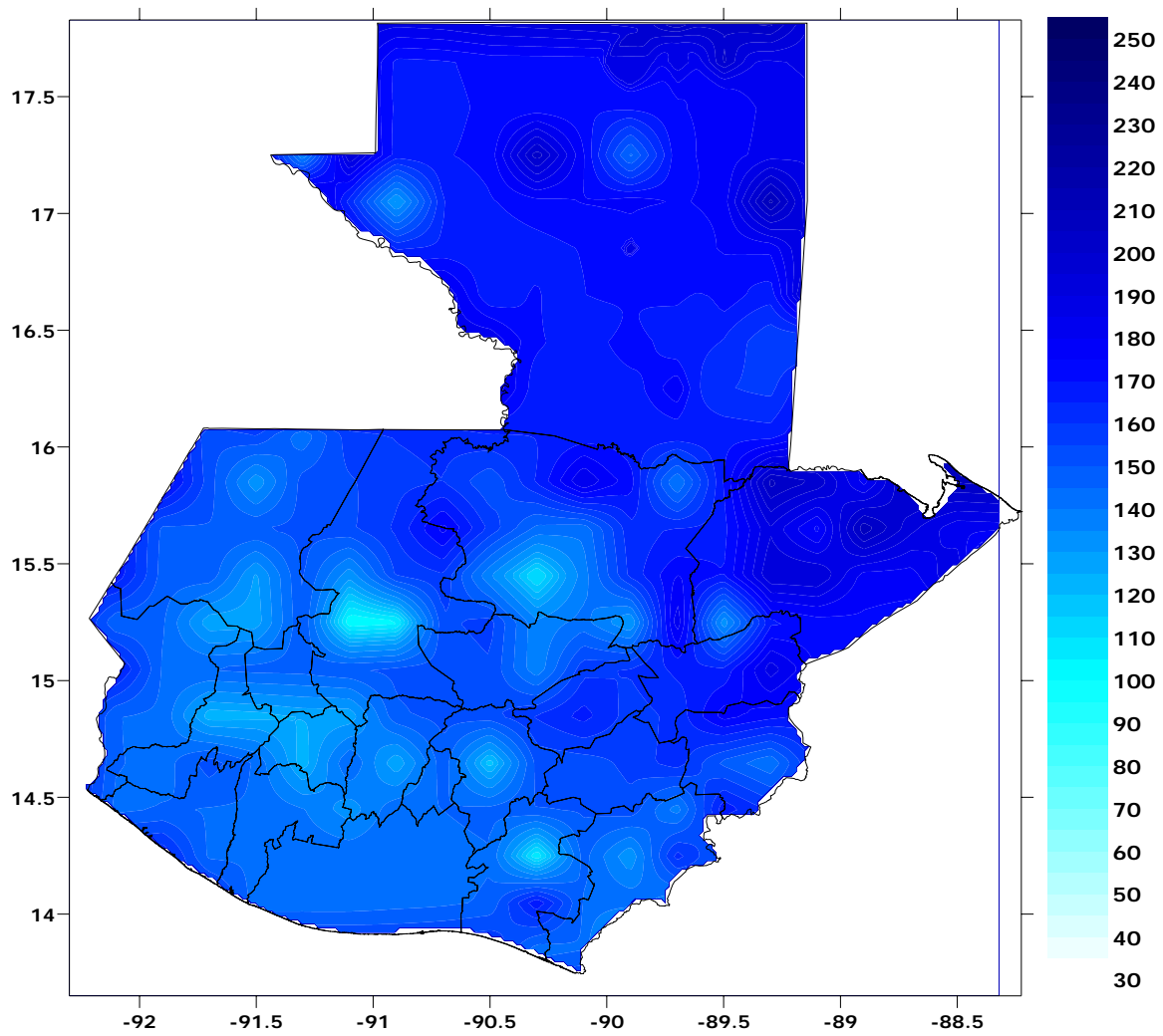


Figura 3-10
Mapa de distribución espacial la velocidad máxima del viento [km/h] para 500 años de periodo de retorno

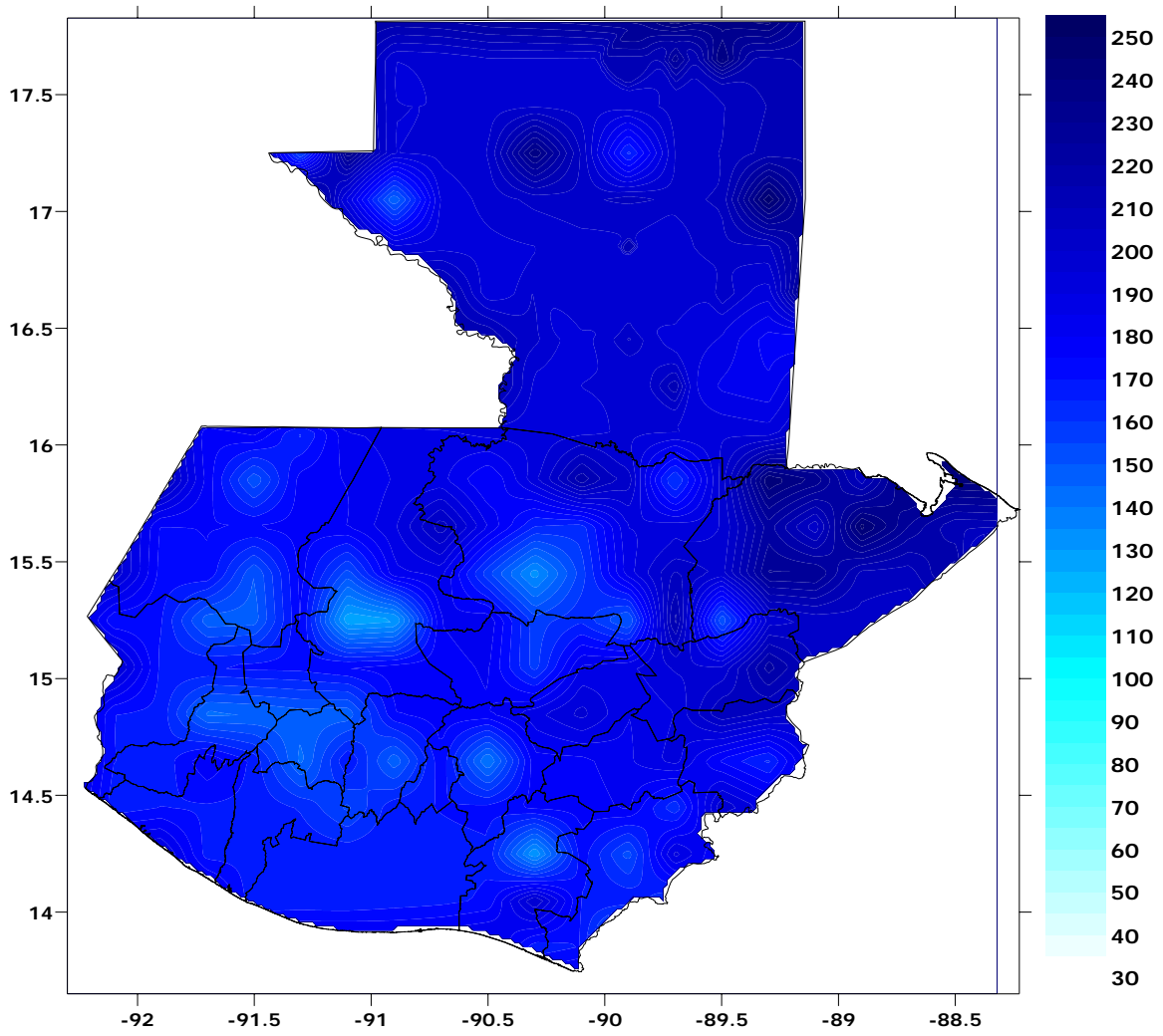


Figura 3-11
Mapa de distribución espacial la velocidad máxima del viento [km/h] para 1000 años de periodo de retorno

3.5.2 Mapas de amenaza por lluvias huracanadas

Se calcularon mapas de amenaza uniforme por lluvias huracanadas, tomando como medida de intensidad la profundidad de precipitación, según lo explicado en el informe ERN-CAPRA-T1.2 (Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales, ERN 2009), y para periodos de retorno de 20, 50, 100, 500 y 1000 años. Los cálculos fueron realizados empleando el programa ERN-Huracán (ERN 2007).

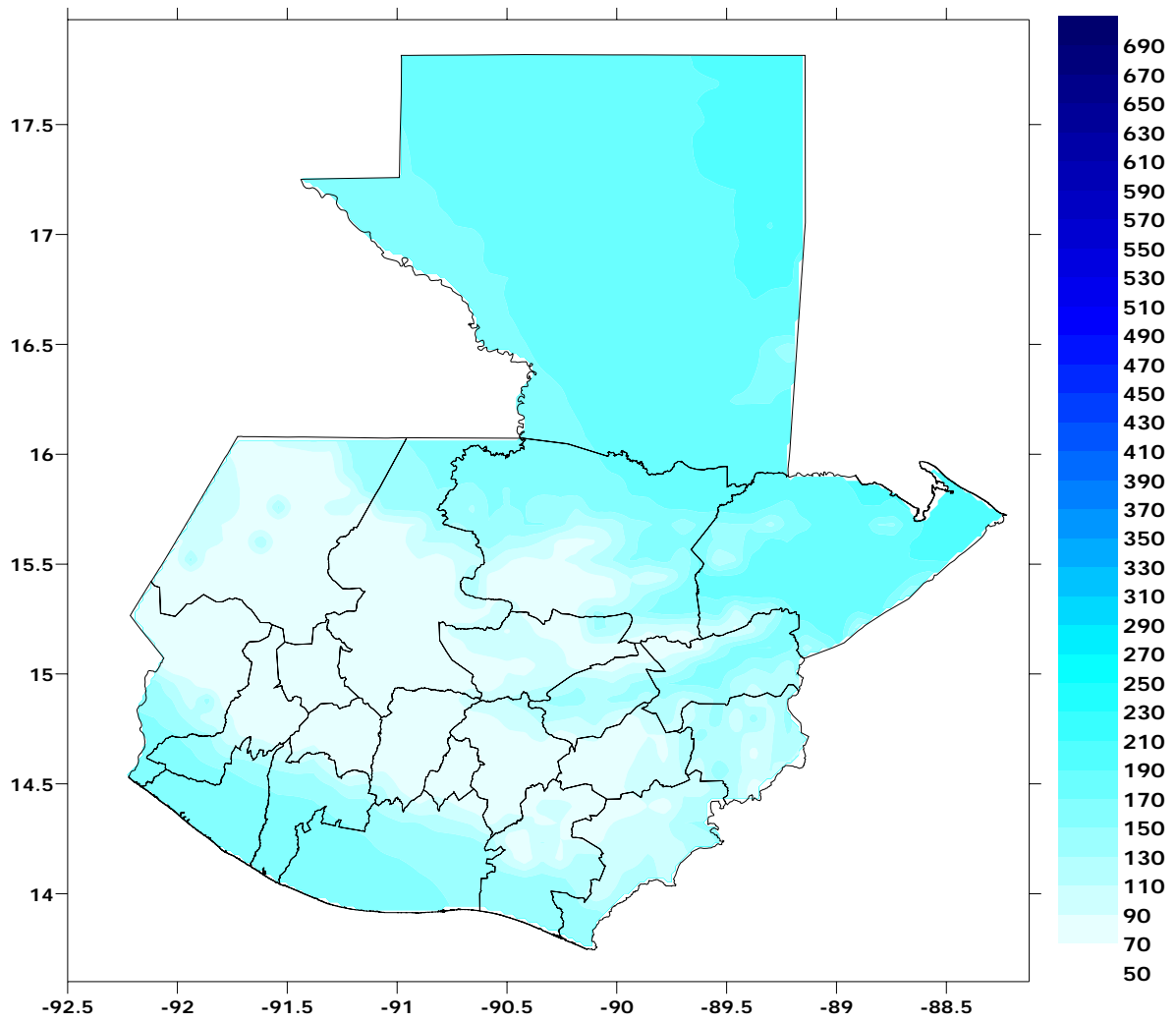


Figura 3-12
Mapa de distribución espacial de la profundidad de precipitación [mm] para 20 años de periodo de retorno

