



Taller:

"Divulgación de Insumos Técnicos para la Actualización de la Normativa Nacional para Diseño y Construcción en El Salvador"



Universidad Centroamericana
José Simeón Cañas



MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE



MINISTERIO DE
OBRAS PÚBLICAS Y
DE TRANSPORTE



Colaboración del
Pueblo Japonés





Plan de acción para implementar el Índice de Gobernabilidad y Políticas Públicas para la Gestión del Riesgo de Desastres (EST1267)



MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y DE TRANSPORTE

GENERALIDADES

- ❖ Proyecto de cooperación técnica no reembolsable.
- ❖ **Objetivo principal:**
Trabajar en el desarrollo de insumos técnicos necesarios para una futura actualización de la Normativa Nacional para Diseño y Construcción Sismorresistente y para un Plan Nacional para la Reducción de Vulnerabilidad Sísmica
- ❖ **Beneficiario:** El Salvador
- ❖ **Agencia Ejecutora:** Banco Interamericano de Desarrollo (BID)
- ❖ **Financiamiento:** 700,000 USD
- ❖ **Participantes:** MARN (Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales), MOP (Ministerio de Obras Públicas) y UCA (Universidad Centroamericana José Simeón Cañas)
- ❖ **Contrapartida local:** 100,000 USD (UCA). Técnicos y especialistas de las distintas instituciones.
- ❖ **Período de ejecución:** 2018-2021

COMPONENTES DEL PROYECTO

- ❖ **Componente 1. Fortalecimiento de capacidades para mejorar el entendimiento del Riesgo Sísmico:**
 - Actualización en la evaluación de amenaza sísmica de El Salvador.
 - Desarrollo de estudios para la caracterización dinámica de los suelos del país, y
 - Análisis de vulnerabilidad sísmica, realización de análisis de laboratorio de dinámica de suelos y de estructuras grandes.
- ❖ **Componente 2. Fortalecimiento de la Normativa Nacional Sismo-Resistente e implementación:**
 - Propuesta de actualización del Reglamento de Seguridad Estructural de las construcciones, y
 - Diseño de un Plan Nacional para la reducción de la vulnerabilidad sísmica.

LOGROS A MEDIANO Y LARGO PLAZO

- Fortalecimiento** de capacidades institucionales para entender y enfrentar el riesgo sísmico.
- Generación** de condiciones para que los estudios técnicos se sigan desarrollando y se mejore la evaluación del riesgo sísmico y la reducción de la vulnerabilidad sísmica.
- Formar** a ingenieros jóvenes en temáticas relacionadas con la gestión del riesgo e incentivarlos a seguir estudios de Maestría y Doctorado.
- Contribuir** a construir un país cada vez menos vulnerable a los desastres.



Plan de acción para implementar el Índice de Gobernabilidad y Políticas Públicas para la Gestión del Riesgo de Desastres (EST1267)



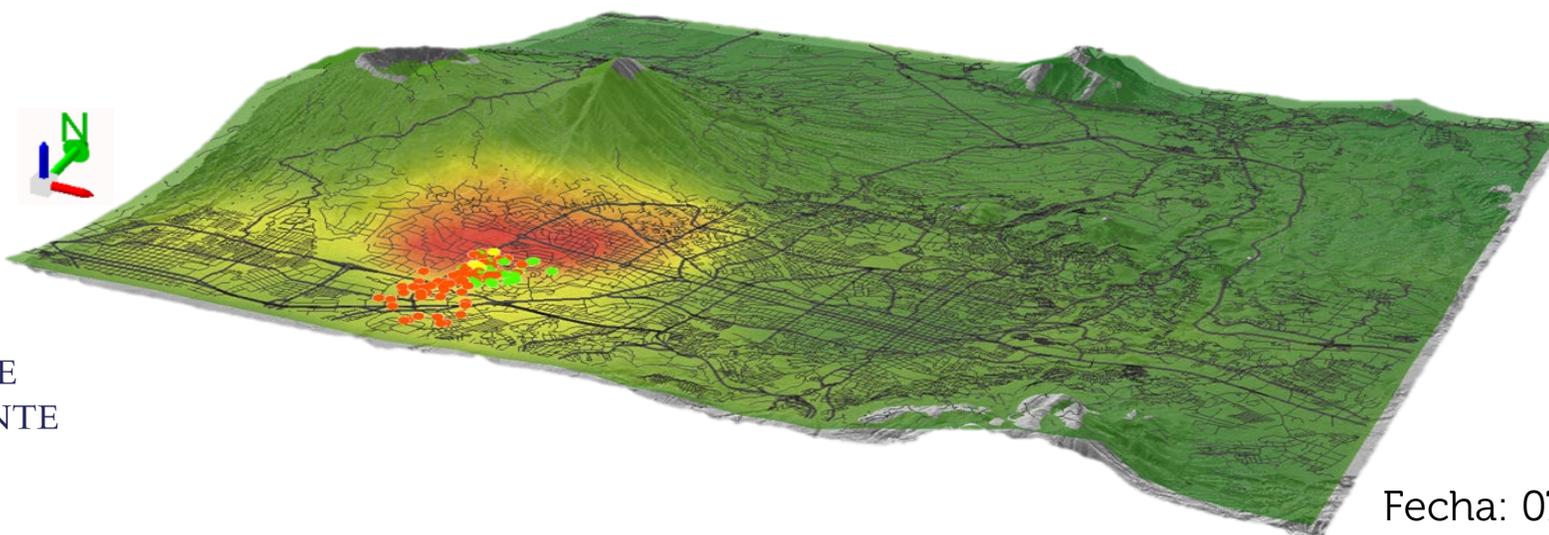
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y DE TRANSPORTE

Caracterización y evaluación probabilística de la amenaza sísmica de El Salvador

Presenta: Luis Ernesto Mixco Durán. Ing. Civil, MSc, MBA



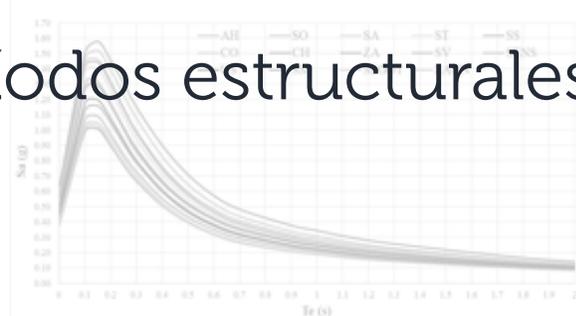
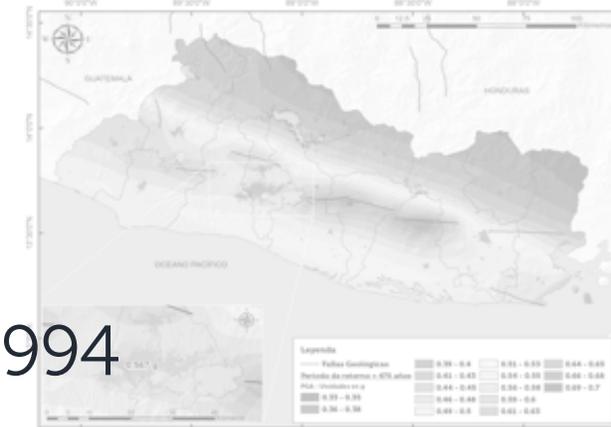
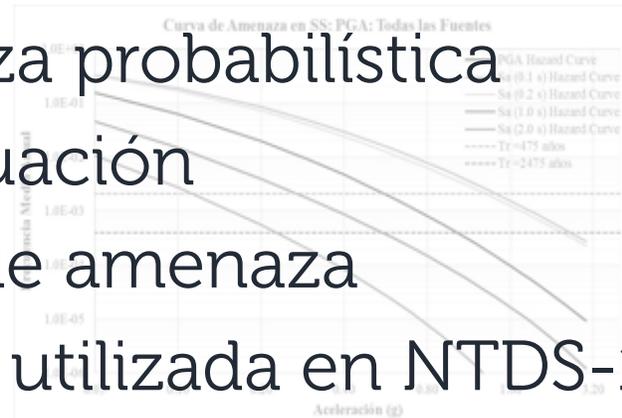
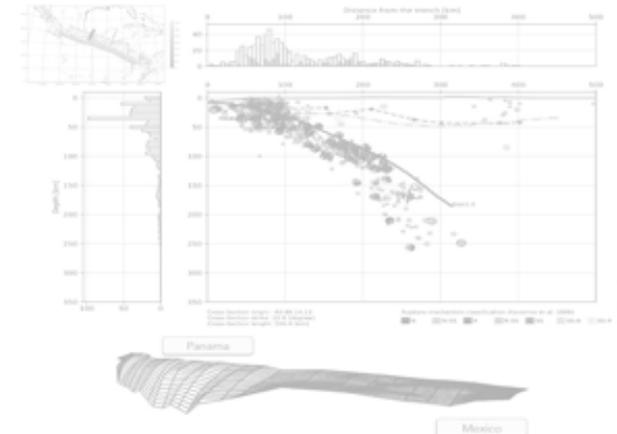
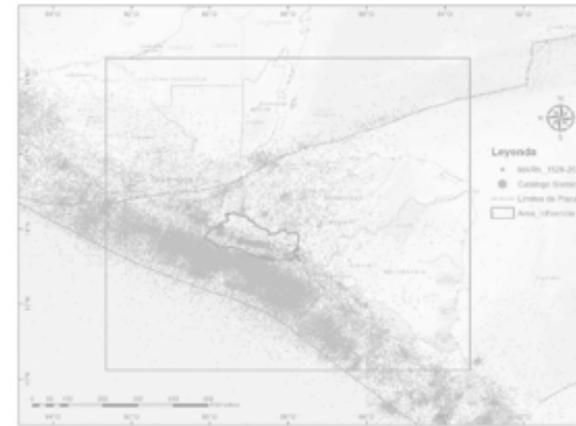
GOBIERNO DE EL SALVADOR

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

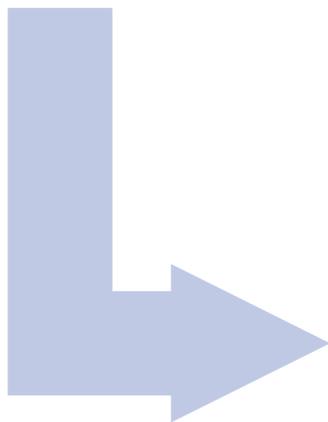
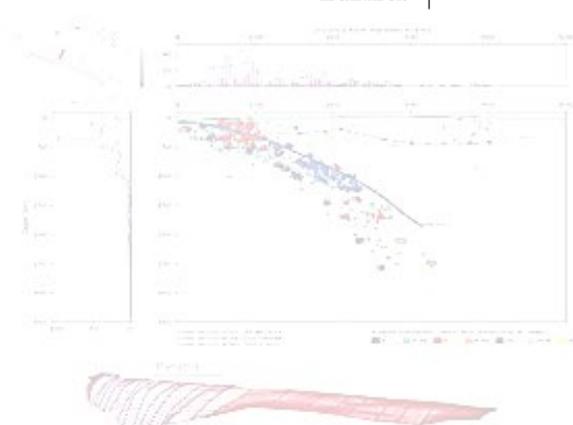
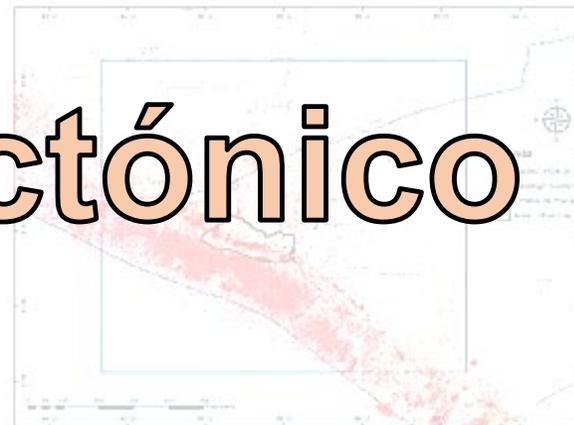
Fecha: 07 de septiembre de 2021

Contenido

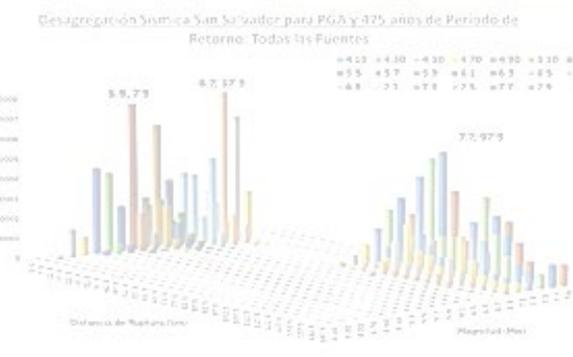
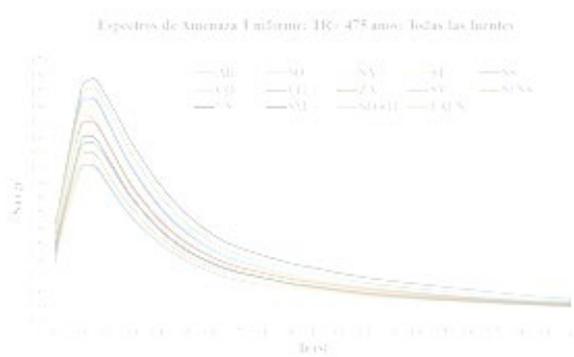
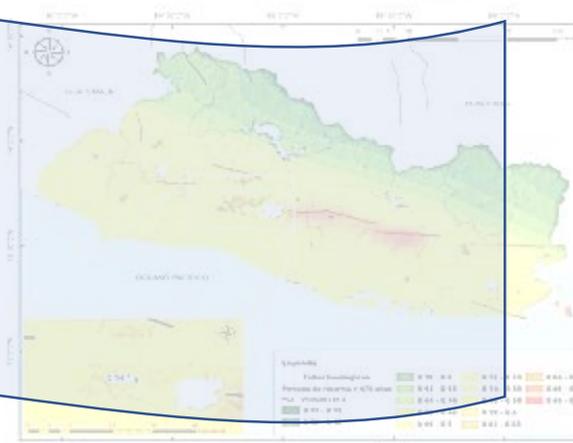
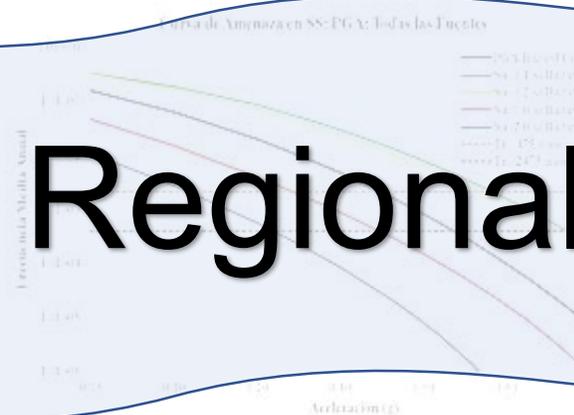
1. **Marco sismo-tectónico**
2. Concepción de fuentes sísmicas
3. Catálogo sísmico utilizado
4. Modelación de fuentes sísmicas
5. Enfoque para cálculo de amenaza probabilística
6. Evaluación de modelos de atenuación
7. Antecedentes de evaluaciones de amenaza
8. Filosofía de cálculo de amenaza utilizada en NTDS-1994
9. Resultados de amenaza probabilística en suelo firme
10. Desagregación sísmica para períodos estructurales de interés
11. Conclusiones



Marco sismo-tectónico

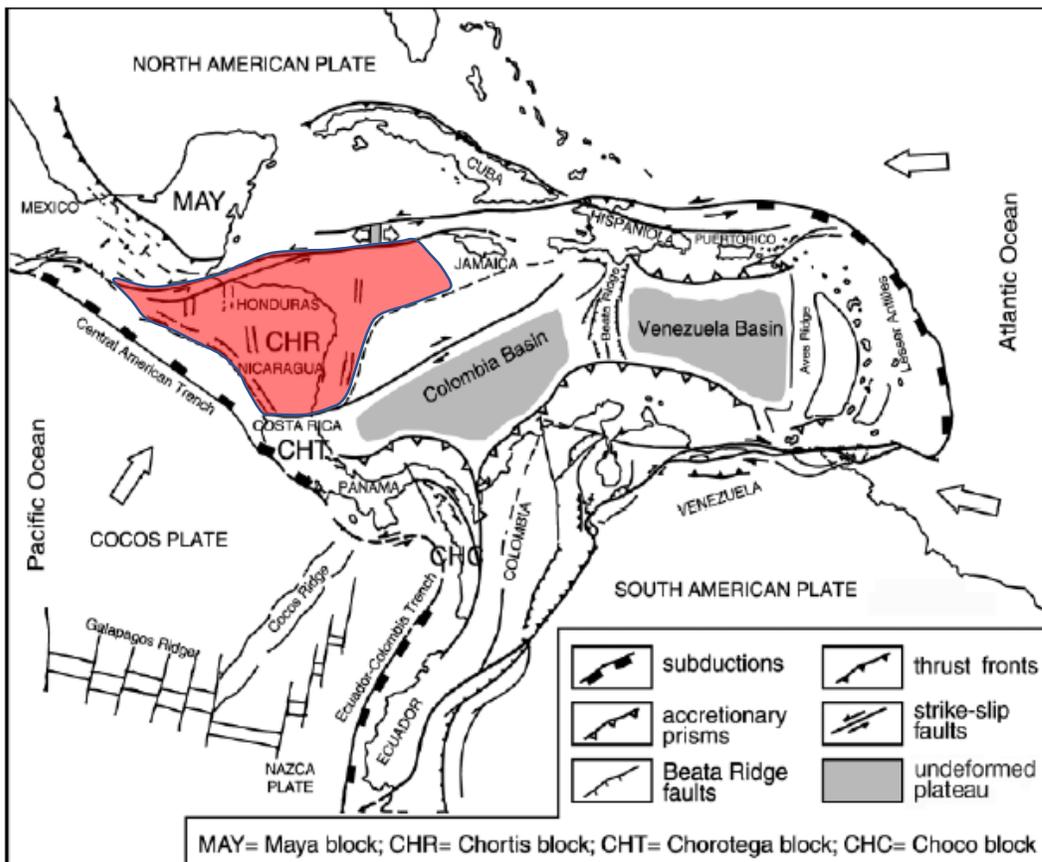


Nivel Regional

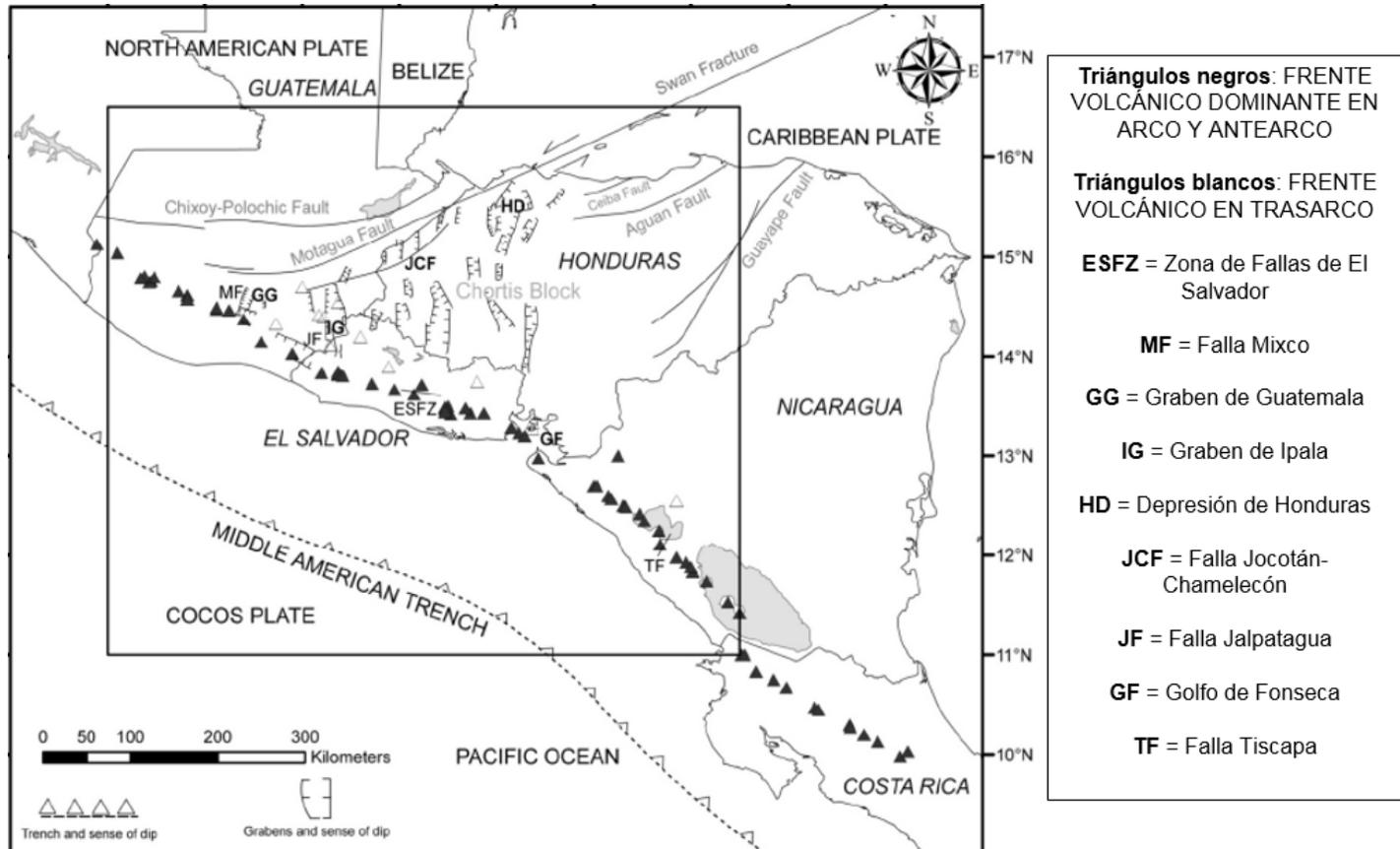


Marco sismo-tectónico

Mapa tectónico - estructural macro-regional



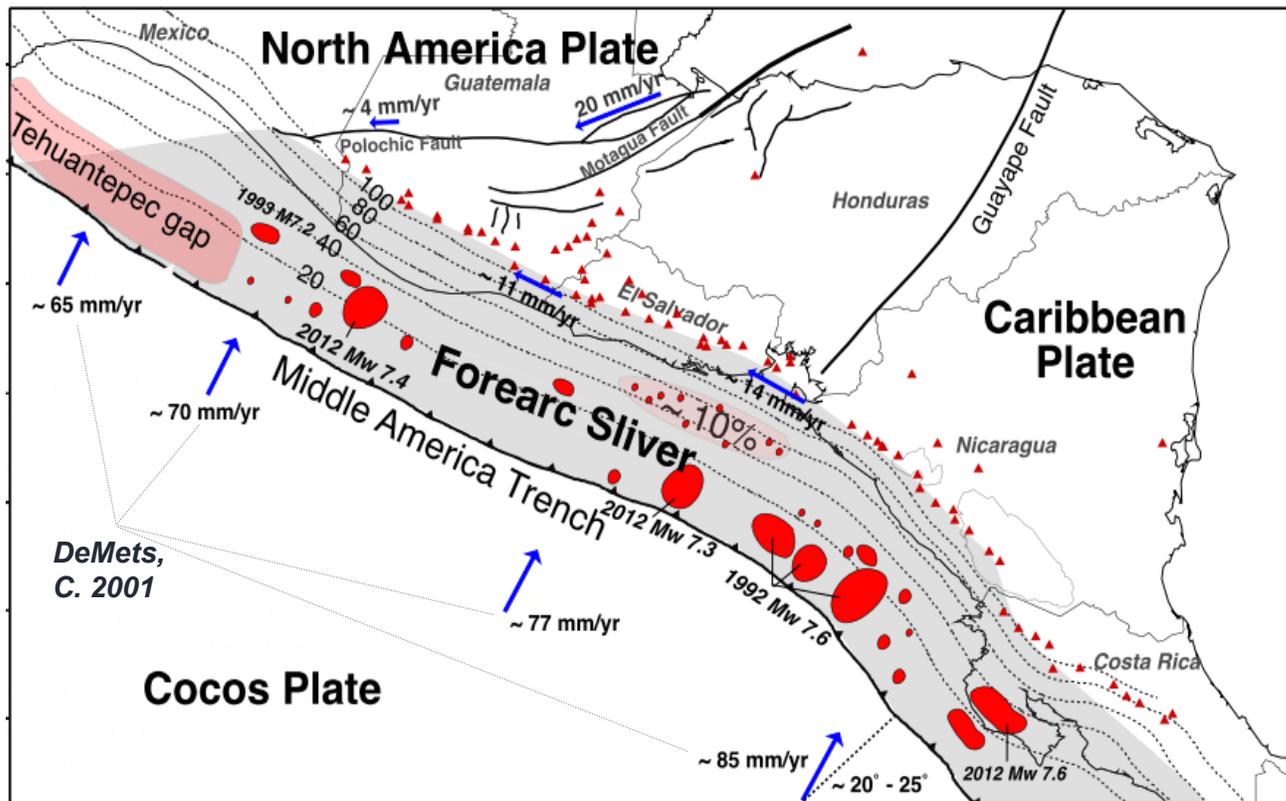
Fuente: Giunta et al, 2006



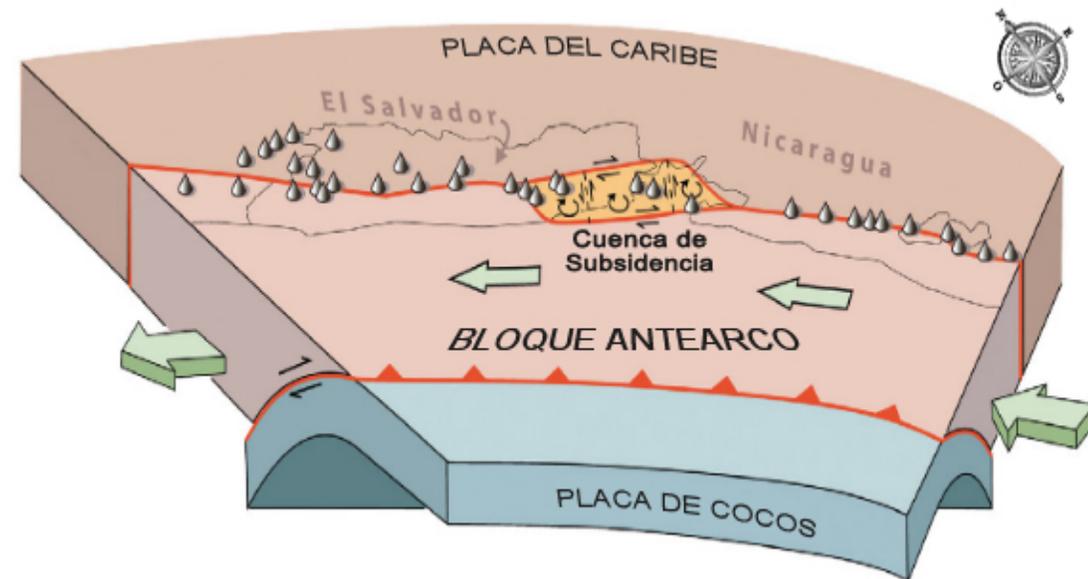
Fuente: Modificada Salazar et al., 2013

Marco sismo-tectónico

Tectónico micro-regional: Bloque de antearco



Fuente: Ye, L.; Lay, T; Kanamori, H. 2013

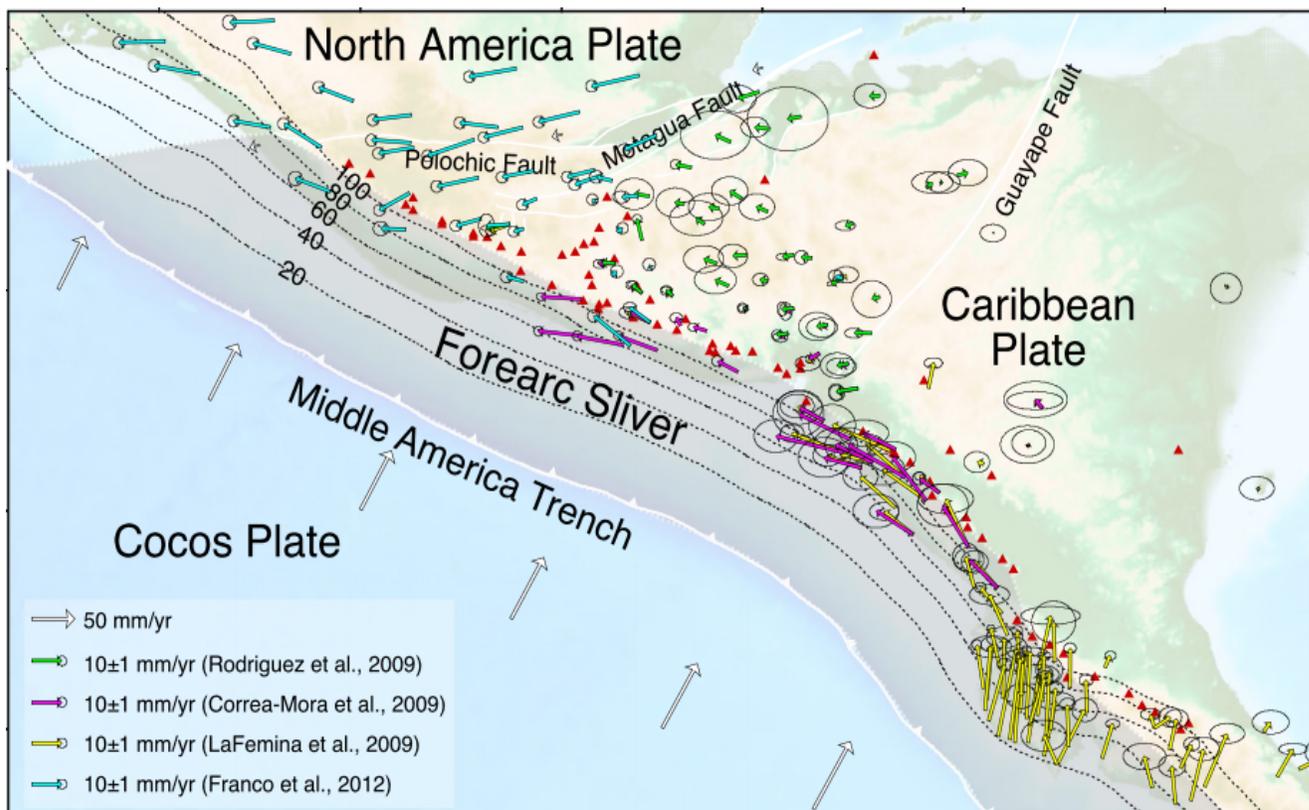


Fuente: [Correa-Mora et al., 2009]

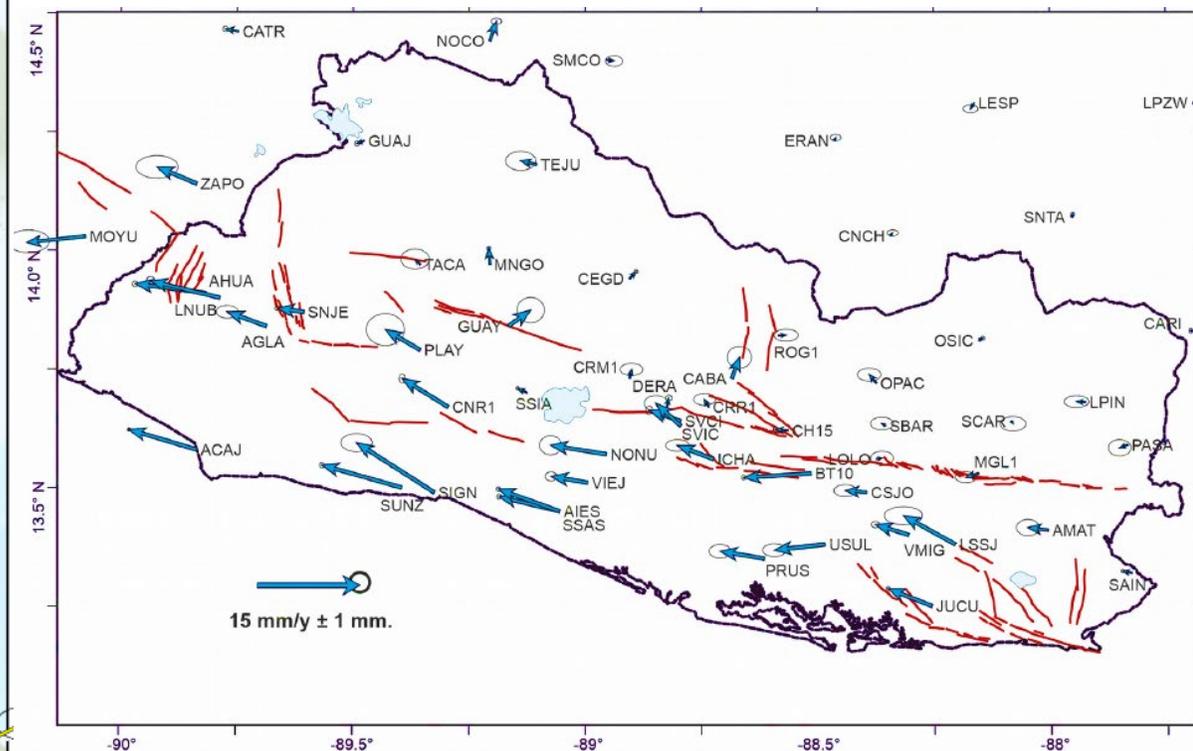
Proceso tectónico basado en el movimiento hacia el noroeste de una cuña de la Placa del Caribe, llamado **Bloque de Antearco**. Esta se mueve paralelamente a la trinchera. Se desplaza a 11-14 mm/año (relativo a la Placa del Caribe). A este fenómeno se le conoce como **Escape Tectónico**.

Marco sismo-tectónico

Tectónico micro-regional: Dirección de vectores de GPS



Fuente: Ye, L.; Lay, T; Kanamori, H. 2013

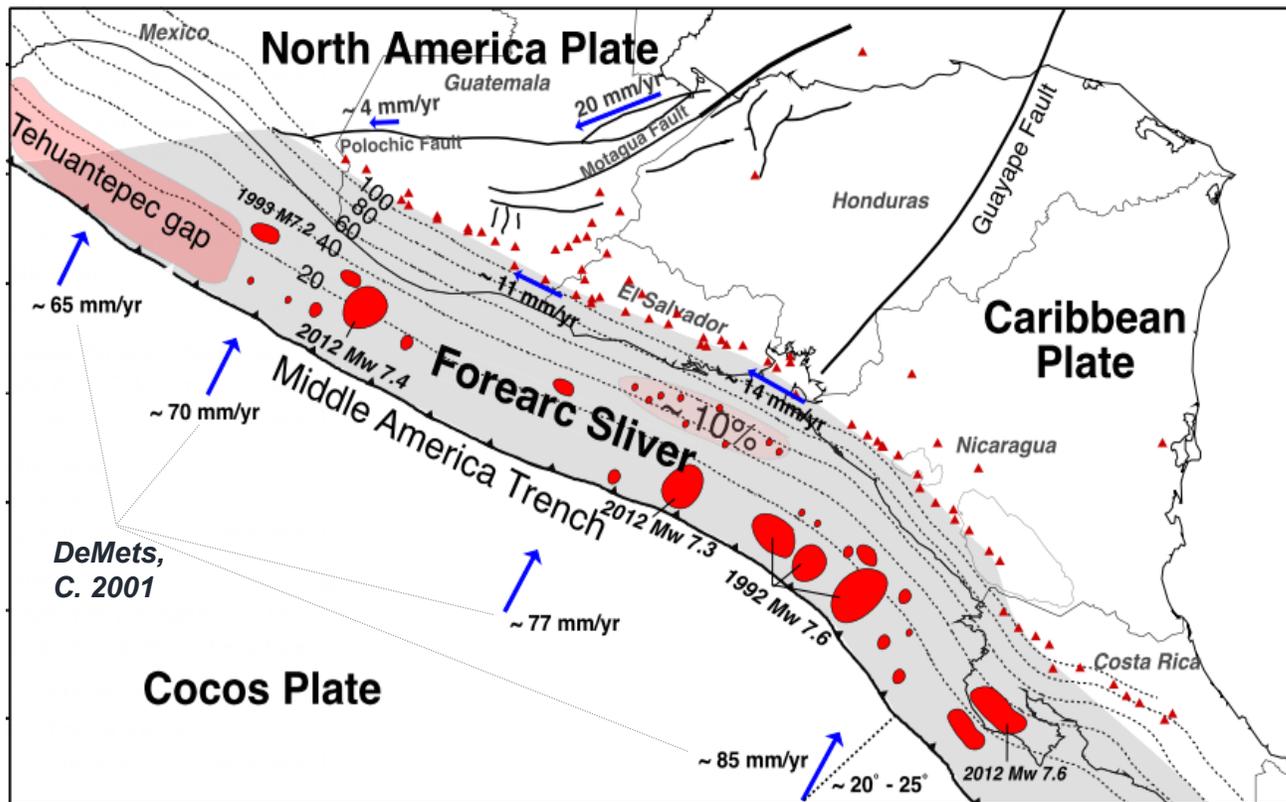


Fuente: [Martínez-Díaz et al. 2020]

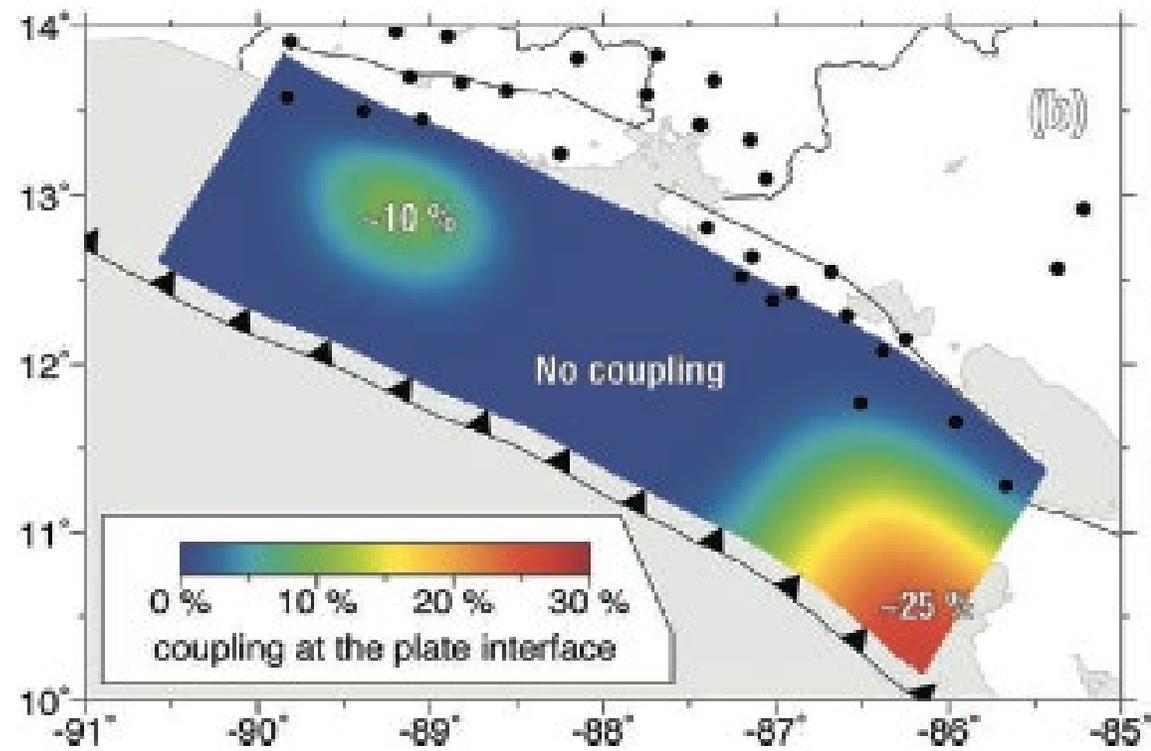
Los vectores de velocidad localizados en estaciones GPS emplazadas en Guatemala, El Salvador y Nicaragua; poseen un componente perpendicular a la trinchera muy pequeño (concentrándose su mayor valor en la dirección que se mueve el bloque de antearco).

Marco sismo-tectónico

Tectónico micro-regional: Débil acople en la interfase



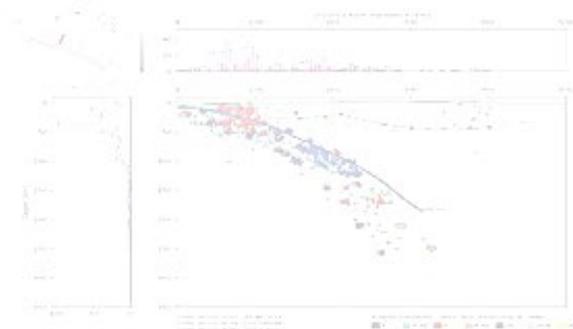
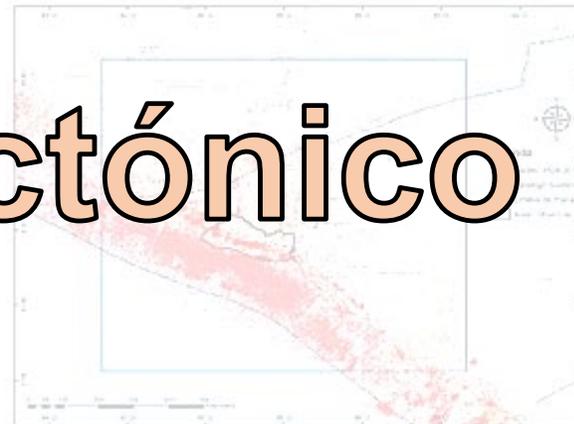
Fuente: Ye, L.; Lay, T; Kanamori, H. 2013



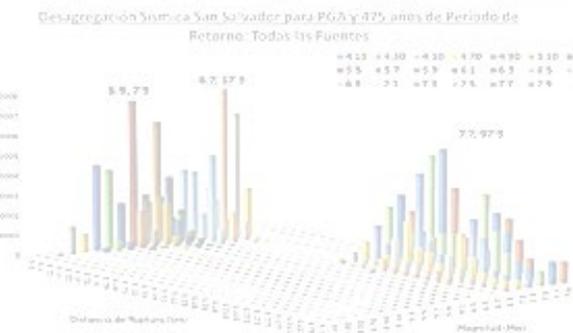
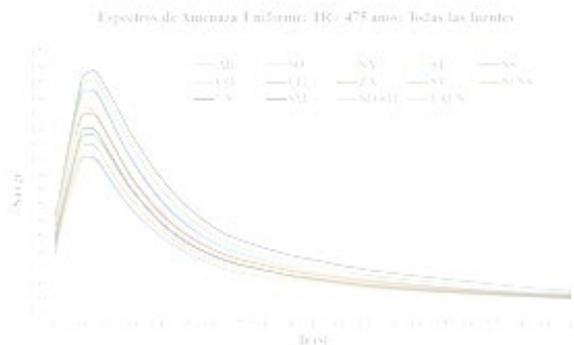
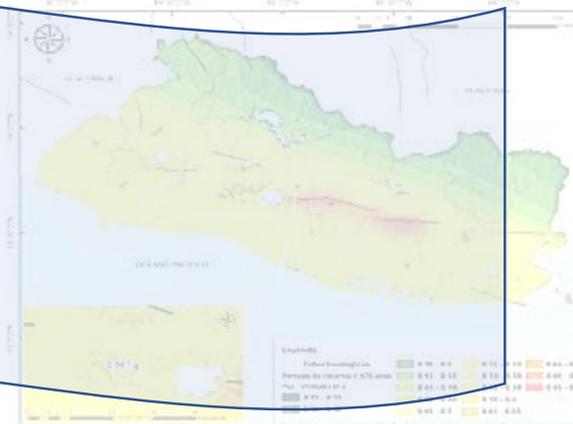
Fuente: [Correa-Mora et al., 2009]

Asperidades sísmicas esquemáticas (parches rojos) que tenían / tienen un alto acoplamiento sísmico según se infiere de modelos para grandes eventos de interfase entre placas. Se infiere que la región frente a la costa de El Salvador a profundidades de 30 a 60 km tiene un acople de ~ 10% invertido a partir de datos geodésicos.