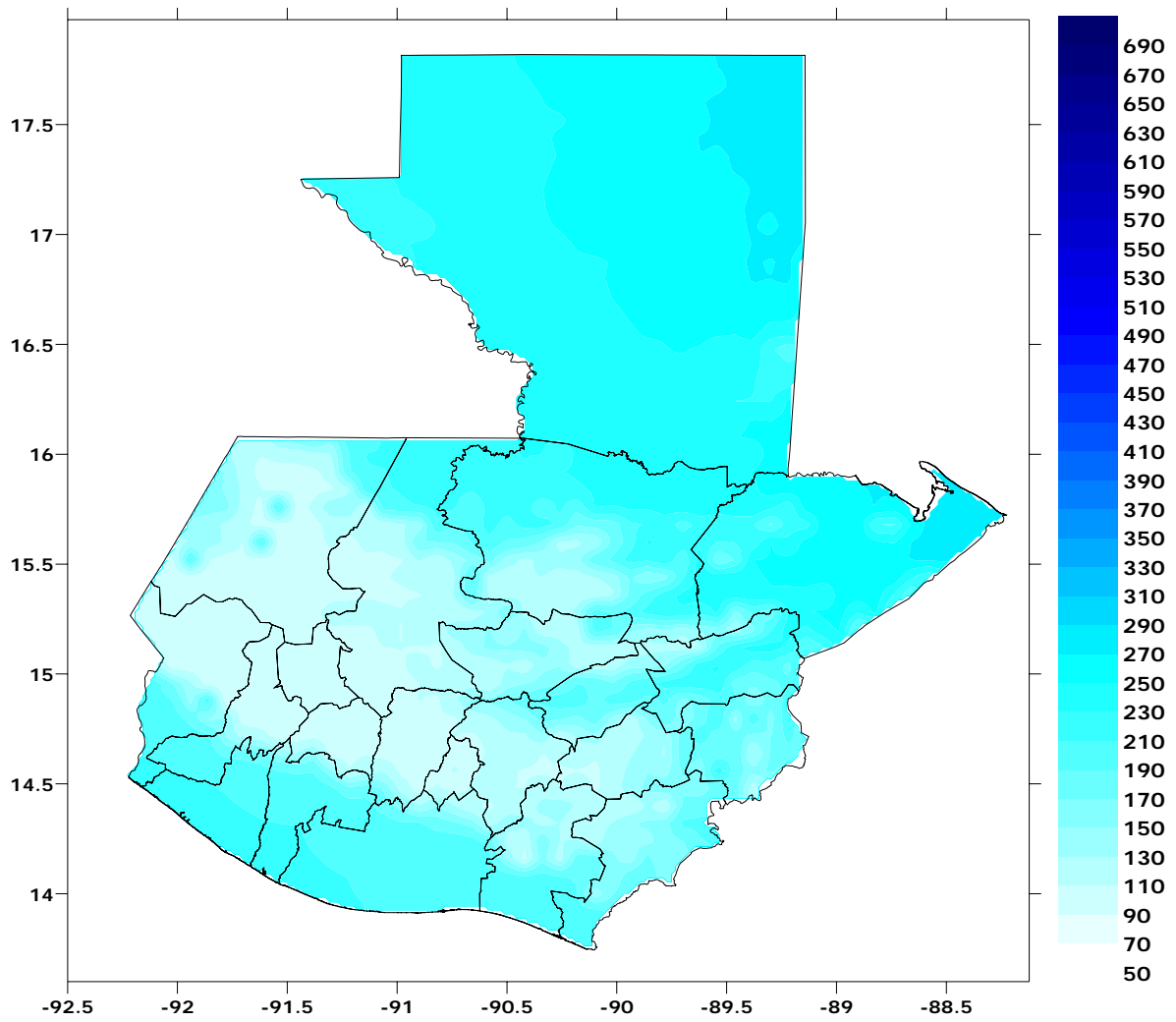


Figura 3-13
Mapa de distribución espacial de la profundidad de precipitación [mm] para 50 años de periodo de retorno

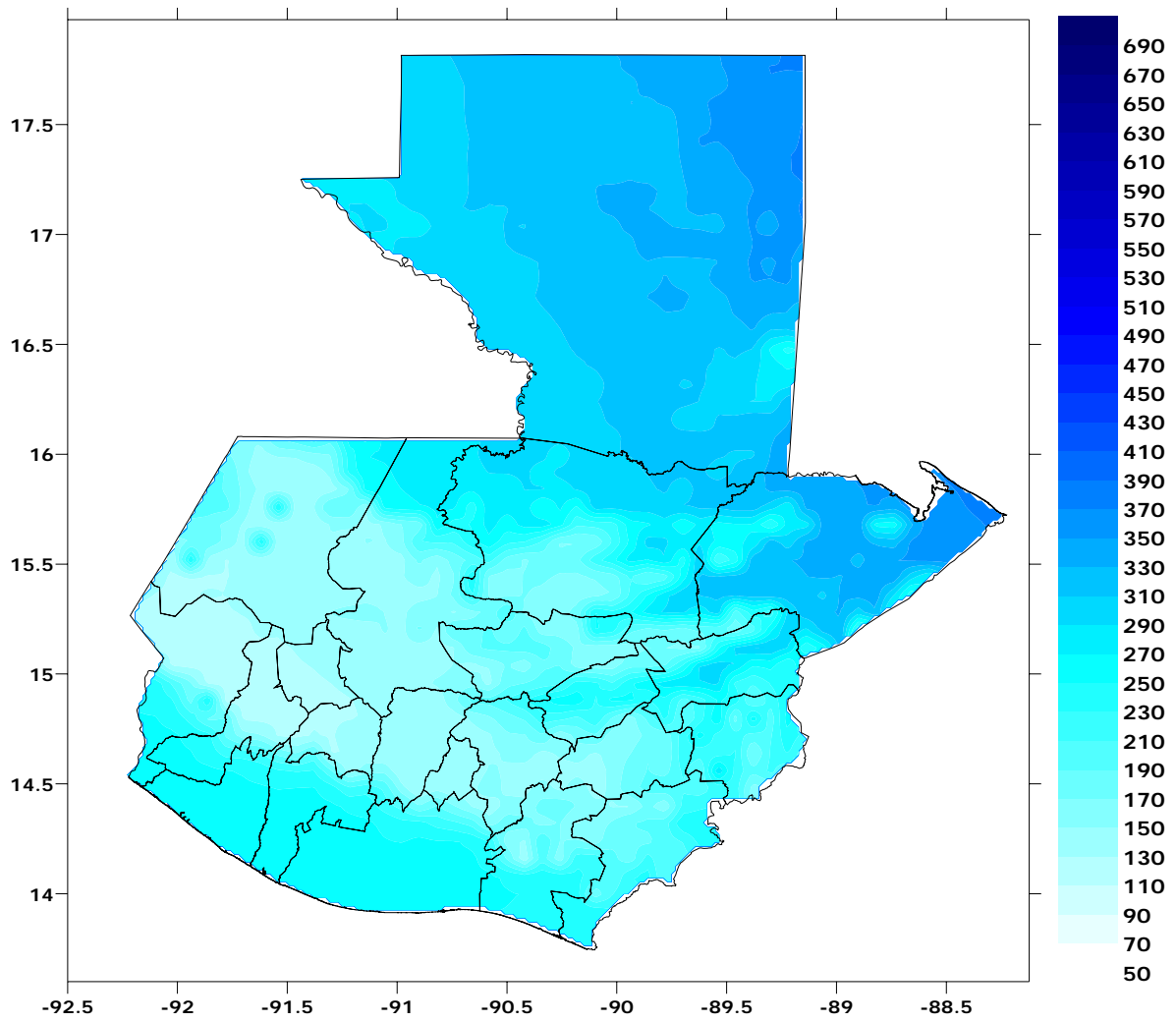


Figura 3-14
Mapa de distribución espacial de la profundidad de precipitación [mm] para 100 años de periodo de retorno

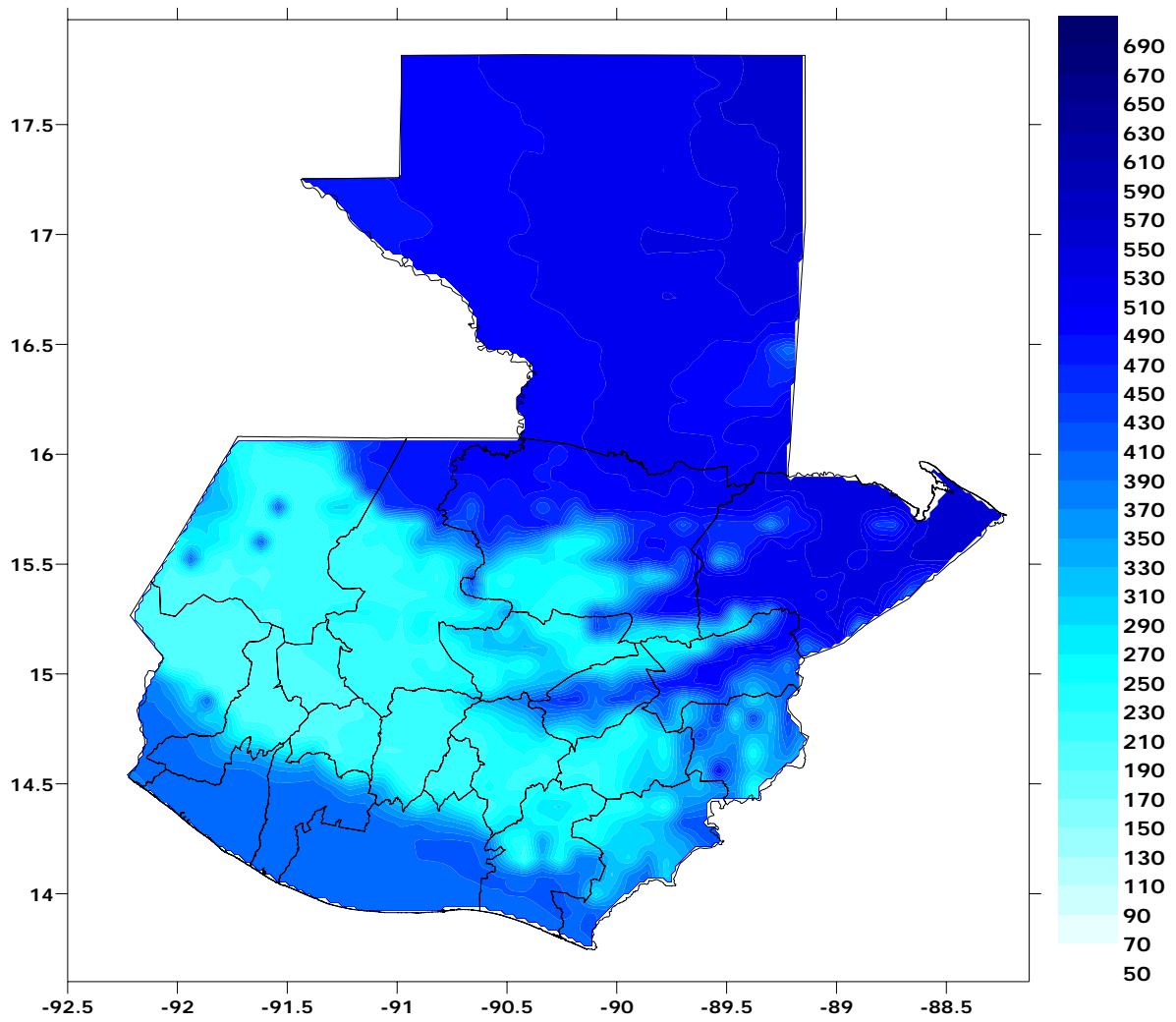


Figura 3-15
Mapa de distribución espacial de la profundidad de precipitación [mm] para 500 años de periodo de retorno

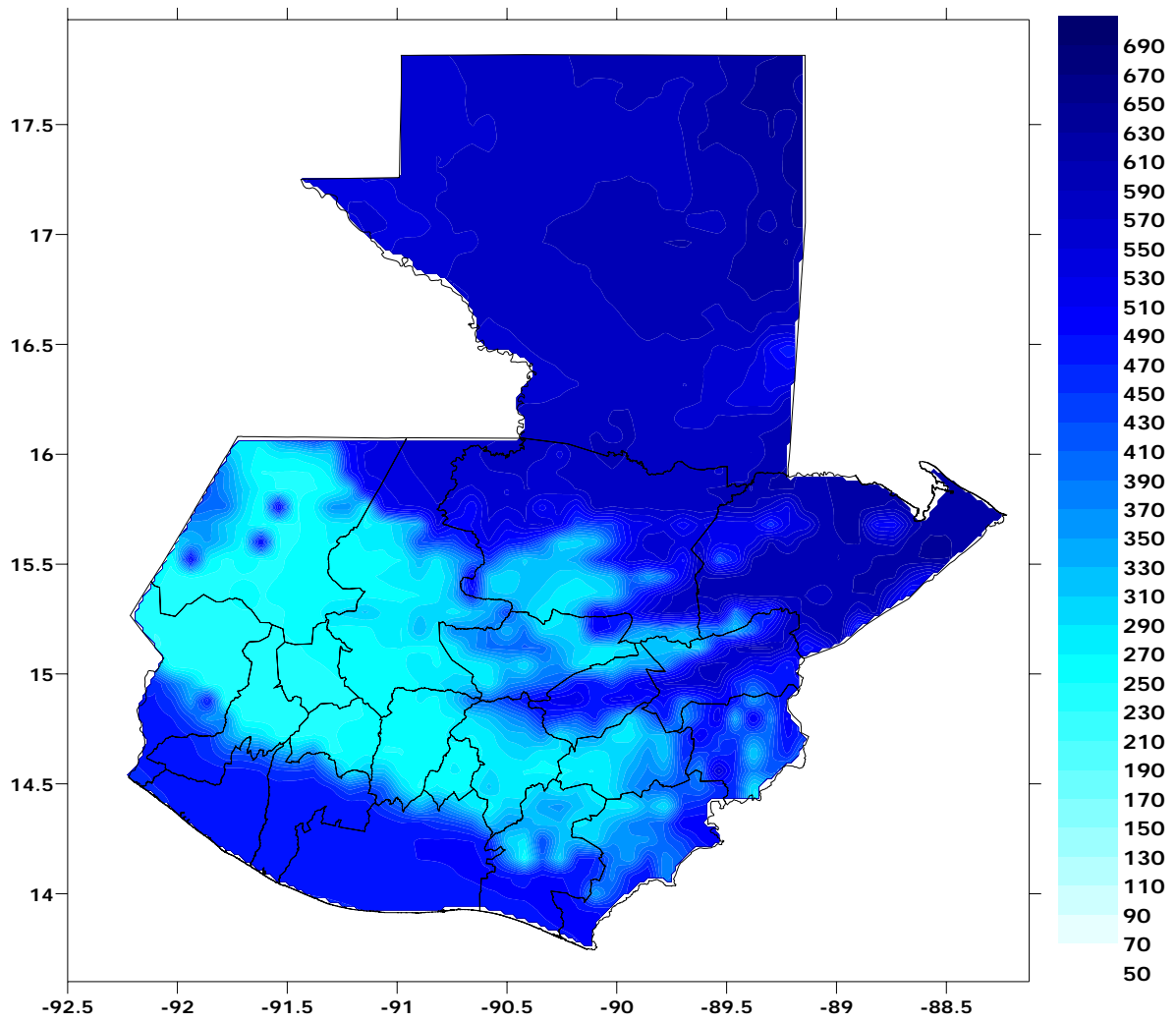


Figura 3-16
Mapa de distribución espacial de la profundidad de precipitación [mm] para 1000 años de periodo de retorno

3.5.3 Mapas de amenaza por inundación asociada a lluvias huracanadas

Aplicando el modelo de eventos detonantes propuesto en este estudio (ERN-CAPRA-T1-1 Componentes Principales del Análisis de Riesgos, ERN 2009), se calcularon los mapas de amenaza por inundación asociada a lluvias huracanadas, tomando como medida de intensidad la profundidad de inundación, y para periodos de retorno de 20, 50, 100, 500 y 1000 años. Los cálculos fueron realizados empleando la metodología simplificada de amenaza por inundación disponible en el programa ERN-Inundación (ERN 2009).

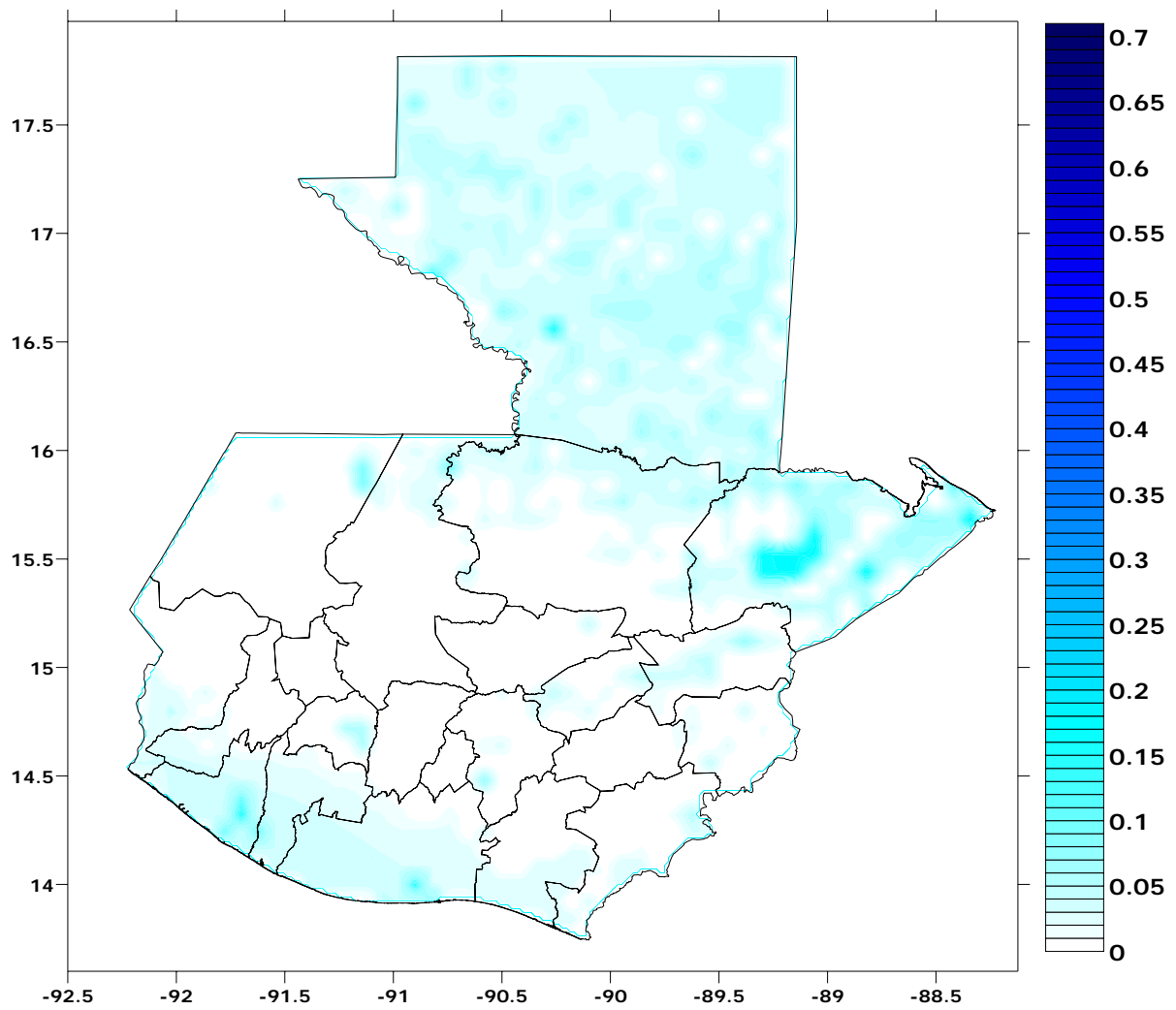


Figura 3-17
Mapa de distribución espacial de la profundidad de inundación [m] para 20 años de periodo de retorno

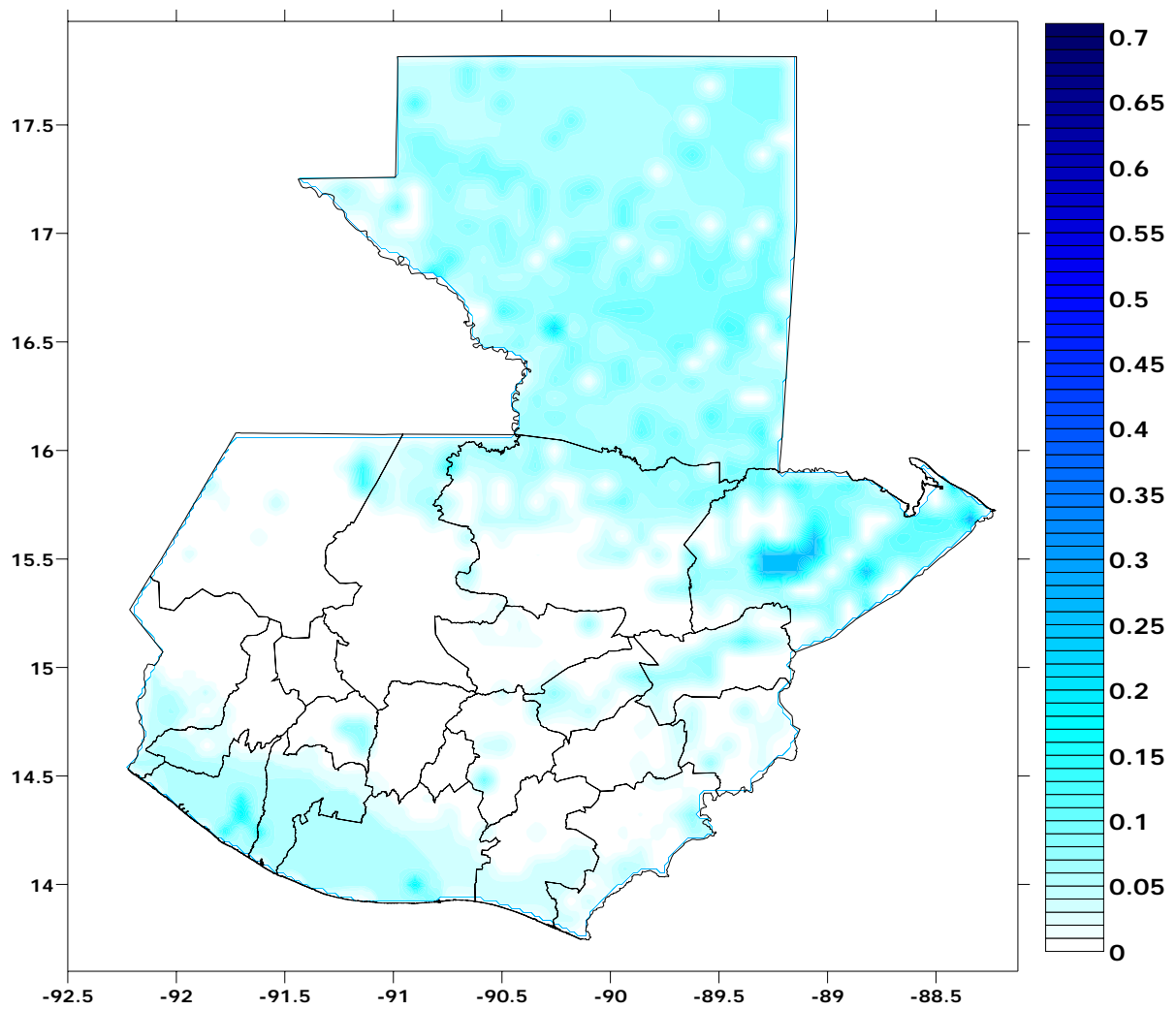


Figura 3-18
Mapa de distribución espacial de la profundidad de inundación [m] para 50 años de periodo de retorno