Marco sismo-tectónico



Nivel Local



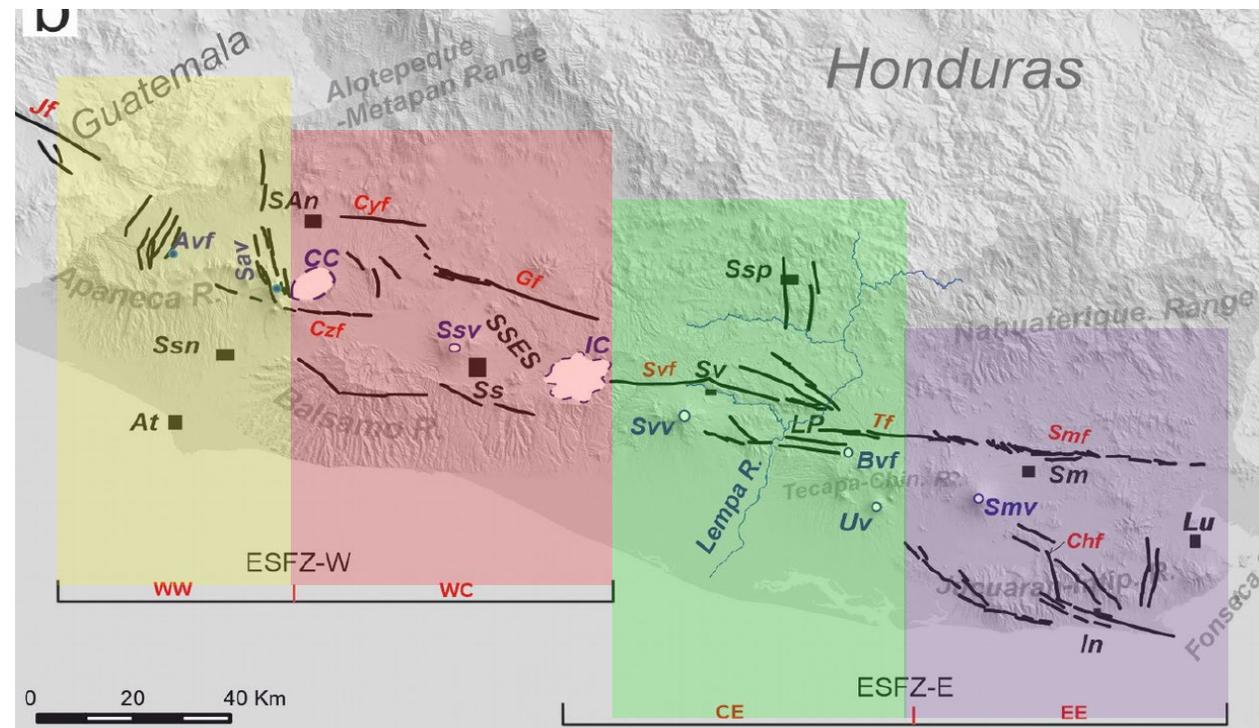
Marco sismo-tectónico

Dominios tectónicos-estructurales en El Salvador

- Se ha caracterizado de mejor manera la estructura tectónica del Graben Central Centroamericano.
- Identificación geográfica de la **Zona de Falla de El Salvador (ESFZ)**, la cual representa una estructura tectónica principal con potencial sismogénico importante. Y la definición de **4 dominios tectónicos-estructurales** asociados a regímenes de deformación de corteza específicos. (Martínez-Díaz, et al. 2020).



Representación esquemática de la Zona de Falla de El Salvador.
 Fuente: Martínez-Díaz et al, 2020



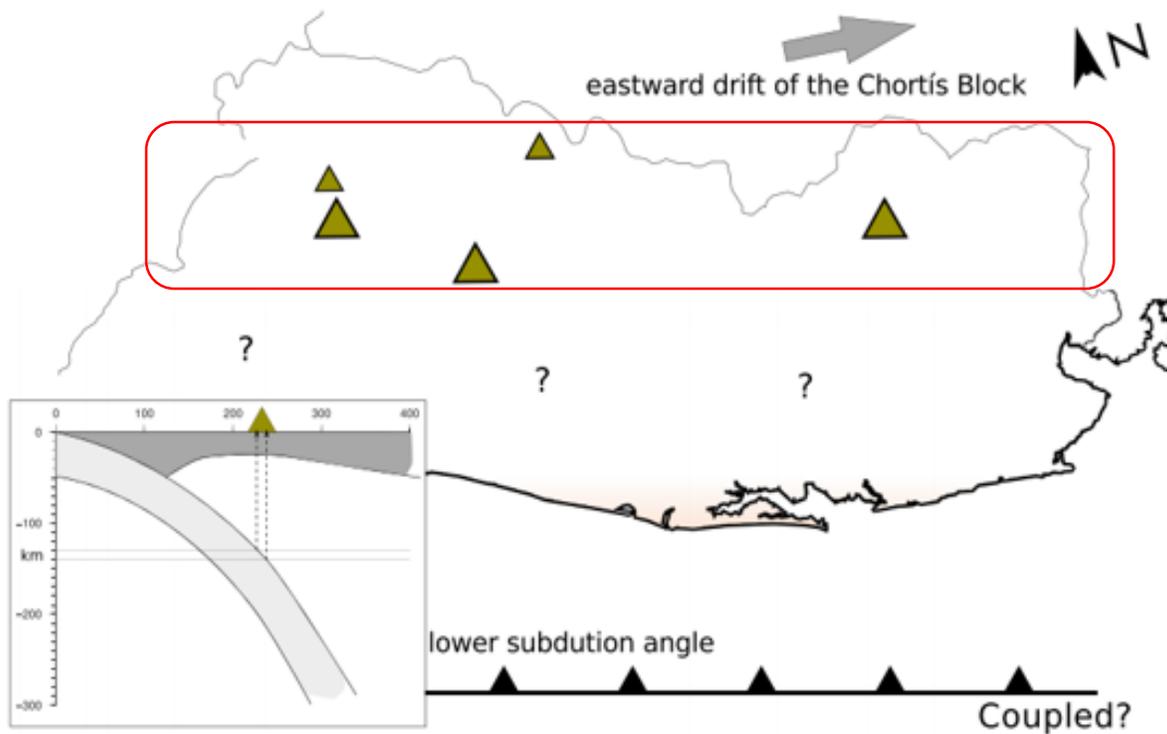
Mapa esquemático de la Zona de Fallas de El Salvador con las principales fallas de los cuatro dominios tectónicos-estructurales. Fuente: Martínez-Díaz, et al., 2020.

Marco sismo-tectónico

- La ESFZ, a lo largo de la historia geológica, ha sido partícipe de una **evolución cinemática significativa**; donde se presume que en su primera etapa predominaba una:

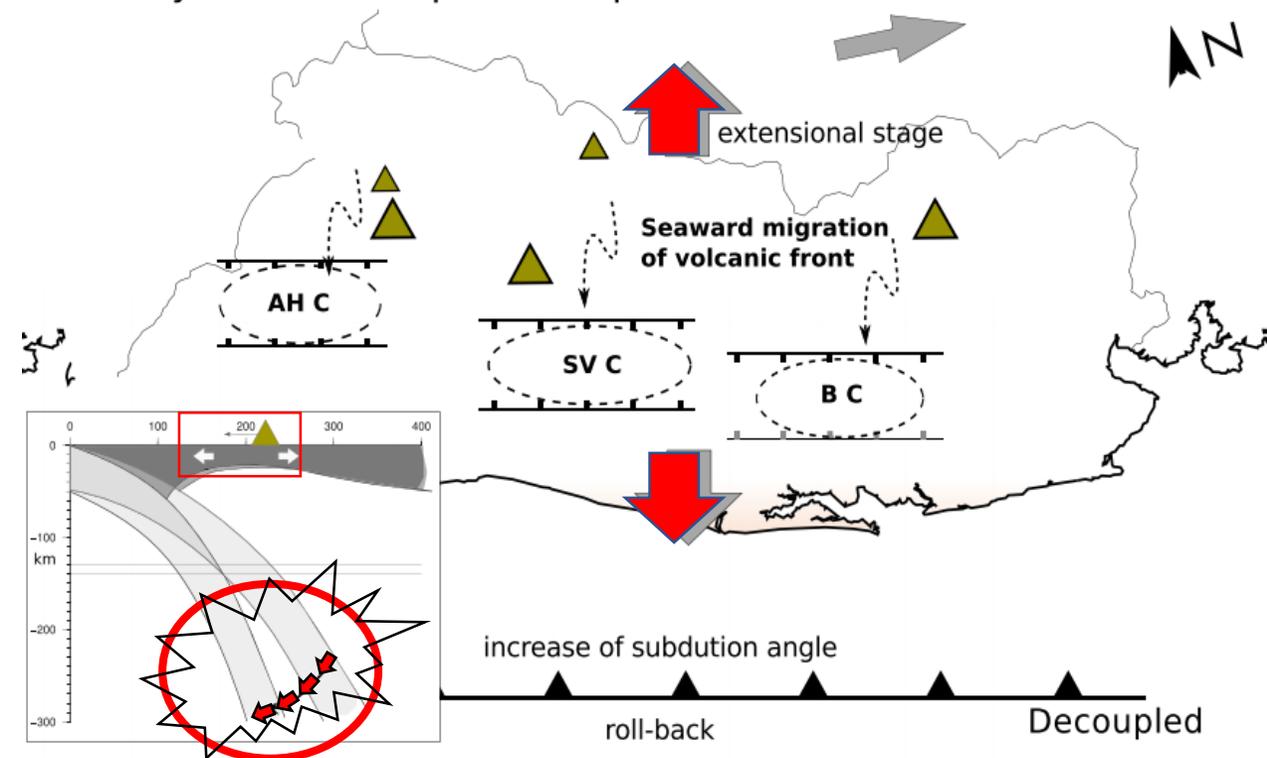
○ Fase extensional completa y posteriormente vino surgiendo una nueva

a. Miocene (~10 Ma)



b. Pliocene (~<6 Ma)

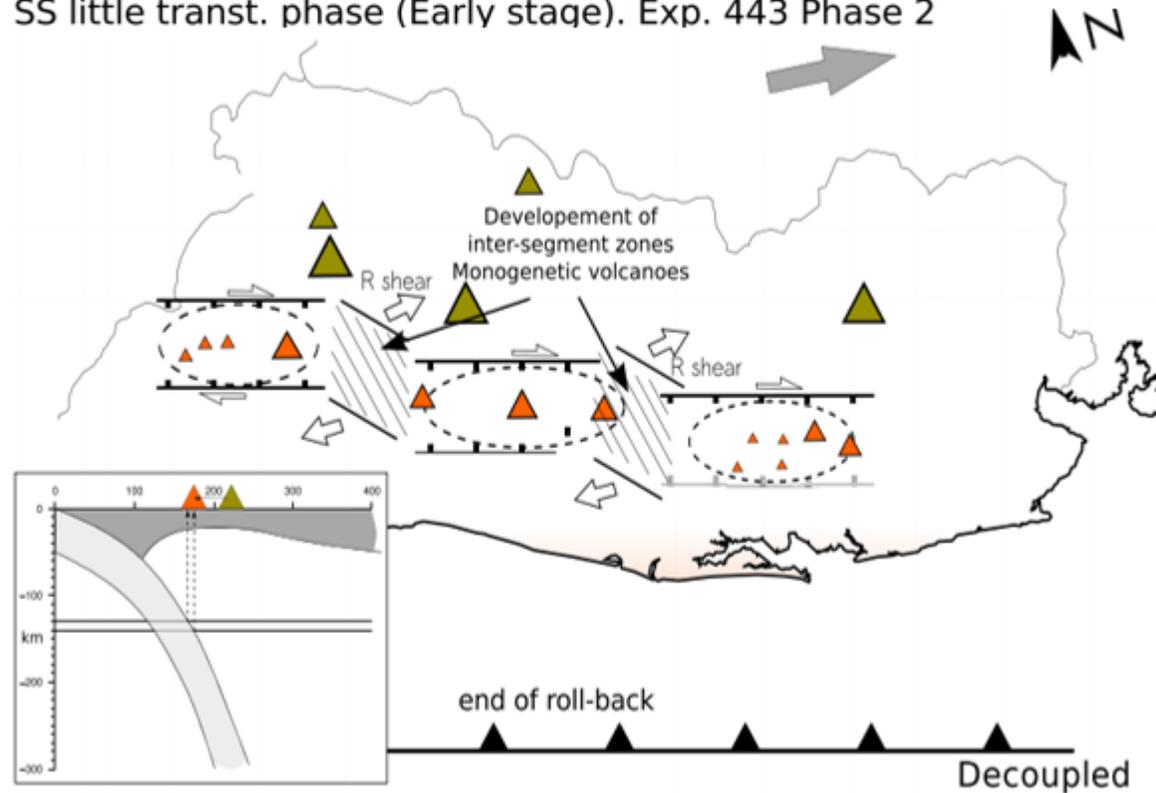
Mainly extensional phase. Exp. 443 Phase 1



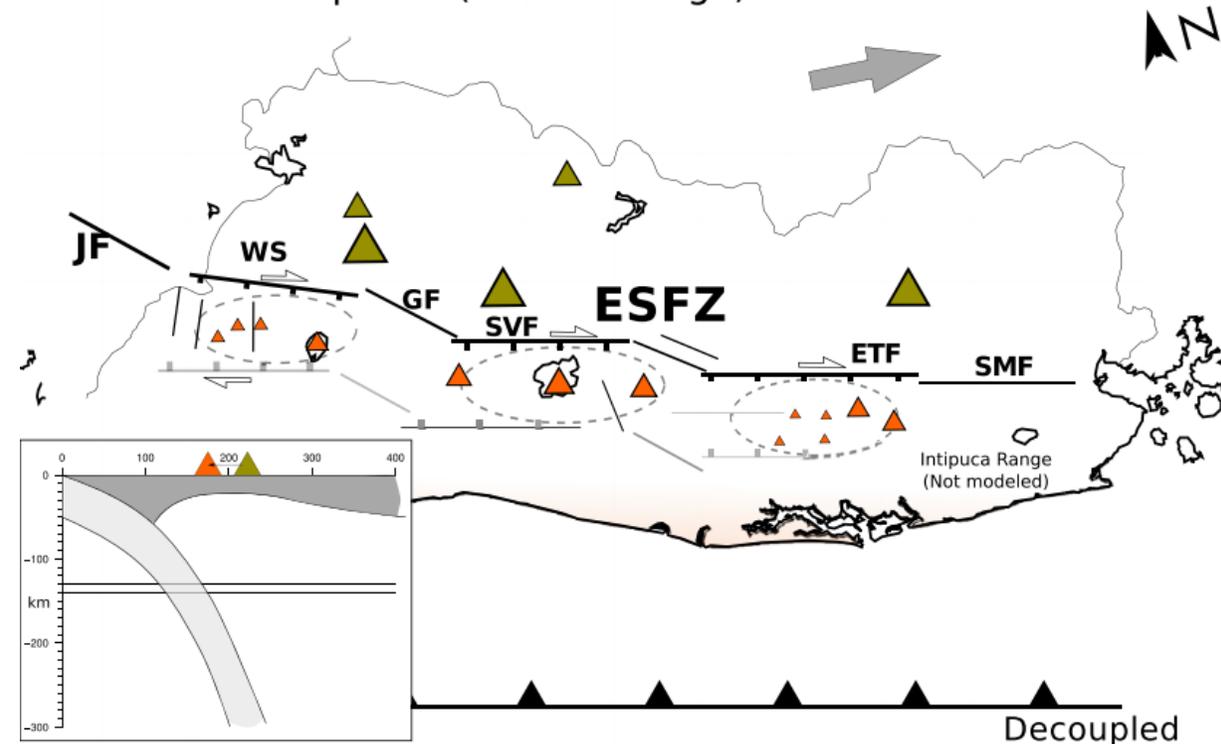
Marco sismo-tectónico

- Fase transtensional focalizada en zonas coexistiendo con otras zonas originarias de extensión

c. Plio-Pleistoceno (~2 Ma)
SS little transt. phase (Early stage). Exp. 443 Phase 2



d. Holoceno (0 Ma)
SS little transt. phase (Evolved stage)

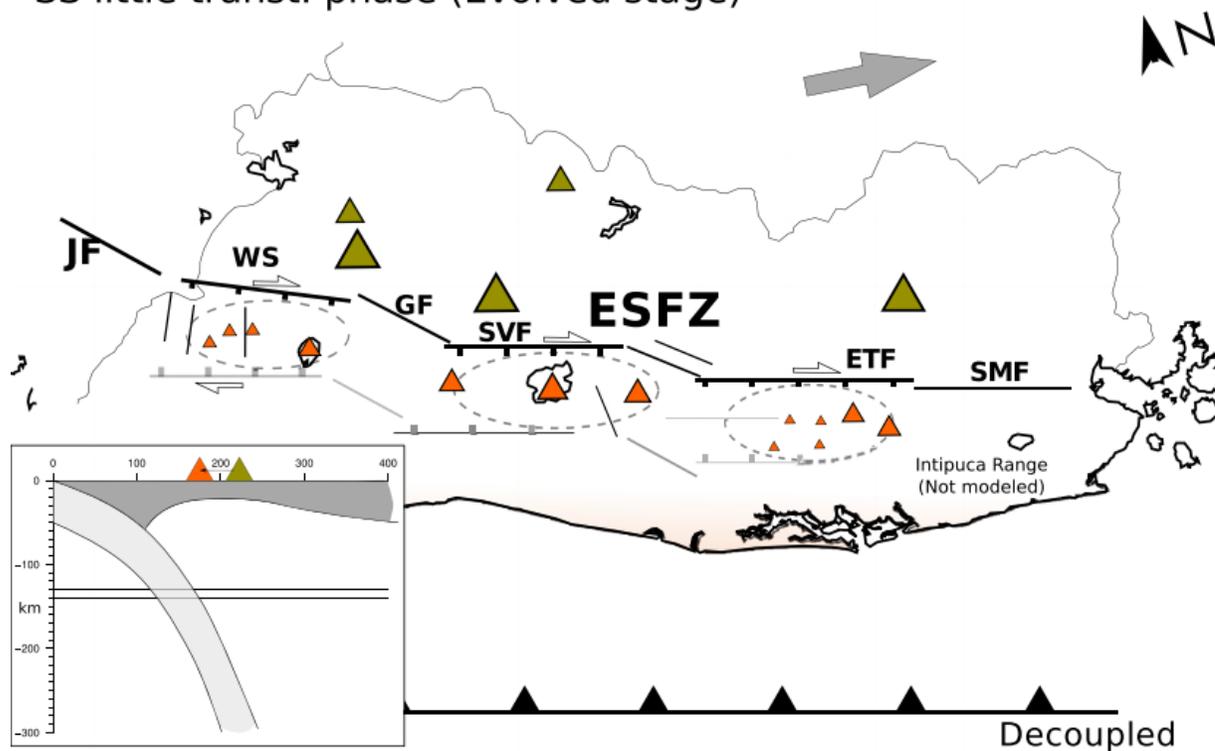


Marco sísmo-tectónico

Modelo de deformación multifase (Extensión y Transtensión) de la ESFZ actual

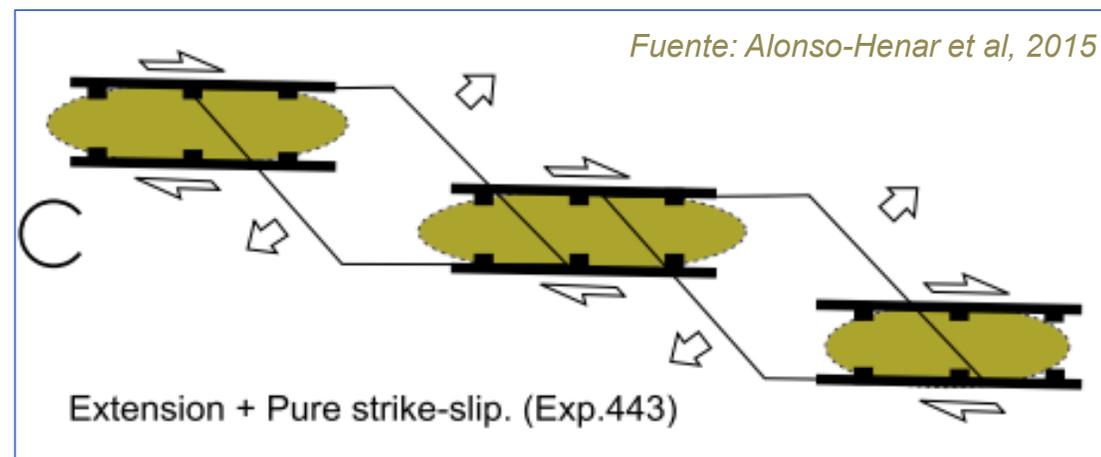
d. Holoceno (0 Ma)

SS little transt. phase (Evolved stage)



Resumen de propuesta de evolución tectónica de la ESFZ.

Fuente: Alonso-Henar et al, 2015

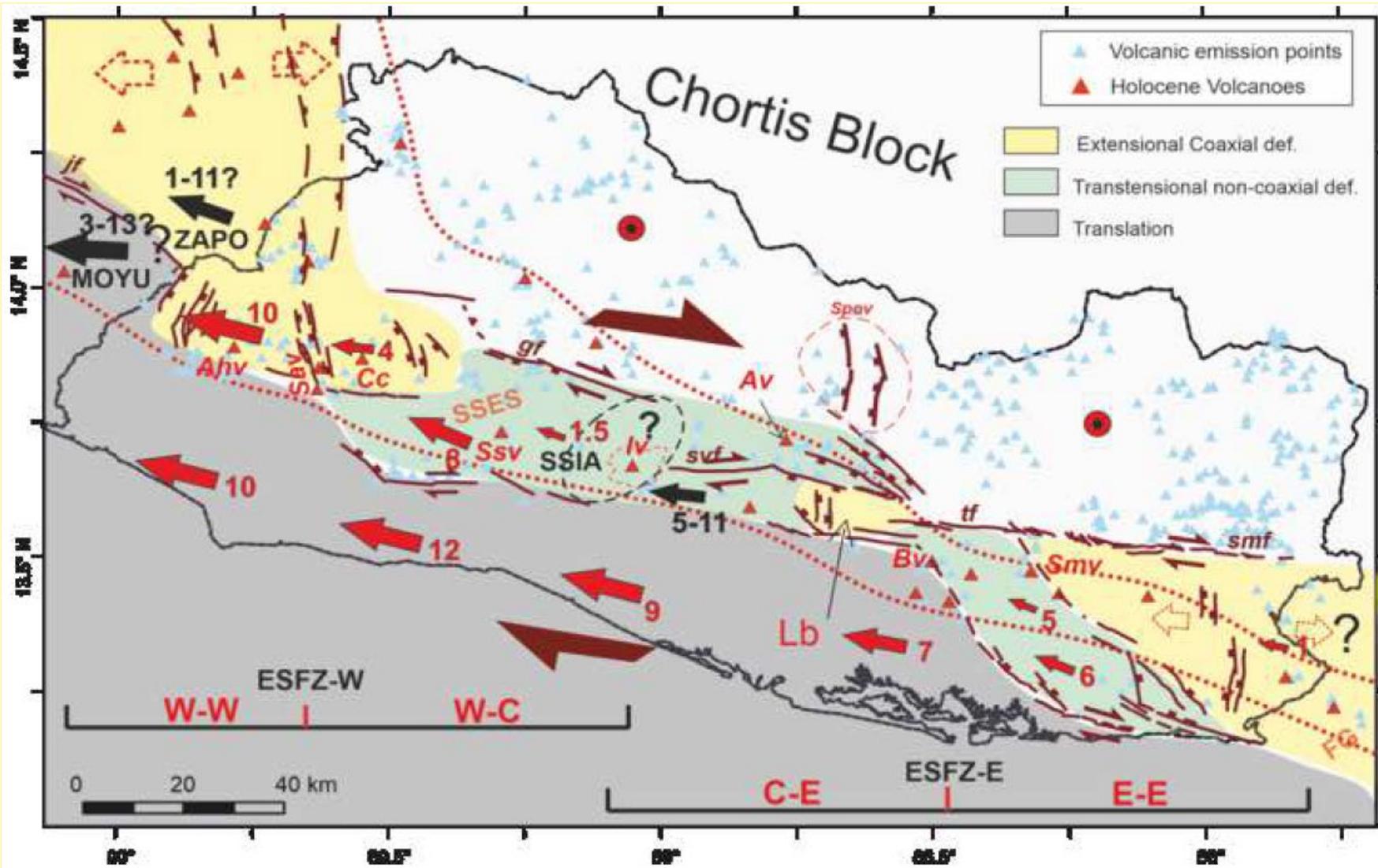


Este modelo explicaría la presencia de:

- Grábenes segmentados (color café)
- La reactivación de las fallas de desgarre (strike-slip) limítrofes a los grábenes (líneas negras sólidas)
- La presencia de estructuras pull-apart (cuencas de subsidencia con extensión oblicua o también llamados extensional step-over) que se separan entre las áreas corticales adelgazadas.

Marco sismo-tectónico

Modelo cinemático sinóptico de la zona de falla de El Salvador



Régimen extensional

- Puro Corte
- No existe rotación
- Producen deformaciones coaxiales.

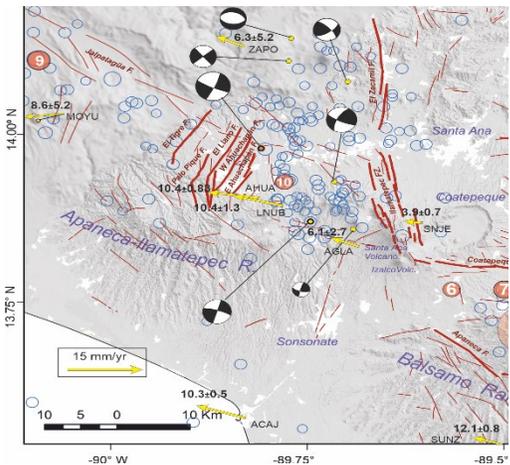
Régimen Transtensional

- Existe Corte +
- Existe rotación
- Producen deformaciones NO coaxiales.

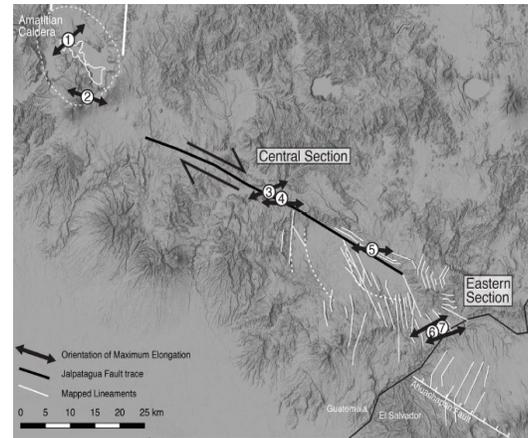
El área gris oscuro representa la parte del Bloque de Antearco con menor deformación interna y fracturación.

Marco sísmo-tectónico

➤ Dominio occidental (ESFZ-WW)

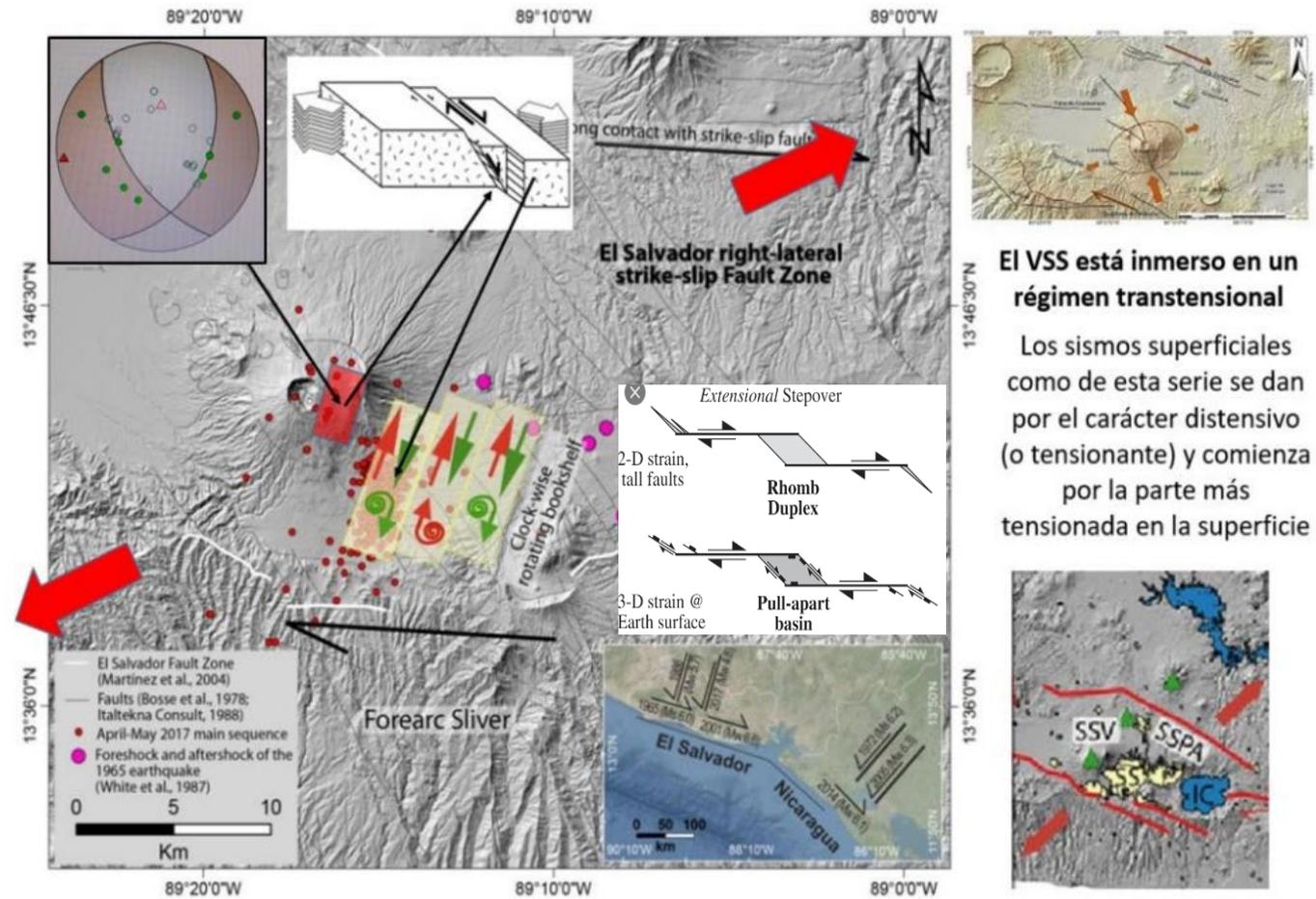


➤ *Mapa de sistema de falla de dominio Occidental, donde figura la falla de Jalpatagua y el sistema de fallas de Ahuachapán y de Coatepeque. Fuente: [Martínez-Díaz et al. 2020].*



➤ *Definición y límite de traza de falla de Jalpatagua en Guatemala y sistema de fallas de Ahuachapán en El Salvador. Fuente: [Garnier et al. 2020].*

➤ Dominio central (ESFZ-WC)



El VSS está inmerso en un régimen transtensional

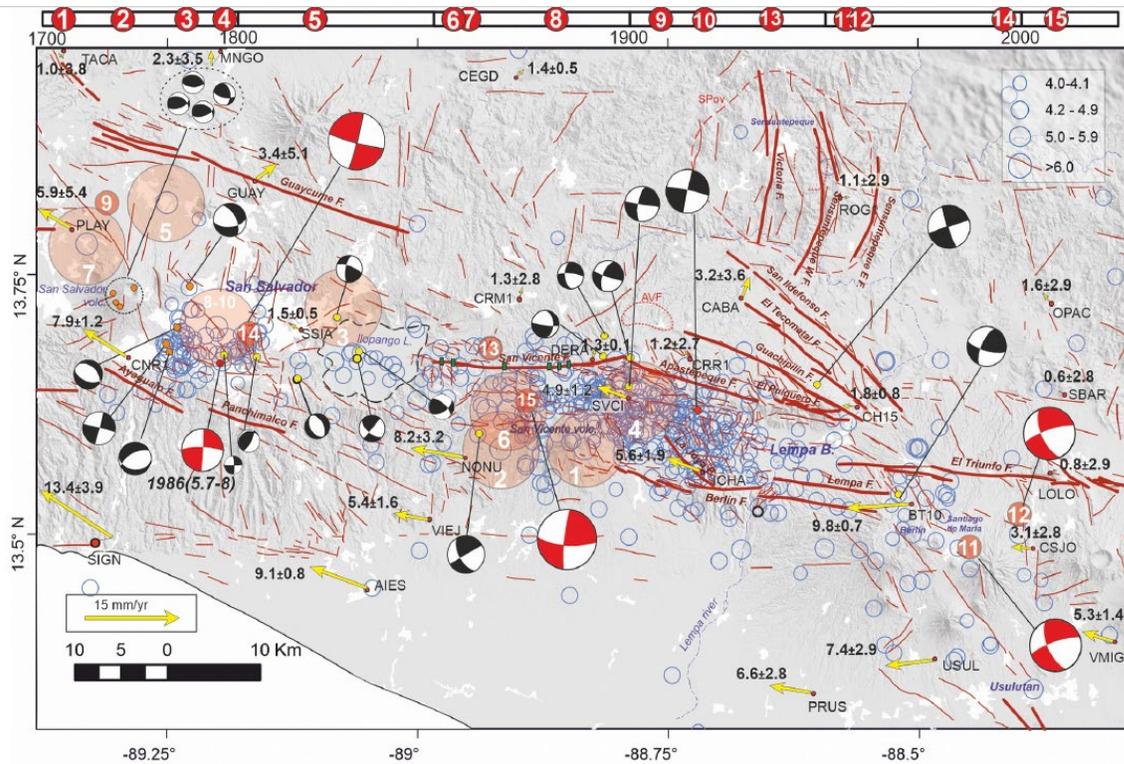
Los sísmos superficiales como de esta serie se dan por el carácter distensivo (o tensionante) y comienza por la parte más tensionada en la superficie

➤ *Modelo esquemático de fallas de librería dentro de la cuenca pull-apart originada por el step-over extensional de San Salvador. Fuente: Legrand, D. et al. (2017)*

Marco sísmo-tectónico

➤ Dominio oriental (ESFZ-EE)

➤ Dominio central oriental (ESFZ-EC)



Mapa de sistema de falla de dominio Central Oriental, donde figura la falla de San Vicente y fallas tensionales que evidencian la propagación de la cuenca del Lempa hacia el norte. Fuente: [Martínez-Díaz et al. 2020].



Ilustración 3D esquemática del movimiento del antearco de El Salvador y Nicaragua Fuente: Imagen Modificada de Alvarado et al. 2011)

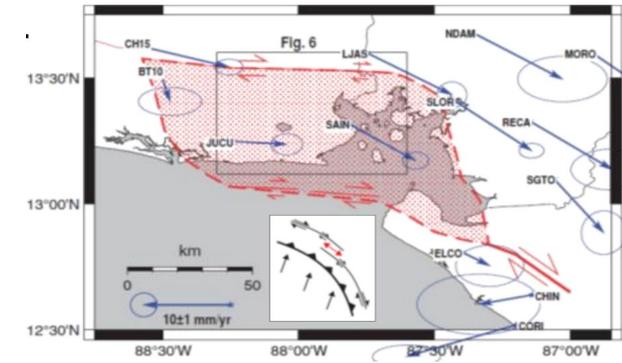
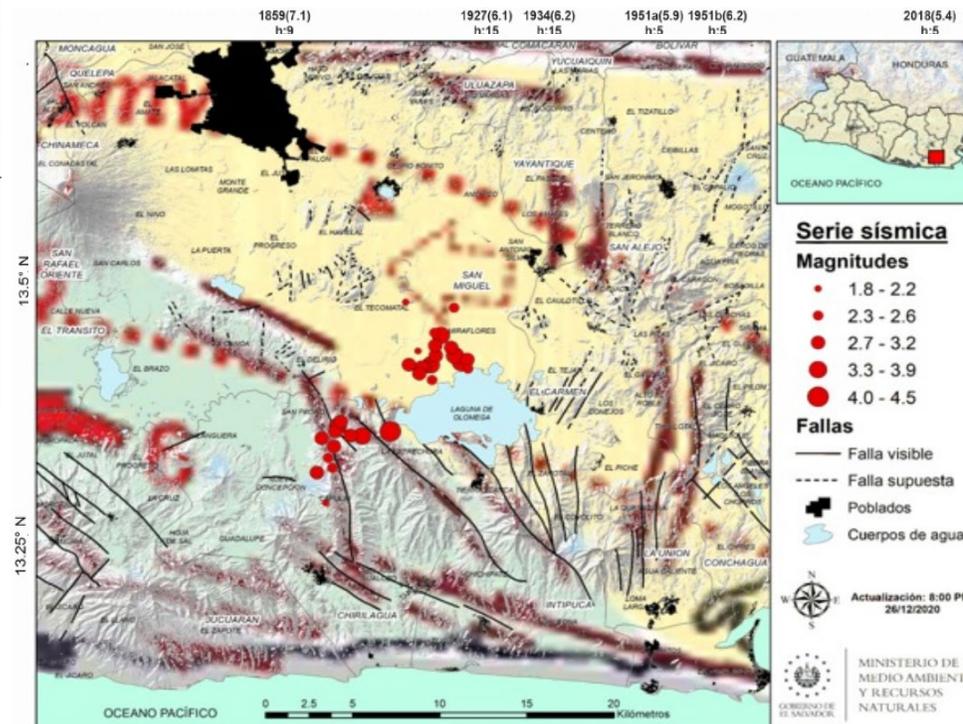


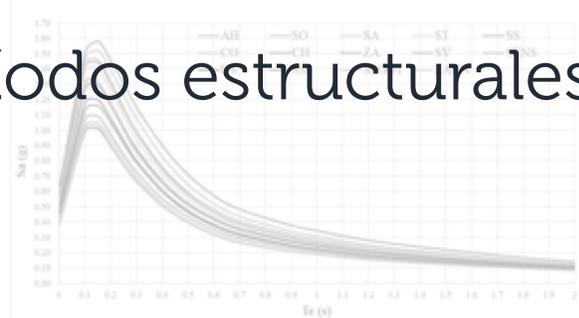
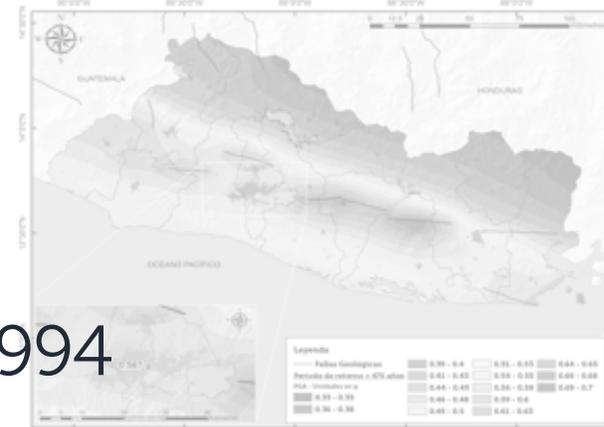
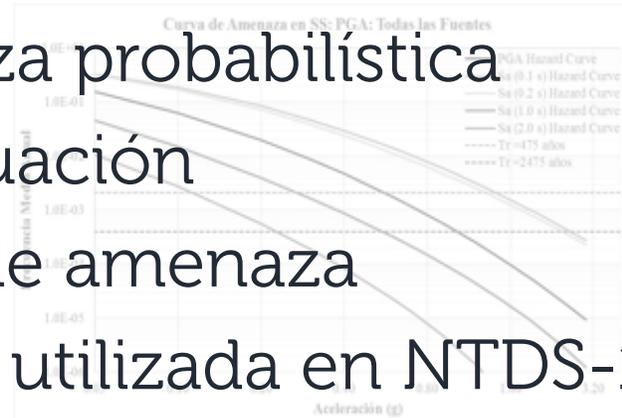
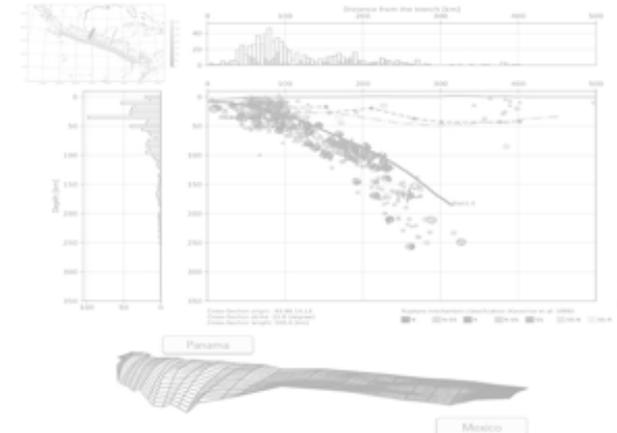
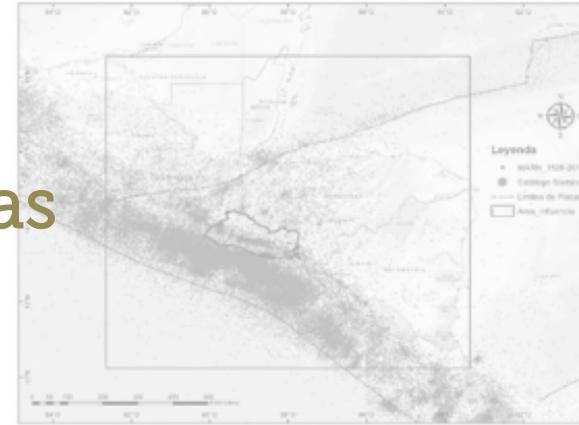
Diagrama esquemático en el step-over entre arcos volcánicos de El Salvador y Nicaragua, mediante un pull-apart. Fuente: Alvarado et al. (2011) y Perez-Moreno (2014).



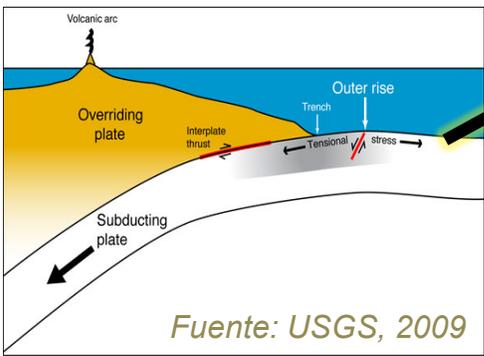
- Mapa de serie sísmica suscitada en diciembre de 2020 entre los municipios de La Garraza y San Miguel Oriente, que refleja la activación de fallas de dos regímenes de deformación y el dominio oriental de fallas que MAPN e integran. Fuente propuesta de [Martínez-Díaz et al. 2020].

Contenido

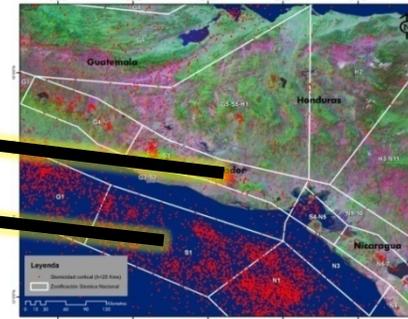
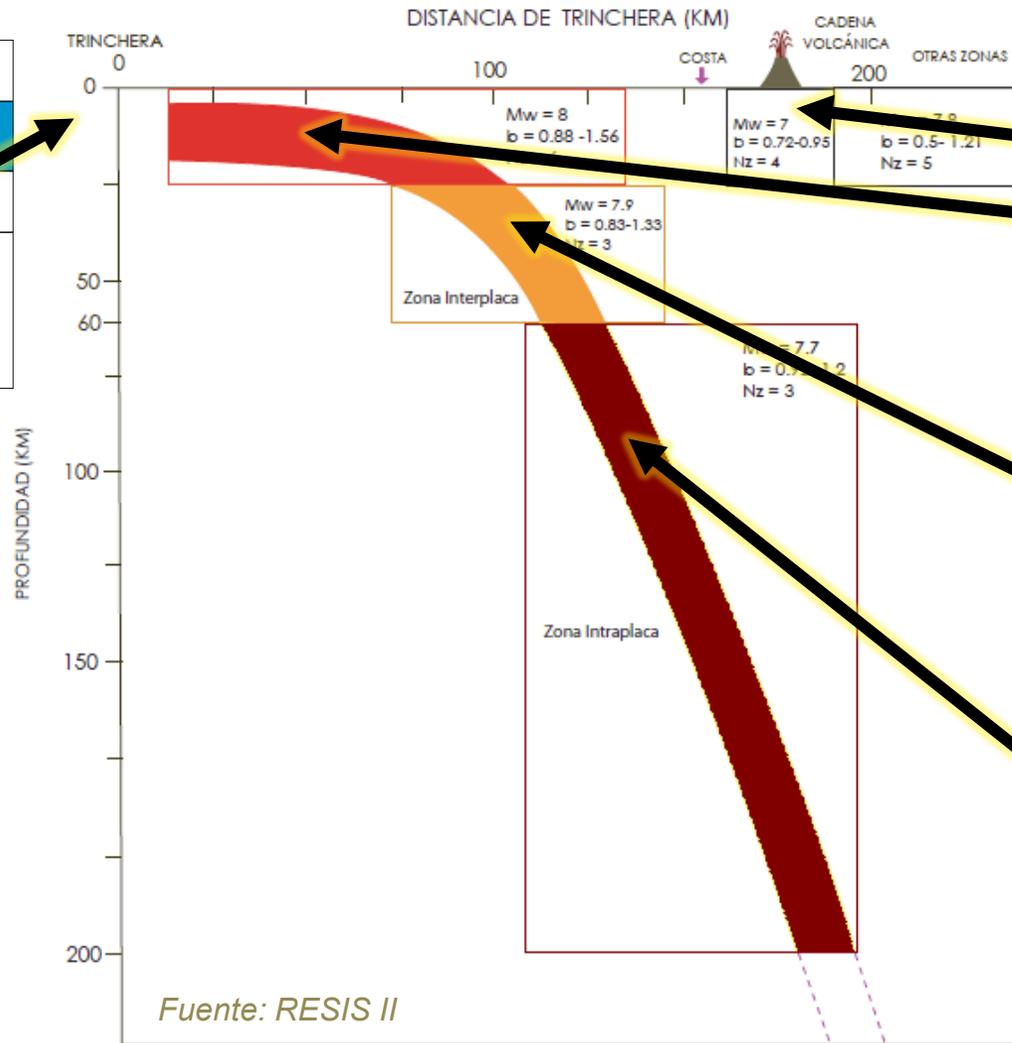
1. Marco sísmo-tectónico
2. **Concepción de fuentes sísmicas**
3. Catálogo sísmico utilizado
4. Modelación de fuentes sísmicas
5. Enfoque para cálculo de amenaza probabilística
6. Evaluación de modelos de atenuación
7. Antecedentes de evaluaciones de amenaza
8. Filosofía de cálculo de amenaza utilizada en NTDS-1994
9. Resultados de amenaza probabilística en suelo firme
10. Desagregación sísmica para períodos estructurales de interés
11. Conclusiones



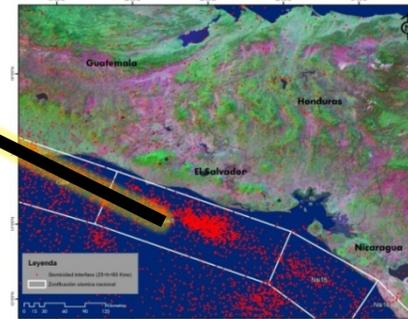
Concepción de fuentes sísmicas



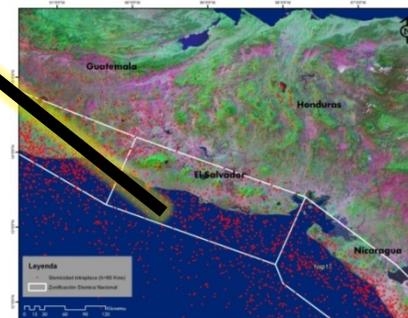
SUBDUCCIÓN EXTERIOR EMERGENTE (OUTER-RISE)
 Sismos con profundidades menores a 50 km



CORTEZA SUPERFICIAL ACTIVA
 Sismos con profundidades menores a 25 km



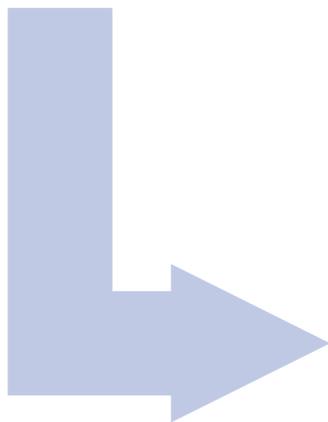
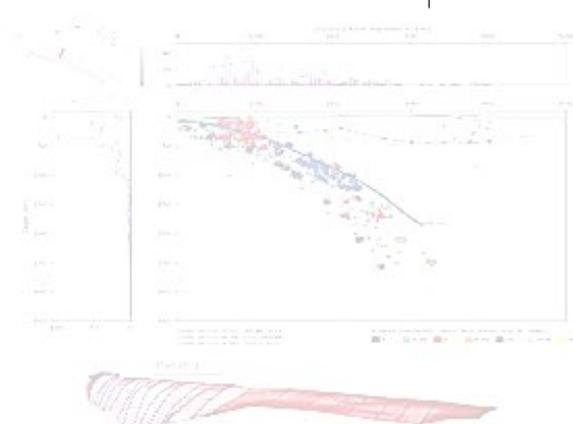
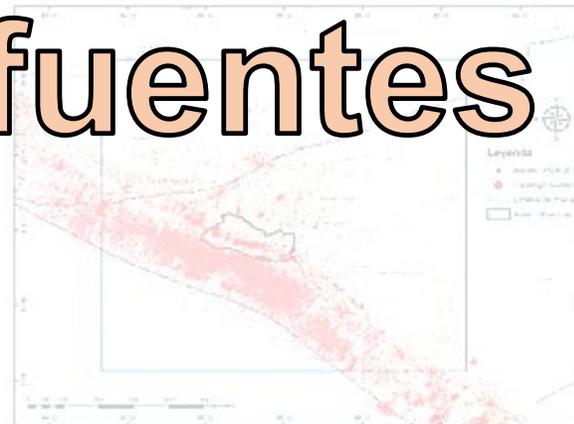
SUBDUCCIÓN INTERFASE
 Sismos con profundidades de entre 10 - 40 km.



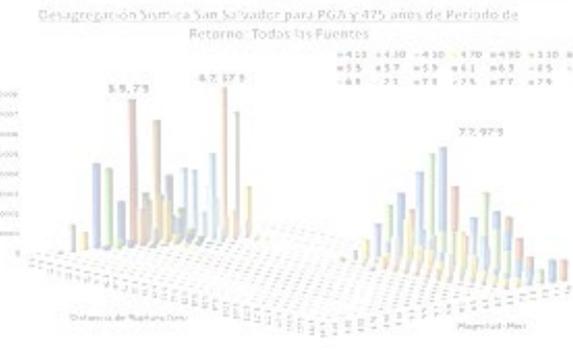
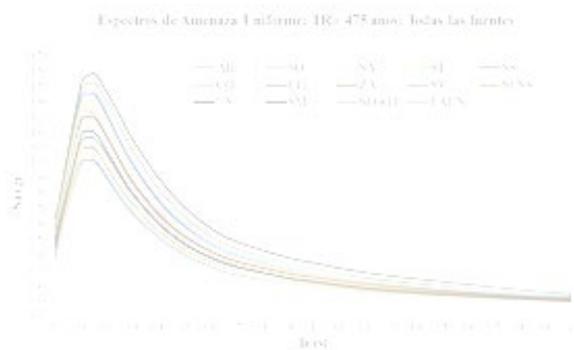
SUBDUCCIÓN INTRAPLACA
 Sismos con profundidades mayores a 40 km.

Definición en base a datos sismológicos y geológicos – condiciones semejantes dentro de la zona

Concepción de fuentes sísmicas

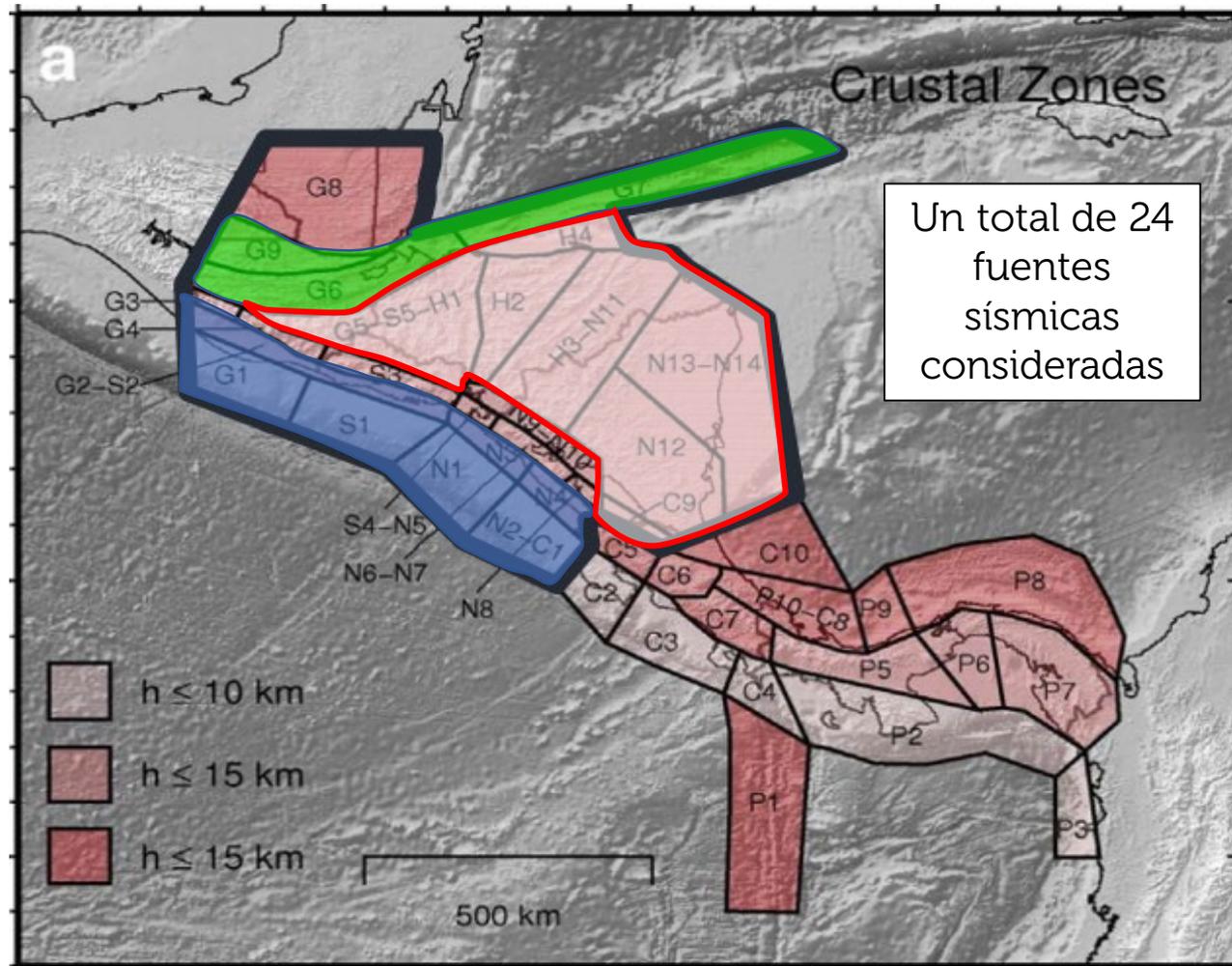


Fuente Corteza Superficial Activa



Concepción de fuentes sísmicas

Fuente: corteza superficial activa



- Sistema de fallas de Guatemala (Motagua, Chixoy-Polochic y Jocotlán-Chamelecón) y Honduras (Islas Ganso)

- Zonificación de Grábenes de Guatemala (Ipala) y Grábenes de Honduras (Depresión de Honduras) y,

- La sismicidad que ocurre a pocas profundidades sobre la placa del Caribe (ya sea dentro del mar o en la sección correspondiente a la cuña de antearco).

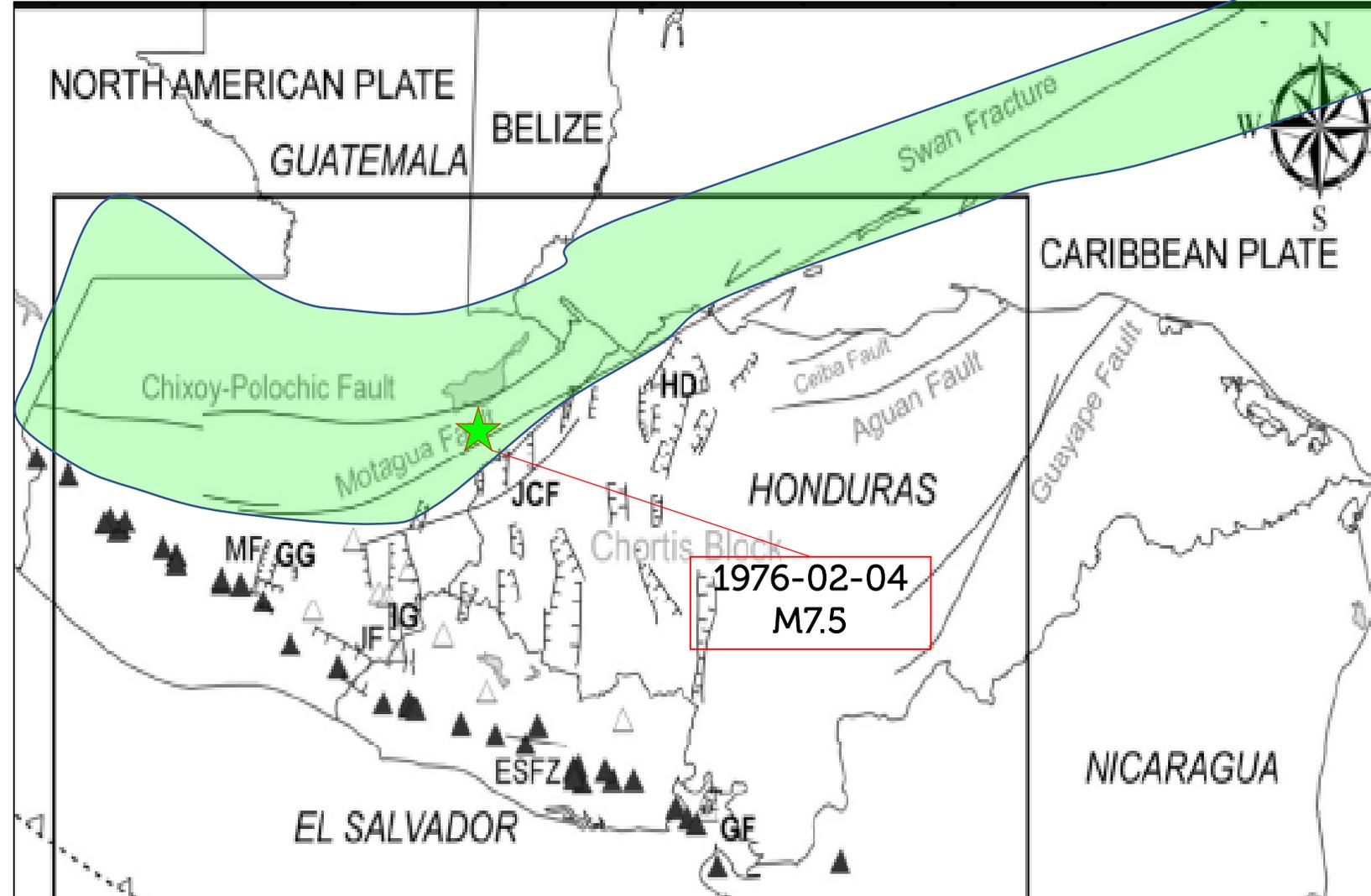
Concepción de fuentes sísmicas

Fuente: corteza superficial activa

Fuente: Modificada Salazar et al., 2013

- Las Fallas de Motagua y Chixoy - Polochic atraviesan la parte central de Guatemala en un arco cóncavo hacia el Norte y se extiende en el mar Caribe al norte en al zona de la Fractura de Swan.

- Los eventos sísmicos ocurren en las fallas superficiales con profundidades focales menores a los 15 km.



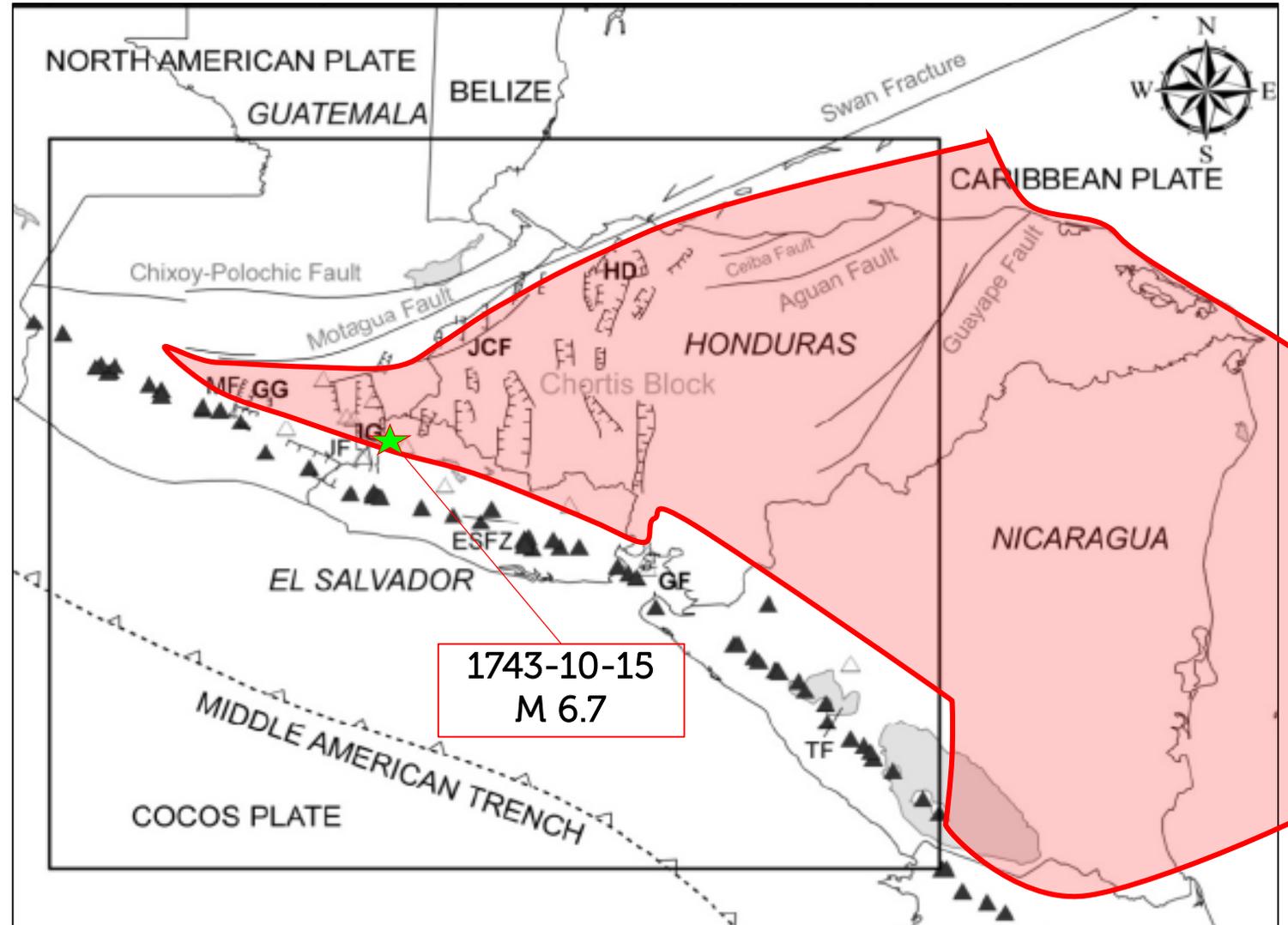
Concepción de fuentes sísmicas

Fuente: corteza superficial activa

Fuente: Modificada Salazar et al., 2013

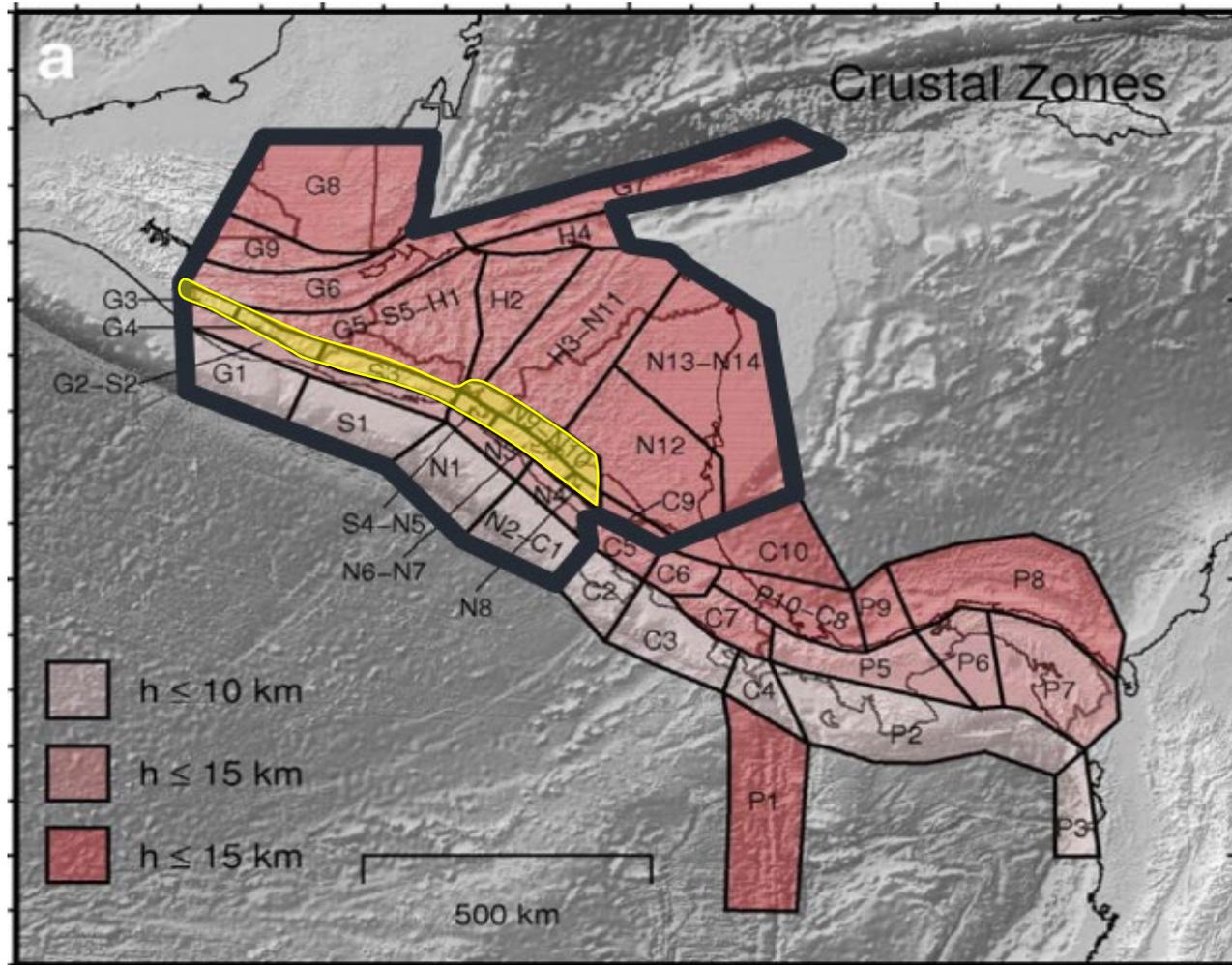
- La sismicidad acá posee intervalos de recurrencia bajos, con profundidades menores o iguales a 15 km.

- La estructura mas prominente de extensión en esta zona es el **Graben de Ipala**, localizada al Sur-Este de Guatemala y al Nor-Oeste de El Salvador.



Concepción de fuentes sísmicas

Fuente: corteza superficial activa



Los arcos volcánicos de:

- Guatemala (donde figuran las fallas de Mixco y Jalpatagua),
- Nicaragua (la falla de Tiscapa) y
- El Salvador (asociada a la dinámica de la Zona de Falla de El Salvador –ESFZ y sus diferentes subsistemas de fallas).

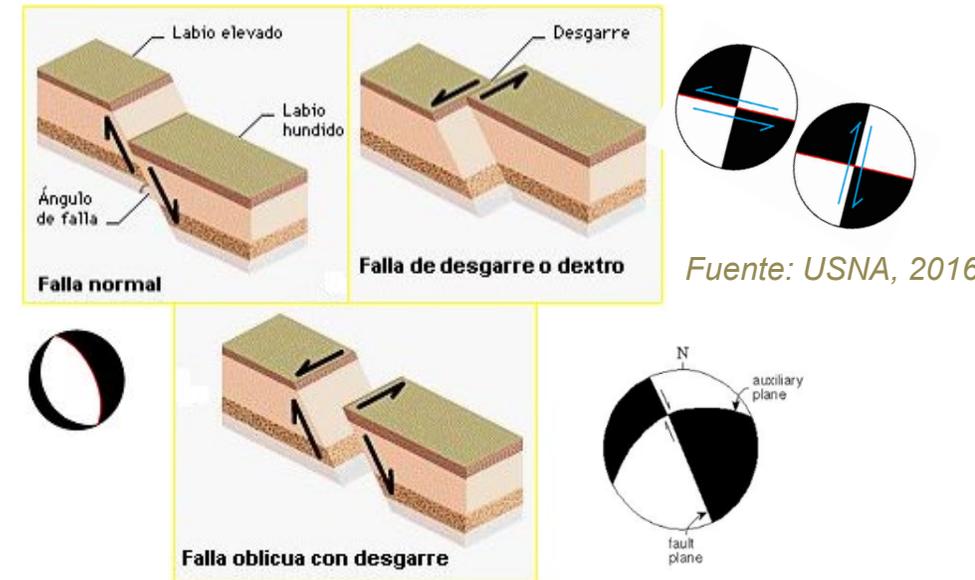
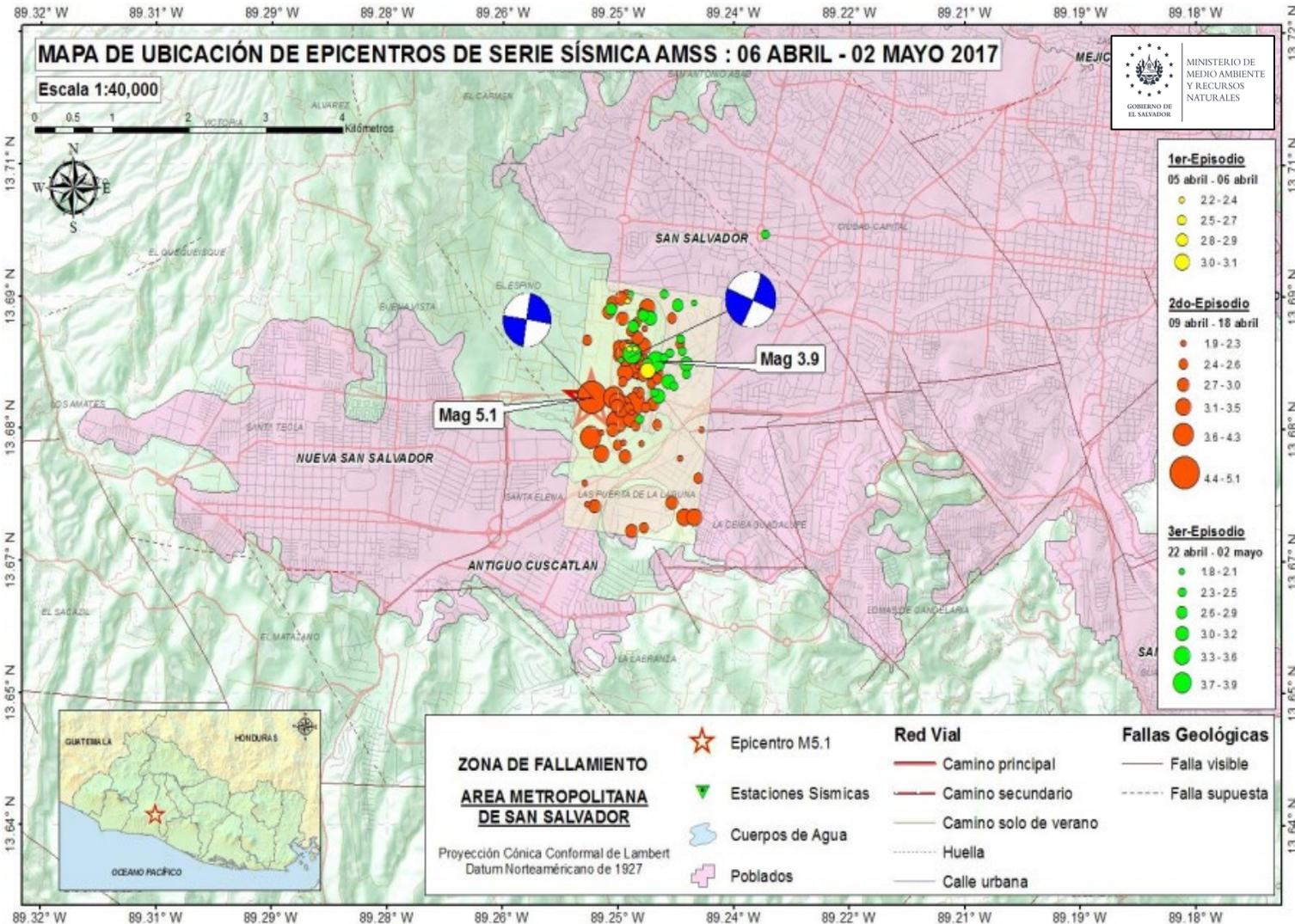
Los sismos en esta zona, aparecen con frecuencia en forma de series sísmicas, sin un sismo principal relacionado (enjambres).

Sin embargo, existen eventos con sismos principales y posteriores réplicas que se asocian a fallas geológicas importantes.

Concepción de fuentes sísmicas

Fuente: corteza superficial activa

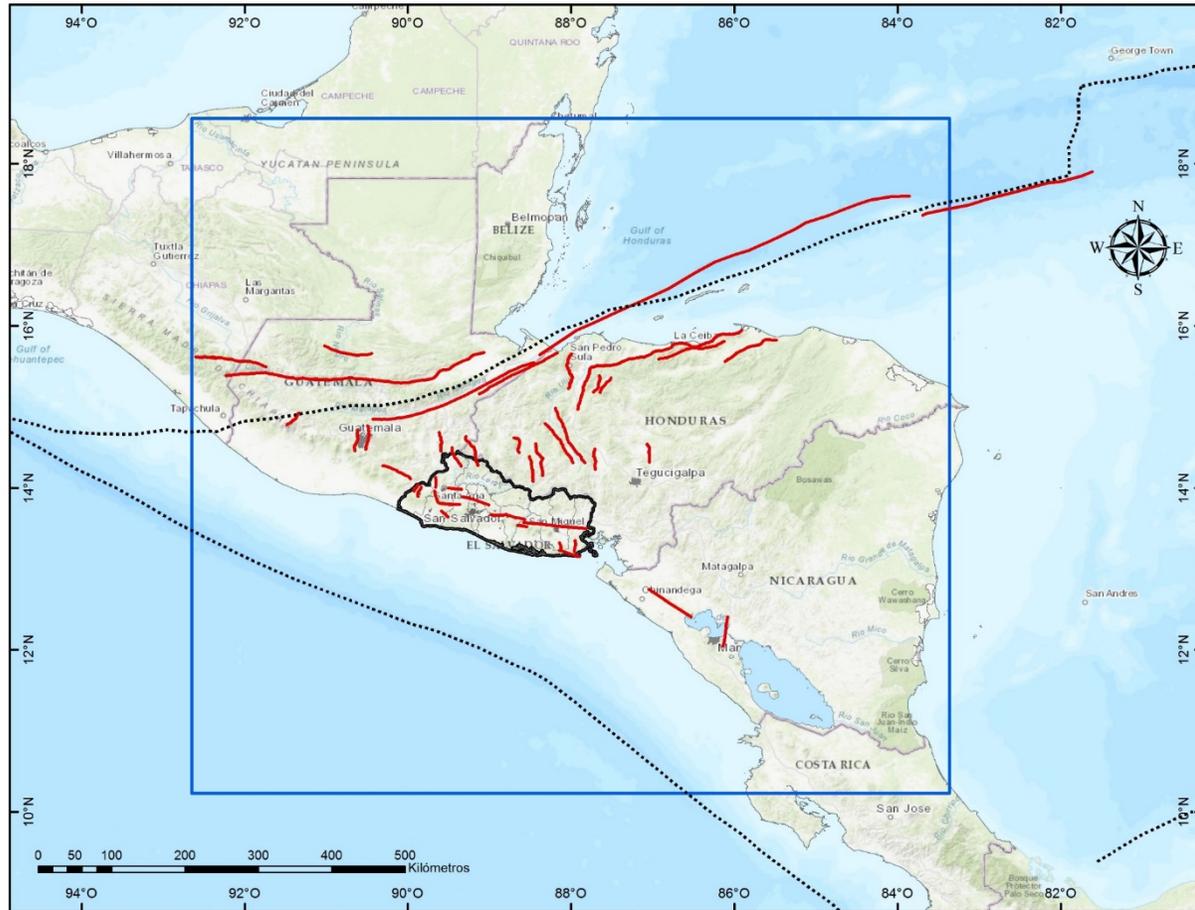
Los mecanismos de falla predominantes en esta fuente son transcurrentes o de desgarre. Sin embargo, en algunas zonas específicas se podrían observar mecanismos con fallamiento normal o combinaciones [oblicuos].