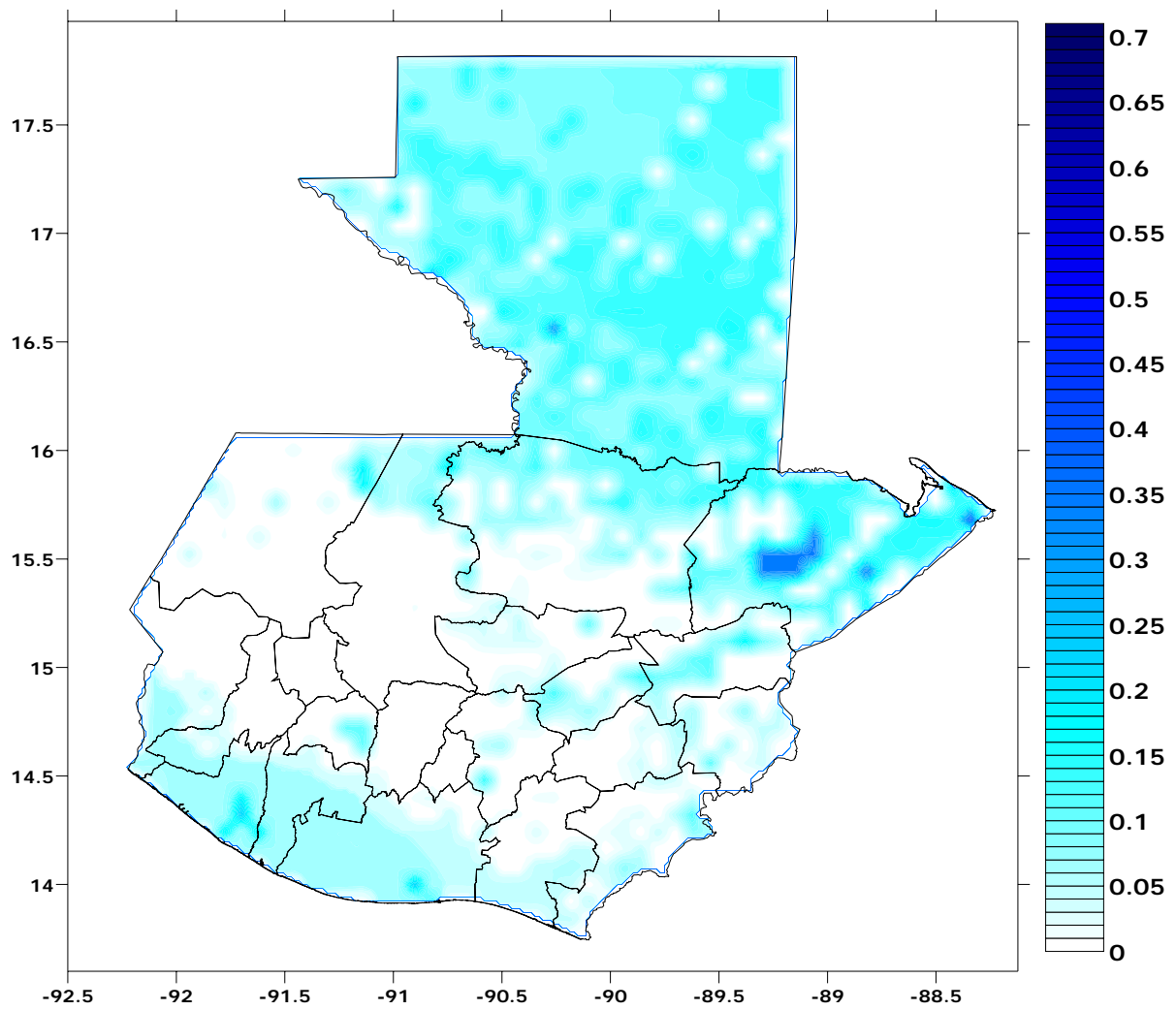


Figura 3-19
Mapa de distribución espacial de la profundidad de inundación [m] para 100 años de periodo de retorno

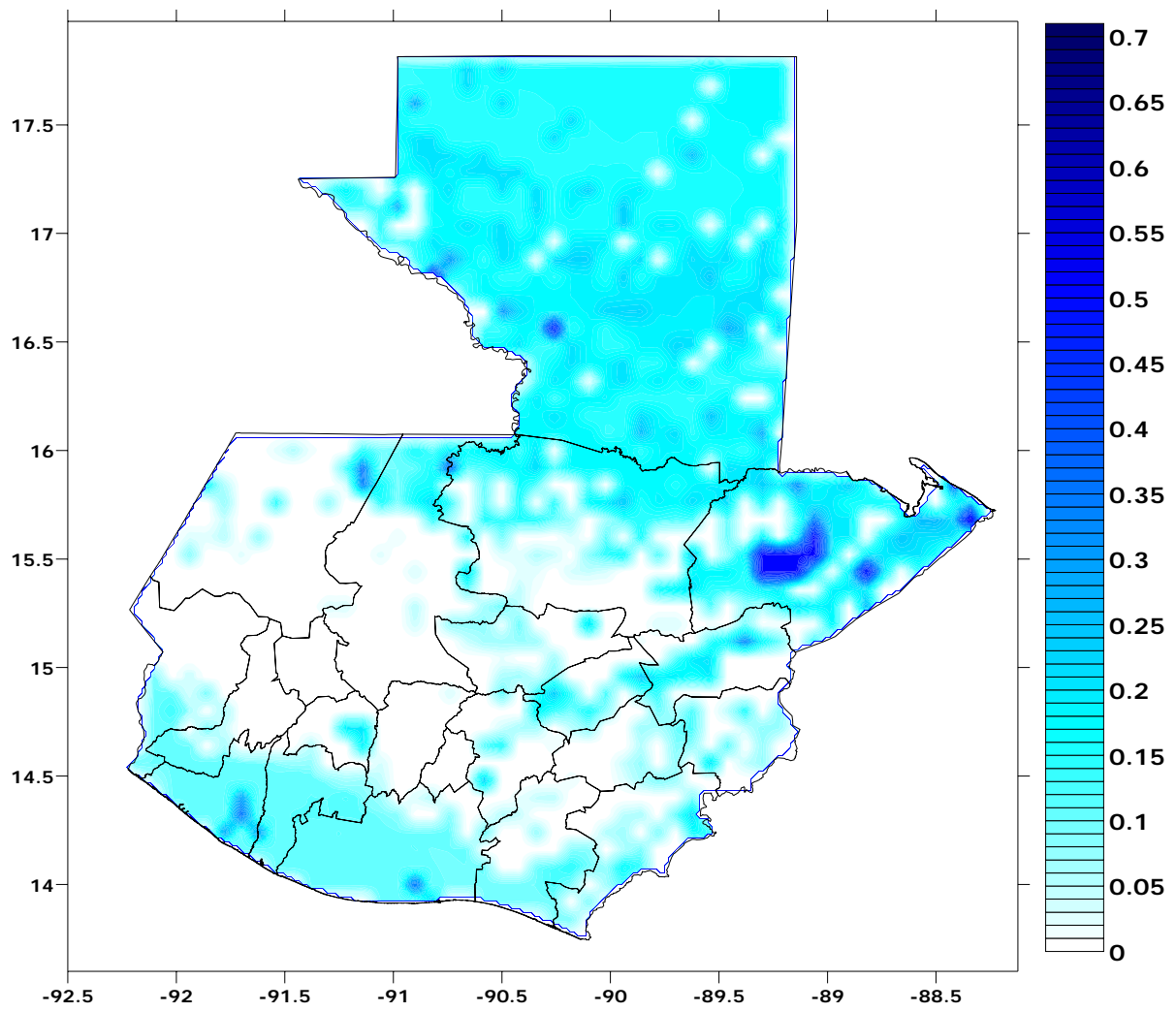


Figura 3-20
Mapa de distribución espacial de la profundidad de inundación [m] para 500 años de periodo de retorno

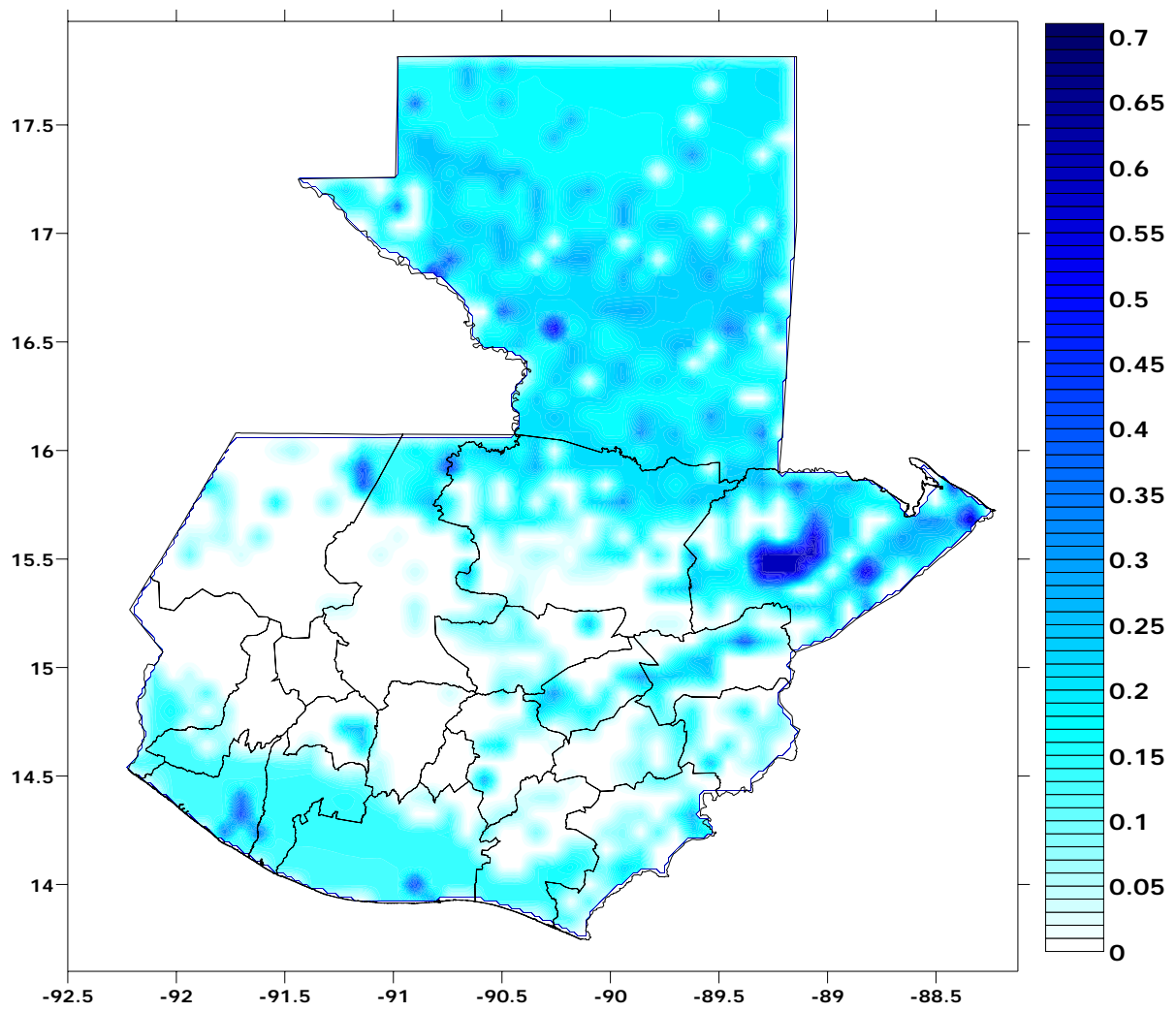


Figura 3-21
Mapa de distribución espacial de la profundidad de inundación [m] para 1000 años de periodo de retorno

4 Amenaza por lluvias intensas e inundación

Con el fin de llevar a cabo el análisis de amenaza por lluvias intensas, se recurrió a la revisión de toda la información meteorológica disponible. La modelación adecuada de las precipitaciones que pueden presentarse en un territorio particular depende fuertemente de la calidad de la información. Se requiere de un periodo de mediciones de valores de precipitación diarios, de alrededor de 30 años para caracterizar correctamente el régimen de lluvias de una región. En el caso particular de Guatemala, la información hidrometeorológica puesta a disposición de CAPRA en la actualidad, cuenta con una calidad que no permite la predicción de las condiciones climáticas empleando los modelos propuestos (ver informe ERN-CAPRA-T1.2 Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales, ERN 2009).