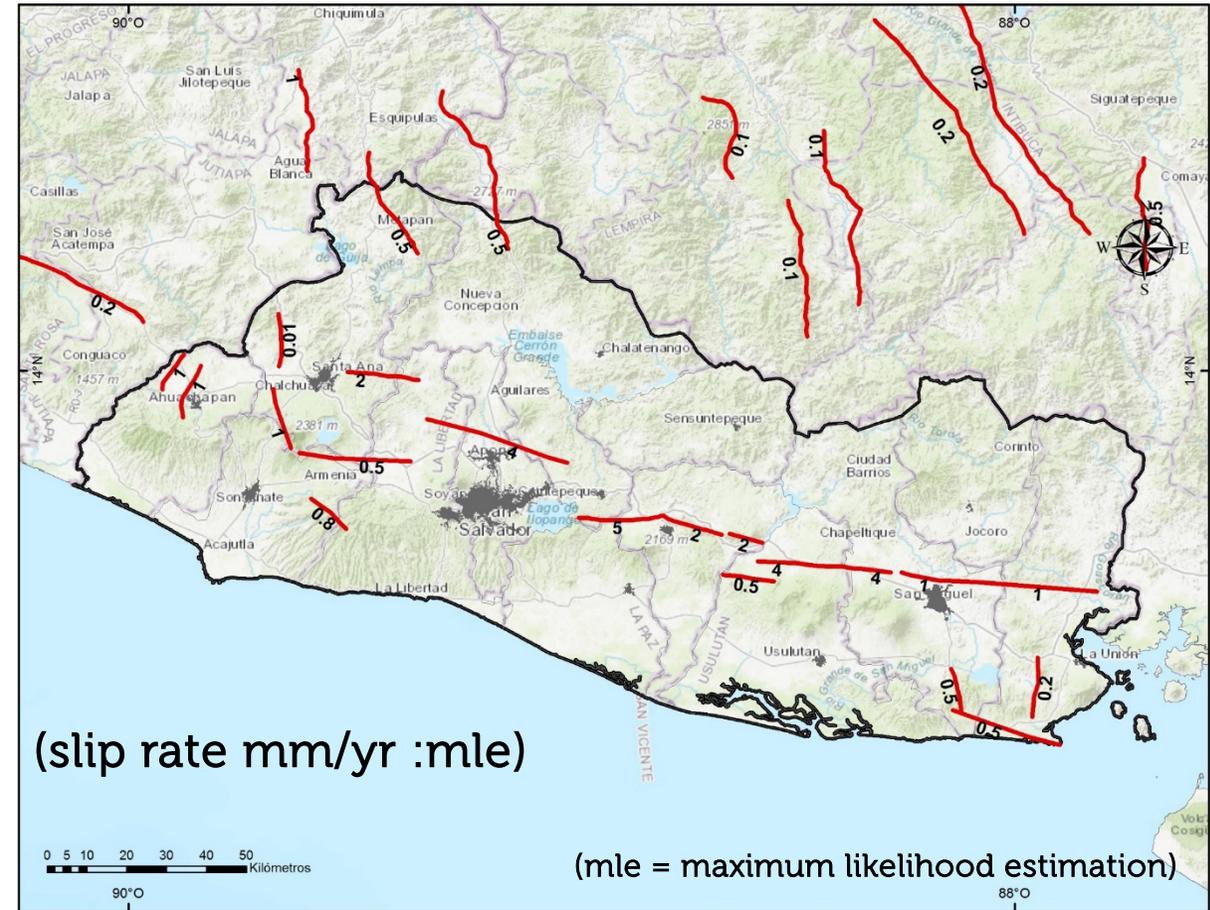
Concepción de fuentes sísmicas

Fuente: corteza superficial activa – fallas geológicas activas

Total de 53 fallas geológicas



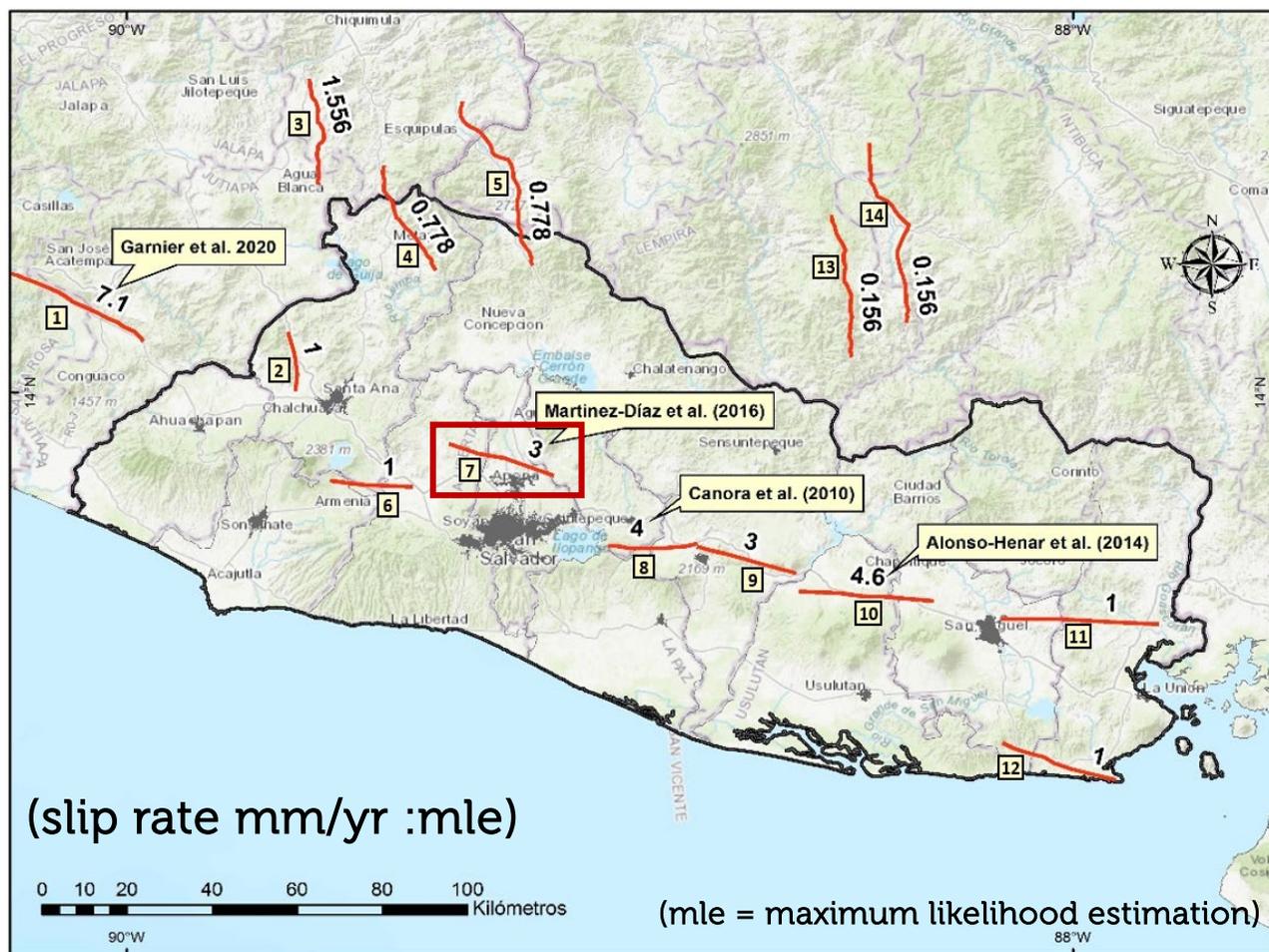
20 fallas geológicas dentro de ES



Concepción de fuentes sísmicas

Fuente: corteza superficial activa – fallas geológicas activas

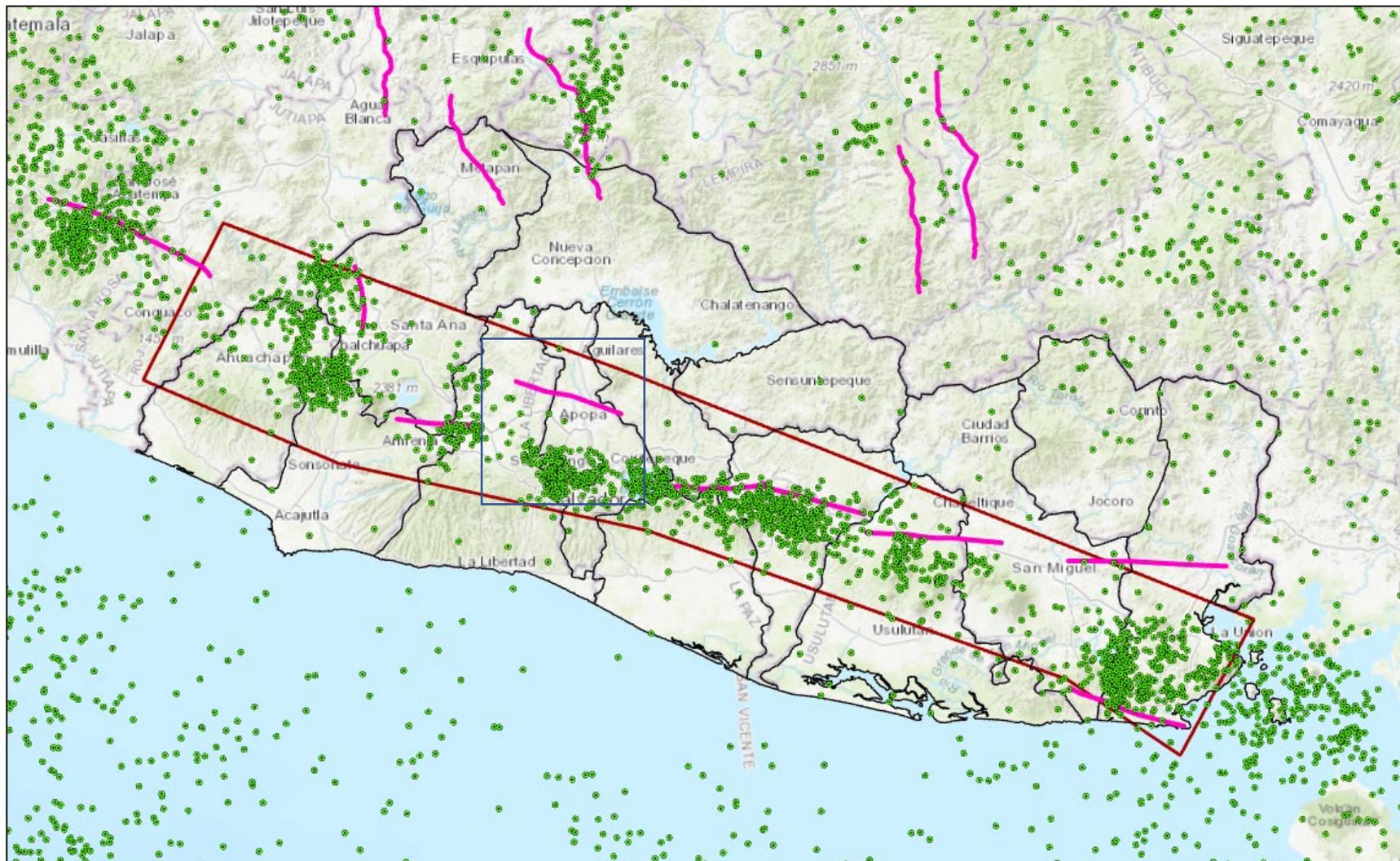
14 fallas geológicas capaces de generar sismos $M_{\geq 6.5}$



Descripción	Dato	Observación adicional
ID	7	
Nombre	Guaycume	
Acimut(Strike) en grados	108	
Buzamiento (Dip) en grados	80	
Deslizamiento (Rake) en grados	180	
Tasa de actividad por geomorfología (mm/año) [Mínimo]	> 1.0	0.7 - 1.1 mm/año (basado en la posible edad de las ignimbritas superiores de Cuscatlan Fm.)
Tasa de actividad por paleosismicidad (mm/año)	5.3	Considerando edad TBJ (edad máxima de los canales sobre los depósitos de terraza)
Tasa de actividad por estudios geodéticos (mm/año) [Máximo]	< 8	A partir de datos GPS data de Staller et al. (2016)
Tasa de actividad estimada seleccionada para peligrosidad (mm/año)	3.0	Usado para evaluar la peligrosidad junto a la sismicidad suavizada en vecindad de falla, con magnitud de truncamiento de 6.5
Longitud de la falla en Km	25.26	
Menor profundidad sismogénica en Km	12.71	
Magnitud (M_w) máxima esperada (de relaciones de escala)	7.0	Se utilizó Wells & Coppersmith, junto a la consideración de su desviación estándar: [$M_w = 6.54 + 0.46 = 7.0$]
Fuente bibliográfica	Martínez-Díaz et al. 2016, Staller, et al. 2016	

Concepción de fuentes sísmicas

Fuente: corteza superficial activa – Caso Falla Guaycúme



Investigadores de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), han propuesto que dicha falla, podría ser la posible fuente del terremoto (Mw 6.4) destructivo ocurrido en 1917 en San Salvador el cual le siguió una erupción volcánica del Volcán de San Salvador

Concepción de fuentes sísmicas

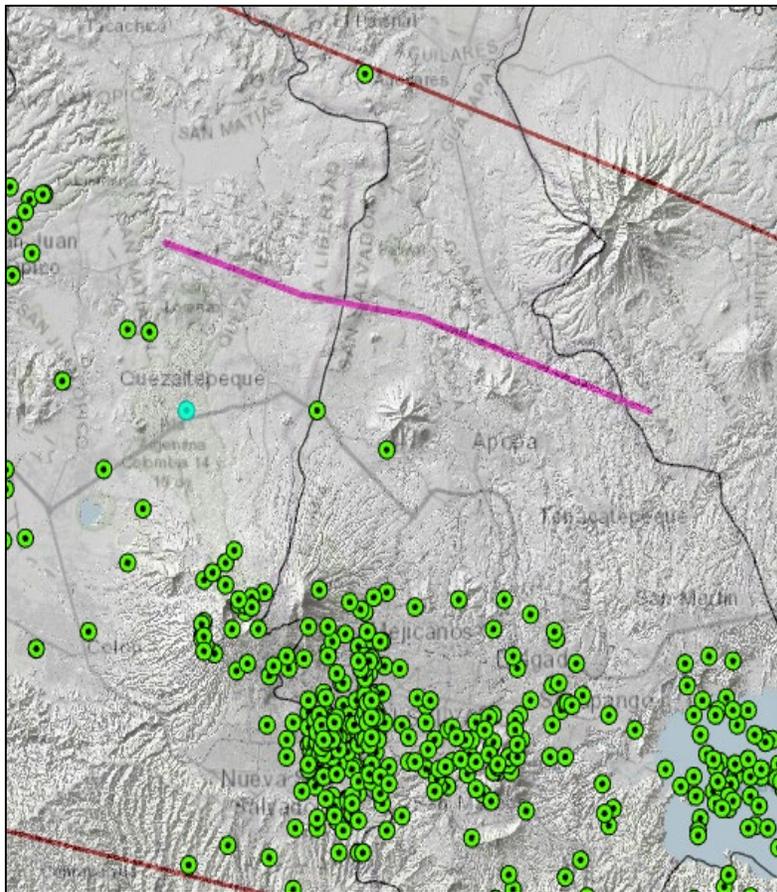
Fuente: corteza superficial activa – Caso Falla Guaycúme

Es evidente que de acuerdo al catálogo sísmico conformado por el MARN, **no se asocia una actividad directa al movimiento de la falla.**

Portela Fernández et al. 2021 (UPM), plantean las hipótesis que van desde suponer que esta falla:

1. **pudiese estar fuertemente bloqueada** o atascada después del evento ocurrido en 1917, o bien,
2. **presente un comportamiento asísmico**; el cual no estaría en consonancia con las tasas de deslizamiento calculadas con los GPS.

Sin embargo, dadas estas hipótesis del comportamiento de dicha falla y estudios aún en marcha, **no resulta prudente dejar de lado** la contribución que pudiese tener esta falla geológica en la peligrosidad sísmica, especialmente, en San Salvador



Concepción de fuentes sísmicas

Fuente: corteza superficial activa – fallas geológicas activas

Falla Asociada al Sismo del 13 de Febrero de 2001



Fuente: SNET 2001

Fallamiento antiguo Carretera de Oro



Fuente: SNET 2006

Concepción de fuentes sísmicas

Fuente: corteza superficial activa – fallas geológicas activas:
Estudios de paleo-sismicidad

Cercanías de El Desagüe de Lago de Ilopango – Falla de San Vicente - 2008



Concepción de fuentes sísmicas

Fuente: corteza superficial activa – fallas geológicas activas:
Estudios de paleo-sismicidad

Cercanías de San Ramón-Jerusalem – Falla de San Vicente - 2010



Fuente: Universidad Politécnica de Madrid, 2010



Fuente: Universidad Politécnica de Madrid, 2010

Concepción de fuentes sísmicas

Fuente: corteza superficial activa – fallas geológicas activas:
Estudios de paleo-sismicidad

Cercanías de Cantón Santa Anita – Falla de Berlín - 2011



Fuente: Universidad Politécnica de Madrid, 2011



Fuente: Universidad Politécnica de Madrid, 2011

Concepción de fuentes sísmicas

Fuente: corteza superficial activa – fallas geológicas activas:
Estudios de paleo-sismicidad

Cantón Guaycúme – Falla Guaycúme- 2017

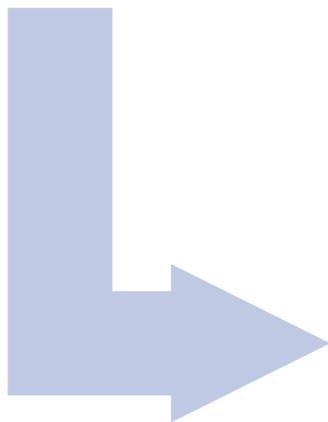
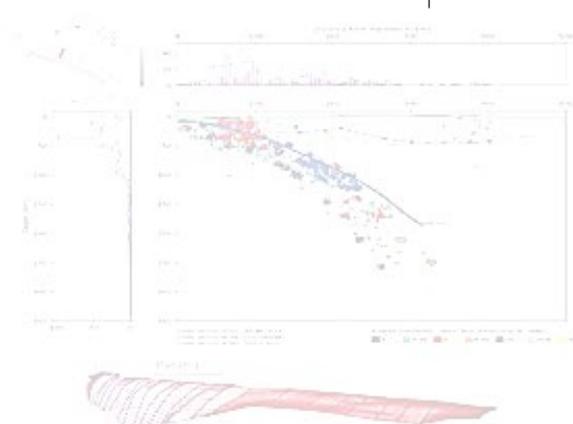
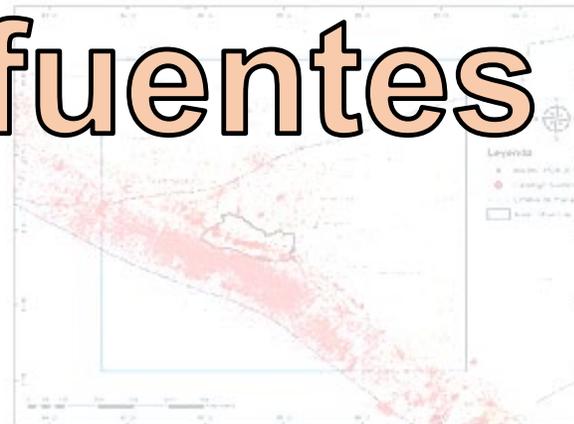


Fuente: Diario de Hoy, 2017

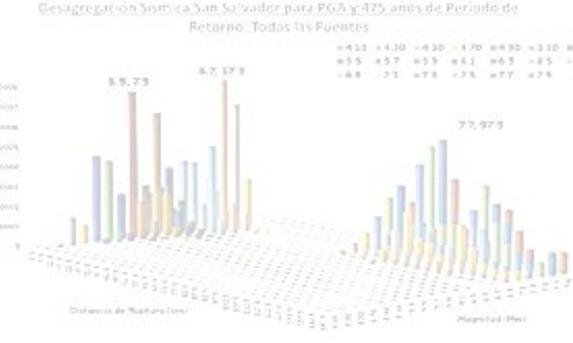
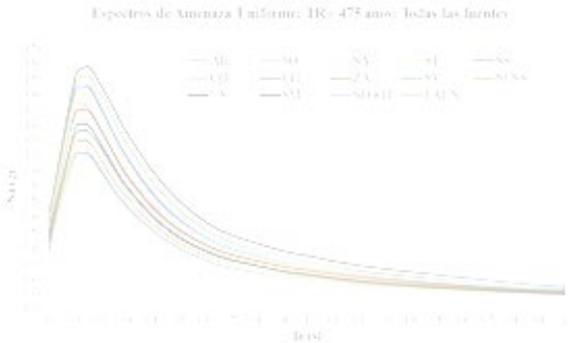
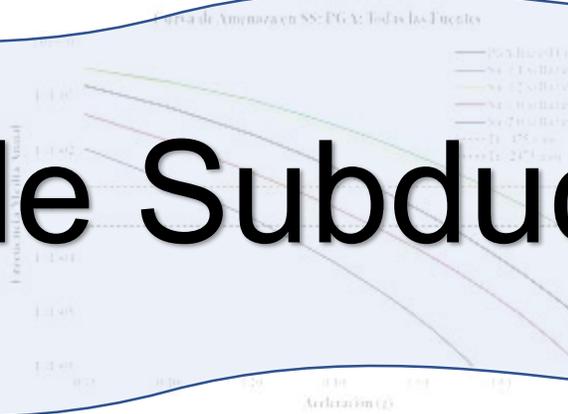


Fuente: La Prensa Gráfica, 2017

Concepción de fuentes sísmicas

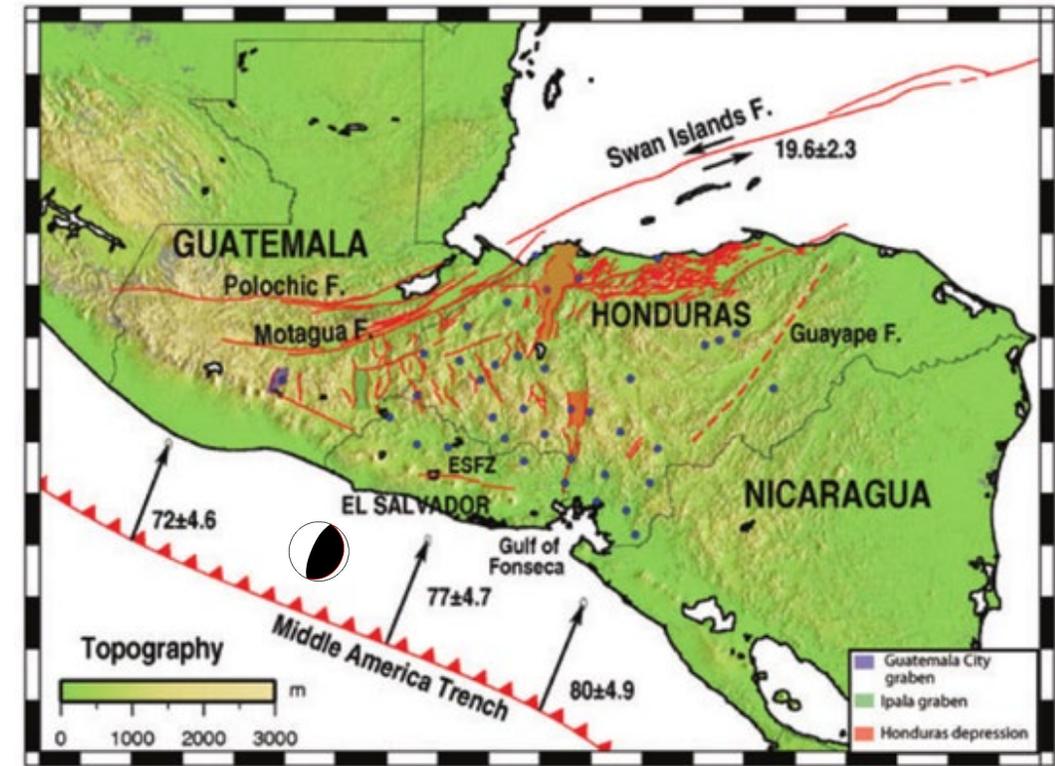
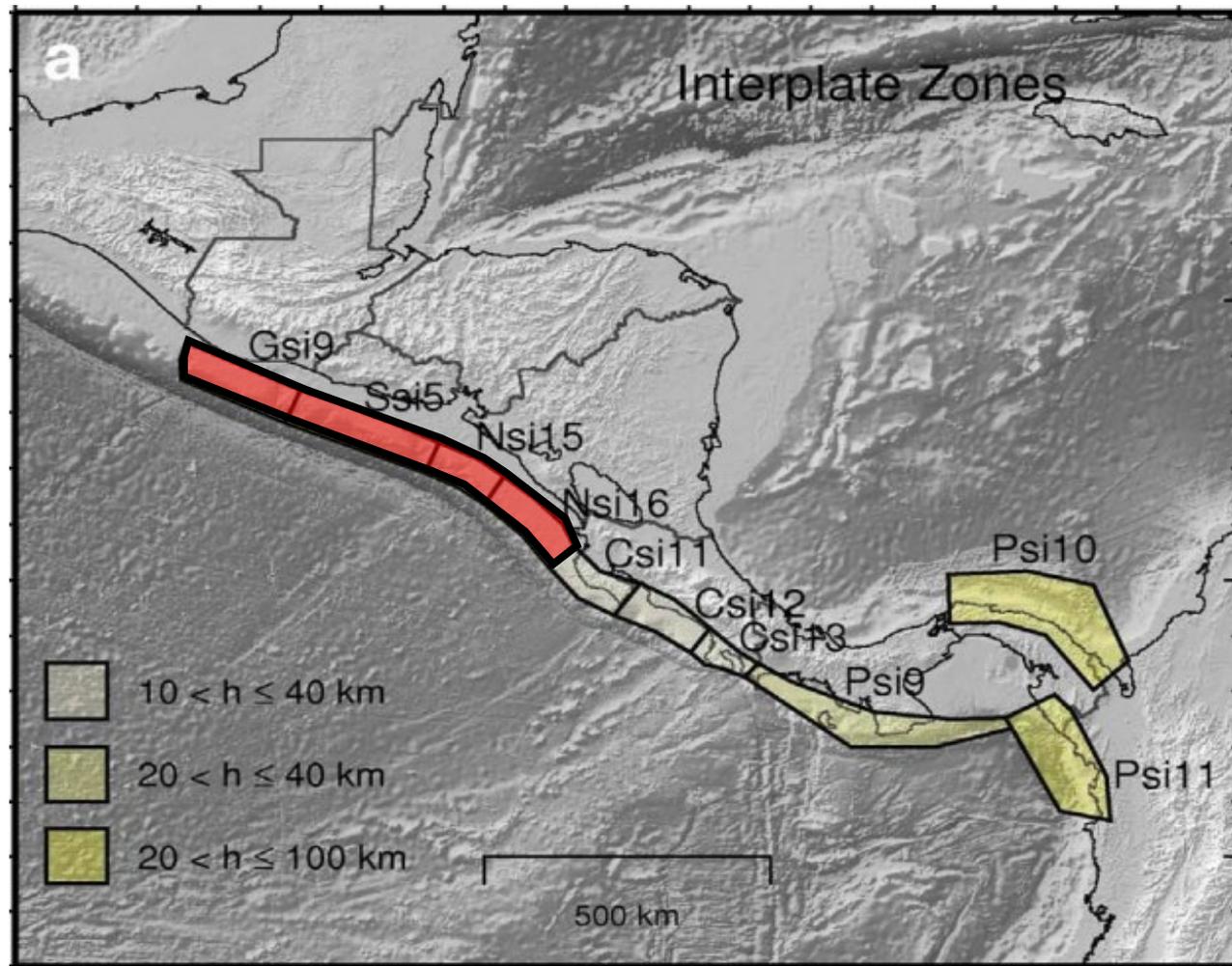


Fuente de Subducción



Concepción de fuentes sísmicas

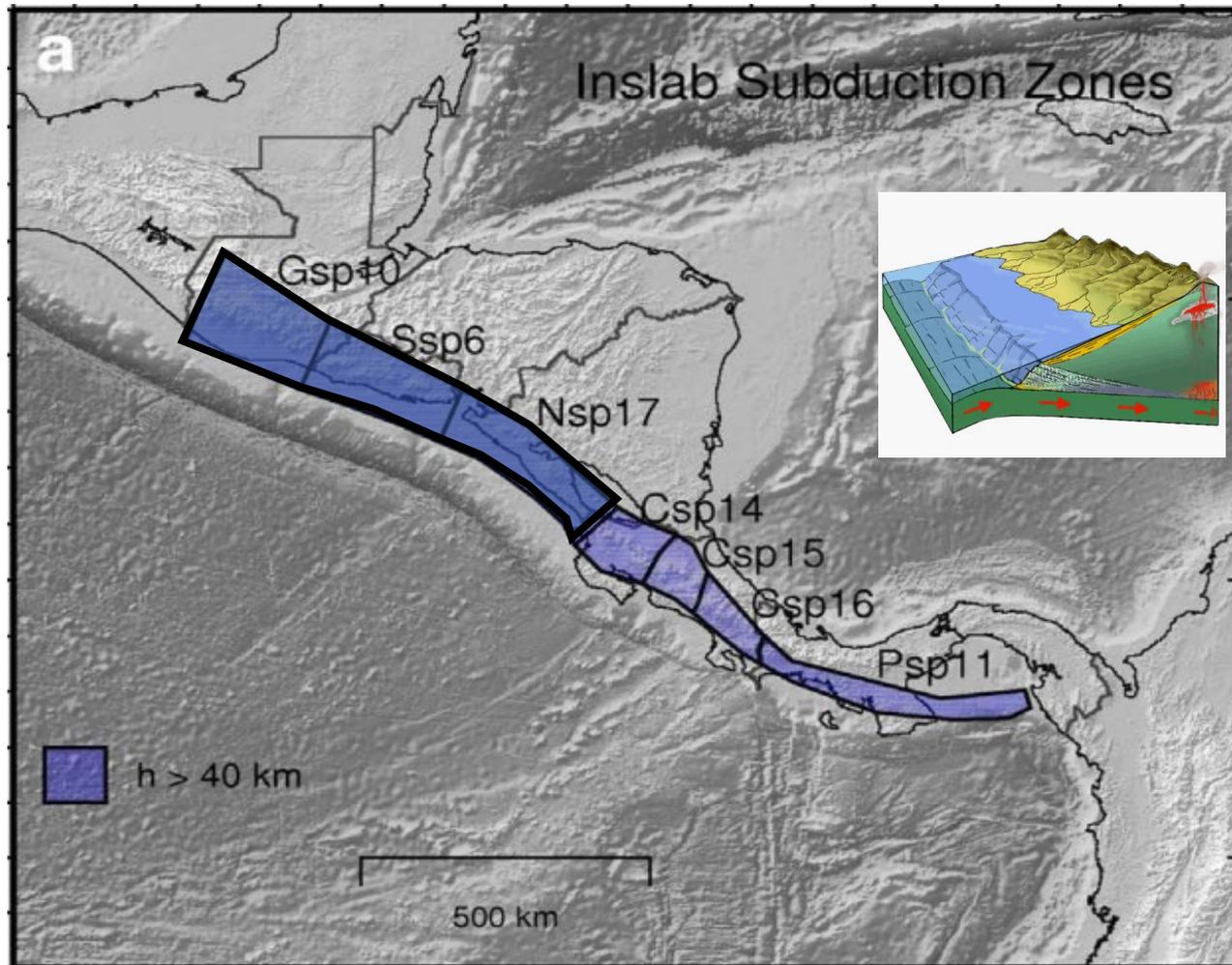
Fuente: subducción interfase o interplaca



- Debido al débil acople entre placas frente a nuestras costas, esta fuente produce terremotos silenciosos; con probabilidades altas de TSUNAMI

Concepción de fuentes sísmicas

Fuente: subducción intraplaca

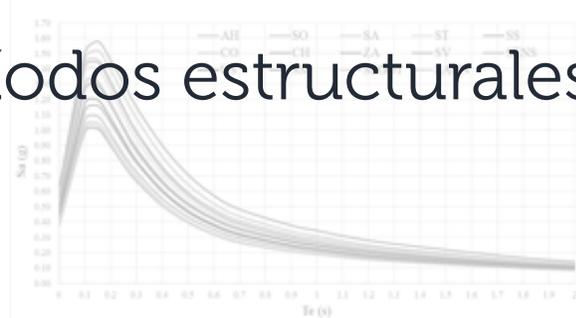
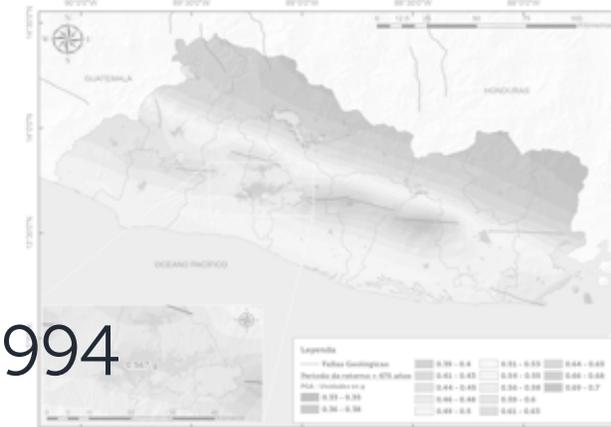
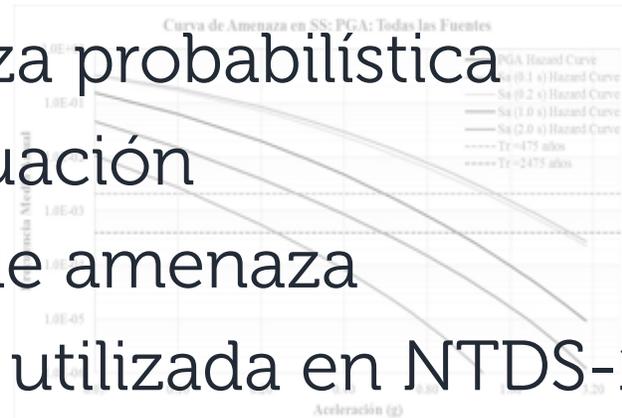
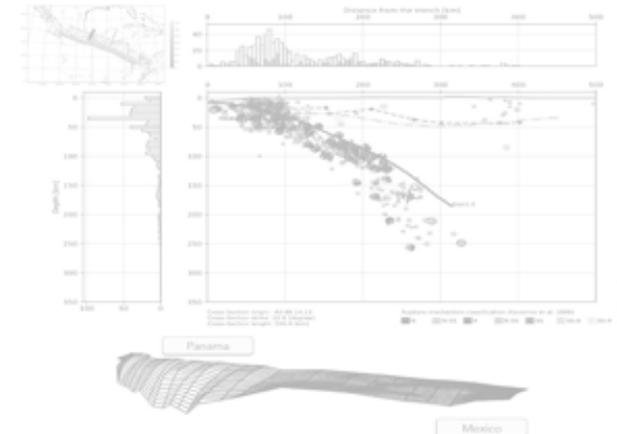
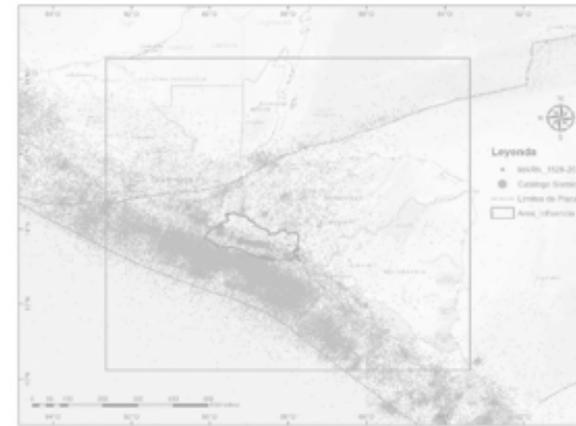


Esta fuente sísmica se divide en dos zonas de acuerdo a la génesis de su fallamiento tipo Normal:

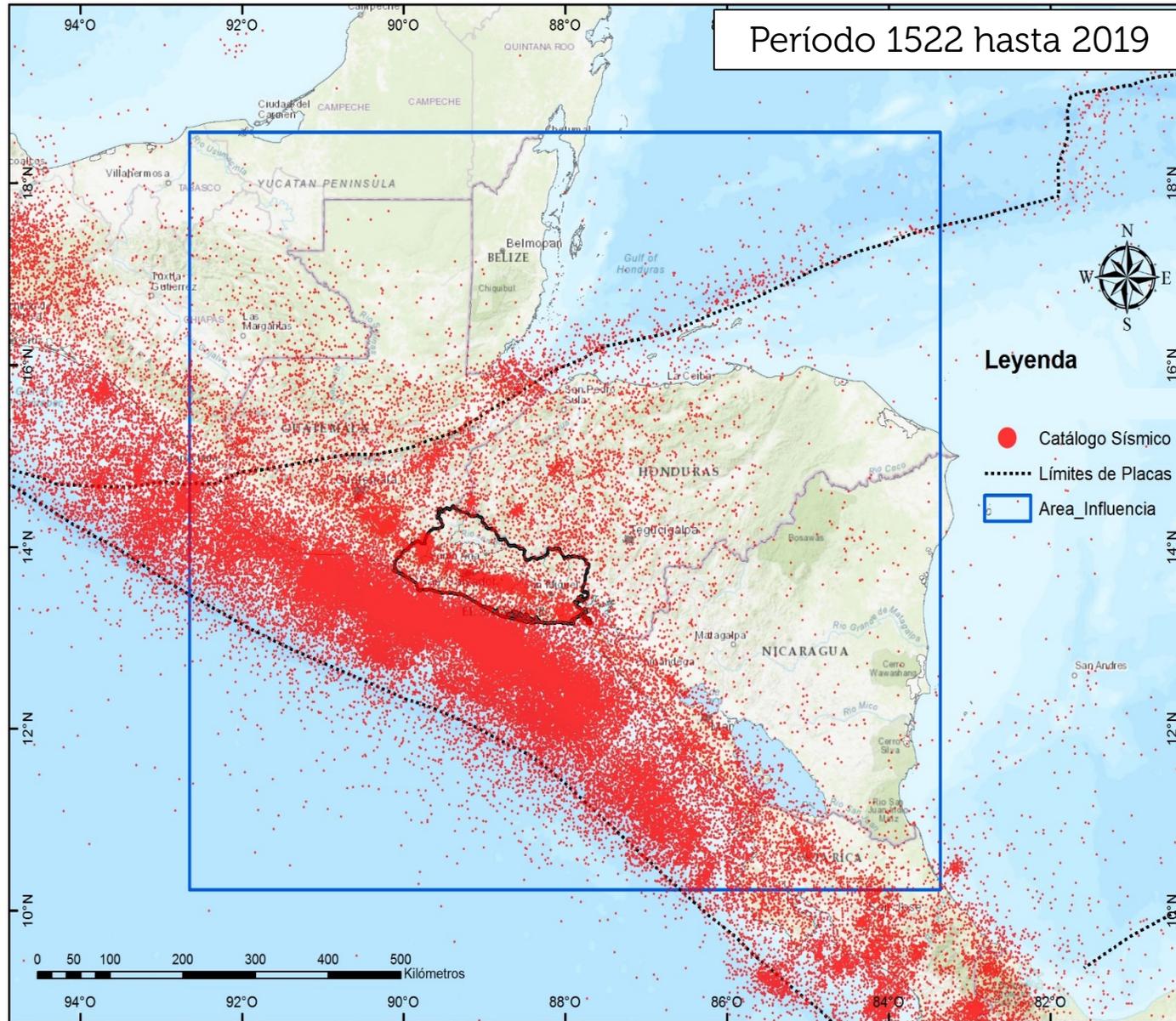
- Para eventos entre 41 y 120 km, se considera que el mecanismo normal se origina como resultado de la flexión inicial de la Placa de Cocos al subducirse debajo de la Placa del Caribe.
- Para eventos mayores a 120 km, se considera que el mecanismo normal obedece al doblamiento de la placa de Cocos (RollBack), al punto de quebrarse por su propio peso.

Contenido

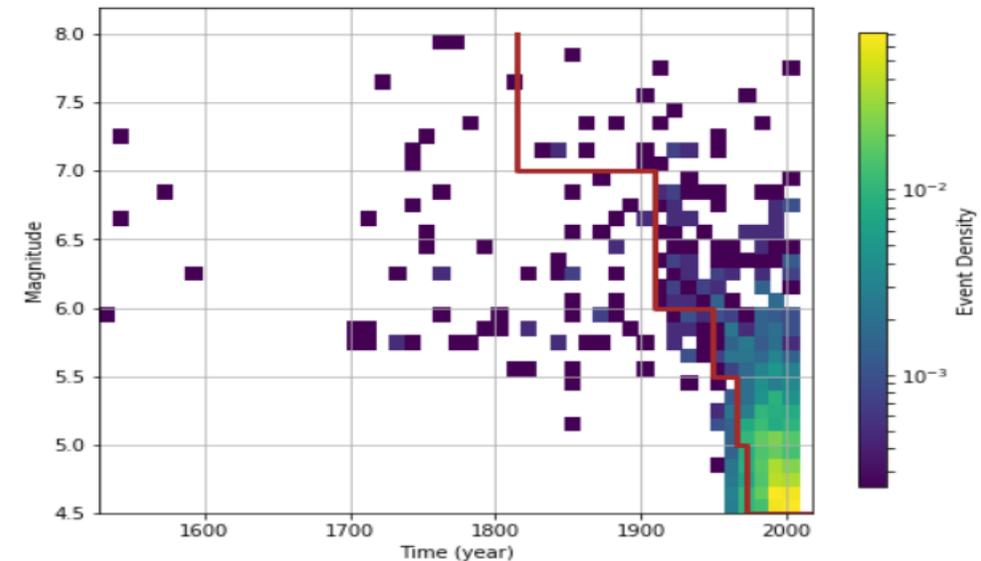
1. Marco sísmo-tectónico
2. Concepción de fuentes sísmicas
3. **Catálogo sísmico utilizado**
4. Modelación de fuentes sísmicas
5. Enfoque para cálculo de amenaza probabilística
6. Evaluación de modelos de atenuación
7. Antecedentes de evaluaciones de amenaza
8. Filosofía de cálculo de amenaza utilizada en NTDS-1994
9. Resultados de amenaza probabilística en suelo firme
10. Desagregación sísmica para períodos estructurales de interés
11. Conclusiones



Catálogo sísmico utilizado

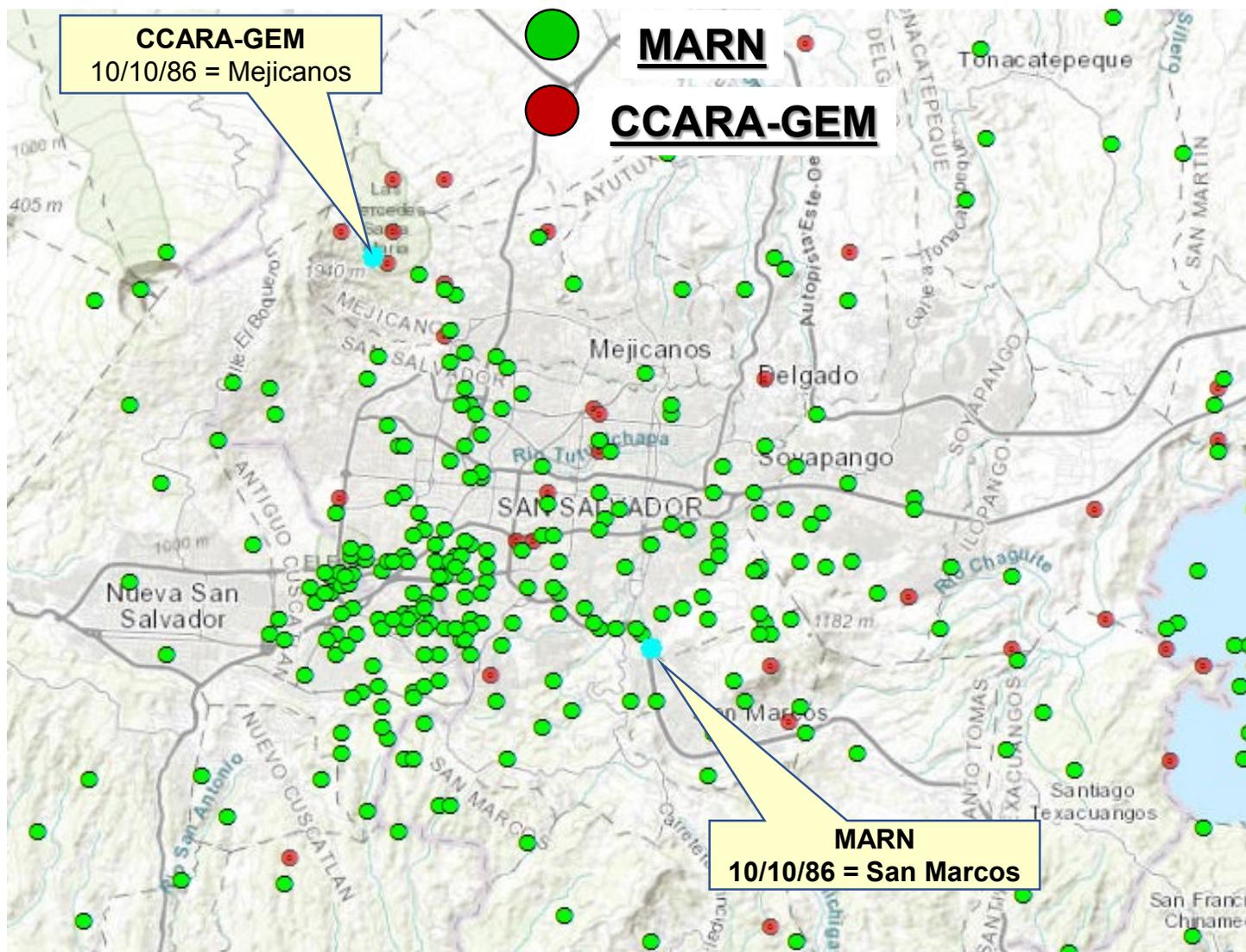


- ❖ Total de Eventos: 100,535
- ❖ Rango de M_w : 1.5 – 8.1
- ✓ Al menos 658 eventos con Mecanismo Focal
- ❖ Fuentes:
 - ✓ Base SAL: MARN (SEISAN y SeiscomP3)
 - ✓ RESIS-II: Homogenized catalogue for Central America
 - ✓ Proyecto CCARA. Versión 1 - GEM-GHEC: Global Earthquake Historical
 - ✓ USGS: Earthquake Hazards Program
 - ✓ Harvard CMT



Catálogo sísmico utilizado

Control de calidad (Discrepancias de eventos)



MALA CALIDAD DE LOCALIZACIÓN DE EVENTOS IMPORTANTES



NECESARIO HACER DE NUEVO EL MODELO DE SISMICIDAD DISTRIBUIDA PARA CADENA VOLCÁNICA



Manteniendo las consideraciones con la integración con las fallas geológicas (buffer y evitar duplicidad)

Catálogo sísmico utilizado

Depuración de sismos en territorio

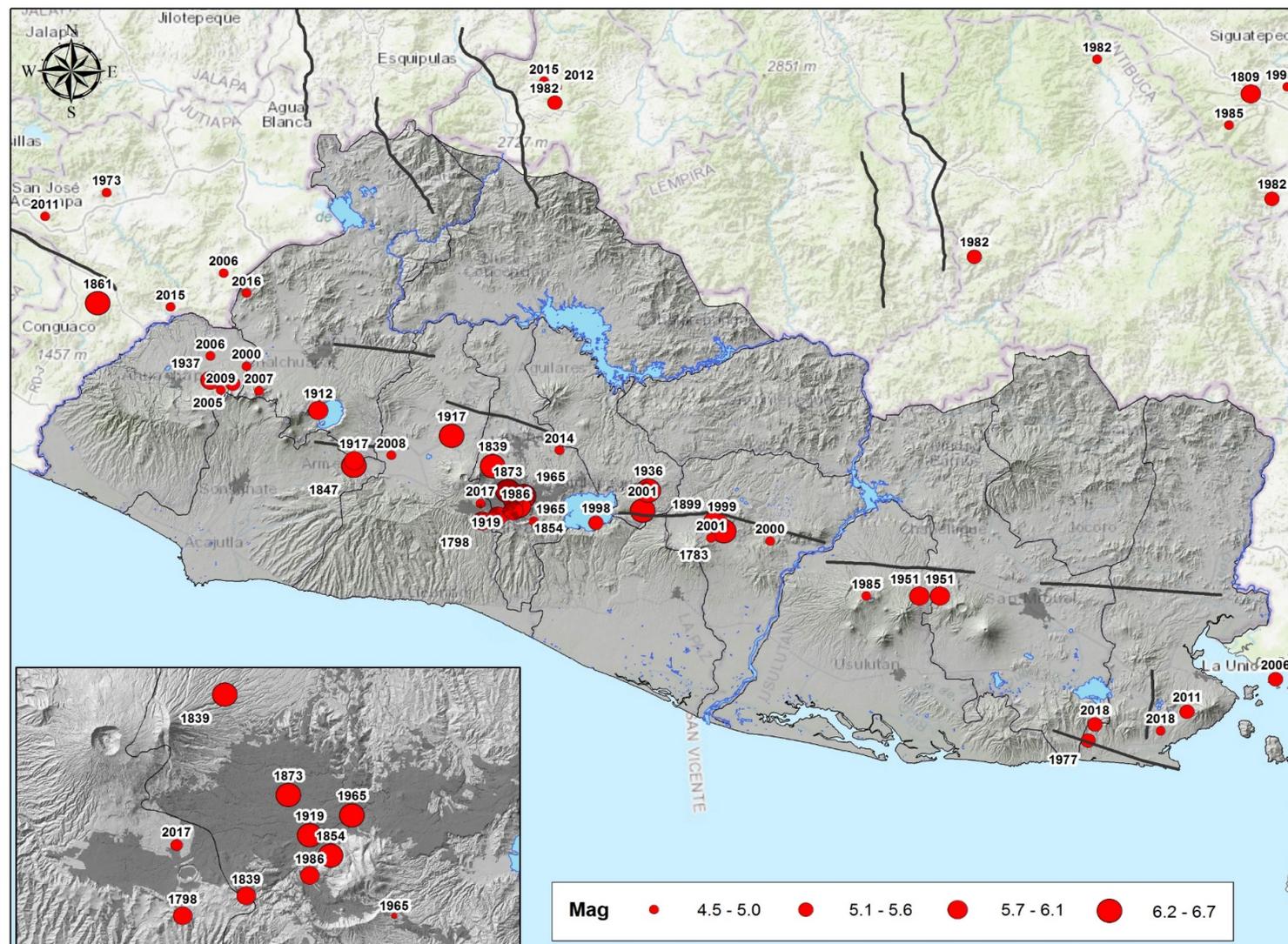
El reconocimiento de sismos sucesivos, procesos de rupturas múltiples, en fallas geológicas conjugadas o escalonadas.