5 Amenaza por deslizamientos

5.1 Introducción

Los deslizamientos son fenómenos muy comunes en países tropicales con alta densidad de zonas montañosas y regímenes de precipitaciones fuertes. Si bien la magnitud misma de un deslizamiento puede no derivar en catástrofes, su alta frecuencia de ocurrencia los posiciona como una de las amenazas más comunes y más importantes en Guatemala.

El enfoque de cálculo aquí presentado está basado en la modelación punto a punto de la estabilidad, con el fin de evaluar espacialmente las condiciones generales de estabilidad de una región.

5.2 Información empleada en la modelación

Para la evaluación de la amenaza al deslizamiento se requiere información detallada de la zona de estudio, según lo especificado en el informe ERN-CAPRA-T1.2 (Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales, ERN 2009). A continuación se lista la información disponible para conformar los datos de entrada del modelo, que hacen parte de la información geográfica existente para Guatemala:

- Mapa topográfico, con resolución de grilla de 30 m
- Mapa geológico general con información relacionada a los diferentes tipos de roca, como descripción, edad de formación, composición mineralógica, estratigrafía y simbología.
- Mapa de zonificación agronómica de suelos con información que permite conocer las características específicas de evolución y creación del suelo, dando indicios de los horizontes en que se desarrolla, y su procedencia (rocas parentales, texturas y tamaños de las partículas). Cabe anotar que no se cuenta con una estratigrafía de precisión de los suelos existentes en el país, por ende los espesores de suelo deben ser inferidos.

5.3 Parámetros del modelo

Según lo especificado en el informe ERN-CAPRA-T1.2 (ERN 2009), se desarrollaron módulos de cálculo para cuatro modelos diferentes de amenaza por deslizamientos, cuya aplicabilidad es función de la información disponible. En este caso, se realizó la modelación a nivel nacional empleando los métodos de Mora-Varhson 1993, y de falla translacional. La información que se empleó en la modelación se describe a continuación.

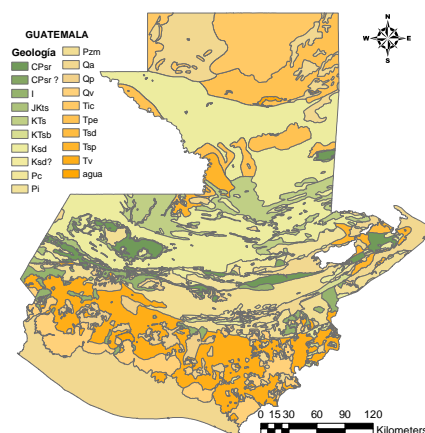
5.3.1 Información general

La información general incluye la topografía del país, geología, cuencas e información geotécnica. Las capas de propiedades de los suelos deslizables se generaron a partir de la información geotécnica y geológica disponible, mostrada en la Figura 5-1. La información requerida sobre los estratos deslizables y estratos base corresponde a: cohesión, ángulo de fricción, pero específico y espesor. La totalidad de las capas de información general son las siguientes:

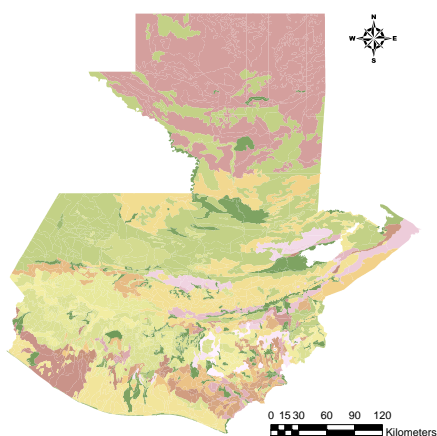
- Topografía.
- Geología Regional
- División por cuencas
- División de los suelos según material originario



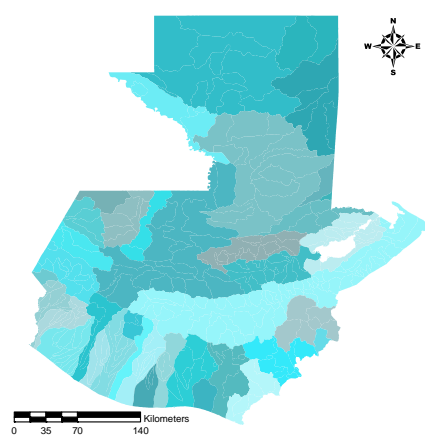
Modelo Digital de Elevación
(Fuente: NASA SRTM. Resolución de 30 m)



Geología regional
(Fuente: SNET)



División de los suelos según material originario
(Fuente: SNET)



División por cuencas
(Fuente: SNET)

Figura 5-1
Capas de información general disponible para Guatemala

5.3.2 Información de eventos detonantes

Los eventos considerados como detonantes de deslizamientos se deben especificar de maneras diferentes. La amenaza sísmica debe incluirse al modelo como un conjunto de escenarios estocásticos, cada uno con como una capa de intensidades de movimiento y una frecuencia anual de ocurrencia.

Las lluvias intensas no se consideran de manera directa. Debido a las limitaciones en la información disponible, se trabaja con el *estado de humedad* del suelo potencialmente deslizante, a partir del espesor de la capa de suelo. Para el caso en que la capa se encuentre completamente saturada, el estado de humedad toma un valor de cero (0), mientras que para un suelo completamente seco toma un valor de uno (1). Es posible variar las condiciones de humedad entre los valores descritos, y asignarle a cada escenario de humedad una frecuencia anual de ocurrencia. A partir de esta información se puede ubicar el nivel freático en el estrato potencialmente deslizante.

5.4 Calidad de los datos disponibles

El cálculo de la amenaza por deslizamiento requiere de información altamente detallada, la cual no se encuentra disponible a nivel nacional o subnacional. La información actualmente disponible es aceptable únicamente para análisis indicativos de susceptibilidad a los deslizamientos.

Un análisis detallado de amenaza por deslizamiento implica en primer lugar la escogencia de una región de interés particular, generalmente a una escala muy inferior a la nacional o subnacional. En segundo lugar, requiere de información topográfica detallada y caracterización mecánica de los suelos superficiales y potencialmente deslizables del área de estudio, así como de los niveles freáticos y sus variaciones en el tiempo (ver informe ERN-CAPRA-T1.2 Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales, ERN 2009).

En este caso particular, la información detallada no se encuentra disponible, por lo cual deben realizarse inferencias y suposiciones que permitan la caracterización mecánica de los suelos superficiales, lo cual reduce la calidad del resultado. Así mismo, y dada la alta complejidad en la modelación de las variaciones de los niveles freáticos, las condiciones de humedad del suelo se modelan de manera determinista, a partir de la definición de escenarios de saturación.

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.

5.5 Mapas de amenaza por deslizamiento

Se calcularon los mapas de amenaza por deslizamiento para Guatemala mediante los dos métodos mencionados anteriormente. El cálculo con el método de Mora-Varhson se realizó para 2 condiciones de humedad del suelo (completamente saturado y completamente seco), y un escenario sísmico, correspondiente a un sismo de magnitud Mw 6.8 (calculado con el programa CRISIS 2007, Ordaz et al 2007). El cálculo con el método de falla traslacional se realizó para las mismas 2 condiciones de humedad y amenaza sísmica. Los análisis realizados se listan en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Análisis de amenaza por deslizamiento realizados

N°	Tipo de análisis	Escenarios de humedad	Escenarios de sismo	N° de escenarios de deslizamiento.
1	Mora Vahrson	2	1	2
2	Falla Plana	2	-	2
		2	1	2

El parámetro de intensidad empleado es el *factor de inseguridad*, el cual corresponde al inverso del factor de seguridad. A mayor factor de inseguridad, mayor será la probabilidad de ocurrencia de la amenaza por deslizamiento. Los cálculos se realizaron empleando el programa ERN-Deslizamiento (ERN 2009). Los mapas presentados a continuación se dibujan teniendo en cuenta las siguientes escalas:

Escala método Mora – Vahrson: La clasificación de la amenaza por este método se divide en varias clases que se describen en la siguiente escala de colores, que va desde amenaza insignificante hasta muy alta.

I	II	III	IV	V	VI
Insignificante	Bajo	Moderado	Medio	Alto	Muy Alto
<6	7-32	33-162	163-512	513-1250	>1250

Escala método de falla traslacional: la escala gráfica de estos mapas se da en función del factor de inseguridad, de la manera mostrada a continuación.

0	0.1	0.5	0.83	>1.11
Muy Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy Alto

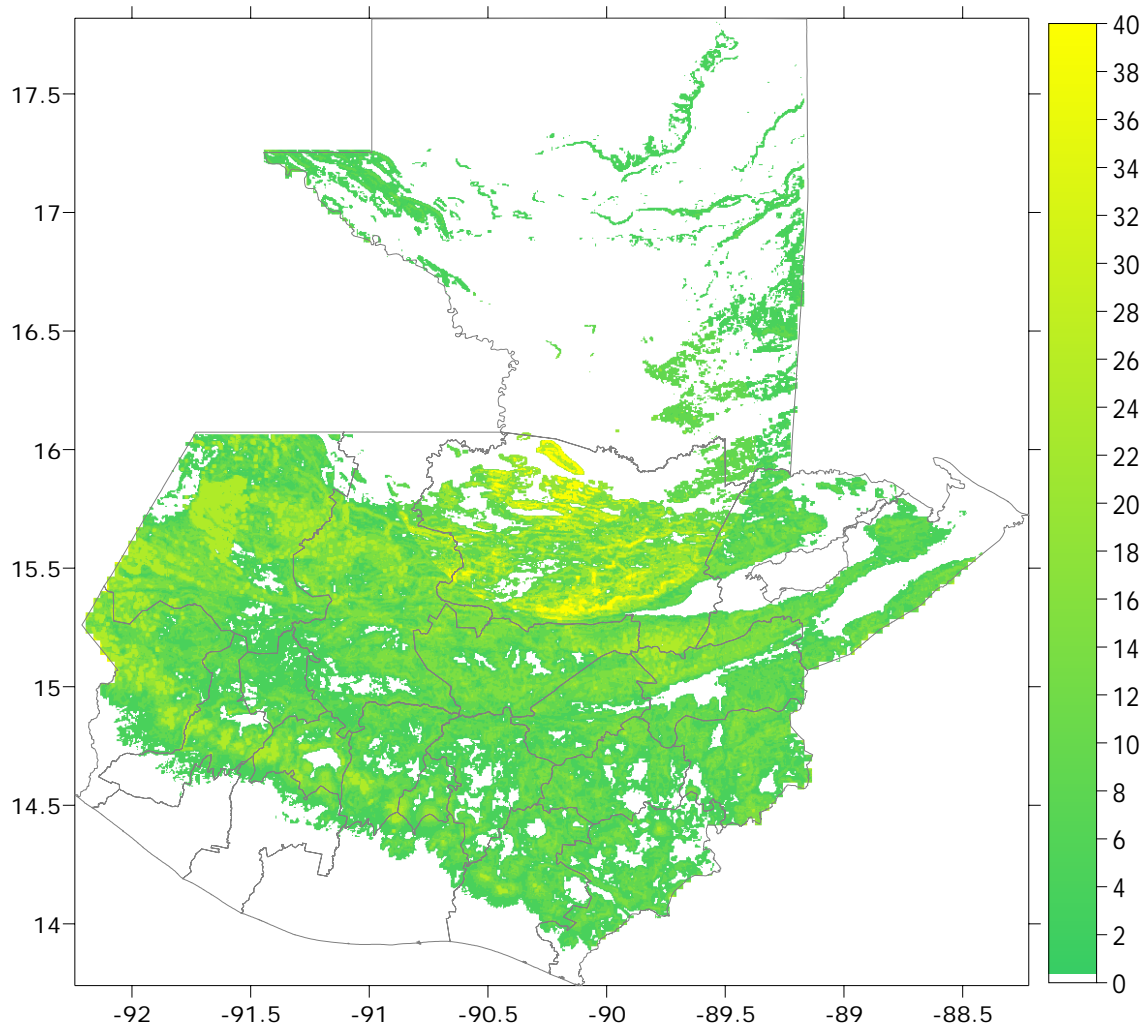


Figura 5-2
Mapa de amenaza por deslizamiento en condiciones secas con sismo. Calculado con el método de Mora-Varhson