Teniendo cuidado de eliminar eventos importantes (*Mainshocks*) al momento de depurar réplicas (Distribución de Poisson)



Incorporación de sismos recientes en cadena Volcánica (2017-2019)



Catálogo sísmico utilizado

Homogenización de catálogo (Mw)

- El catálogo "clustered" no depurado contiene diferentes tipos de magnitudes

Mw	Ml	Mc	mb	Ms
637	24,793	74,109	789	207

- Se llevó a cabo el proceso de homogeneización (a Mw) mediante regresiones ortogonales. Usando registros con ambas magnitudes

Ml	Mc	Mb	Ms	Total
152	124	113	2	391

- Para llevar a cabo este proceso de homogenización, se ha seguido la metodología planteada por Ranjit Das et al., 2012, en su trabajo "*Homogenization of Earthquake Catalog in terms of Magnitude using General Orthogonal Regression*"

Tabla 3. Jerarquía de ecuaciones entre magnitudes utilizadas para la conformación del catálogo sísmico

Si existe Mw se traslada directamente su valor

Si no existe Mw, pero existe Ml

Utilizar las siguientes expresiones de Hanks y Boore que relaciona el Momento Sísmico, y luego la de Kanamori para convertirla a Mw.

$$Mw = \frac{2}{3} (17.53 + 0.63 Ml + 0.10 Ml^2) - 10.7$$

Esto se hizo, ya que no se obtuvo una buena regresión ortogonal entre ambas magnitudes.

Si no existe Mw ni Ml, pero existe mb,

mb se convierte a Mw, usando las relaciones siguientes:

$$mb_proxy = 0.738 * mb + 1.20$$

$$Mw = 1.167 * mb_proxy - 0.376$$

$$Mw = 1.167 * (0.738 * mb + 1.20) - 0.376$$

Si no existen Mw, Ml ni mb, pero existe Mc,

Mc se convierte a Mw usando las relaciones siguientes:

$$Mc_proxy = 0.735 * Mc + 1.08$$

$$Mw = 1.096 * Mc_proxy + 0.155$$

$$Mw = 1.096 * (0.735 * Mc + 1.08) + 0.155$$

Si no existen Mw, Ml ni Mb, ni Mc, pero existe Ms,

Ms se convierte a Mw usando esta relación.

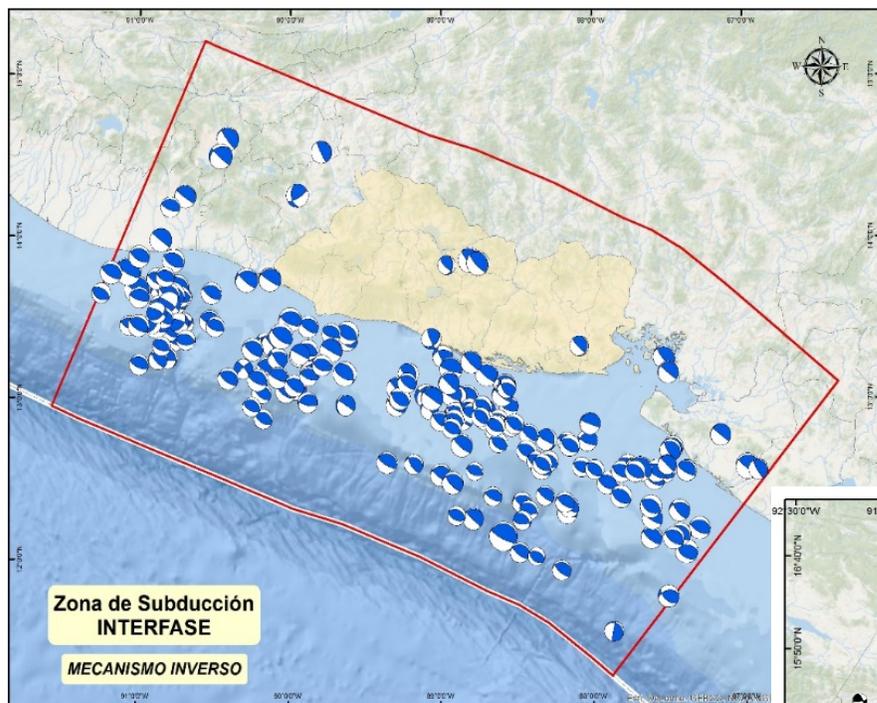
Siempre y cuando Ms sea menor a 6.6 de lo contrario Ms será igual a Mw.

$$Mw = 0.077 * Ms^2 - 0.155 * Ms + 4.363$$

Dado el bajo coeficiente de Correlación obtenido en el proceso para la Ms, se extrae la relación calculada en el trabajo de Salazar et al, 2013: JCEA - 20130217-3

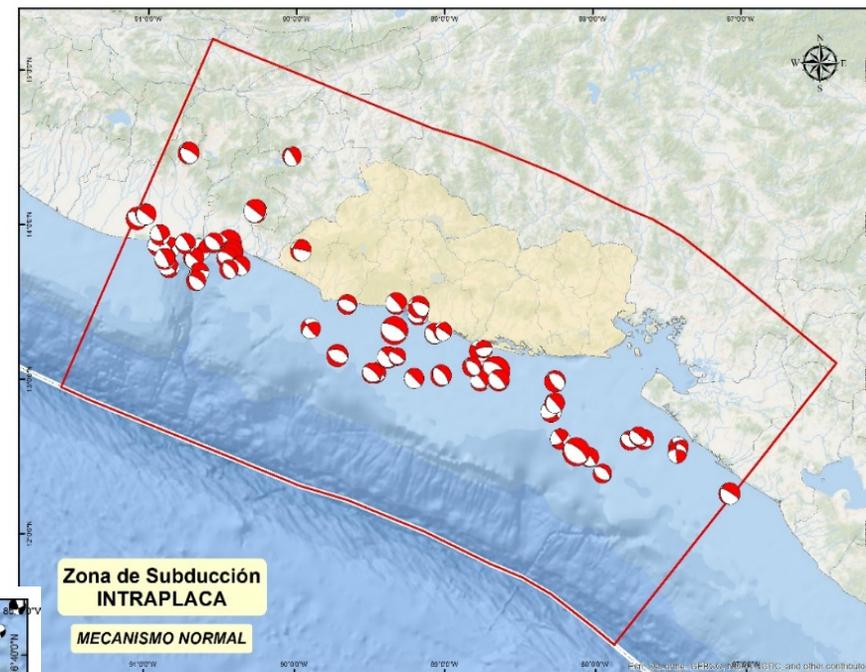
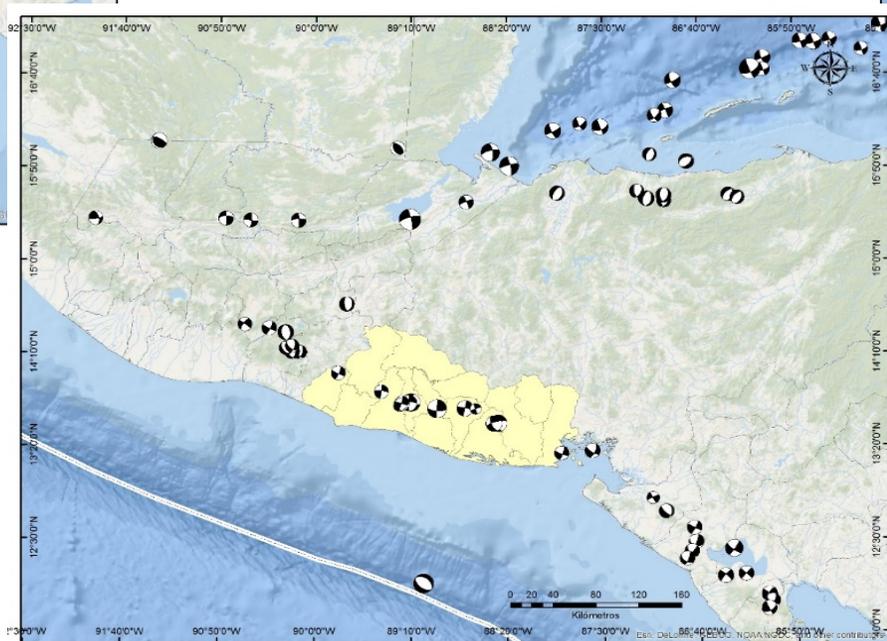
Catálogo sísmico utilizado

Recopilación de mecanismos focales



➤ Subducción Interface

El catálogo sísmico contiene al menos 658 eventos con mecanismos focales

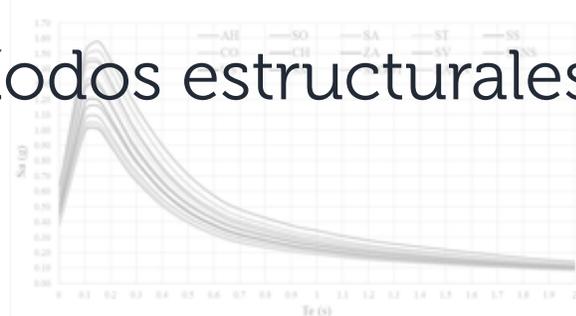
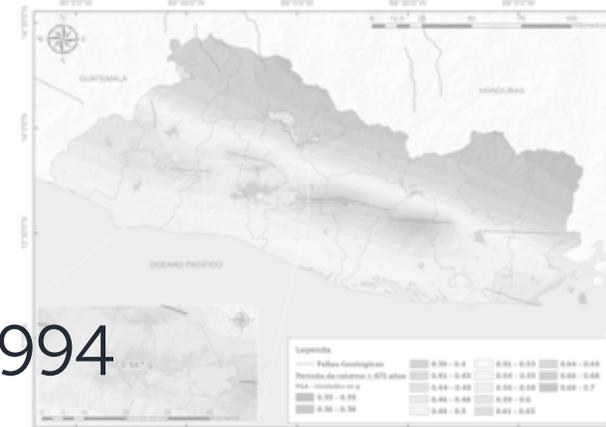
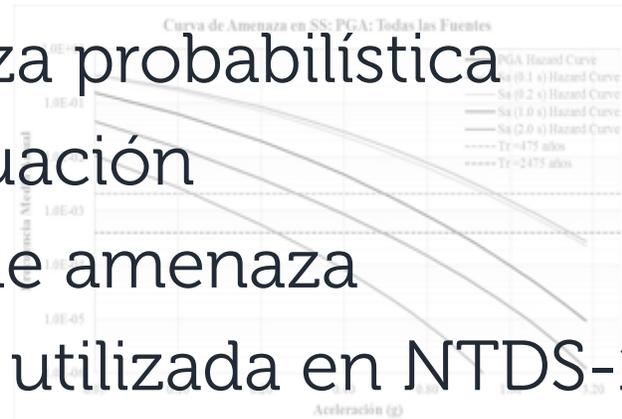
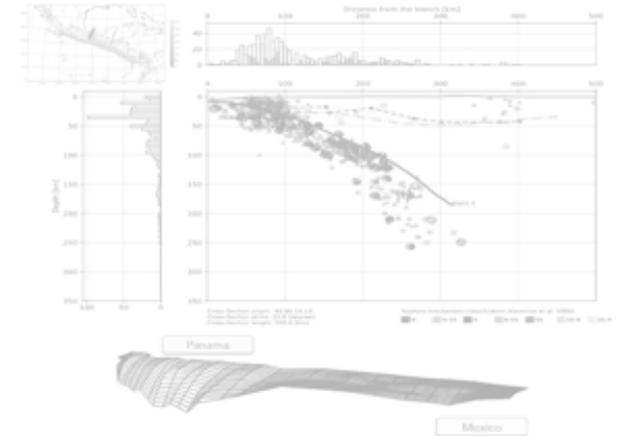
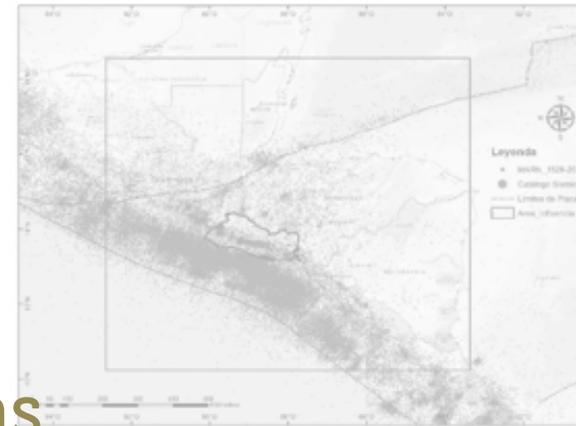


➤ Subducción Intraplaca

➤ Zona de falla de El Salvador (Cadena volcánica), Fallas y grábenes de Guatemala y Honduras.

Contenido

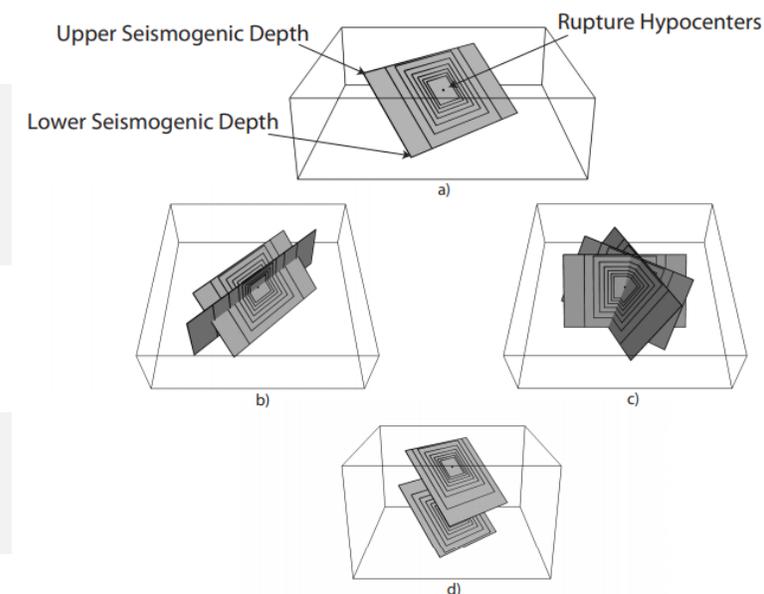
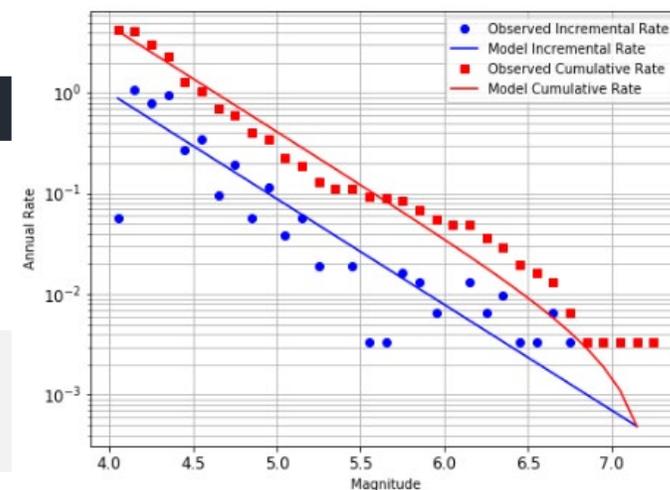
1. Marco sísmo-tectónico
2. Concepción de fuentes sísmicas
3. Catálogo sísmico utilizado
4. **Modelación de fuentes sísmicas**
5. Enfoque para cálculo de amenaza probabilística
6. Evaluación de modelos de atenuación
7. Antecedentes de evaluaciones de amenaza
8. Filosofía de cálculo de amenaza utilizada en NTDS-1994
9. Resultados de amenaza probabilística en suelo firme
10. Desagregación sísmica para períodos estructurales de interés
11. Conclusiones



Modelación de fuentes sísmicas

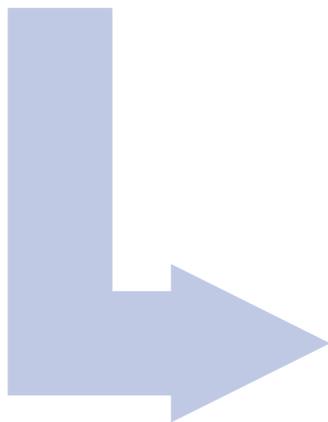
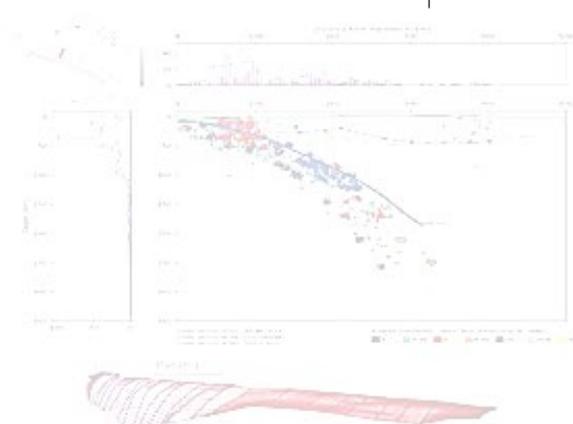
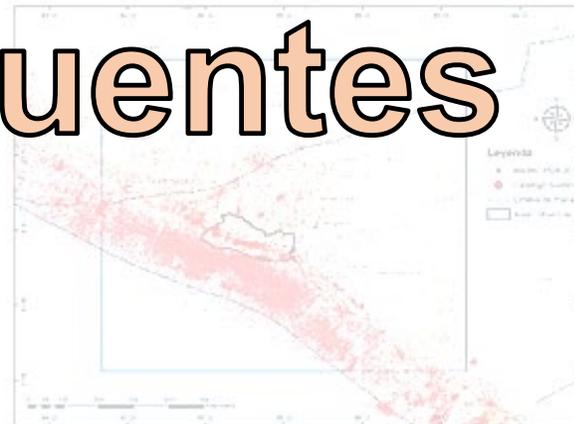
Parámetros requeridos para modelar

Parámetros	Descripción	Utilizado
Distribución magnitud-frecuencia	Define la tasa de momento sísmico total liberada por una fuente, así como la frecuencia relativa de terremotos de diferente magnitud que puede generar	Gutenberg-Richter doblemente truncado (valor de a y b , M_{\min} y M_{\max})
Modelo de ocurrencia temporal	Define la forma funcional utilizada para calcular la probabilidad del número de ocurrencias de ruptura en un lapso de tiempo dado	Modelo de Poisson (independiente del tiempo)
Tipo de región tectónica	Atributo clave para asociar una fuente sísmica a un modelo de movimiento del suelo .	Corteza Superficial Activa Subducción Interfase e Intraplaca
Relación de escala magnitud-área Relación de aspecto de ruptura	Define los tamaños y formas de planos de ruptura	Wells & Coppersmith (1994) Strasser et al 2012
Distribución del plano nodal	Define orientaciones y estilos de fallas de rupturas.	Strike-slip, normal e inverso, de acuerdo a fuente
Profundidad sismogénica superior e inferior	Restringe los planos de ruptura dentro de la capa sismogénica	De acuerdo a Alvarado et al. 2017
Distribución de profundidad hipocentral	Define centroides de planos de ruptura	De acuerdo a Alvarado et al. 2017

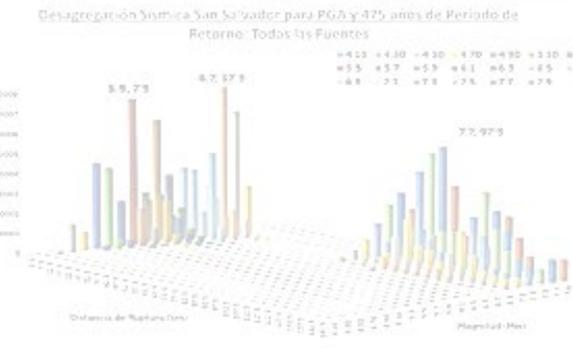
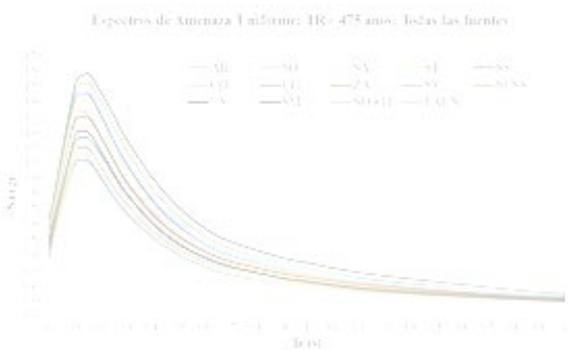
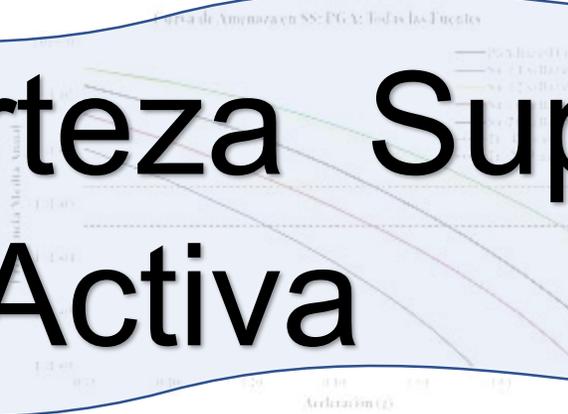


Fuente: GEM, 2014

Modelación de fuentes sísmicas



Fuente Corteza Superficial Activa

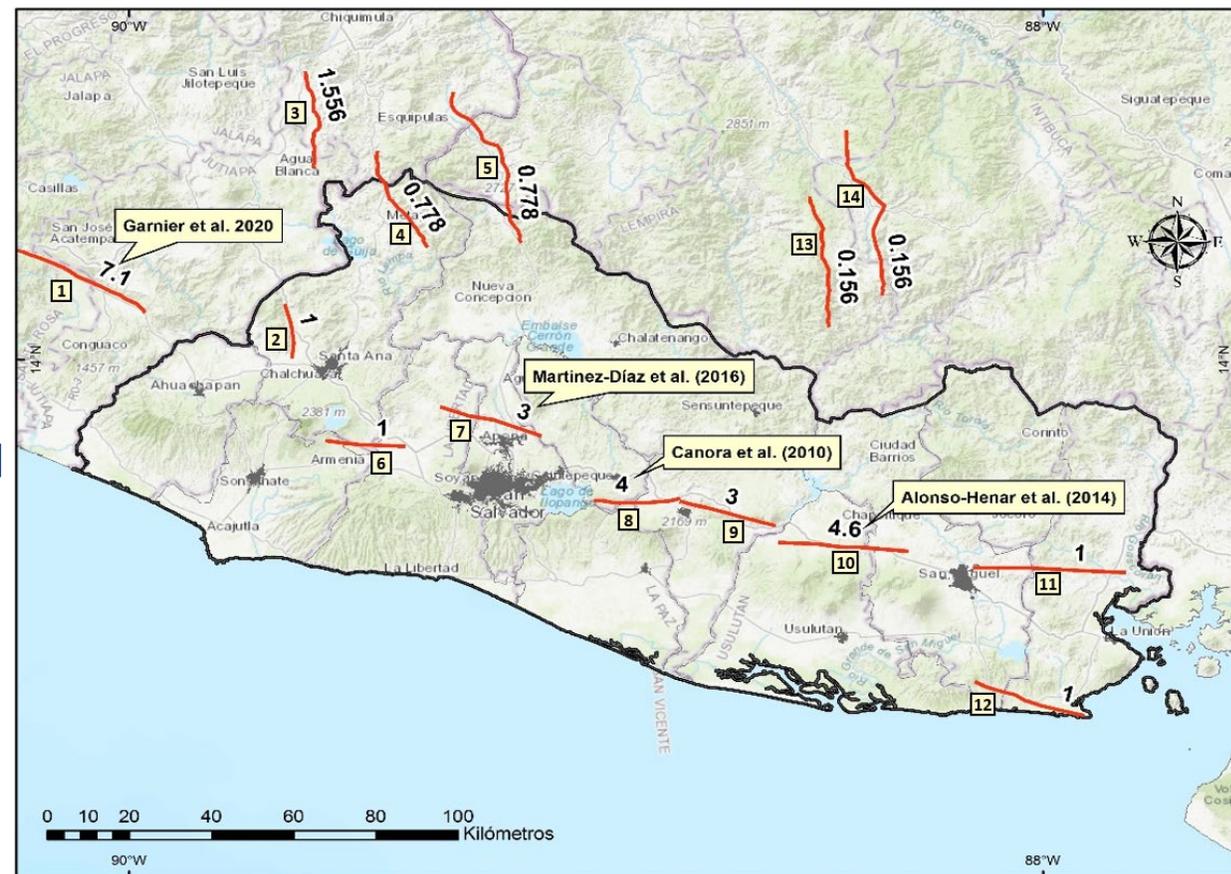
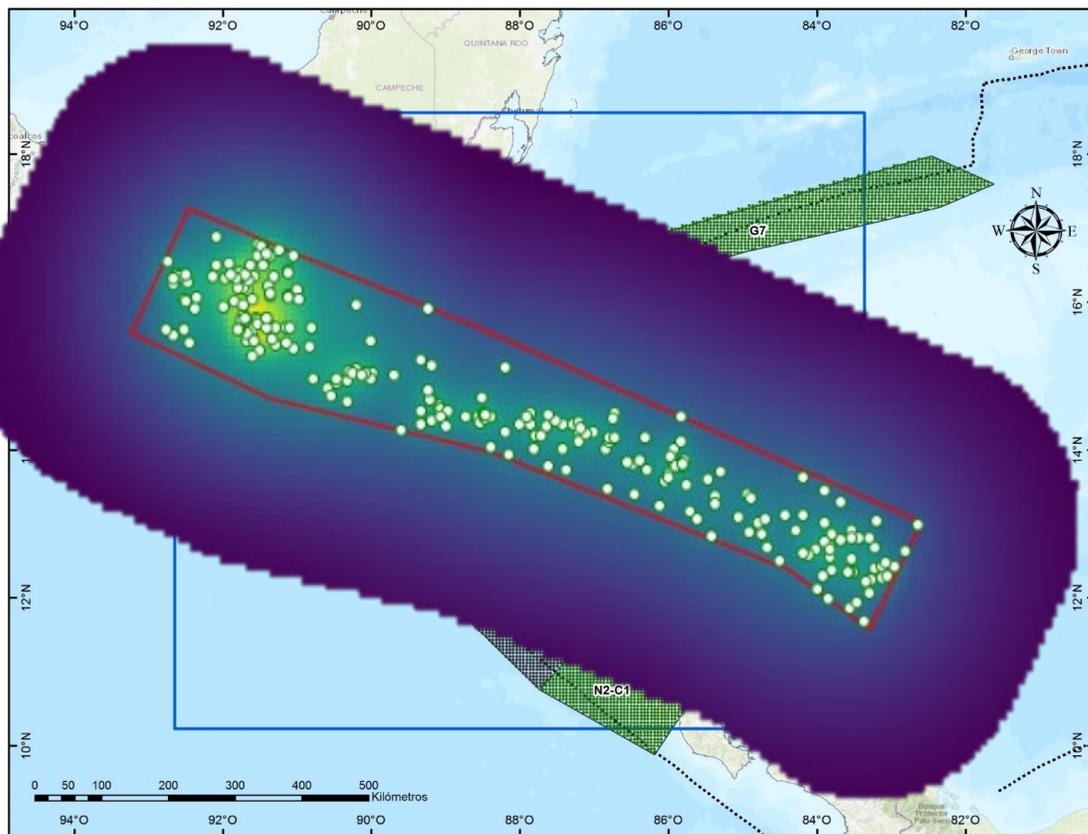


Modelación de fuentes sísmicas

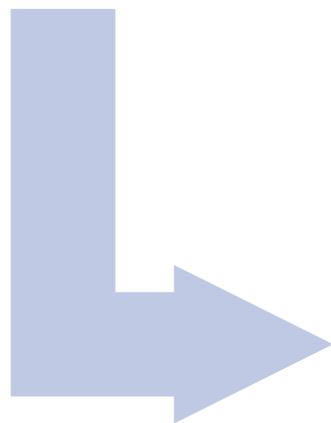
Corteza Superficial Activa

Se há utilizado un Modelo Integrado

Sismicidad Distribuida o Suavizada (Grid Sources) con Fallas Geológicas (Simple Fault Sources)

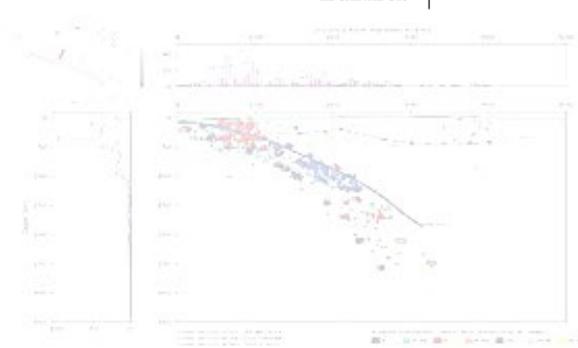
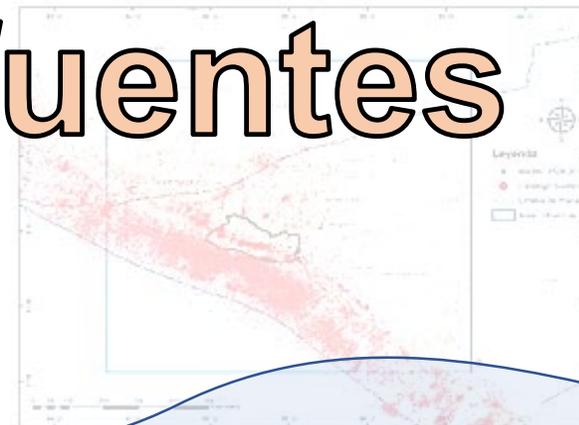


Modelación de fuentes sísmicas

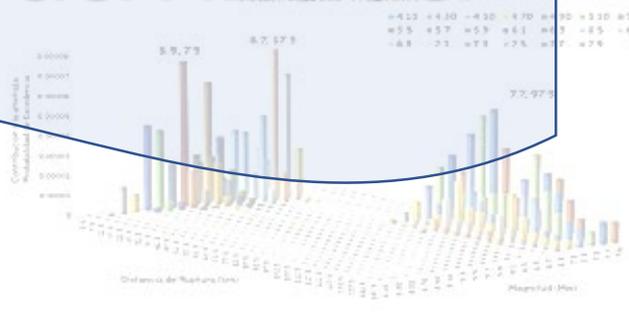
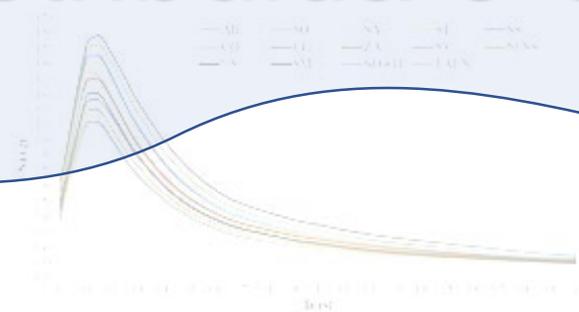


Fuente Corteza Superficial Activa

Sismicidad Distribuida o Suavizada



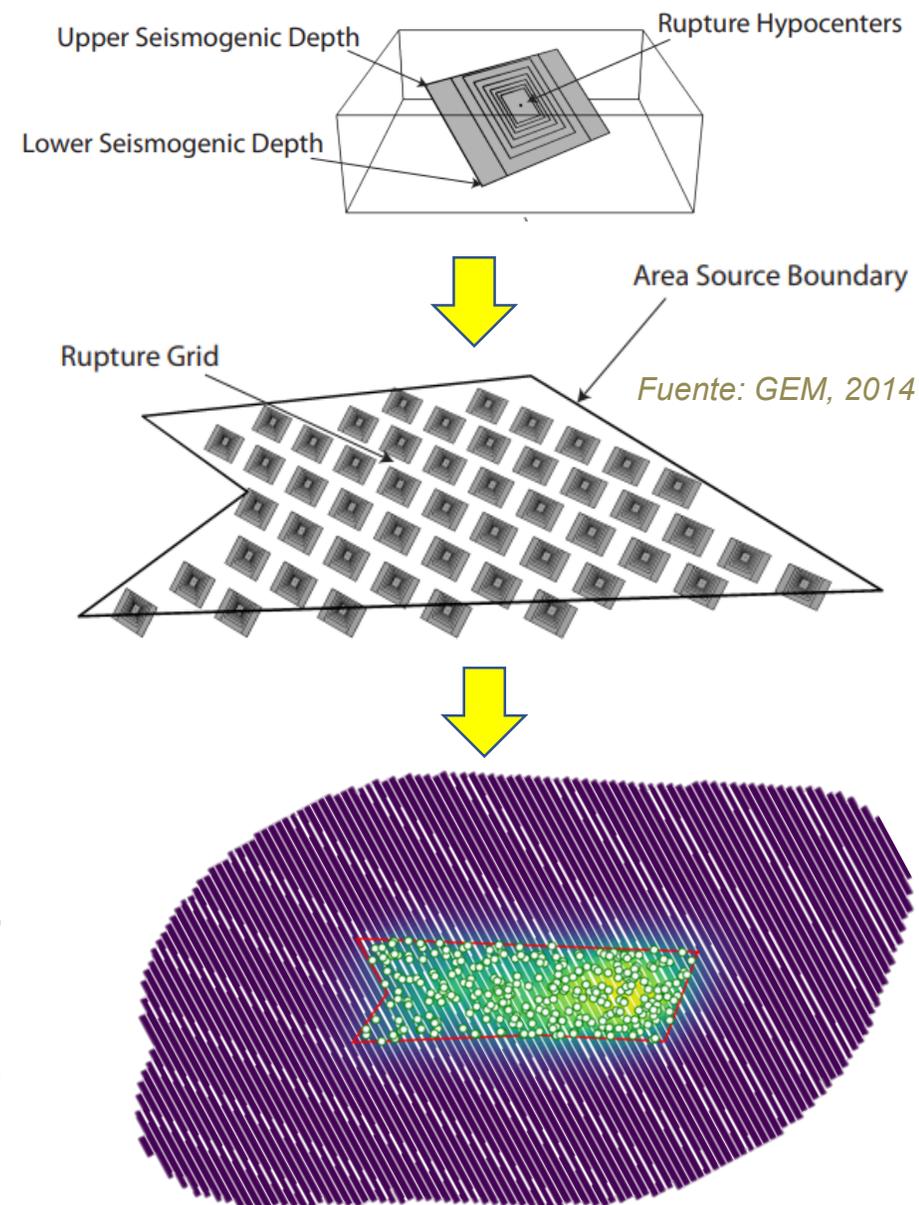
Curva de Amenaza SS-PGA: Islas las Tucetas



Modelación de fuentes sísmicas

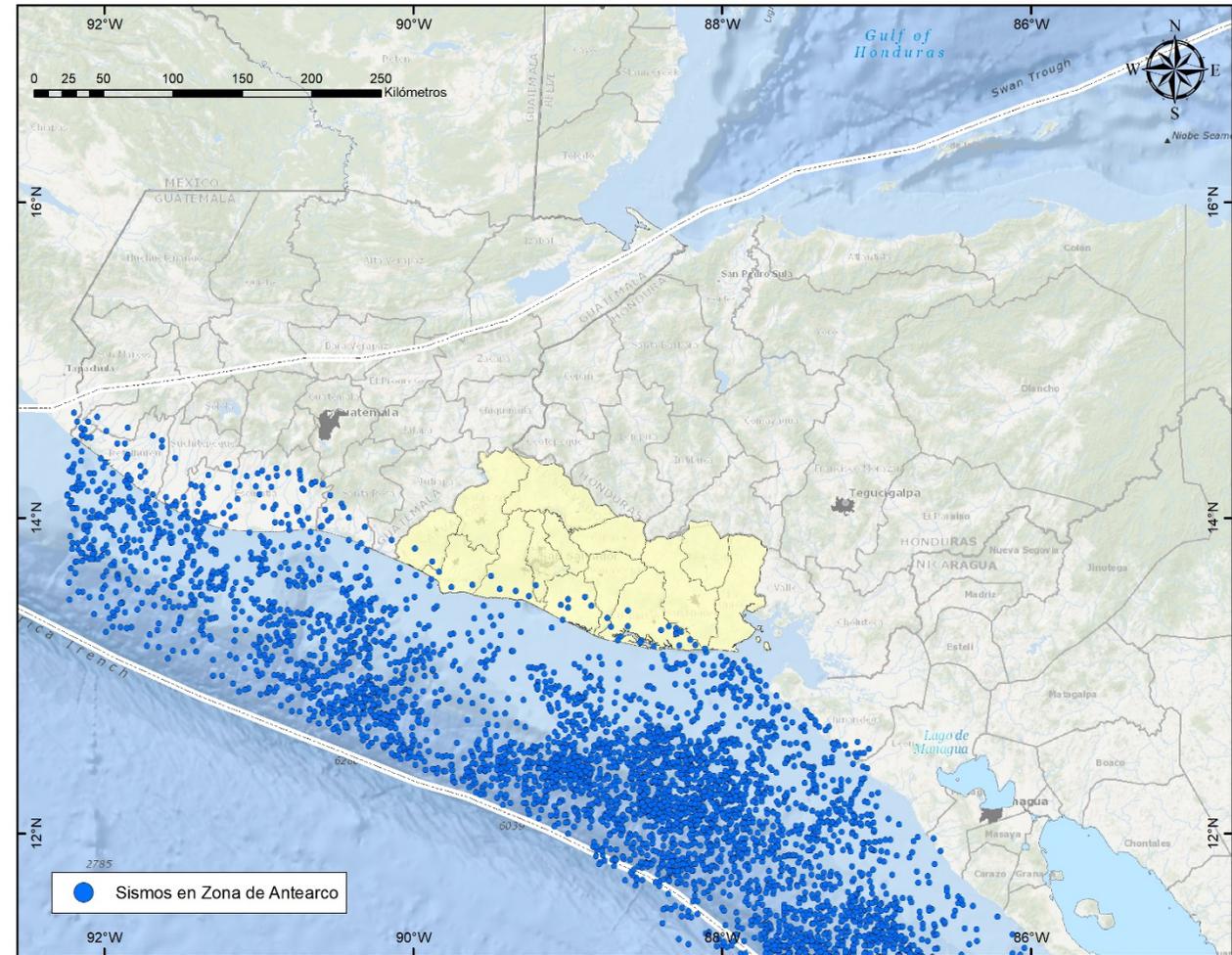
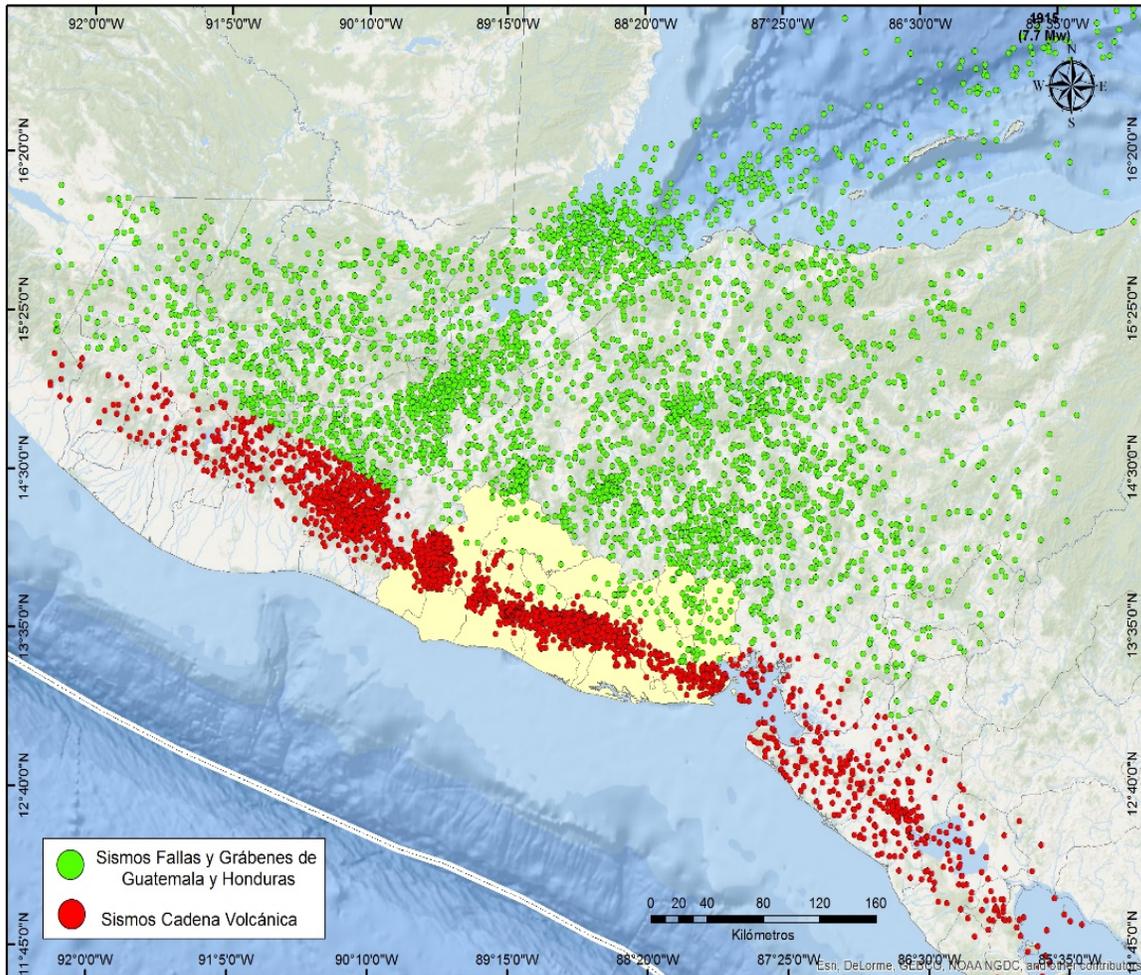
CSA: Sismicidad Distribuida

- Colección de **fuentes puntuales** para modelar la sismicidad con parámetros **espacialmente variables**.
- Las tasas de momento se basan en ocurrencias observadas, **y no en valores de (a y b) constantes**.
- **Se suaviza** la sismicidad que se produce en la cuadrícula de puntos mediante un filtro gaussiano.
- Ventajas en comparación con las fuentes de área:
 - ❑ **Elimina la mayor parte del grado de subjetividad** en la definición de las geometrías de las fuentes área.
 - ❑ **Produce un patrón espacial de sismicidad** que suele estar más cerca de lo observado en la realidad.