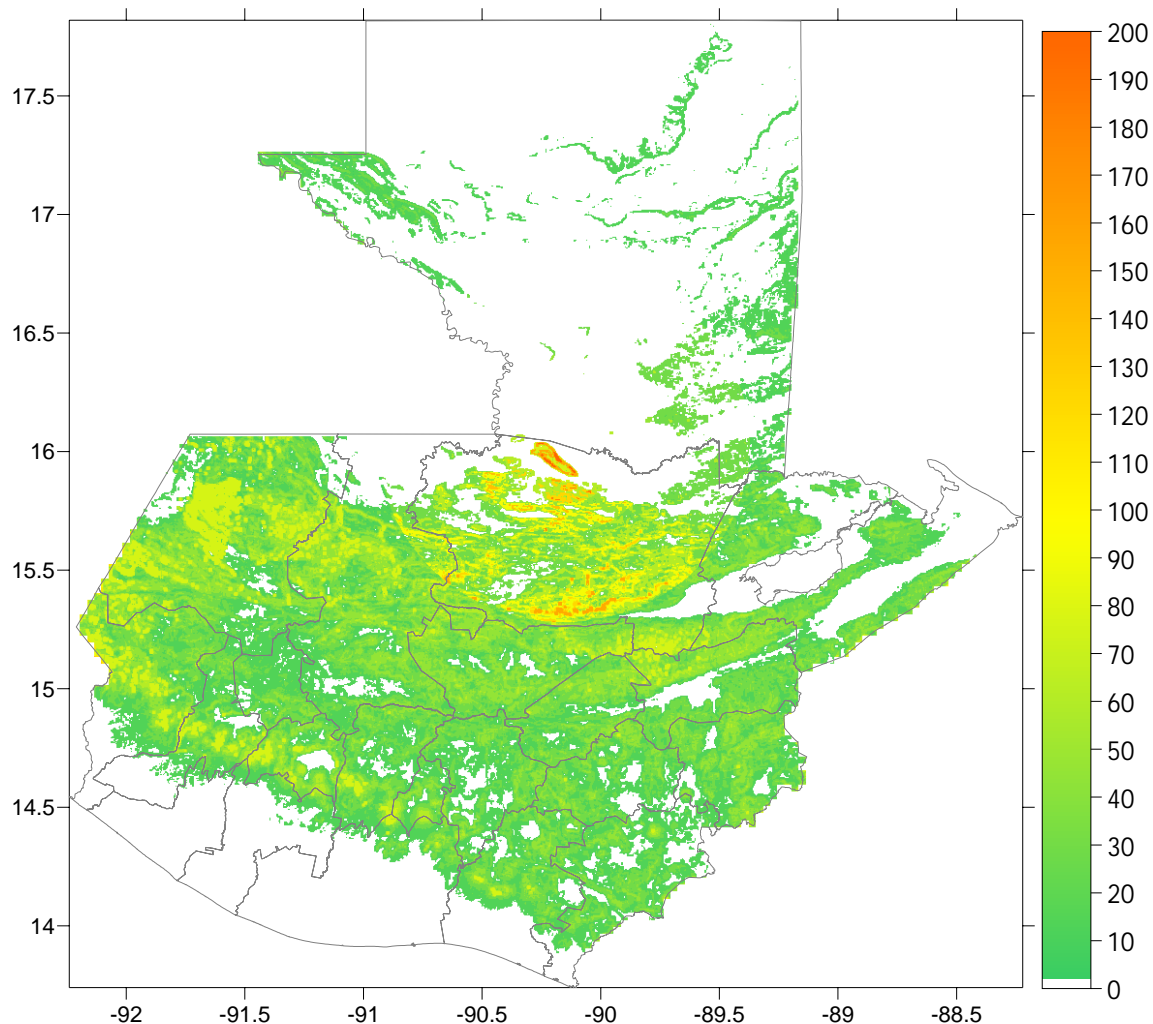


Figura 5-3
Mapa de amenaza por deslizamiento en condiciones húmedas con sismo. Calculado con el método de Mora-Varhson

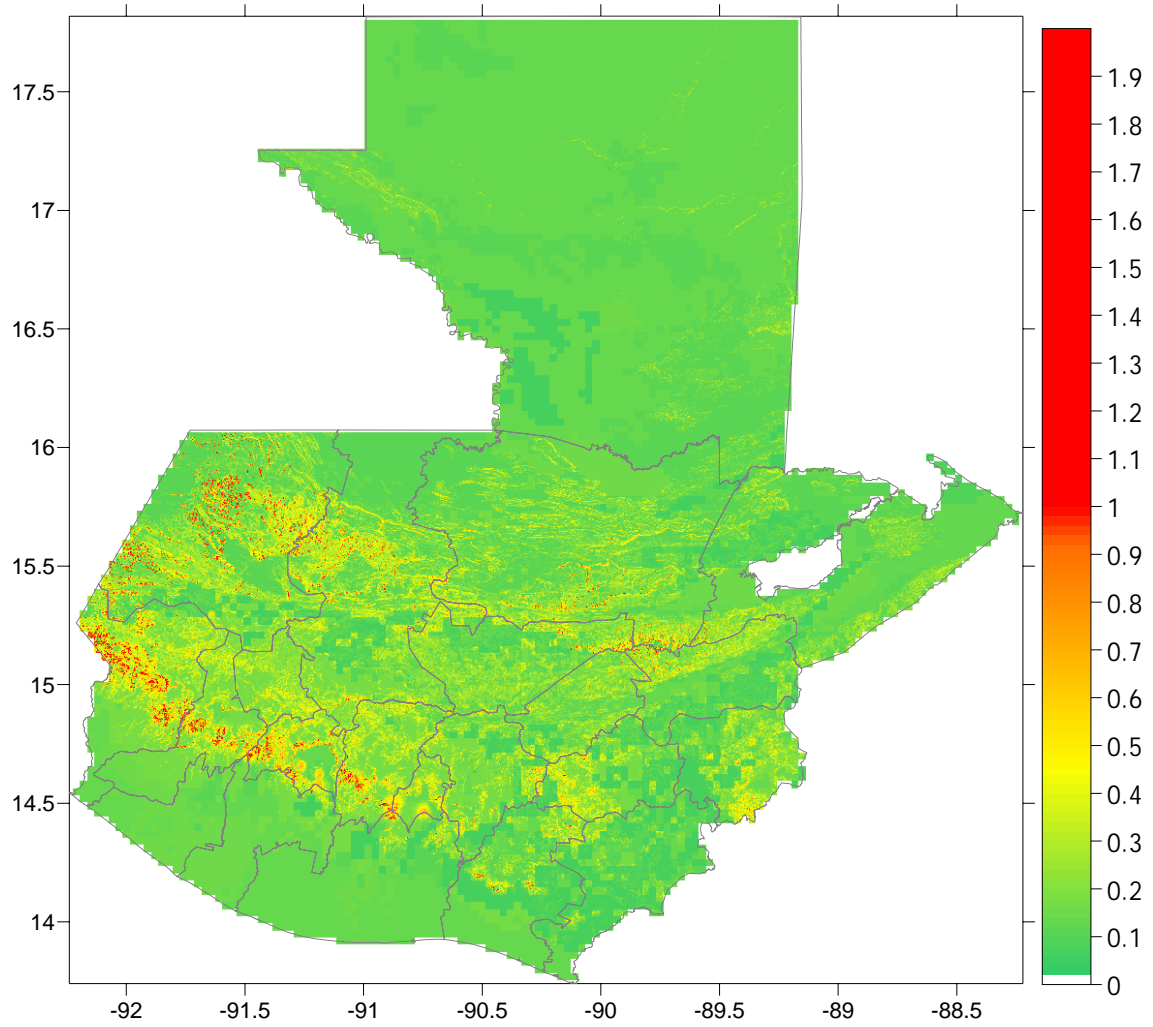


Figura 5-4
Mapa de amenaza por deslizamiento en condición seca sin sismo. Calculado con el método de falla traslacional

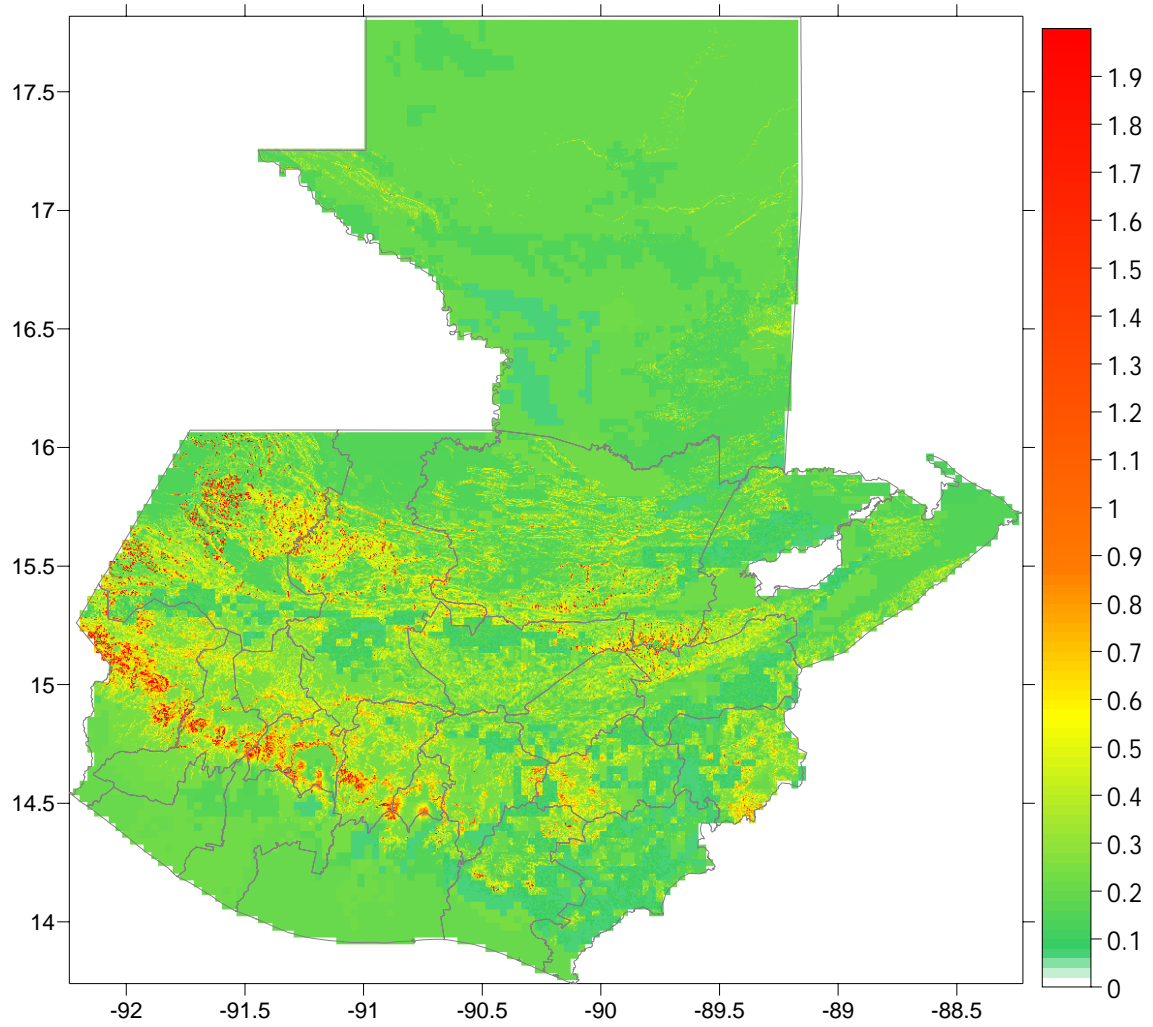


Figura 5-5
Mapa de amenaza por deslizamiento en condición saturada sin sismo. Calculado con el método de falla traslacional

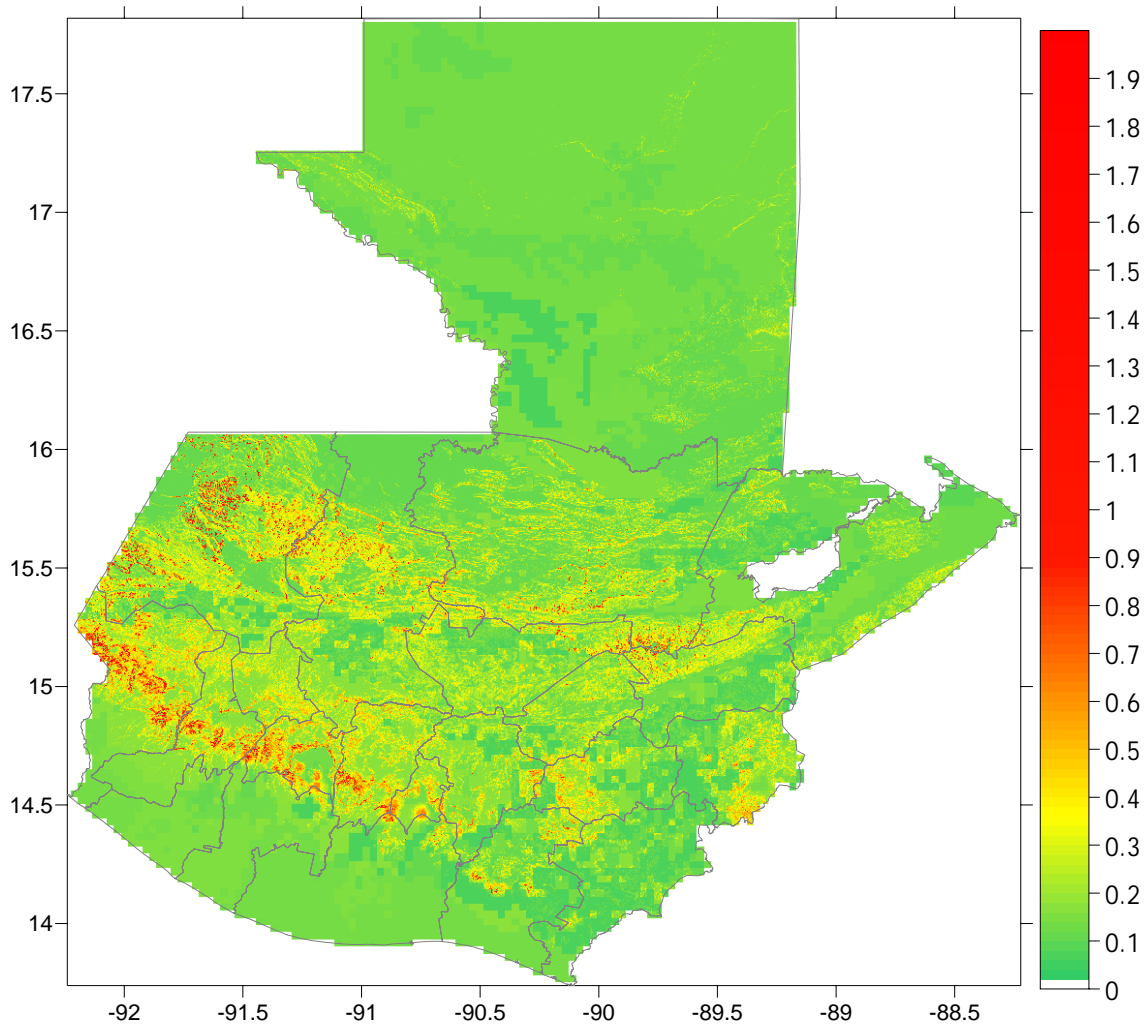


Figura 5-6
Mapa de amenaza por deslizamiento en condición seca con sismo. Calculado con el método de falla traslacional

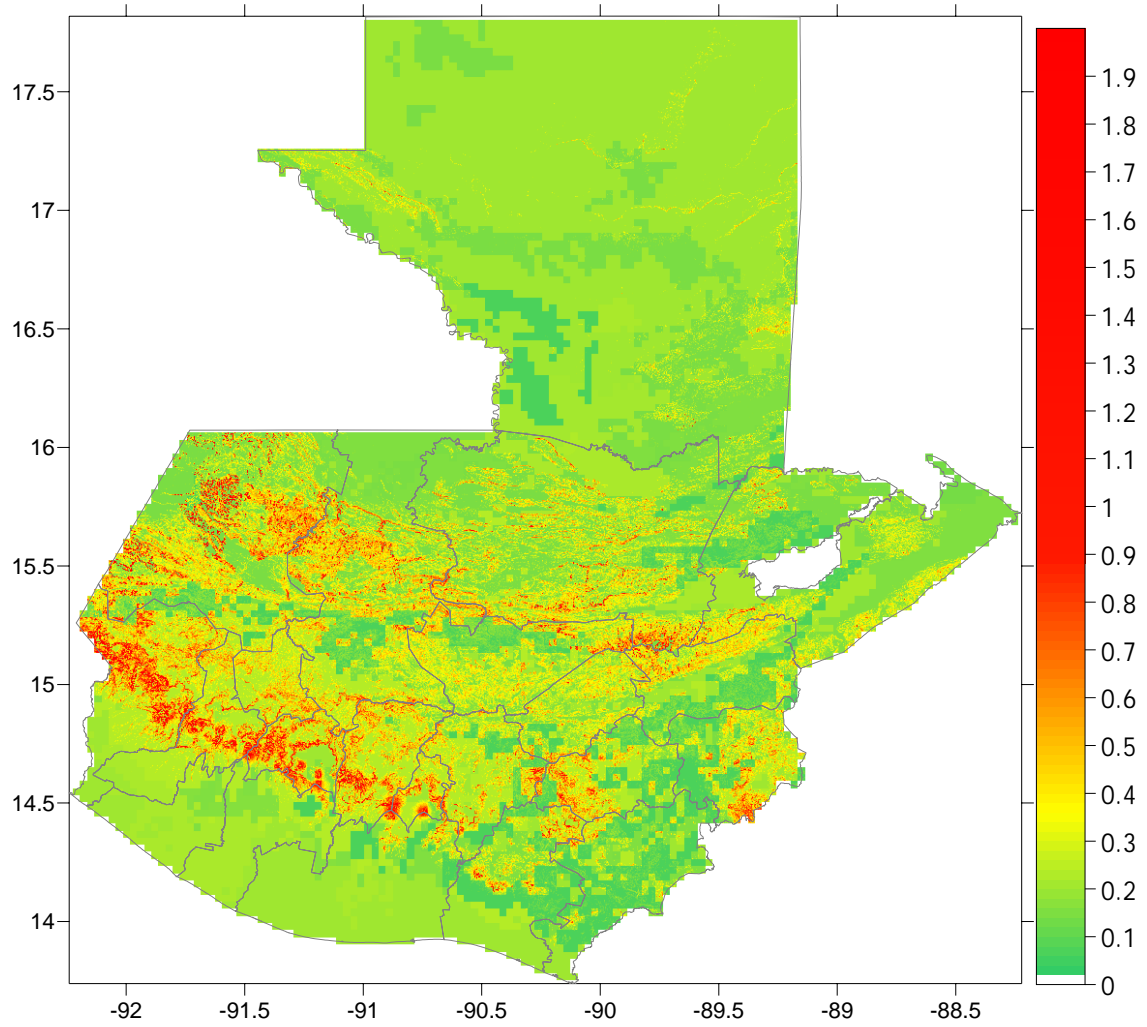


Figura 5-7
Mapa de amenaza por deslizamiento en condición saturada con sismo. Calculado con el método de falla traslacional

6 Amenaza volcánica

6.1 Introducción

Para el caso de la amenaza volcánica en Guatemala, se realizó una modelación determinista de la amenaza al no contarse, en la mayoría de los casos, con información suficiente para una adecuada modelación probabilista. Cada volcán fue caracterizado a partir de su historia eruptiva y características vulcanológicas generales, con el fin de modelar el escenario de amenaza más representativo.

6.2 Calidad de los datos disponibles

La información de erupciones históricas y sus efectos, en lo que se refiere a la distribución espacial de los productos asociados, es generalmente escasa. La caracterización adecuada de la amenaza volcánica, siguiendo el enfoque probabilista presentado en el informe ERN-CAPRA-T1.2 (Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales, ERN 2009), requiere la caracterización de las tasas de excedencia de valores de VEI, y la determinación de la intensidad de la erupción asociada a cada VEI, en términos de su valor esperado y desviación estándar. Dados los periodos de retorno asociados a erupciones volcánicas importantes (del orden de 10000 años), no es posible realizar una caracterización completa de las tasas de excedencia para el espectro completo de valores de VEI. Por este motivo, la información existente permite únicamente el cálculo de la amenaza volcánica desde un enfoque determinista.

Así mismo, la caracterización vulcanológica necesaria para el cálculo de la distribución de productos volcánicos, de acuerdo a los modelos propuestos, requiere de estudios detallados para cada volcán, que en la actualidad no se encuentran disponibles.

Por otra parte, la información topográfica empleada para el cálculo de las intensidades asociadas a los productos de una erupción, cuenta con una buena resolución (30 metros) para el cálculo a nivel local en cada volcán.

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.

6.3 Evaluación de la amenaza volcánica

Las características geológicas de Guatemala hacen de este uno de los países con la mayor actividad volcánica en Centro América y el mundo. En Guatemala existen aproximadamente 288 volcanes o estructuras identificadas como de origen volcánico, de los cuales solamente 8 tienen reportes de actividad en tiempos históricos, y 4 son los más

activos actualmente. Por su estructura todos son del tipo estratovolcán, con excepción del Santiaguito que es una secuencia de cuatro domos de lava dacítica, pero sólo unos 37 de ellos son reconocidos oficialmente como volcanes por la Federación Nacional de Andinismo. Se destacan los volcanes de Tajumulco, el pico más alto de América Central (4,220 msnm), Volcán de Fuego (3,763 msnm), el de Santa María (3,772 msnm), el Volcán de Agua (3,763 msnm), el Volcán San Pedro y el Tolimán, a orillas del lago Atitlán (Ver Figura 6-1, Figura 6-2).



Figura 6-1

Localización de principales volcanes en Guatemala

(Tomado de Global Volcanism Program - Smithsonian Institute. Disponible en Google Earth)



Figura 6-2

Grandes volcanes de Guatemala

(Fuente: http://volcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/Guatemala/Maps/map_guatemala_volcanoes.html)

La modelación de la amenaza volcánica se realizó exclusivamente sobre los volcanes activos del país, que presentan actividad reciente a partir de la cual fue posible recopilar datos de erupciones históricas para la caracterización del volcán.

6.3.1 Volcán Tajumulco

El volcán Tajumulco está localizado en el municipio de Tajumulco, departamento de San Marcos y se encuentra a unos 17 km de la frontera con México. Este volcán es el más alto de Guatemala y de Centroamérica: tiene una altura de 4,220 metros. La cúspide mayor se encuentra en el lado este y tiene un pequeño cráter de unos 50 metros de diámetro. La cúspide menor se conoce como Cerro Concepción y tiene una altura de 4,100 metros (ver Figura 6-3). Es un estratovolcán de composición andesítica. Existen varios reportes que relatan erupciones históricas (1765, 1821, 1863), sin que ninguno se haya confirmado aún.