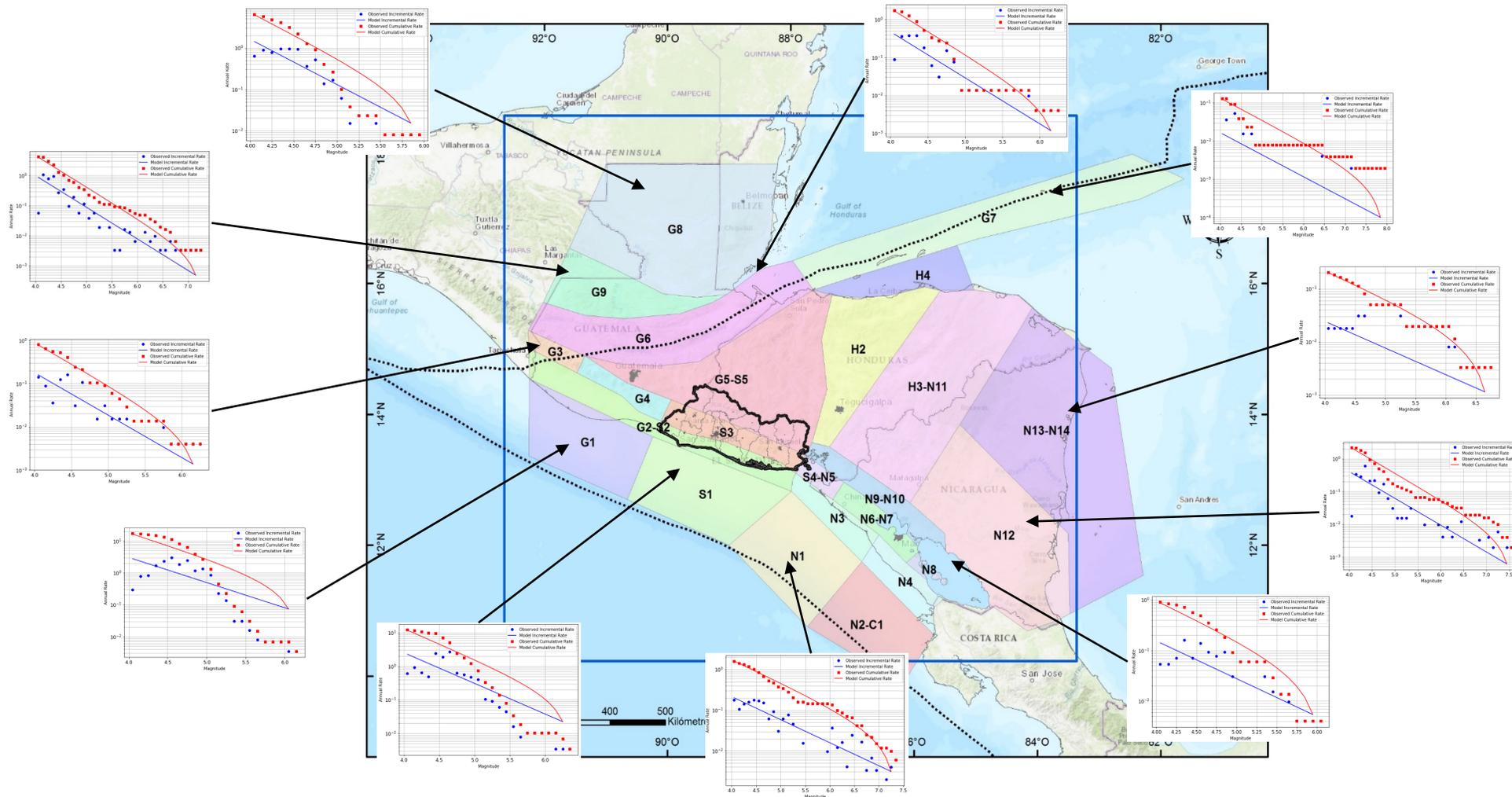
Modelación de fuentes sísmicas

CSA: Sismicidad Distribuida: Paso 1: Regionalización de sismicidad en sub-catálogos para cada macro-zona.



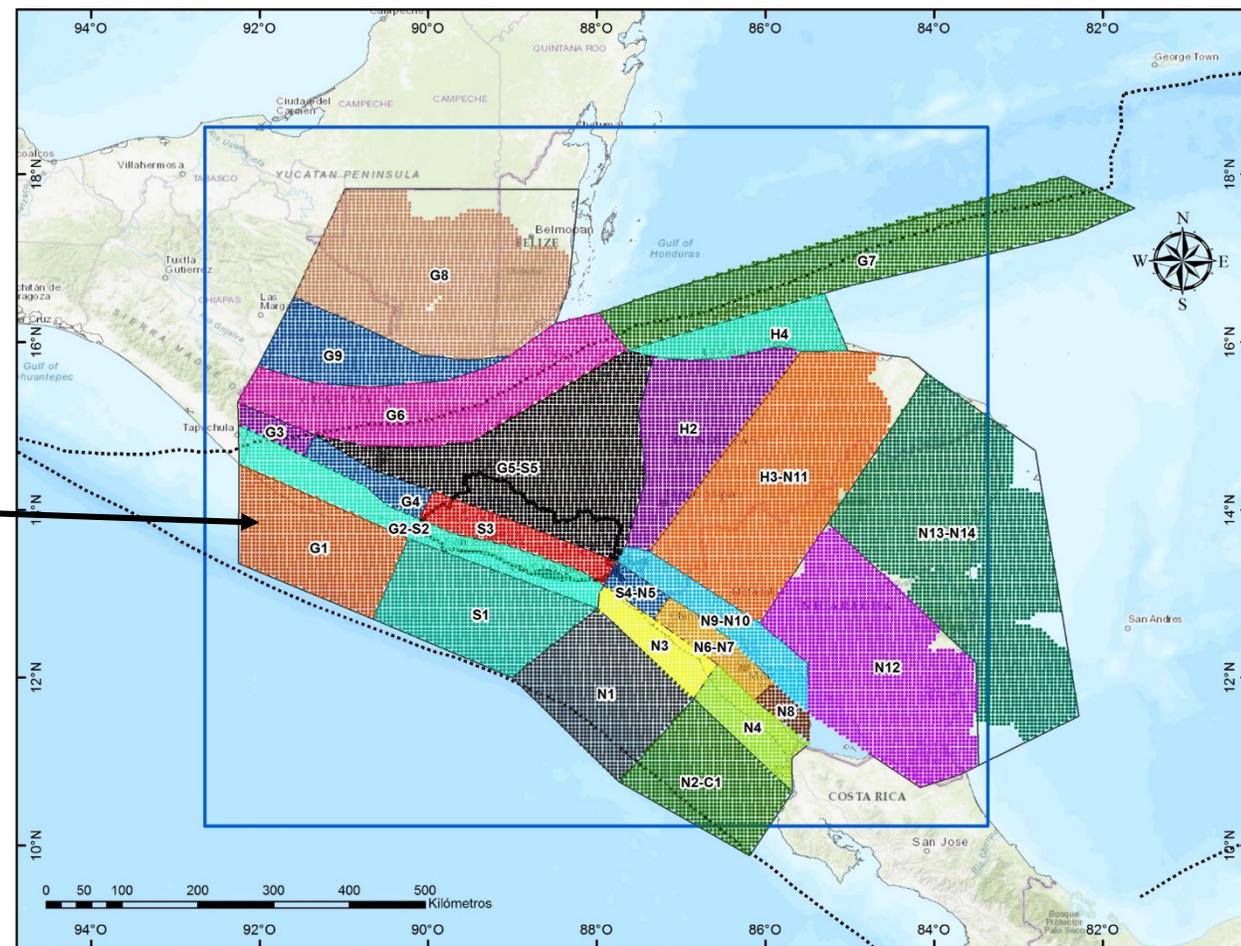
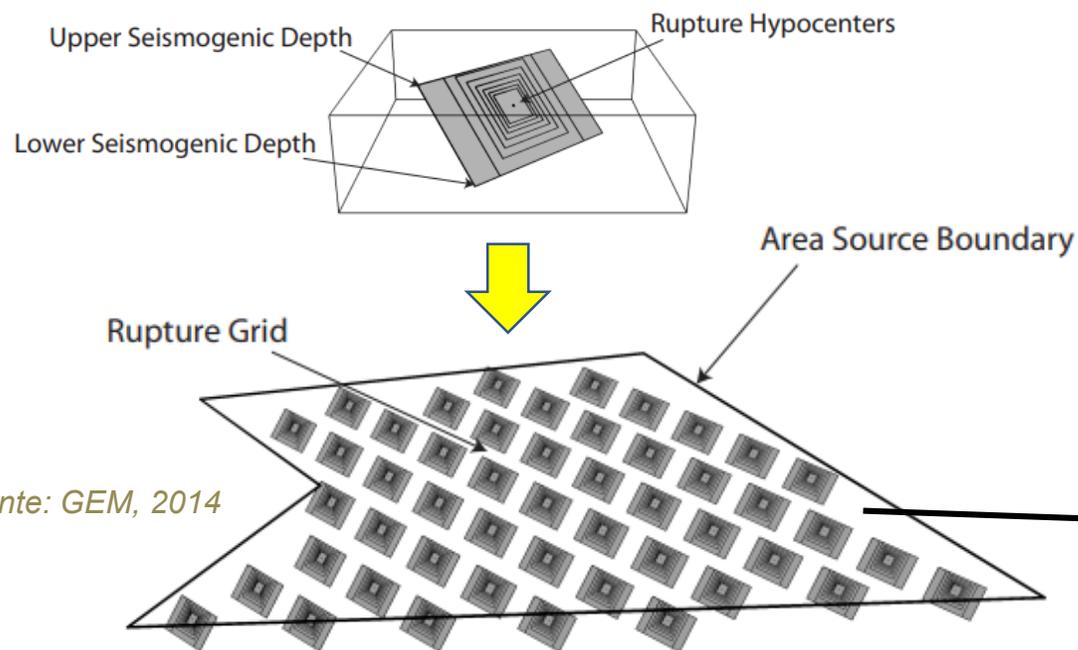
Modelación de fuentes sísmicas

CSA: Sismicidad Distribuida: Paso 2: determinación de la distribución magnitud-frecuencia de cada macro-zona



Modelación de fuentes sísmicas

CSA: Sismicidad Distribuida Paso 3: definición de fuentes puntuales, distribuidas en una malla equiespaciada (0.1°)

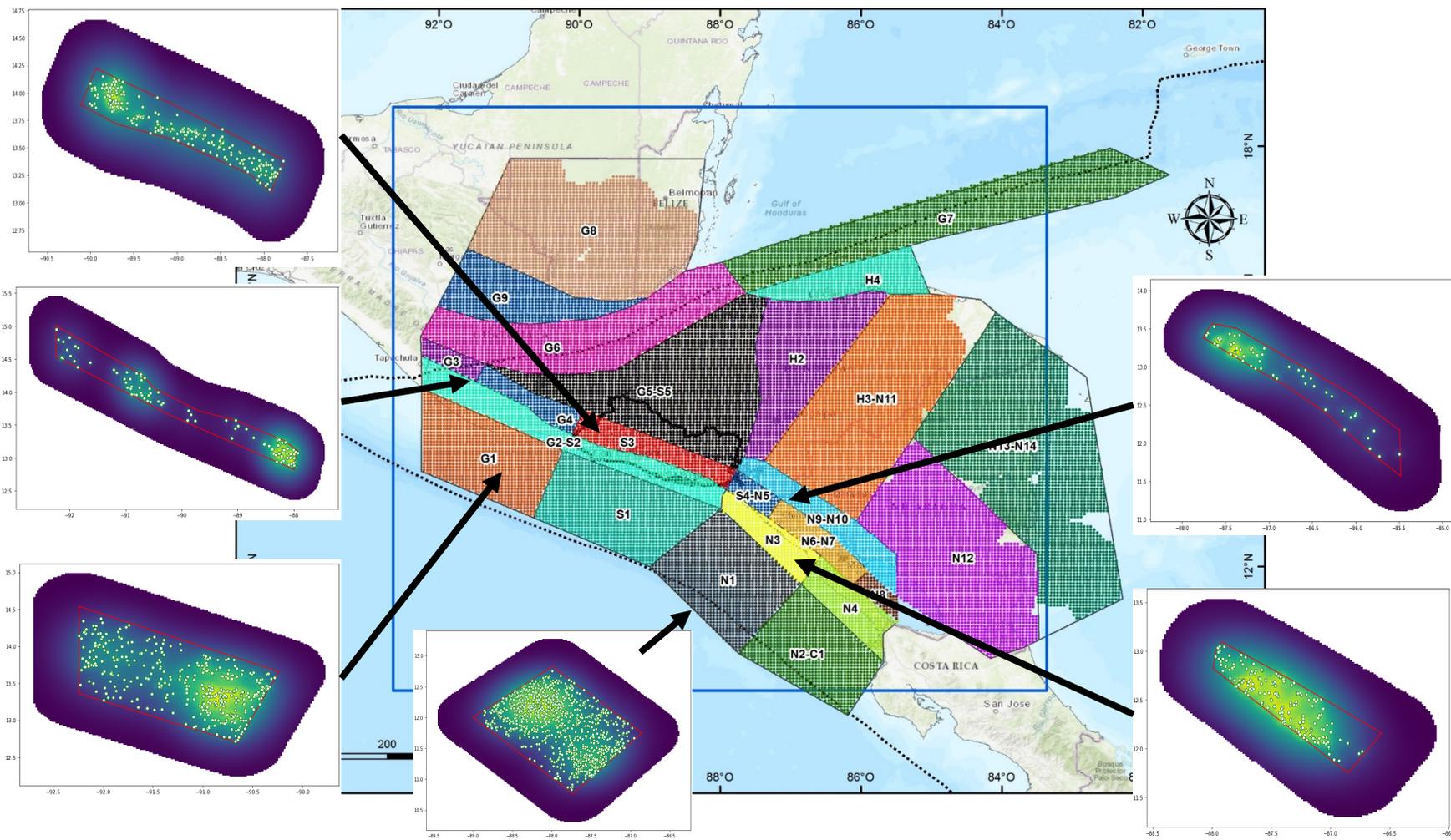
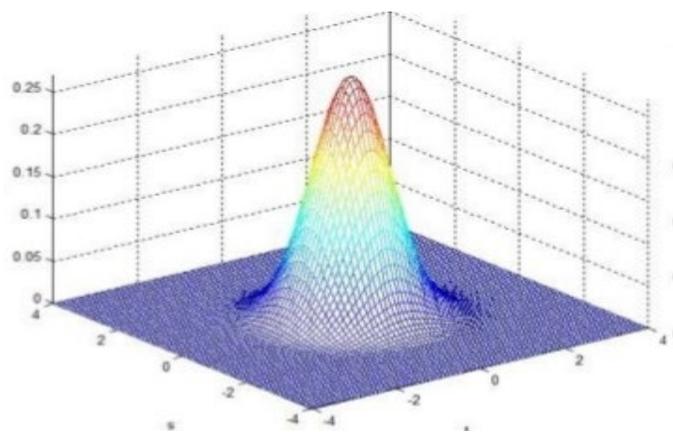


- En cada celda se hará, un conteo de eventos de magnitudes iguales o superiores a determinados rangos de magnitudes, considerando intervalos de $0.1 M_w$.

Modelación de fuentes sísmicas

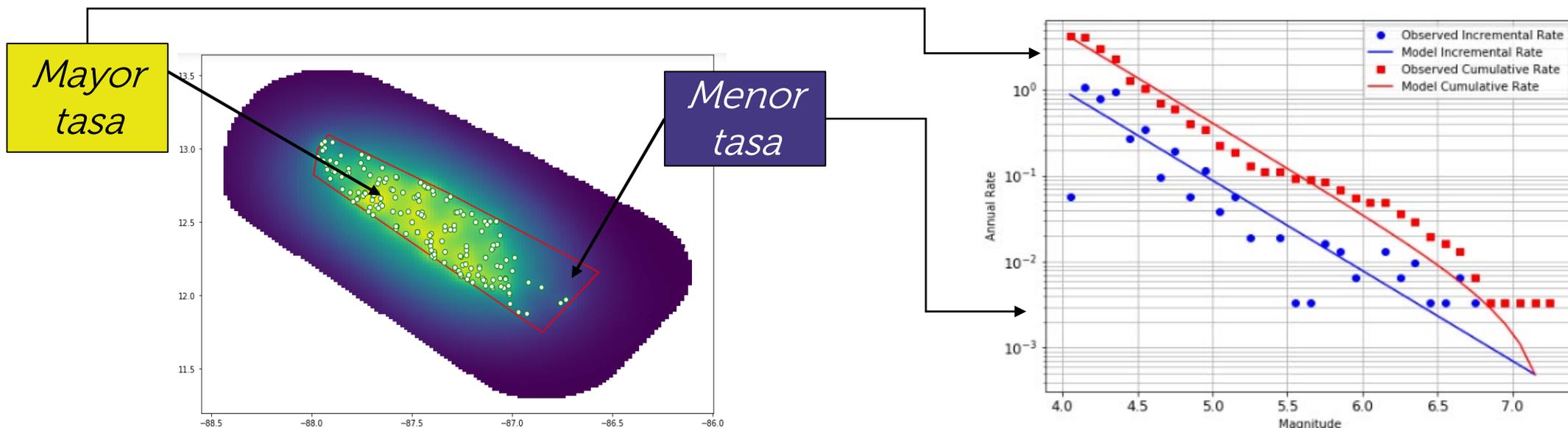
CSA: Sismicidad Distribuida Paso 4: Transformación de fuentes área (macro-zonas) en una cuadrícula de fuentes puntuales

- Mediante la aplicación de filtro gaussiano a cada sub-catálogo dentro de cada macro-zona



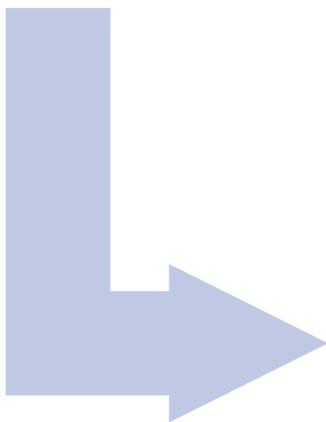
Modelación de fuentes sísmicas

Corteza Superficial Activa: Paso 5: Cálculo de la fracción de la tasa de ocurrencia total espacial en cada nodo de la cuadrícula



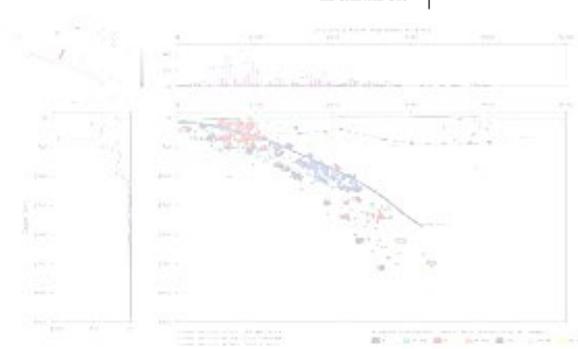
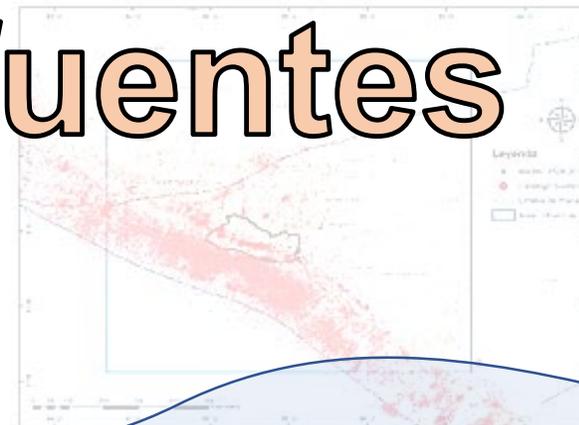
Para una determinada fuente puntual, la tasa de ocurrencia está condicionada por la distribución de magnitud-frecuencia obtenida para la macro-zona, que aunque comparten el mismo valor de b ; cada una posee su propia tasa de ocurrencia de terremotos derivada del producto del filtraje espacial gaussiano

Modelación de fuentes sísmicas



Fuente Corteza Superficial Activa

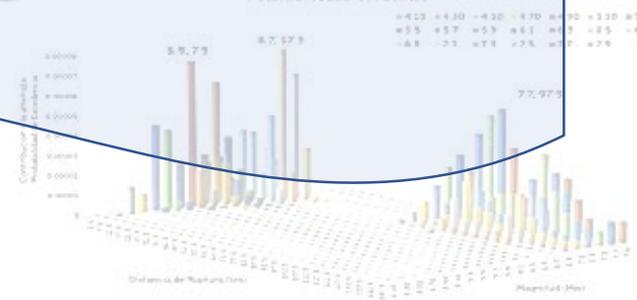
Fallas Geológicas



Curva de Amenaza SS-PGA: Islas las Tuercas



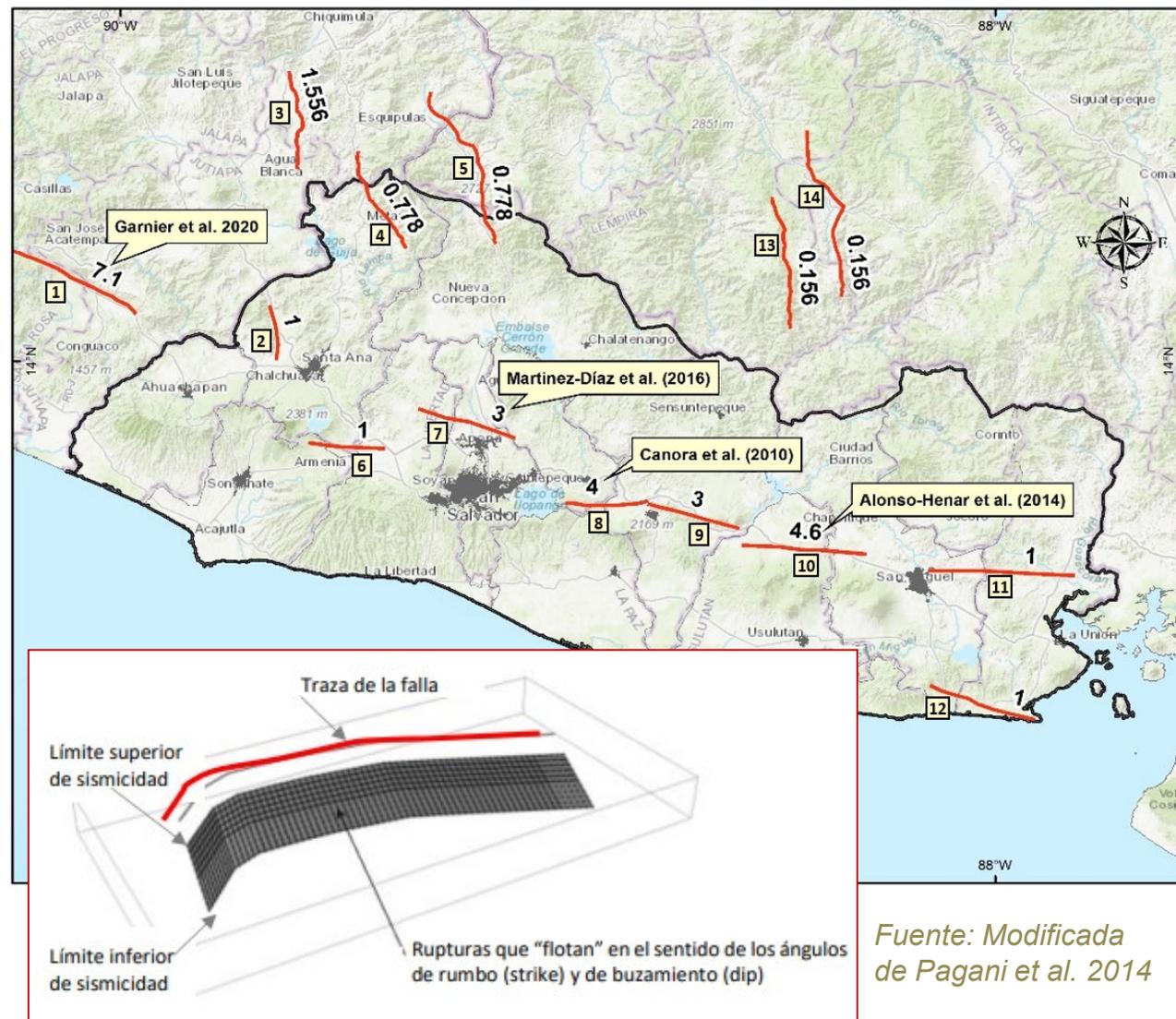
Desagregación Sísmica San Salvador para PGA y 375 años de Periodo de Retorno: Todas las Fuentes



Modelación de fuentes sísmicas

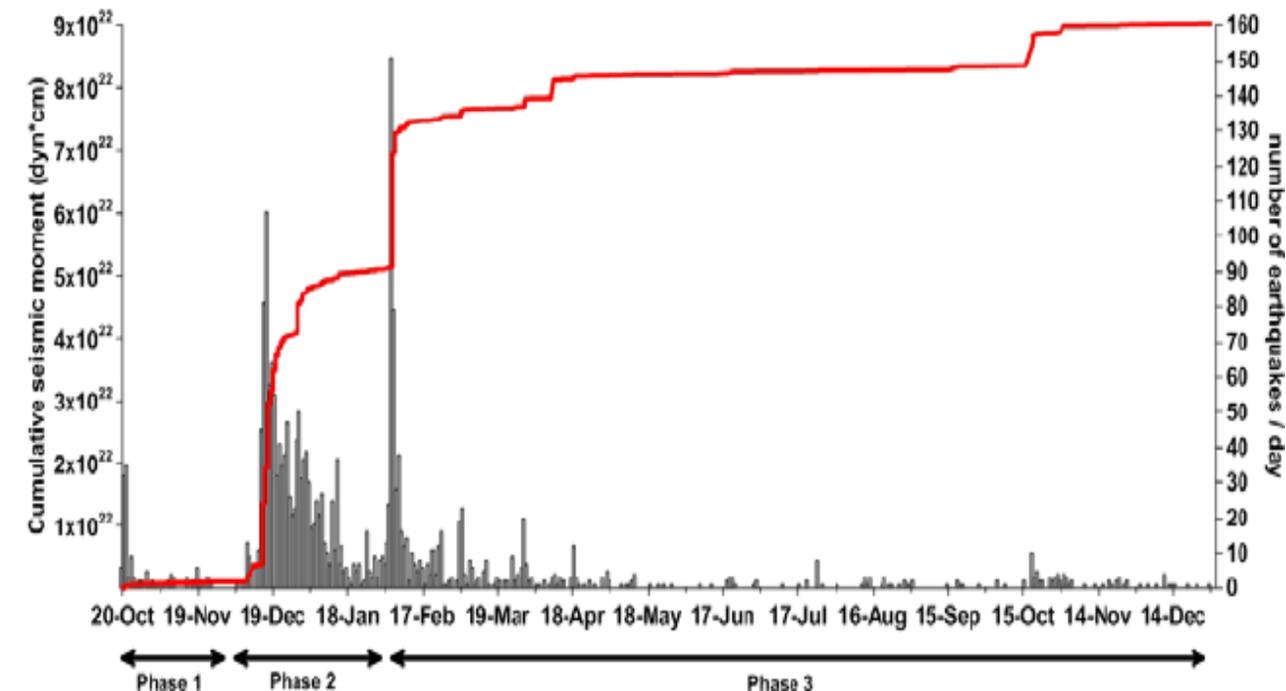
Corteza Superficial Activa: Fallas geológicas

- La actividad sísmica se calcula usando la información geológica y cinemática de las fallas
- Se supone que eventos ocurren en el entorno de la misma.
- Se modelan como fallas simples
- Sismicidad se distribuye uniformemente sobre su superficie
- Para simular todas las posibles ubicaciones de ruptura, se asume que estas van flotando sobre toda la superficie de la falla



Modelación de fuentes sísmicas

Corteza Superficial Activa: Fallas geológicas - suposiciones



Modelo de recurrencia usado fue:
Distribución exponencial Gutenberg-
Richter doblemente truncada,
asumiendo un intervalo de mag. de 0.1
y una mag. mínima ($M_w 6.5$).

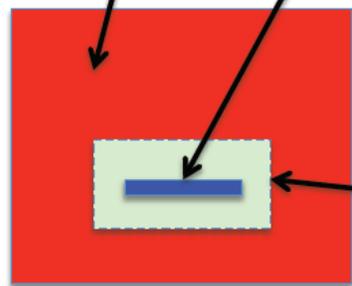
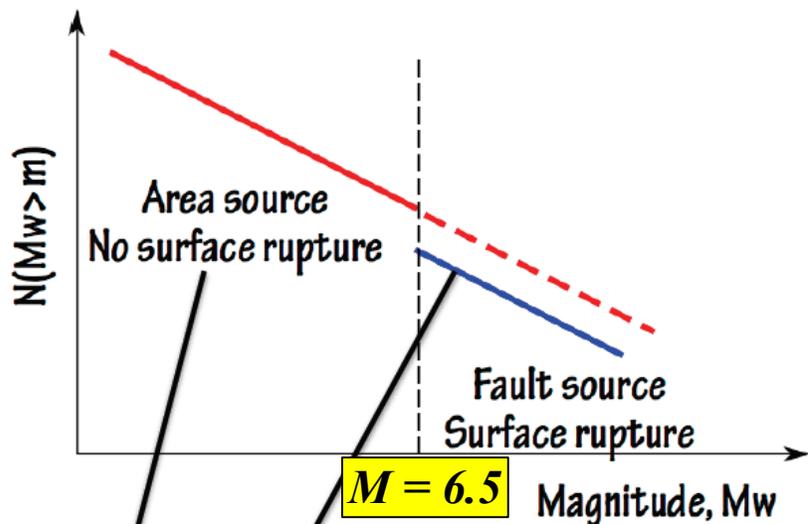
El valor del **parámetro b** se fijó a priori
como el valor obtenido en la macro-
zona a la que pertenece la falla.

El valor del **parámetro a** se ajustó de modo que **la tasa de liberación de momento (total)*** equivale a la tasa de momento sísmico-geológico (M_o) derivada de la dimensión de la falla (Área) y la tasa de actividad o deslizamiento anual.

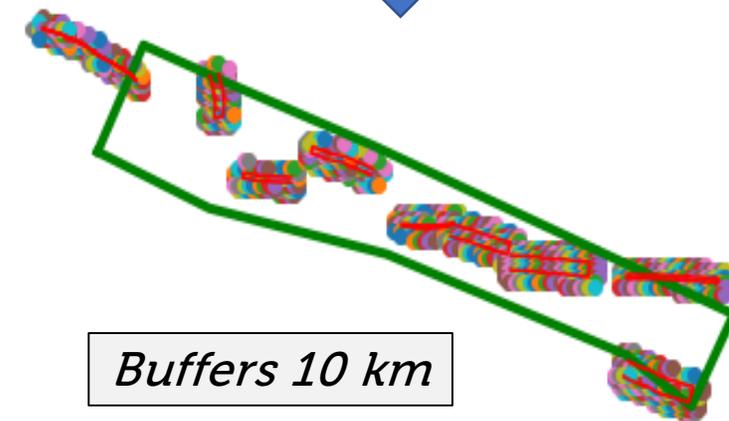
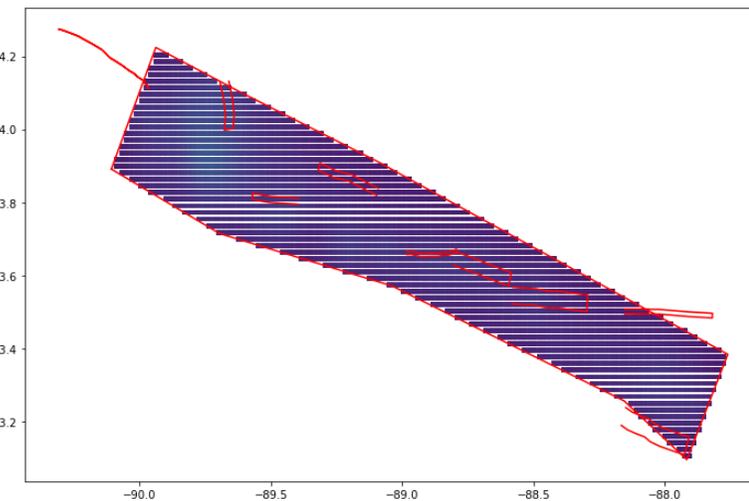
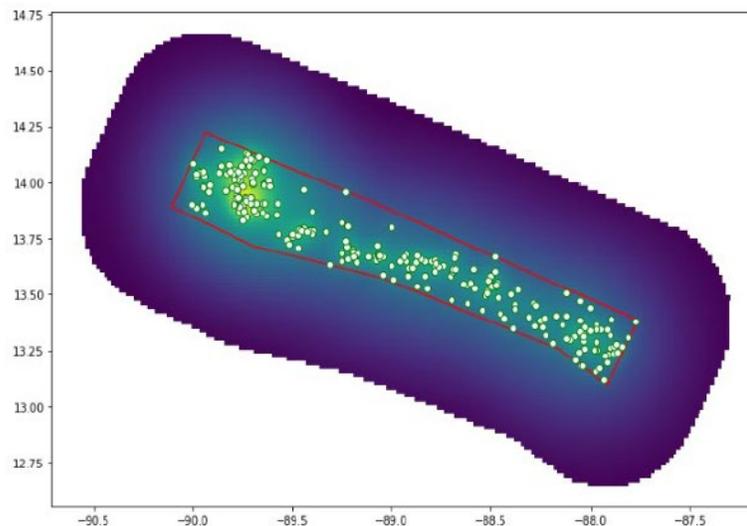
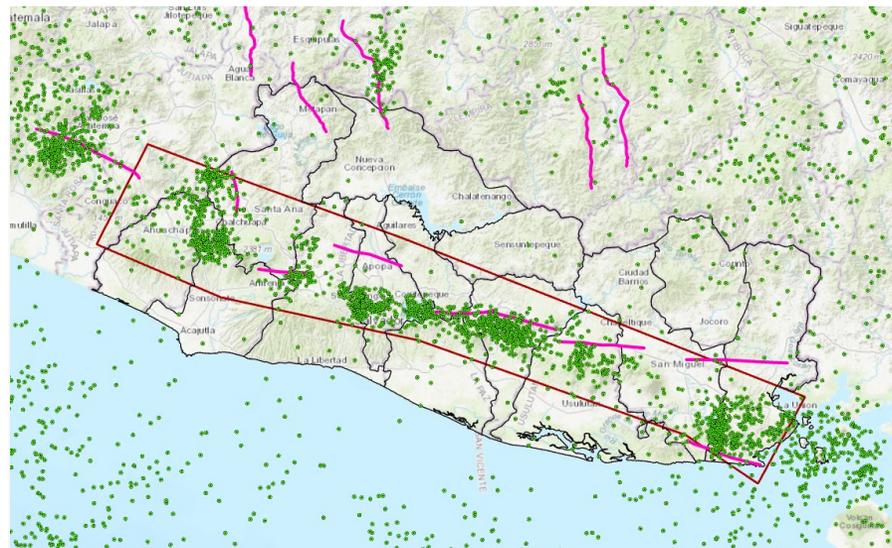
Modelación de fuentes sísmicas

Corteza Superficial Activa: Evitar duplicidad en cálculo

Example: 1 area [red] + 1 fault [blue]

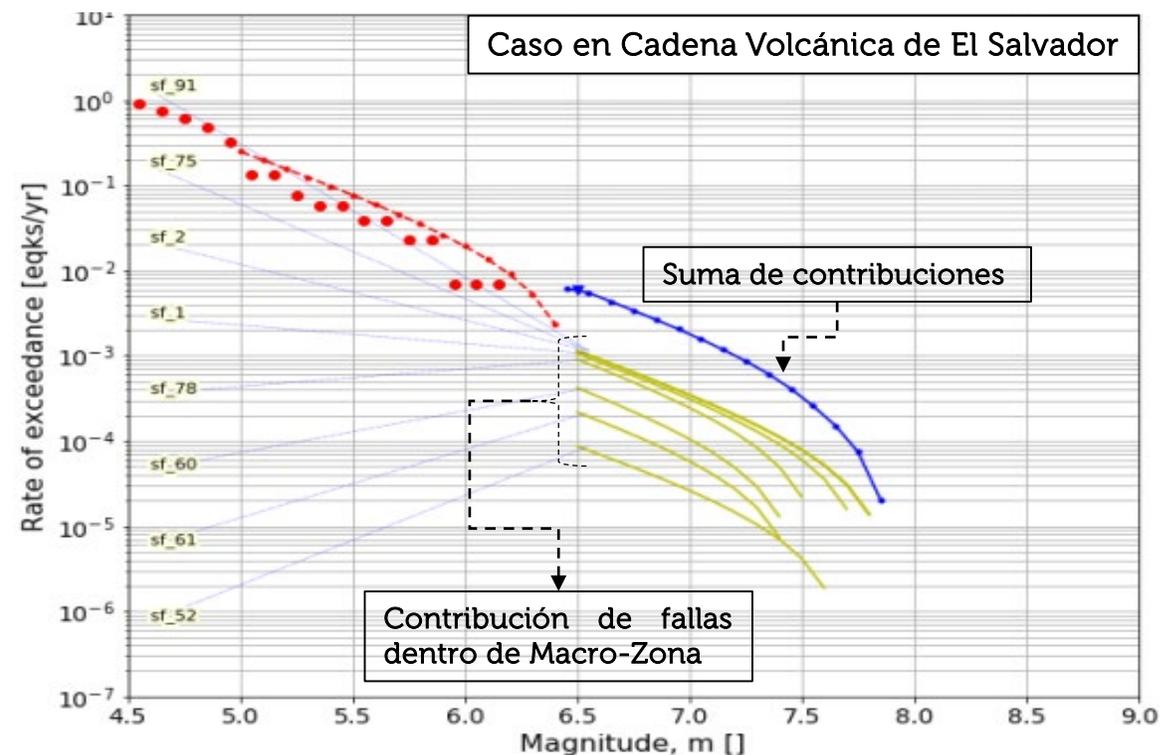
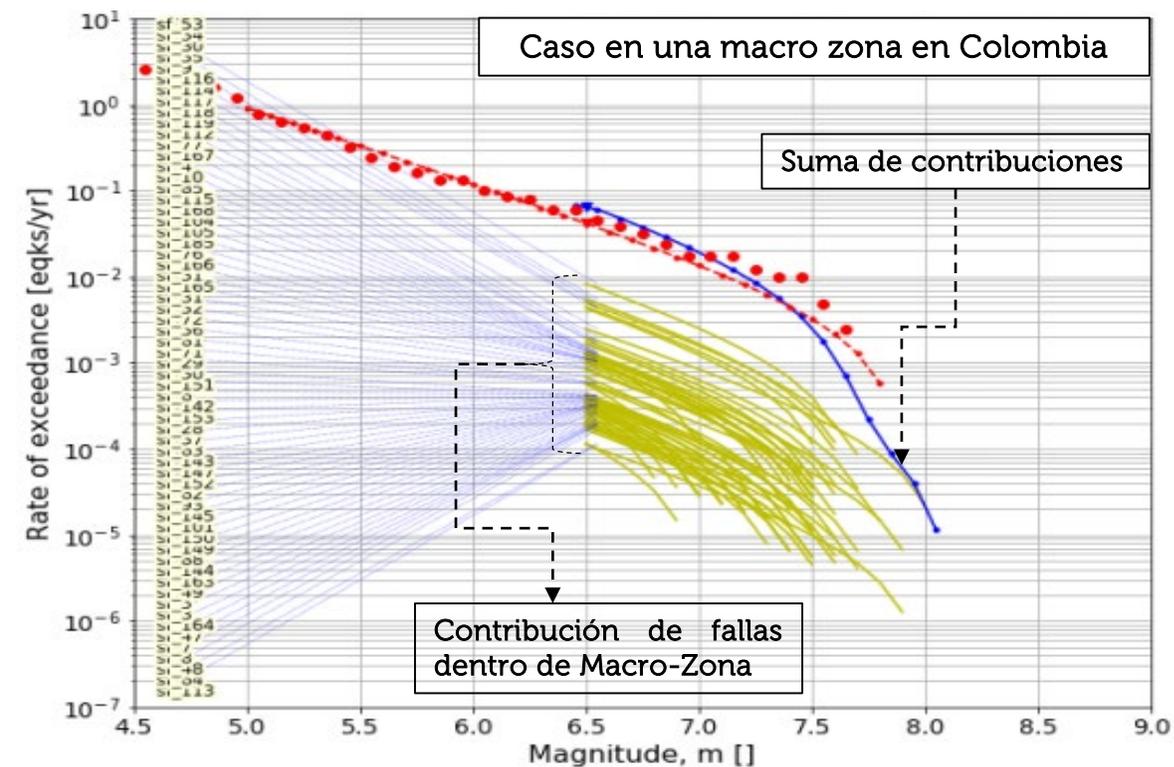


GLOBAL QUAKE MODEL .ORG



Modelación de fuentes sísmicas

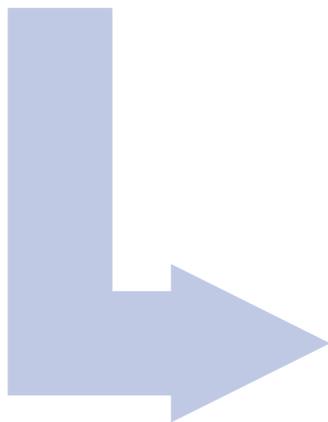
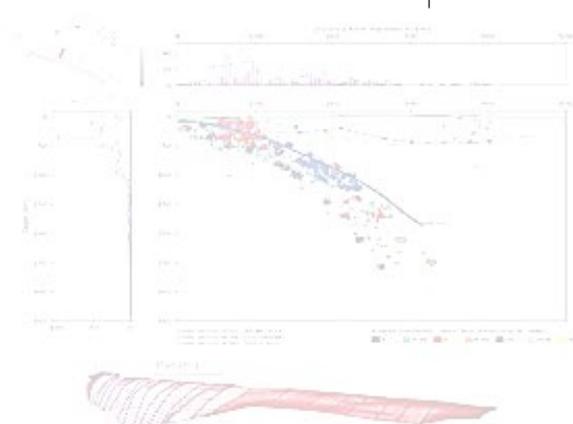
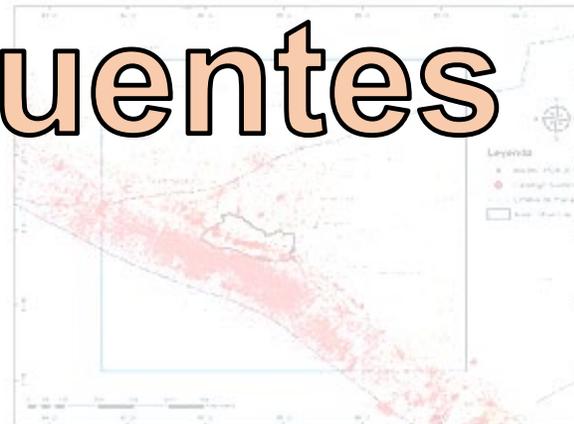
Corteza Superficial Activa: Casos de definición de MFD



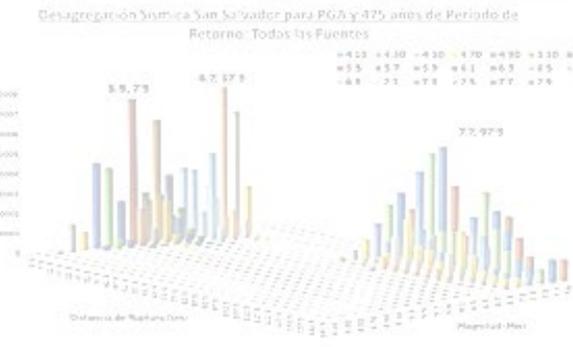
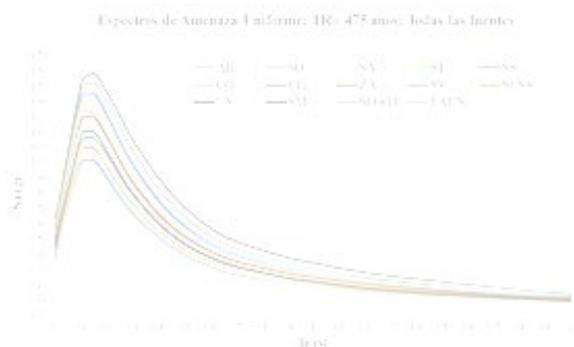
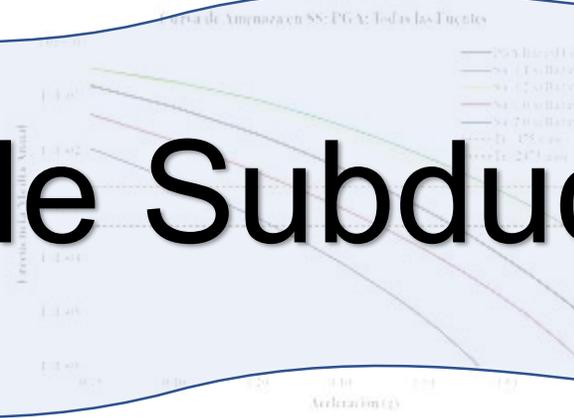
Aquí se observa, un buen ajuste entre la **distribución de magnitudes de la macro-zona (con mag. Máxima superior a 7.5)** y la **suma de distribuciones individuales de fallas** pertenecientes a dicha macro-zona.

Distribución (MFD) de macro-zona [línea roja] se complementa con la **suma de las distribuciones de magnitudes de las fallas [líneas amarillas]**, de tal manera que se puede tener una evaluación de la amenaza sísmica en un rango de magnitudes superiores a 6.5 Mw.

Modelación de fuentes sísmicas



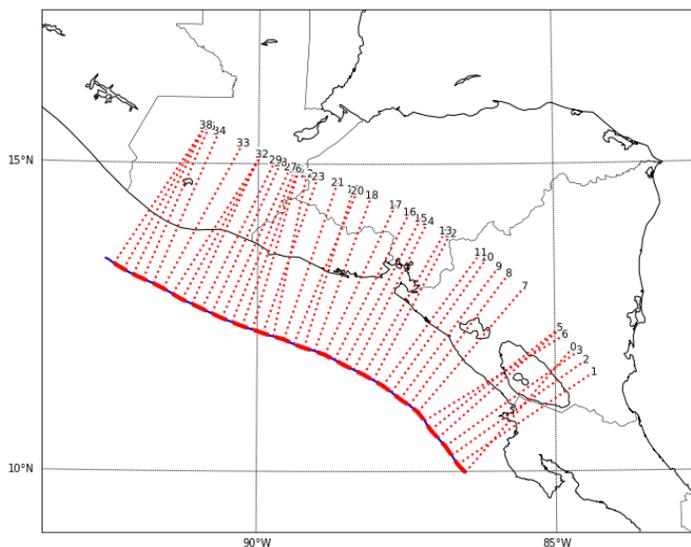
Fuente de Subducción



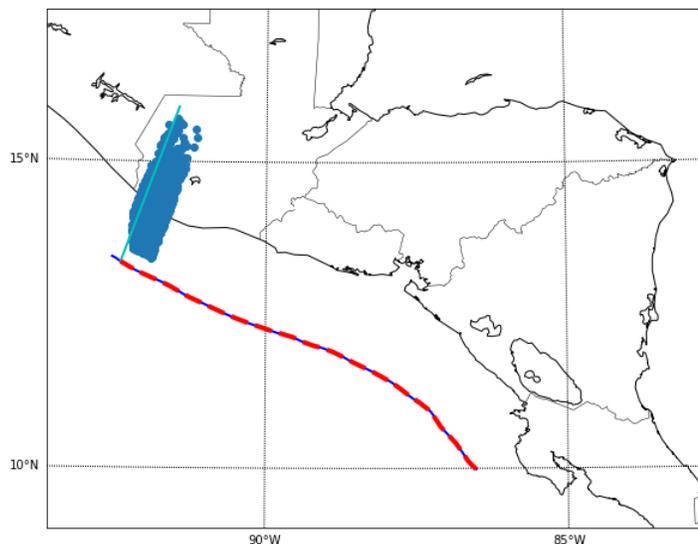
Modelación de fuentes sísmicas

Zona de Subducción: Procedimiento

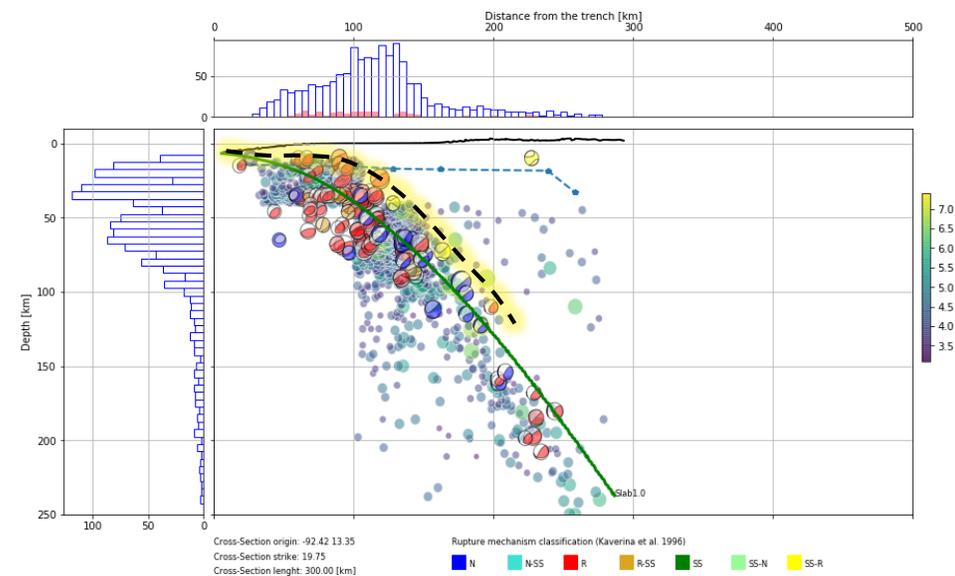
1. Definición de la geometría de la placa que subduce utilizando un modelo 2.5D, en el cual se busca representar en una superficie (2D) el volumen de la placa (3D).



Secciones transversales



Distribución de sismos



Identificación de límite superior de placa de Cocos

Modelación de fuentes sísmicas

Zona de Subducción: Procedimiento

1. Definición de la geometría de la placa subducida utilizando un modelo 2.5D, en el cual se busca representar en una superficie (2D) el volumen de la placa (3D).

Los análisis realizados en cada perfil se integraron en un modelo 2.5D obteniendo una superficie que representa el límite superior de la placa subducida

Panamá



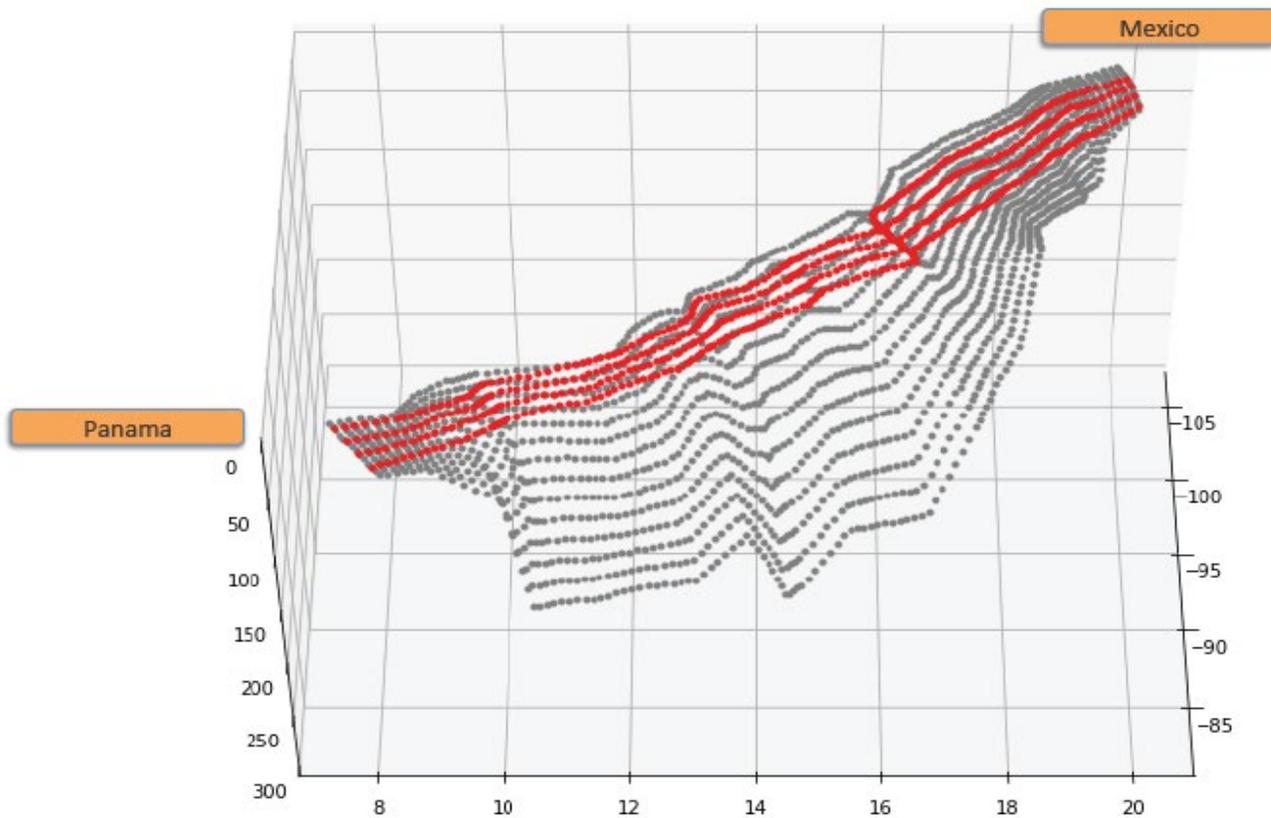
Fuente: CCARA-GEM, 2017

México

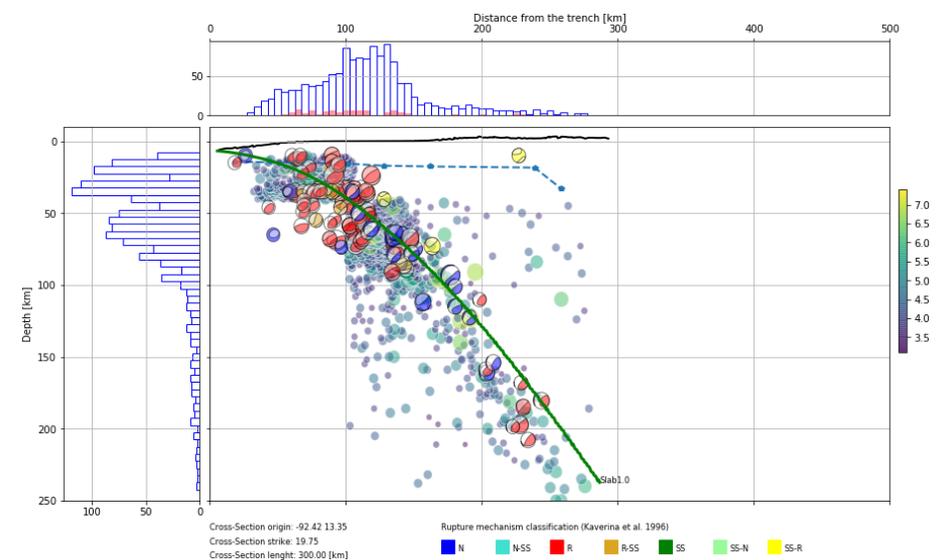
Modelación de fuentes sísmicas

Zona de Subducción: Procedimiento

2. Subdivisión geométrica de la placa subducida en zonas interplaca e intraplaca



Necesario para discriminar las diferentes rupturas con características específicas (mecanismos focales, magnitudes y profundidades)



Modelación de fuentes sísmicas

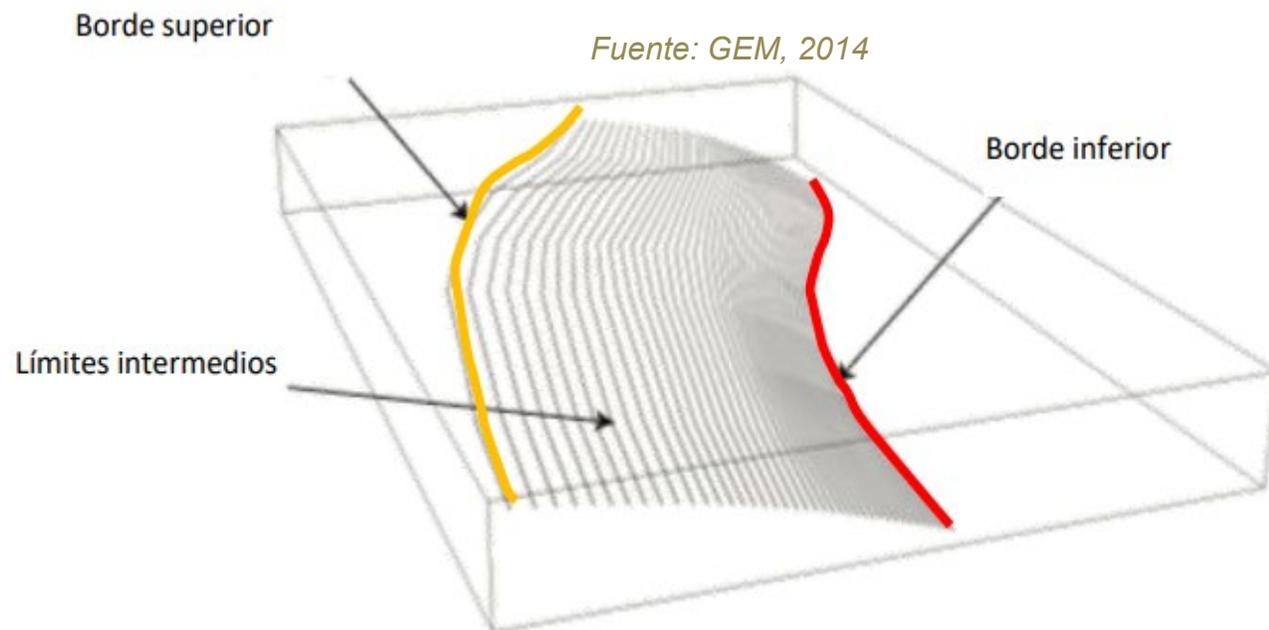
Zona de Subducción: Interfase o interplaca

- Modelada como una **falla de tipo compleja**

- Sismicidad se distribuye **uniformemente** sobre su superficie

- Para simular todas las posibles ubicaciones de ruptura, se asumen que estas van **flotando sobre toda la superficie de la falla**

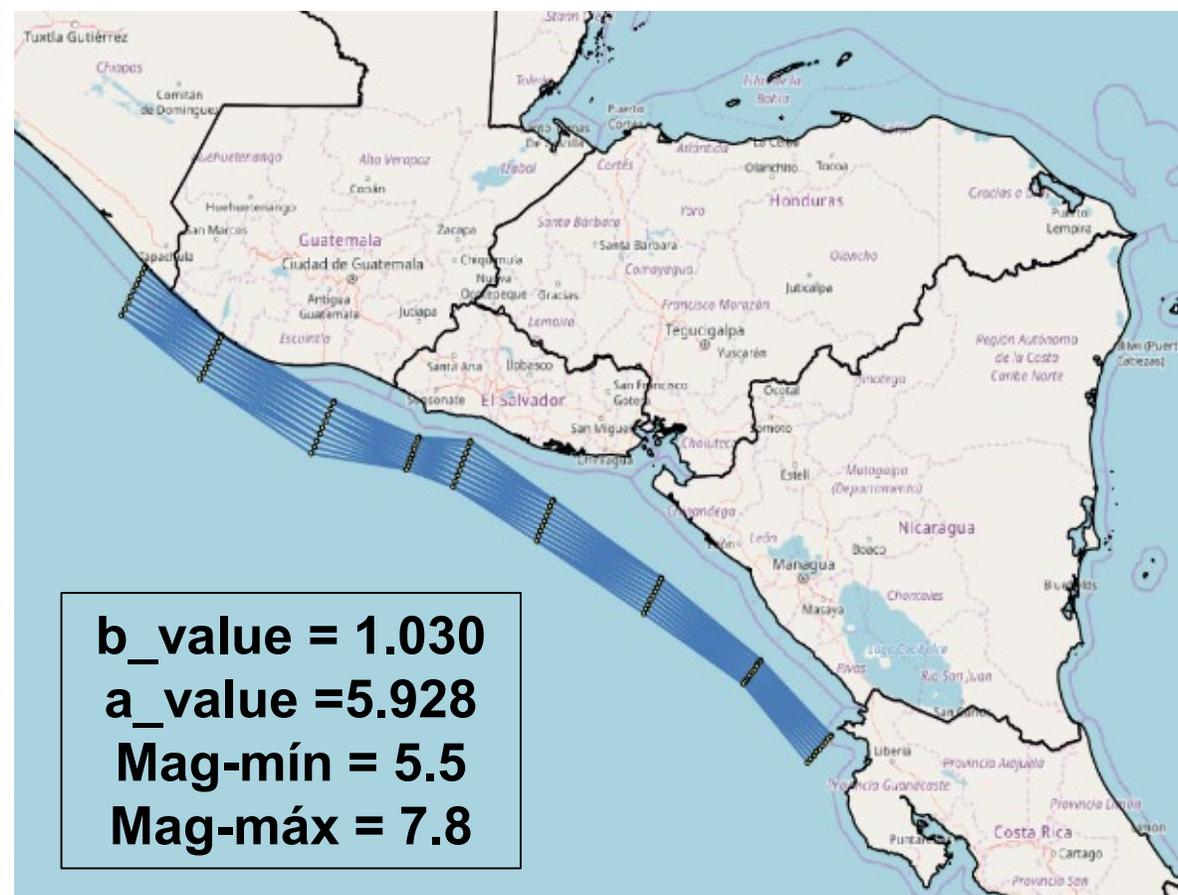
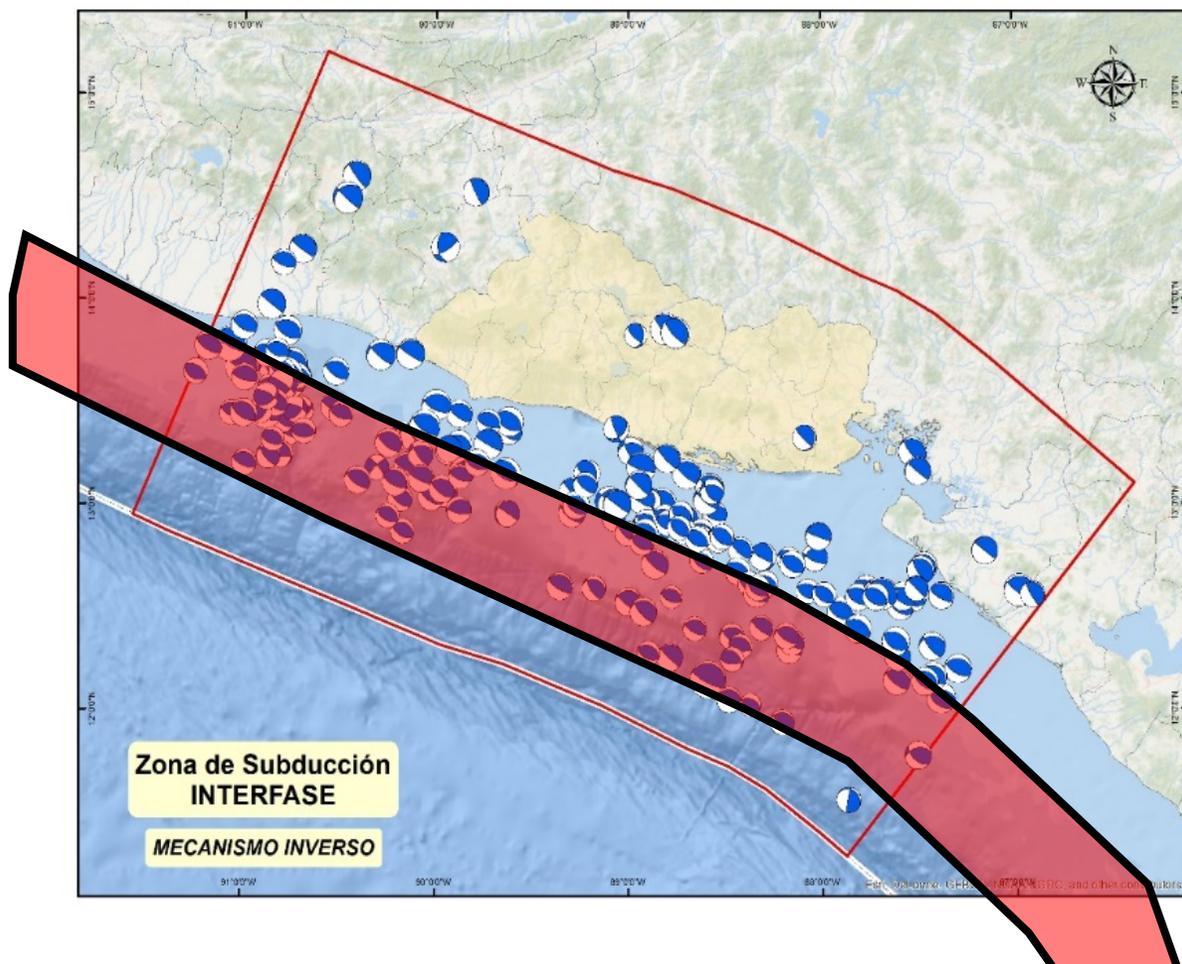
- Se modela una superficie cuadrilátera arbitrariamente compleja, para poder lograr acomodar cambios en **el ángulo de buzamiento a lo largo de la profundidad** o el **acimut por cambios en el ancho de la falla.**



Modelación de fuentes sísmicas

Zona de Subducción: Interfase o interplaca

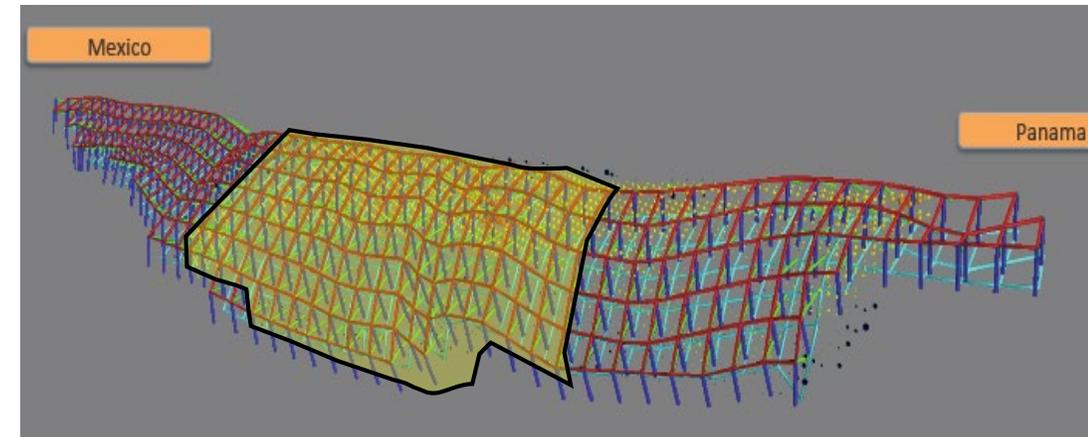
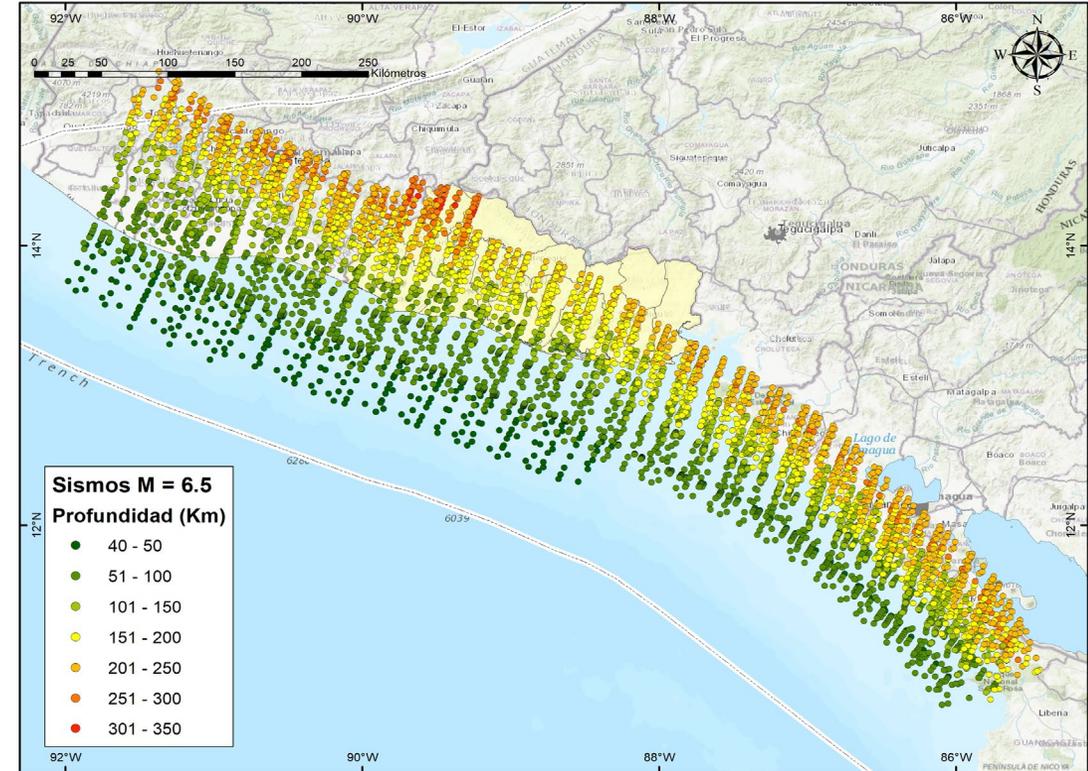
- Regionalización de eventos y determinación de parámetros de recurrencia



Modelación de fuentes sísmicas

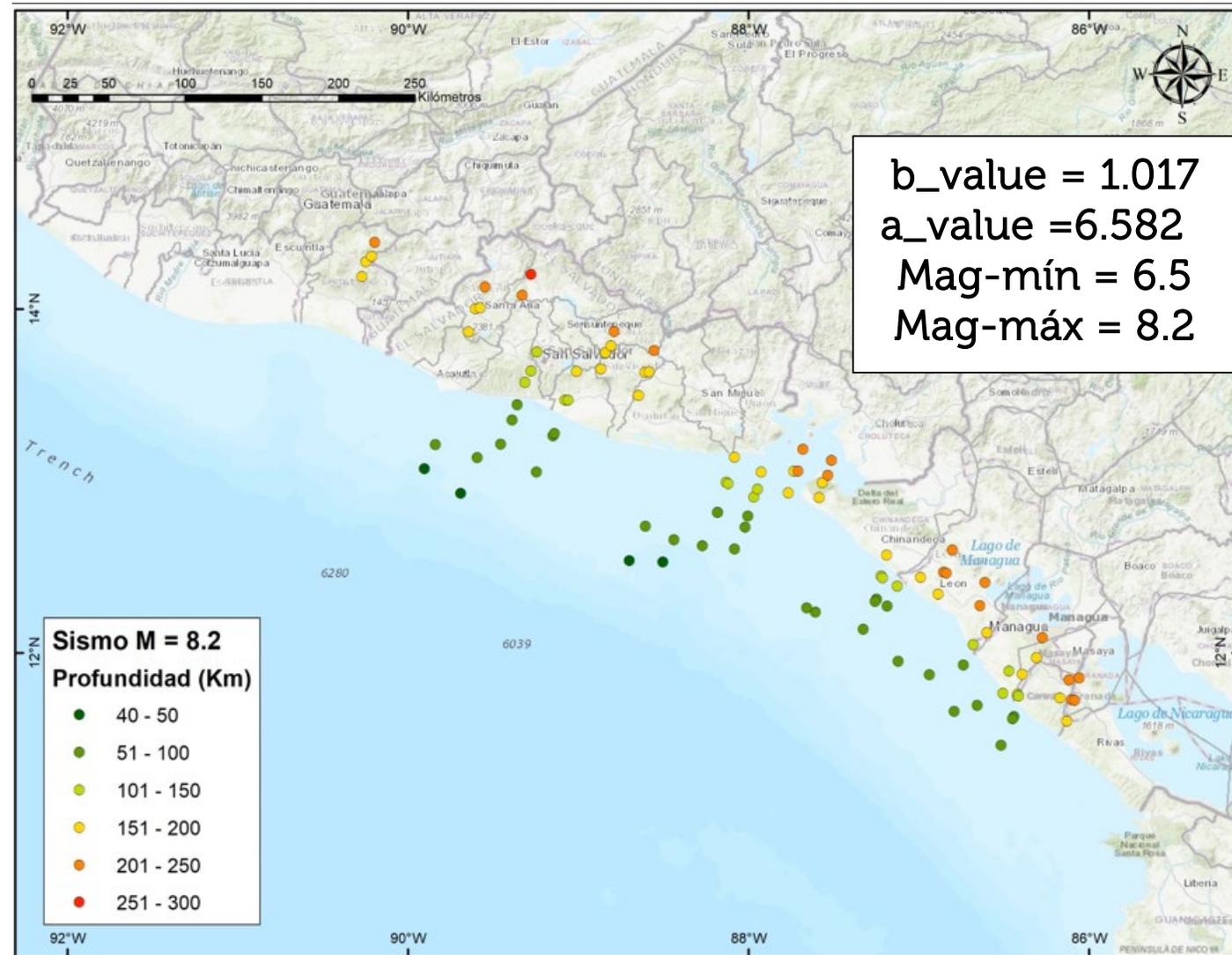
Zona de Subducción: Intraplaca

- Modelada como una malla de fuentes no paramétricas
- Para tratar de tener un mayor control en la generación de las roturas y sus probabilidades.
- Esto se hizo variando a cada 0.10 de Magnitud. (Desde 6.05 hasta 8.15)
- Para cada celda se asigna una probabilidad e hipocentro para un tiempo de exposición de 1 año.



Modelación de fuentes sísmicas

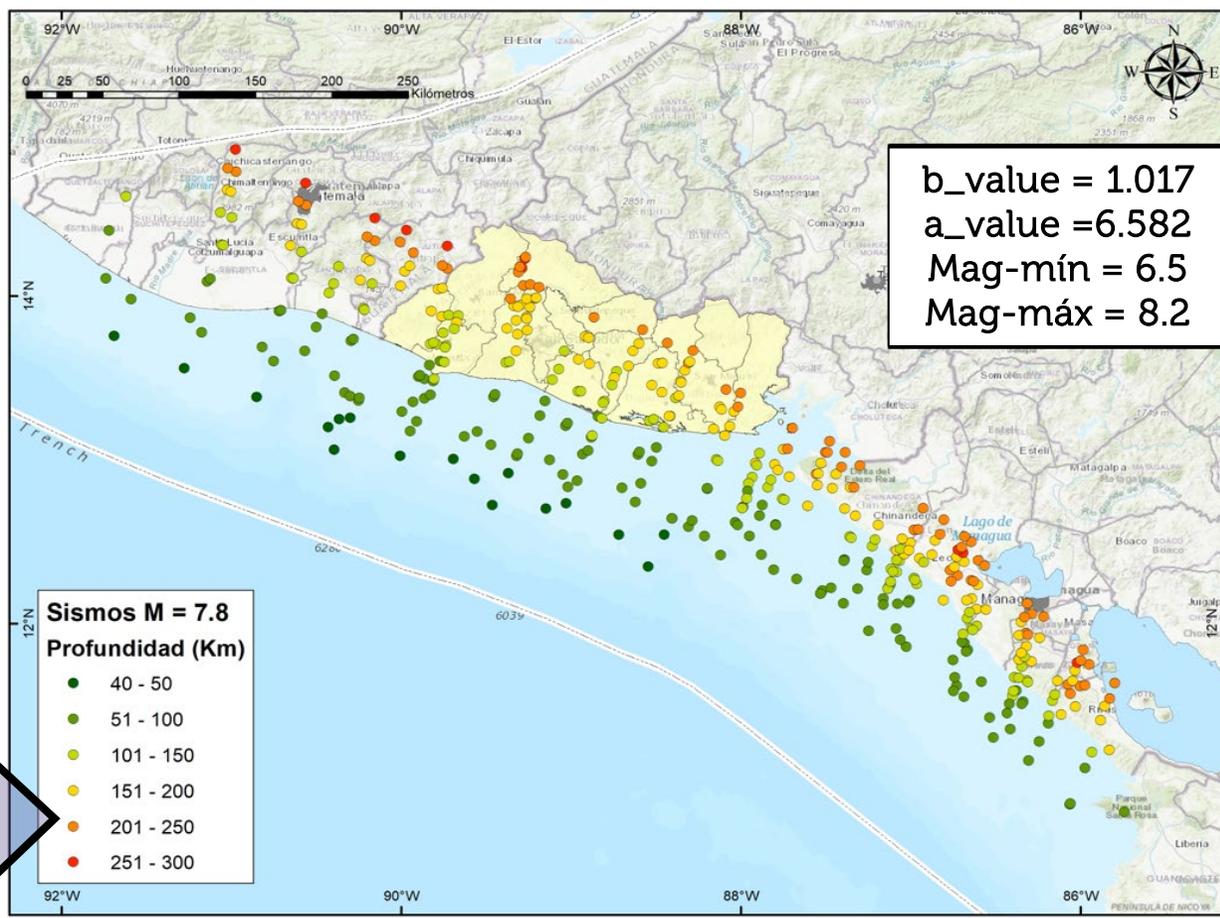
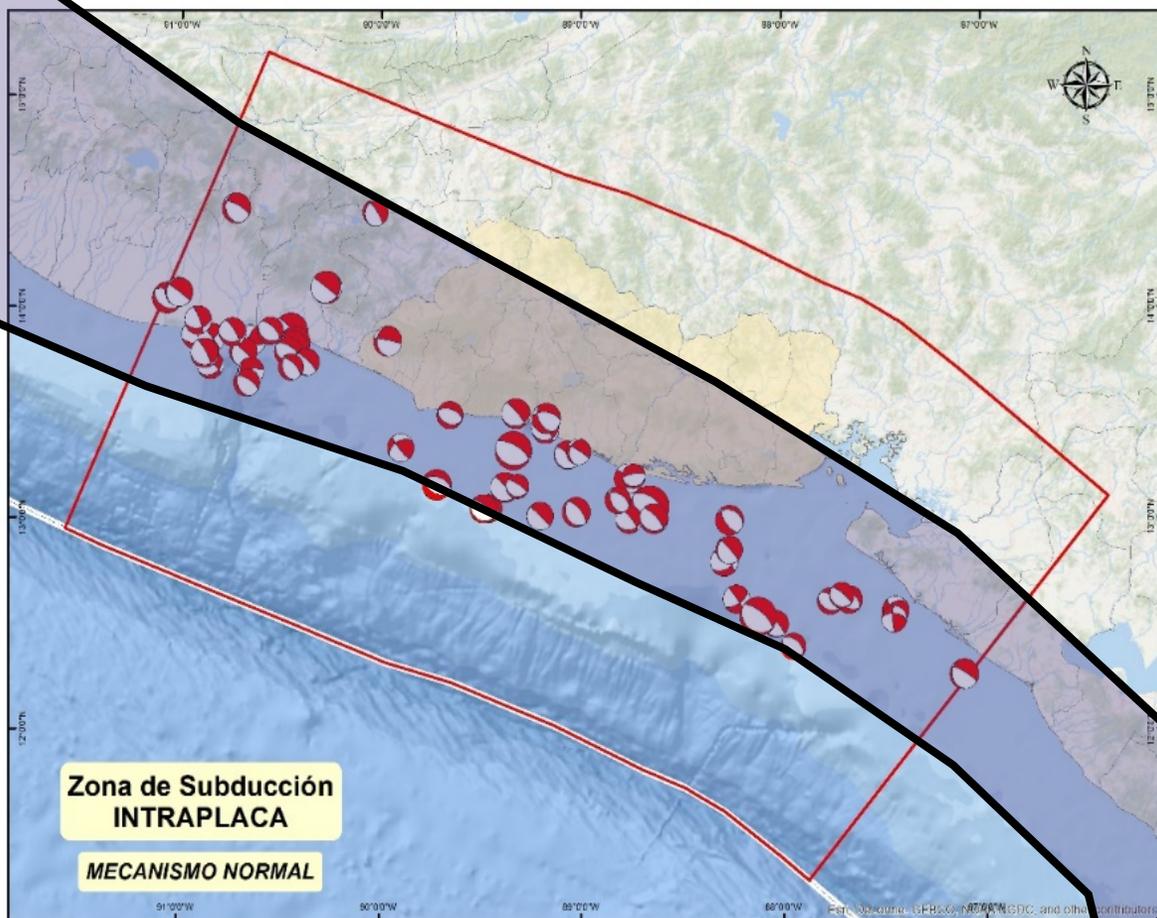
Zona de Subducción: Intraplaca. Fuentes no paramétricas



Modelación de fuentes sísmicas

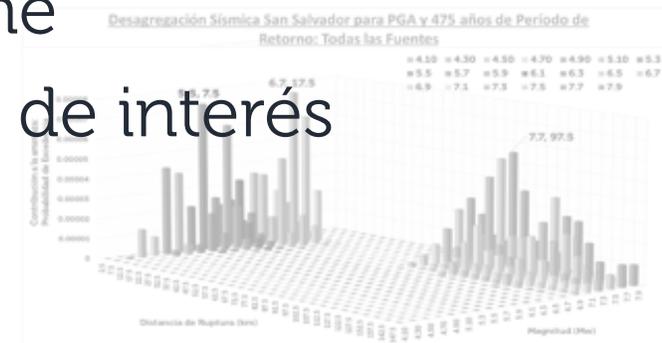
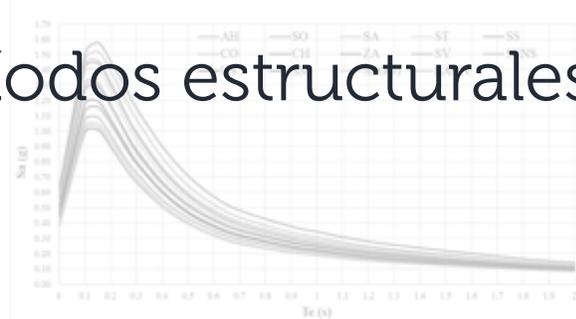
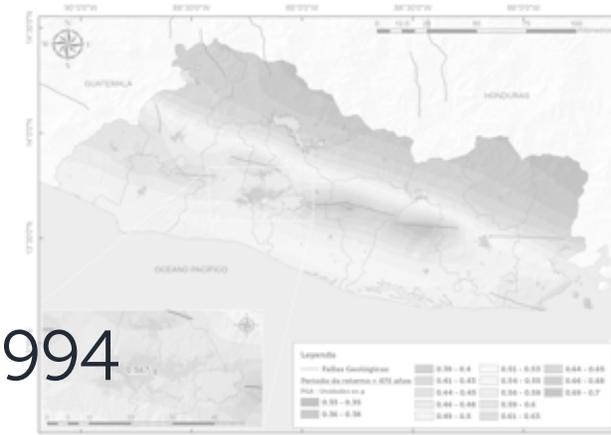
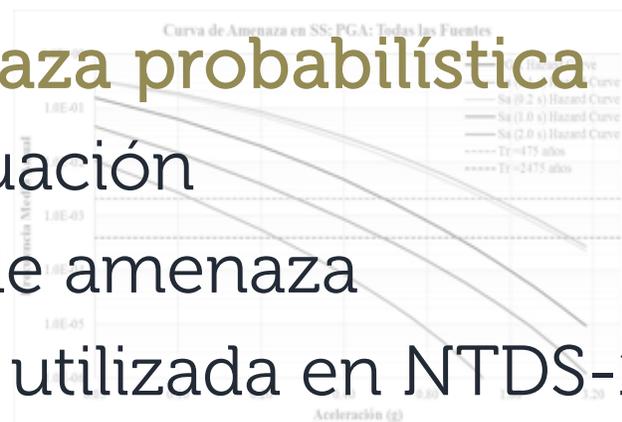
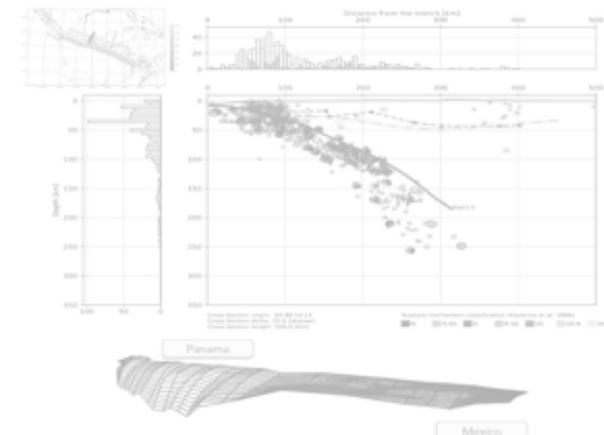
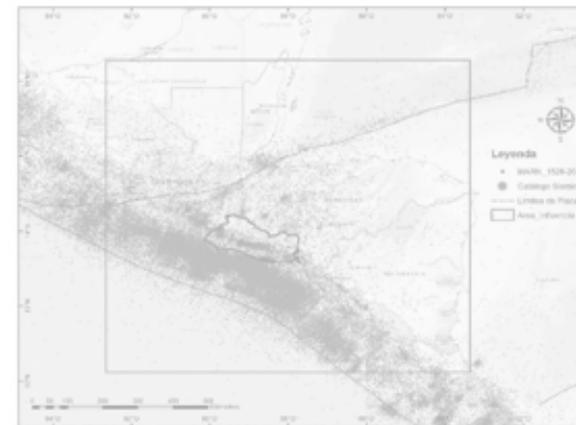
Zona de Subducción: Intraplaca

- Regionalización de eventos y determinación de parámetros de recurrencia



Contenido

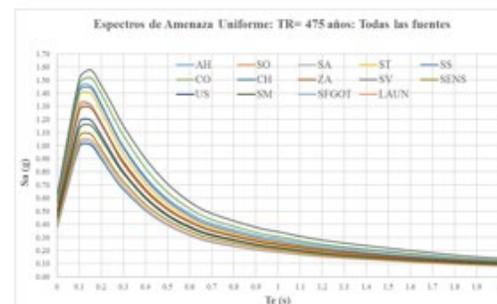
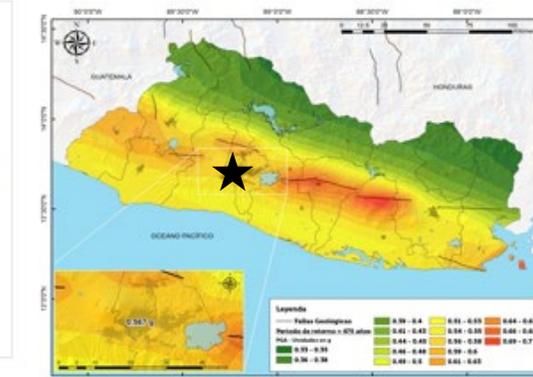
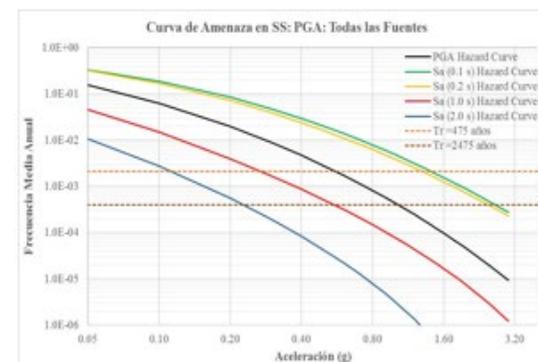
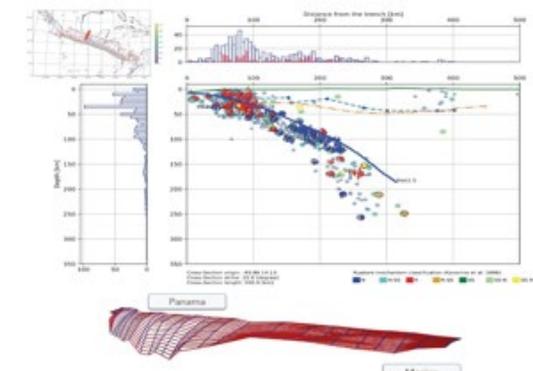
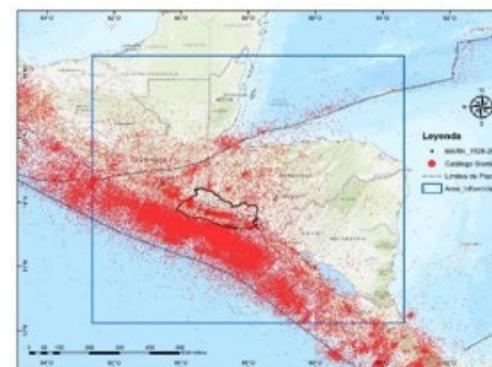
1. Marco sísmo-tectónico
2. Concepción de fuentes sísmicas
3. Catálogo sísmico utilizado
4. Modelación de fuentes sísmicas
5. **Enfoque para cálculo de amenaza probabilística**
6. Evaluación de modelos de atenuación
7. Antecedentes de evaluaciones de amenaza
8. Filosofía de cálculo de amenaza utilizada en NTDS-1994
9. Resultados de amenaza probabilística en suelo firme
10. Desagregación sísmica para períodos estructurales de interés
11. Conclusiones



Enfoque para cálculo de amenaza

¿Qué es el cálculo de amenaza sísmica?