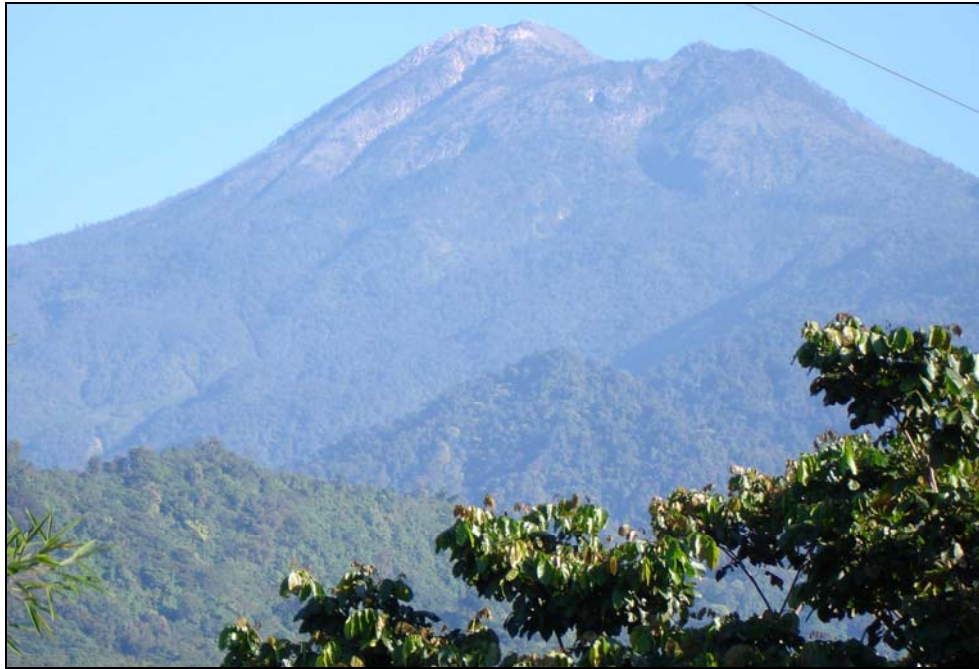


Figura 6-3
Volcán Tajumulco

(Fuente: <http://static.panoramio.com/photos/original/6349100.jpg>)

6.3.2 Volcanes Santa María y Santiaguito

El volcán Santa María es un estratovolcán con altura de 3772 msnm, de forma cónica cortada al suroeste por un amplio cráter de 1.5 Km de diámetro. A la gran erupción Pliniana de 1902 que devastó el suroeste de Guatemala, la precedió un periodo de reposo hasta 1922 cuando en el centro del cráter colapsado empezó a construirse un domo de lava dacítico que actualmente se conoce como Volcán Santiaguito, la construcción continua, y que presenta actividad actualmente representada en pequeñas erupciones explosivas, flujos de lava y flujos piroclásticos. El Santiaguito ahora alcanza una altura de 2.500 msnm y tiene un volumen de aproximadamente 1 km³ (ver Figura 6-4). La erupción de 1902 (VEI=6) en el volcán Santa María dejó un cráter de 700x1000 m al SW del volcán. En 1922 empezó una actividad que aun continua con VEI no superior a 3.



Figura 6-4
Volcanes Santa María (derecha) y Santiaguito (centro)
(Fuente: http://image14.webshots.com/15/6/0/92/173960092ALCDfG_ph.jpg)

6.3.3 Volcán Pacaya

El volcán de Pacaya está ubicado entre los departamentos de Guatemala y Escuintla, y tiene una altura de 2,550 msnm. Este volcán forma parte de un macizo volcánico que comprende los cerros: Hoja de Queso (2,090 msnm), el Cerro de Agua (2,560 msnm) y el Cerro Chiquito (2,420 msnm). A la vez forma parte de una gran caldera volcánica que comprende el lago de Amantillan y la laguna de Calderas (ver Figura 6-5).

Es un estratovolcán de composición basáltica y de naturaleza estromboliana. Debido a las constantes erupciones, la forma del cono cambia constantemente. La caldera principal se formó hace aproximadamente 23,000 años. Hace aproximadamente 1,100 años, el edificio del volcán colapsó causando un enorme deslizamiento. Depósitos del deslizamiento viajaron alrededor de 25 km desde el volcán hacia la costa del Pacífico. El evento dejó un gran cráter, dentro del cual un cono activo ha ido creciendo. En la actualidad, el Pacaya es el volcán más grande del tipo post-caldera, y ha sido uno de los volcanes más activos de Centro América en los últimos 500 años y en total ha hecho erupción 23 veces desde la colonización española de América.



*Figura 6-5
Volcán Pacaya*

6.3.4 Volcán Fuego

Este volcán está ubicado entre los departamentos de Escuintla, Sacatepéquez y Chimaltenango. La altura de este macizo ha variado debido a sus erupciones. Su nombre en idioma kaqchikel es "Chi Gag" que quiere decir "donde está el fuego". El volcán Fuego es hermano gemelo del volcán de Acatenango por su cercanía. La unión entre estos dos volcanes se llama "Horqueta" y tiene una altura de 3,300 metros. Es uno de los más activos, registrando erupciones desde 1524 hasta 1974. En ocasiones las cenizas expulsadas han llegado hasta El Salvador y Honduras (ver Figura 6-6).

Es un estratovolcán, sus erupciones son principalmente básicas y los productos varían de basaltos a andesitas. Varias erupciones han sido reportadas desde la era española en 1524 y han producido abundante caída de ceniza así como flujos piroclásticos y flujos de lava. Ha hecho erupción más de 60 veces. Durante el 1 y 6 de julio de 2004, explosiones pequeñas en el volcán Fuego produjeron columnas de humo de alrededor de 1km de altura. Las avalanchas incandescentes de material volcánico viajaron bajo los barrancos que flanquean el volcán.



Figura 6-6
Volcán Fuego

(Fuente: http://www.spaniards.es/archivos/image_library/volcan%20de%20fuego_2.jpg)

6.3.5 *Volcán Tacana*

El volcán Tacana es el segundo pico más alto de Centro América (4060 metros) y se localiza en la frontera con México. Es un estratovolcán con forma cónica truncado de unos 10 km de diámetro en la base. Su cúspide está formada por una cápsula de lava, al pie de la cual se encuentra una pequeña planicie bordeada por una cresta semicircular. Otras dos planicies se encuentran en la falda sureste, respectivamente a unos 3,870 y 3,800 m de altura, cada una conteniendo un cráter más joven. En la falda suroeste se encuentra un cráter adventicio elíptico, a unos 190 m bajo la cima. El cráter de la cima, del cual se formó la cúpula, tiene unos 400 m de diámetro (ver Figura 6-7).

El volcán se asienta en un macizo de granito, conocido como sierra Madre. La roca principal de la cúpula de la cima es andesita de angita e hiperstena de color claro. La roca al pie este del volcán, cerca de Sibinal, es andesita de horblenda e hiperstena negra. En la base afloran también tobas, brechas y pómez. La actividad histórica del Tacana corresponde principalmente a erupciones freáticas, incluyendo la producción de flujos piroclásticos.



Figura 6-7

Volcán Tacaná (izquierda)

A la derecha puede observarse el volcán Acatenango

(Fuente: <http://www.guate360.com/galeria/data/media/174/5.jpg>)

6.3.6 Volcán Agua

El volcán Agua recibe su nombre (Hunahpú en cakchiquel) a raíz de la destrucción de la ciudad de Santiago, antigua capital guatemalteca, en la noche del 10 al 11 de septiembre de 1541, la cual se cree se debió a ldesbordamiento de la laguna ubicada en su cima, por efecto de fuertes lluvias. El volcán Agua es un estratovolcán que se eleva hasta los 3760 msnm (ver Figura 6-8). Sobresale por su forma cónica simétrica. En la cima se pueden hallar concentraciones de agua en el cráter. Su composición varía de basalto a basalto-andesítica. No se reporta actividad histórica.



Figura 6-8
Volcán Agua

(Fuente: <http://www.guatemalaguides.com/zimages/i109165205915.jpg>)

6.3.7 Volcán Acatenango

Es un estratovolcán ubicado cerca a Antigua, es el tercero más alto de Guatemala. El volcán tiene dos picos, el Pico Mayor y Yepocapa (3.880 msnm), que también es conocido como Tres Hermanas. Acatenango se encuentra unido al volcán Fuego, unión conocida como La Horqueta (ver Figura 6-9).

El macizo Fuego-Acatenango comprende una cadena montañosa de cinco o más volcanes de dirección norte-sur en forma perpendicular al arco centroamericano de Guatemala. Entre los principales se encuentran Antigua Acatenango, Yepocapa, Pico Mayor de Acatenango, Meseta y volcán Fuego. El volcanismo en ésta región tiene una historia de más de 200.000 años.

Las únicas erupciones conocidas ocurrieron en el siglo XX, entre los años 1924 y 1927, al norte de la cima del Pico Mayor y, nuevamente en diciembre de 1972 entre Yepocapa y Pico Mayor.



Figura 6-9
Volcán Acatenango (centro), Fuego (izquierda) y Agua (derecha)
(Fuente: http://farm2.static.flickr.com/1407/748206254_ec51743f00.jpg)

6.3.8 Volcán Almolonga

El volcán Almolonga es un domo andesítico-dacítico localizado a 5 Km al oeste de Quezaltenango. Posee una caldera, domos de lava y fuentes termales y de fumarolas (ver Figura 6-10). Un colapso del volcán produjo una caldera de 3,3 Km donde se localizan aproximadamente 8 domos de lava post-caldericos, en el costado norte de la caldera.

El domo más joven y el único activo se llama Cerro Quemado. Hace 1200 años parte del domo andesítico-dacítico colapso y formo una avalancha de escombros asociada a una explosión lateral que sobrepaso el valle hacia el oeste. Amenazas volcánicas para este volcán se consideran flujos de lava, colapso de domos, avalancha de escombros, flujos piroclásticos y blasts laterales.



Figura 6-10
Volcán Almolonga

*En el centro se observan los pequeños domos, a la izquierda se observa el Volcán Santa María.
(Fuente: <http://www.volcano.si.edu/world/volcano.cfm?vnum=1402-04=&volpage=photos&photo=038077>)*

6.3.9 Volcán Atitlán

El volcán Atitlán es uno de los muchos estratovolcanes cónicos de las montañas de Guatemala. Al igual que su volcán gemelo Tolimán, este forma un relieve contrastante en el lago calderico de Atitlan, uno de los lugares más visitados del país. Tiene una altura de 3535 msnm y la cúspide tiene un cráter de unos 250 metros de diámetro y de unos 50 metros de profundidad. Está abierto hacia el sur y está rodeado por hendiduras y grietas concéntricas, de las cuales emanan débiles fumarolas (ver Figura 6-11).

En sentido estructural, el volcán está íntimamente ligado con la génesis del lago de Atitlán, que es una depresión formada por hundimientos tectónicos. Su composición es andesítica y es más joven que el Toliman, aunque sus periodos de actividad se alternan entre sí. A su vez, en contraste con el Tolimán, el Atitlán muestra una cubierta espesa de piroclásticos.



Figura 6-11
Volcán Atitlán

(Fuente: <http://www.volcano.si.edu/world/volcano.cfm?vnum=1402-06=&volpage=photos&photo=078053>)

6.3.10 Volcán Tolimán

El volcán Tolimán es gran estratovolcán de composición andesítica que se levanta al sur del lago Atitlan. Tiene dos picos, uno al sur de 3,158 msnm y otro al norte de 3,134 msnm. El Tolimán se formó durante el Pleistoceno, durante un periodo denominado *Atitlán III*. En la cima se encuentra un pequeño cráter elíptico. A diferencia de su gemelo Atitlán, el Tolimán está cubierto en su cima por espesos flujos de lava (ver Figura 6-12). Toda la falda norte está cubierta por lavas viscosas de composición dacítica a andesítica.



Figura 6-12
Volcanes Tolimán (derecha) y Atitlán (izquierda), rodeados por el lago Atitlán
(Fuente: <http://static.panoramio.com/photos/original/5542969.jpg>)