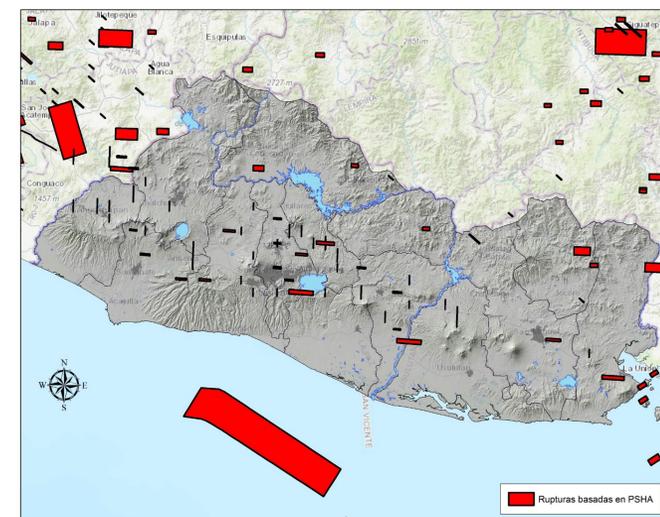
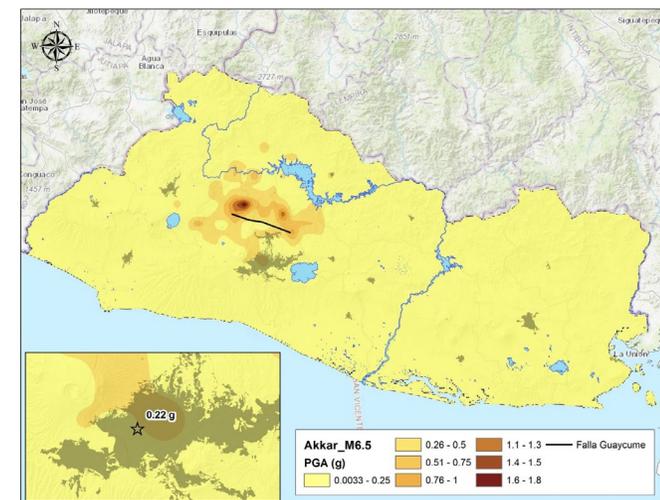
- En el análisis probabilístico se especifica la amenaza sísmica de **un sitio, ★ como el peor evento** que puede ocurrir con una determinada **probabilidad de excedencia, dentro de un determinado período de tiempo** o dentro de una determinada **probabilidad anual**. (Somervilley Moriwaki, 2003).



Enfoque para cálculo de amenaza

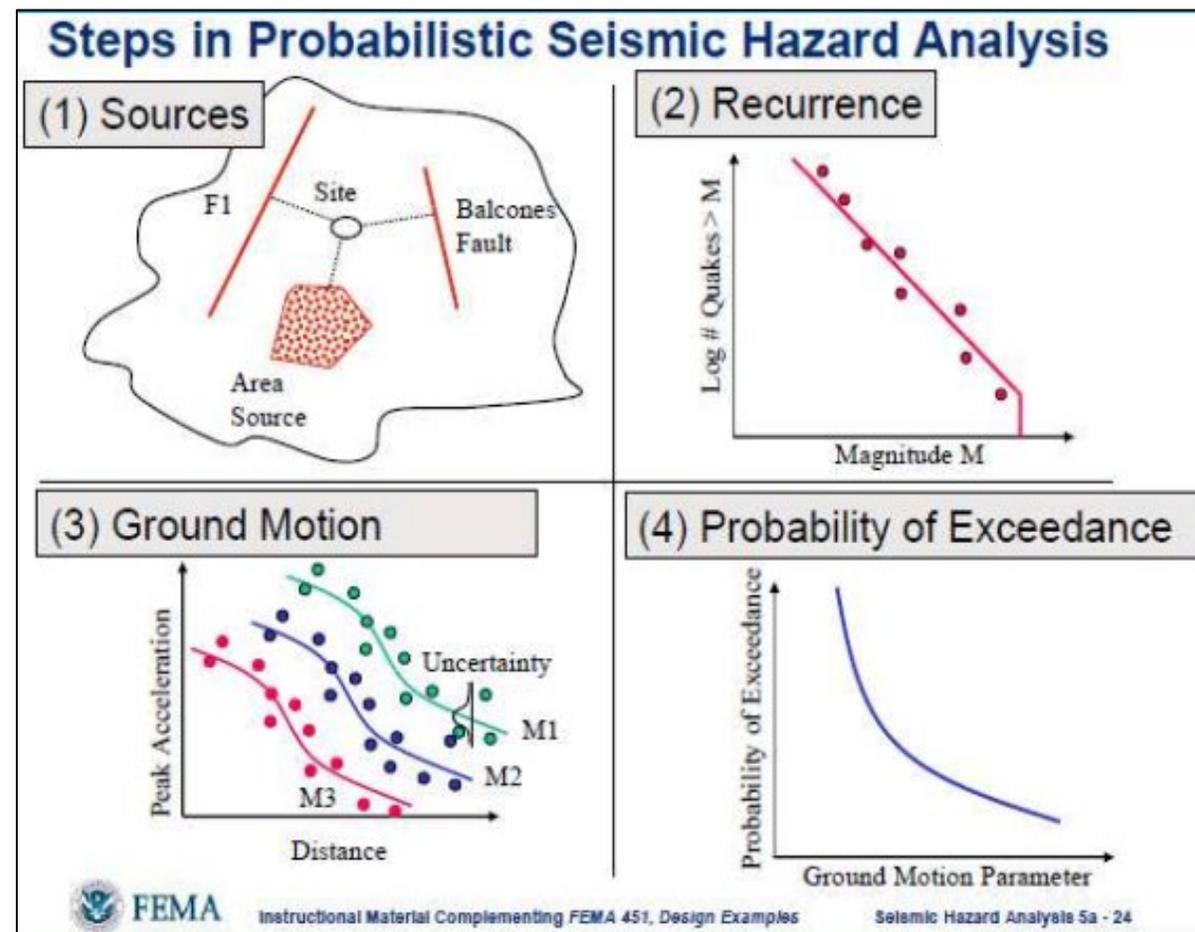
Diferencia entre métodos de cálculo

Método Determinístico - DSHA	Método Probabilístico - PSHA
Asume un solo escenario	Asume muchos escenarios
Selecciona una sola magnitud para cada fuente sísmica.	Considera todas las magnitudes asociadas con todas las fuentes sísmicas.
Selecciona la distancia mas corta entre la fuente y el sitio.	Considera todas las distancias posibles entre la fuente y el sitio.
Asume solamente los efectos debidos a la magnitud y la distancia.	Considera los efectos de todos los parametros.
Se pueden considerar todas las incertidumbres relacionadas con la localización, tamaño, frecuencia de ocurrencia y los efectos de los sismos y las combina todas para calcular la probabilidad de ocurrencia de diferentes niveles de movimiento del terreno.	



Enfoque para cálculo de amenaza

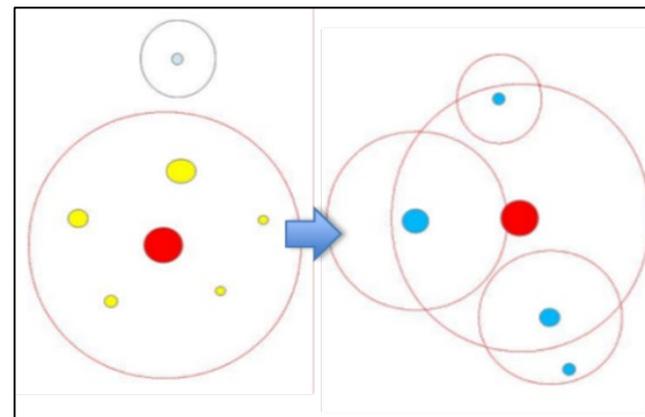
- Enfoque probabilístico de zona rígida o estándar, conocido como el método de Cornell-McGuire, con un modelo de ocurrencia independiente del tiempo
- Permite tener en cuenta las incertidumbres en la ubicación y magnitud de los terremotos, su proceso de ocurrencia en el tiempo y la atenuación del movimiento.
- Asume una distribución exponencial de magnitud (posiblemente con truncamiento)
- Asume que los terremotos "no tienen memoria" (modelo de ocurrencia de Poisson: independiente del tiempo)



Enfoque para cálculo de amenaza

Depuración de réplicas y premonitores

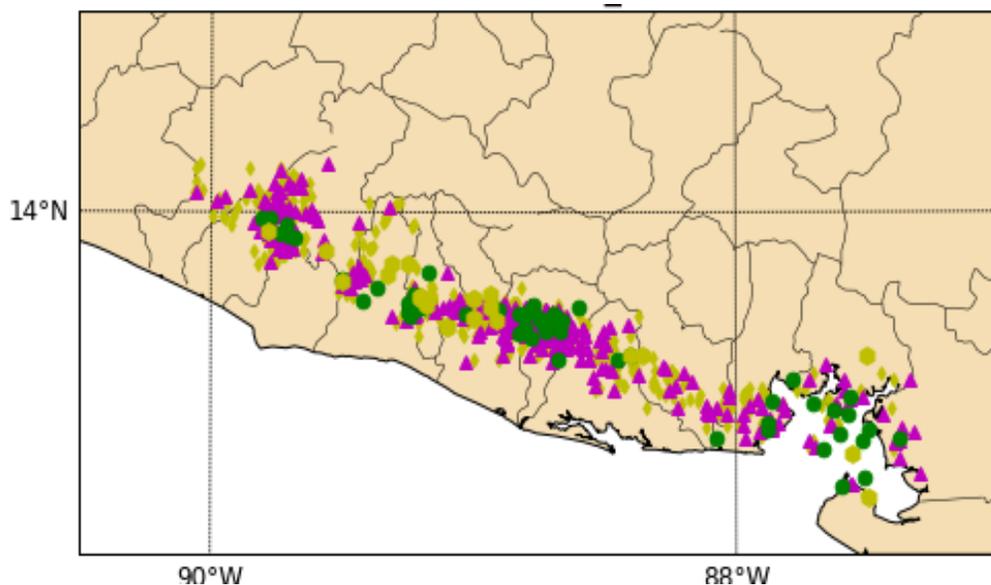
- El catálogo Depurado “declustered” se obtiene eliminando réplicas y premonitores y luego aplicando el algoritmo de Gardner y Knopoff (1974), basado en ventanas de tiempo y distancia propuestas por Unhammer (1986).



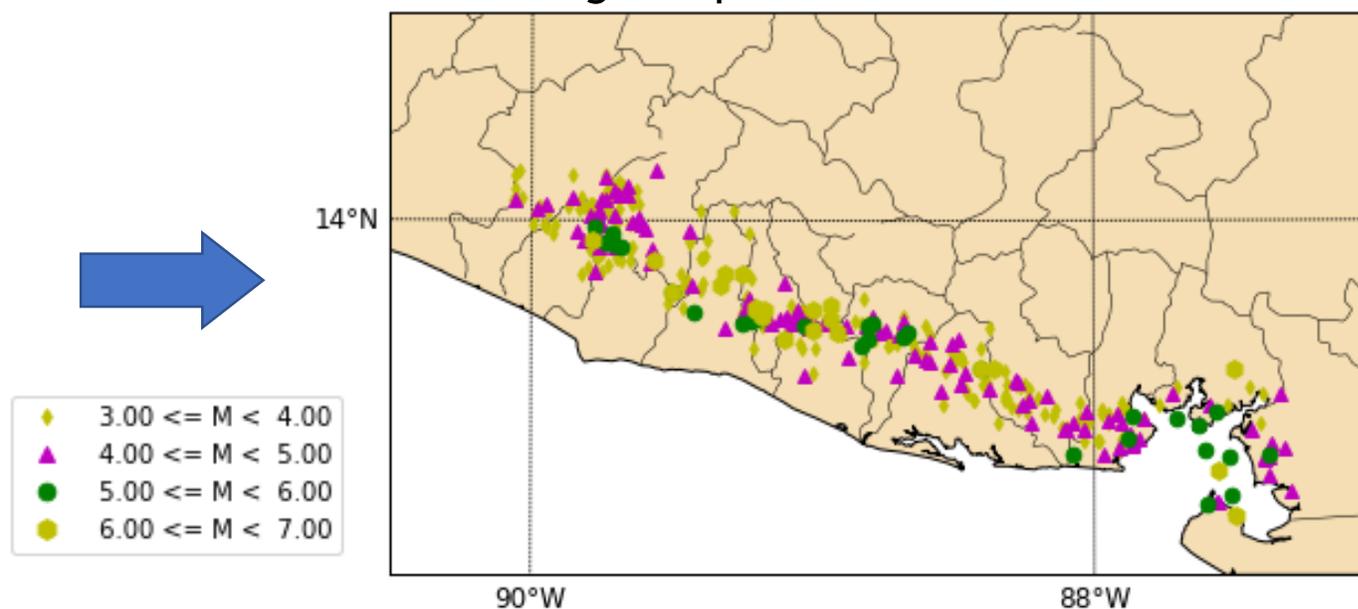
$$\text{distance (km)} = e^{-1.024+0.804M}$$

$$\text{time (decimal years)} = e^{-2.87+1.235M}$$

➤ Catálogo No depurado “Clustered”

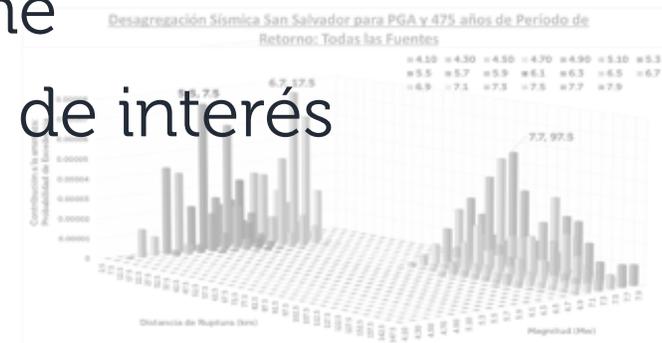
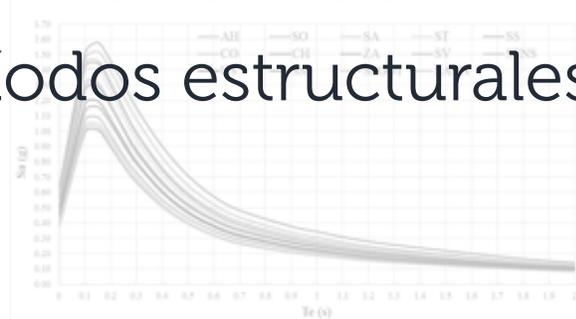
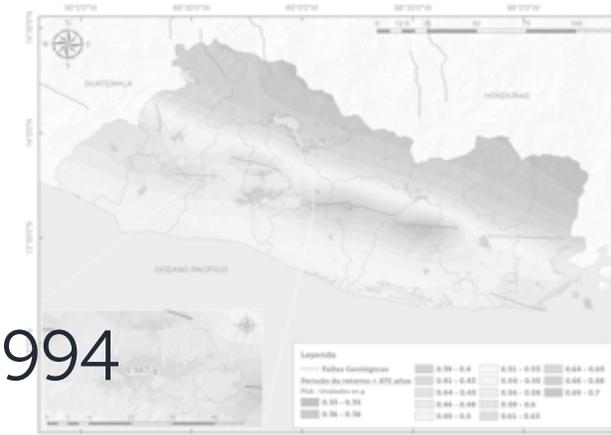
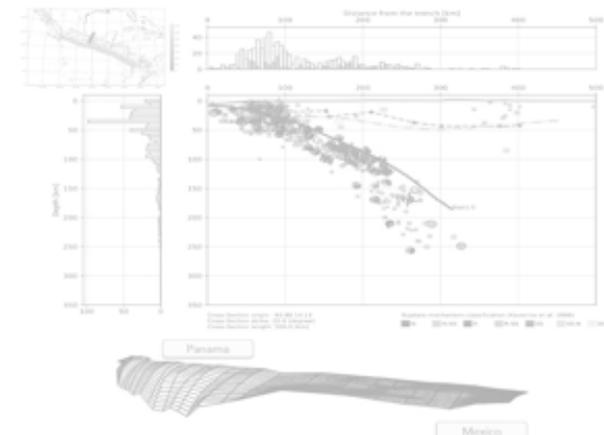
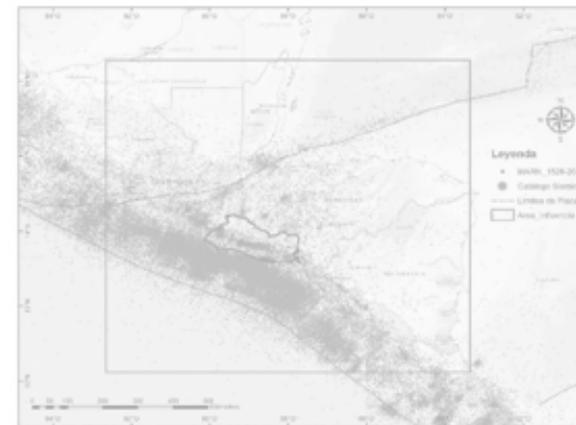


➤ Catálogo Depurado “De-Clustered”



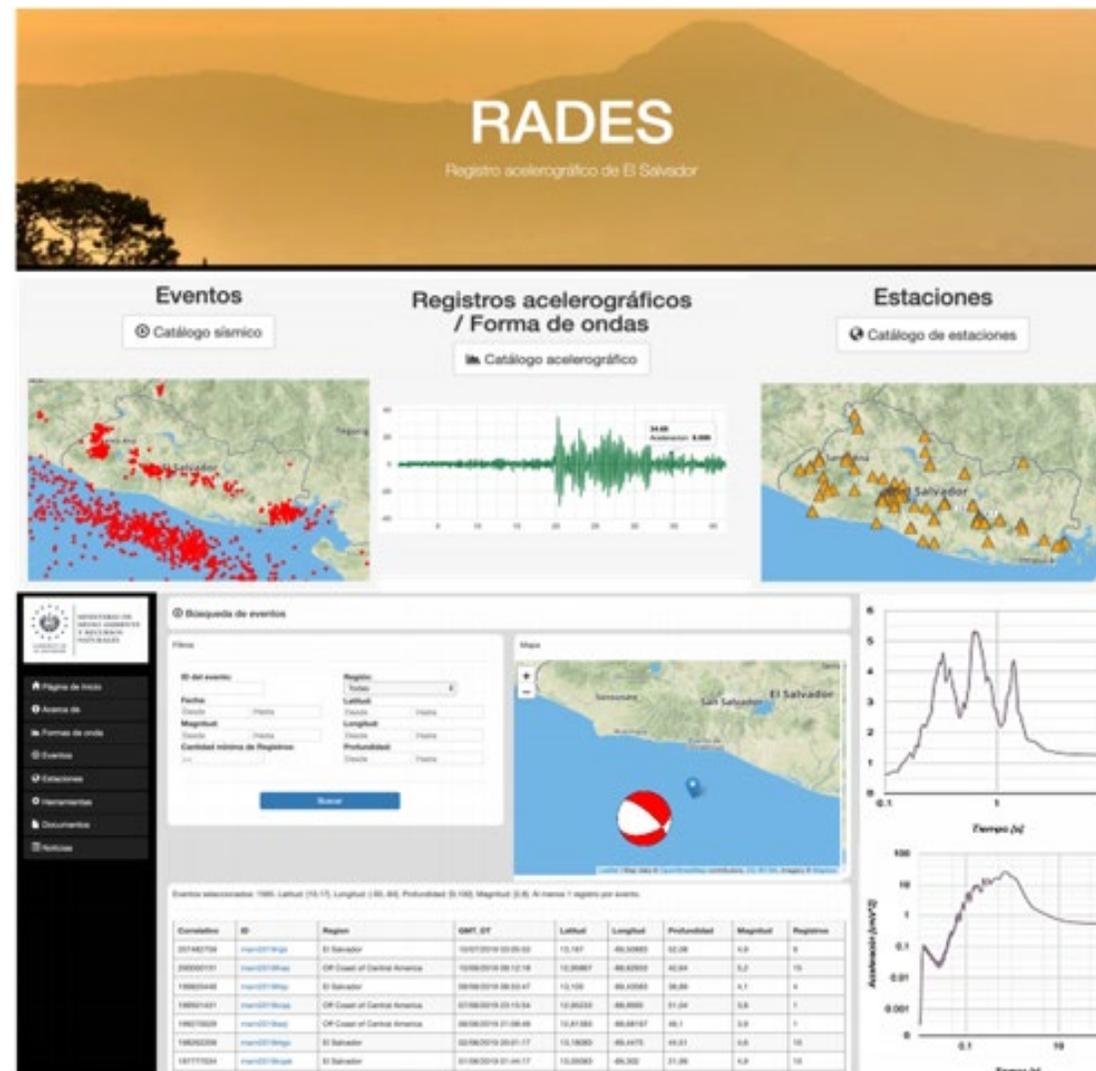
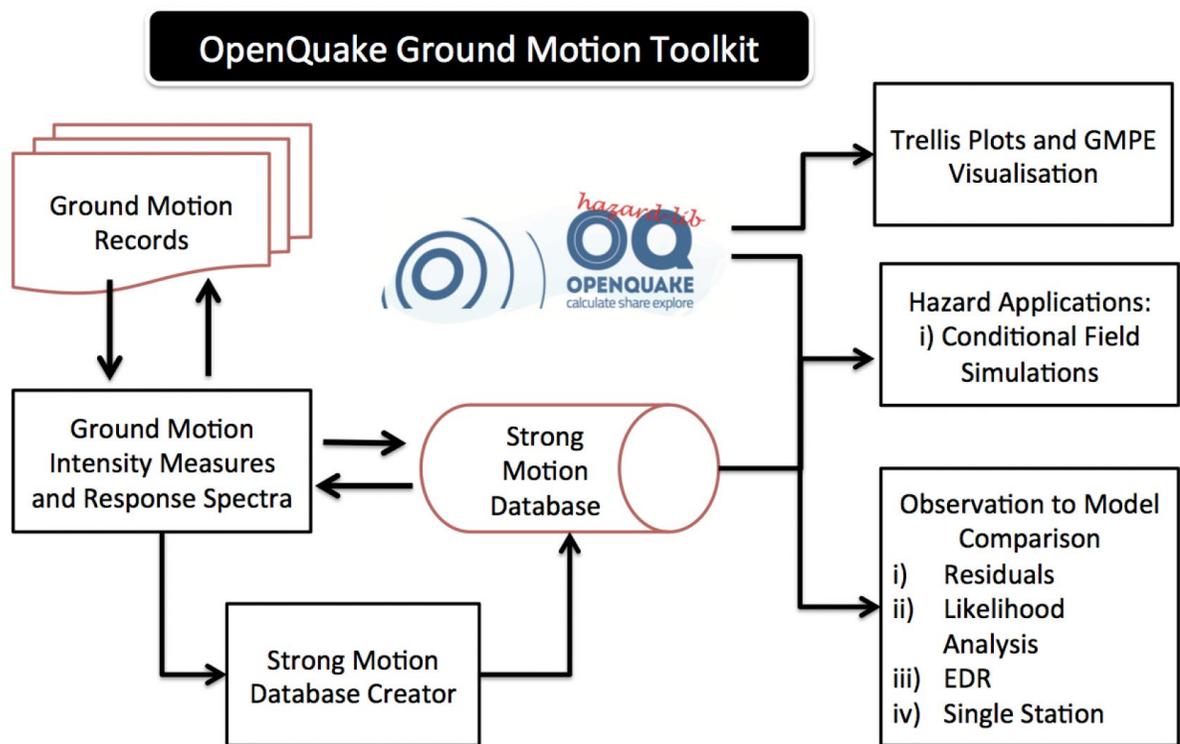
Contenido

1. Marco sismo-tectónico
2. Concepción de fuentes sísmicas
3. Catálogo sísmico utilizado
4. Modelación de fuentes sísmicas
5. Enfoque para cálculo de amenaza probabilística
6. **Evaluación de modelos de atenuación**
7. Antecedentes de evaluaciones de amenaza
8. Filosofía de cálculo de amenaza utilizada en NTDS-1994
9. Resultados de amenaza probabilística en suelo firme
10. Desagregación sísmica para períodos estructurales de interés
11. Conclusiones



Evaluación de modelos de atenuación

Procedimiento empleado para la selección de GMPEs



- El análisis se llevó a cabo utilizando la base de datos de movimiento fuerte así como la caracterización de efectos de sitio.

Evaluación de modelos de atenuación

Procedimiento empleado para la selección de GMPEs

- Preselección de GMPEs para cada ambiente tectónico

Cotton et al. (2006)

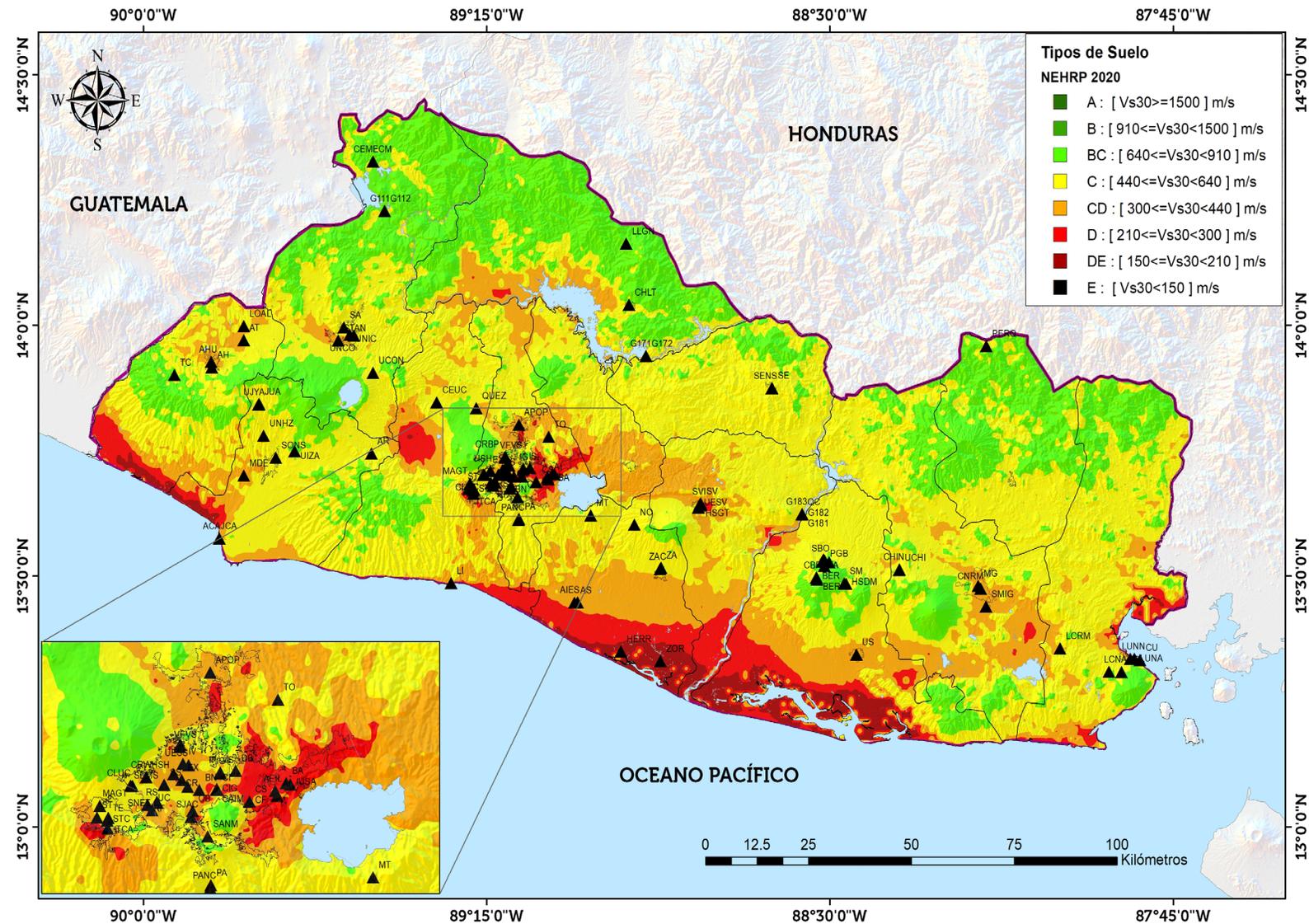
No.	Criterios de exclusión
1	El modelo es claramente de un régimen tectónico irrelevante
2	El modelo no está publicado en una revista internacional revisada por el PEER (Pacific Earthquake Engineering Research)
3	La documentación del modelo y su conjunto de datos subyacente es insuficiente.
4	El modelo ha sido reemplazado por publicaciones más recientes
5	El rango de frecuencia del modelo no es apropiado para aplicaciones de ingeniería.
6	El modelo tiene una forma funcional inadecuada
7	El método de regresión o los coeficientes de regresión se consideran inapropiados

Evaluación de modelos de atenuación

Procedimiento empleado para la selección de GMPEs

- Utilización de mapa Vs30 de El Salvador para usar efecto de sitio en estaciones acelerográficas

Se pretende que este mapa funcione como un diferenciador geográfico de tipos de suelo encontrados en el país



Evaluación de modelos de atenuación

Procedimiento empleado para la selección de GMPEs

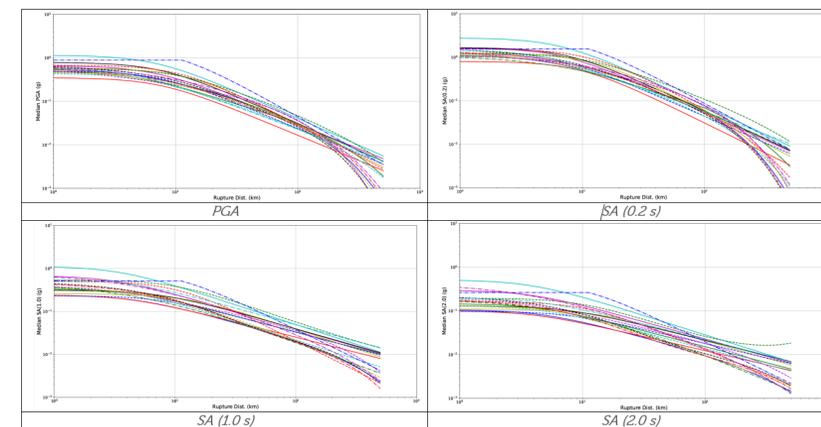
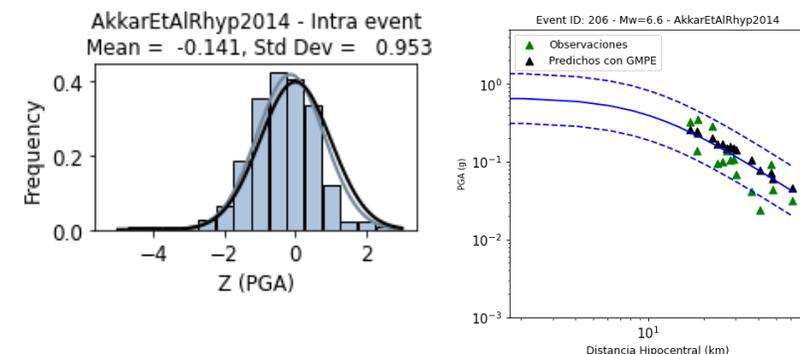
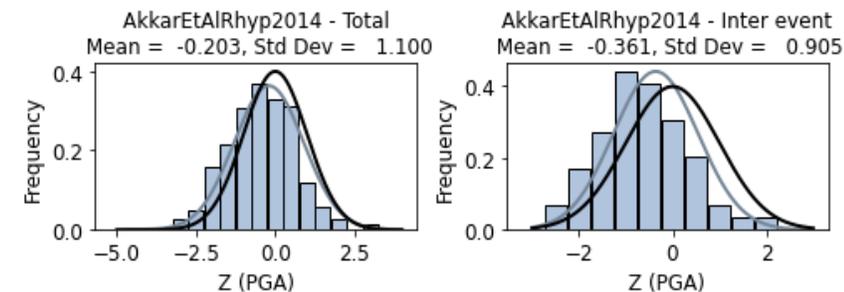
- Evaluación de ajuste

Para las ecuaciones preseleccionadas:

Uso de modelos y criterios estadístico para evaluar el ajuste entre los datos observados y los predichos por las ecuaciones seleccionadas.

Modelos adoptados para la evaluación de las GMPEs

- Análisis de Residuales
- Modelo del logaritmo de la verosimilitud
- Ranking basado en la distancia Euclidiana
- Análisis de escalamiento de GMPEs



Evaluación de modelos de atenuación

Procedimiento empleado para la selección de GMPEs

- Modelos Seleccionados

Para fuente cortical activa:

GMPEs	Peso en árbol lógico
AkkarEtAlRhyp2014	0.34
BooreAtkinson2011	0.33
CauzziEtAl2014	0.33

Un total de 281 registros acelerográficos fueron utilizados, asociados a 58 eventos sísmicos con Magnitudes arriba de 4.0

Para fuente subducción intraplaca:

GMPEs	Peso en árbol lógico
YoungsEtAl1997SSlab	0.34
Kanno2006Deep	0.33
AbrahamsonEtAl2015SSlab	0.33

Un total de 185 registros acelerográficos fueron utilizados, asociados a 12 eventos sísmicos con Magnitudes arriba de 6.5.

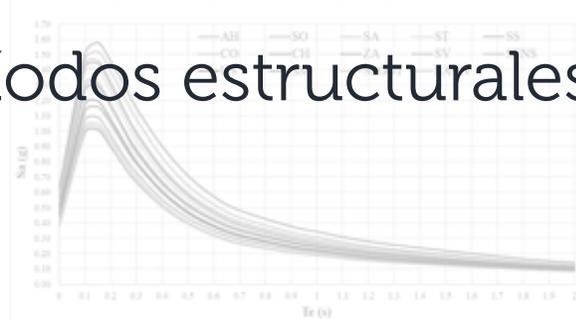
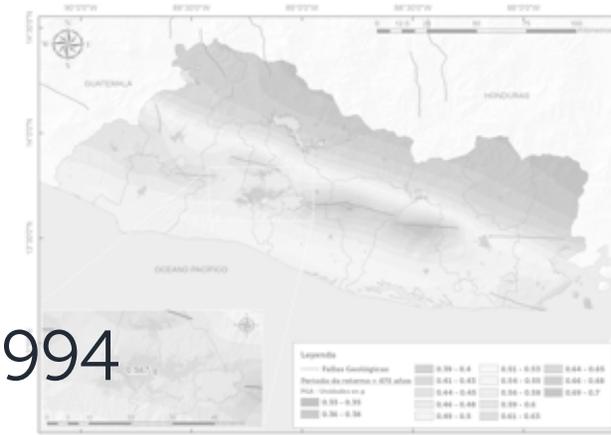
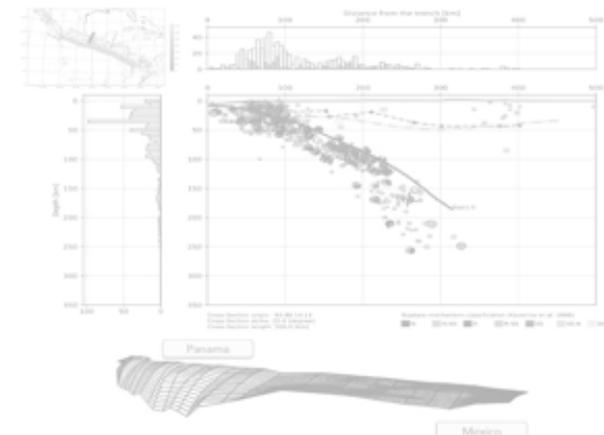
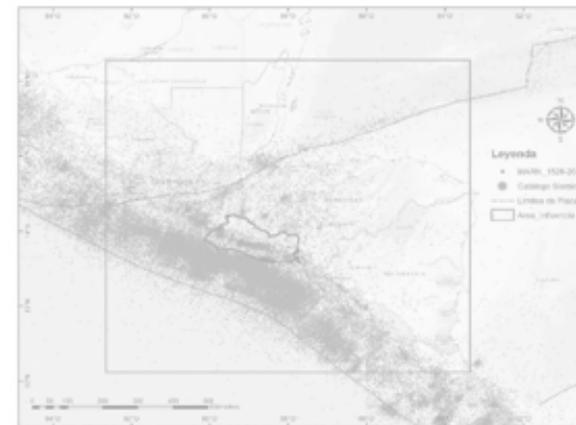
Para fuente subducción interfase:

GMPEs	Peso en árbol lógico
ZhaoEtAl2006SInter	0.33
AbrahamsonEtAl2015SInter	0.33
YoungsEtAl1997SInter	0.34

Un total de 120 registros acelerográficos fueron utilizados, asociados a 10 eventos sísmicos con Magnitudes arriba de 5.5.

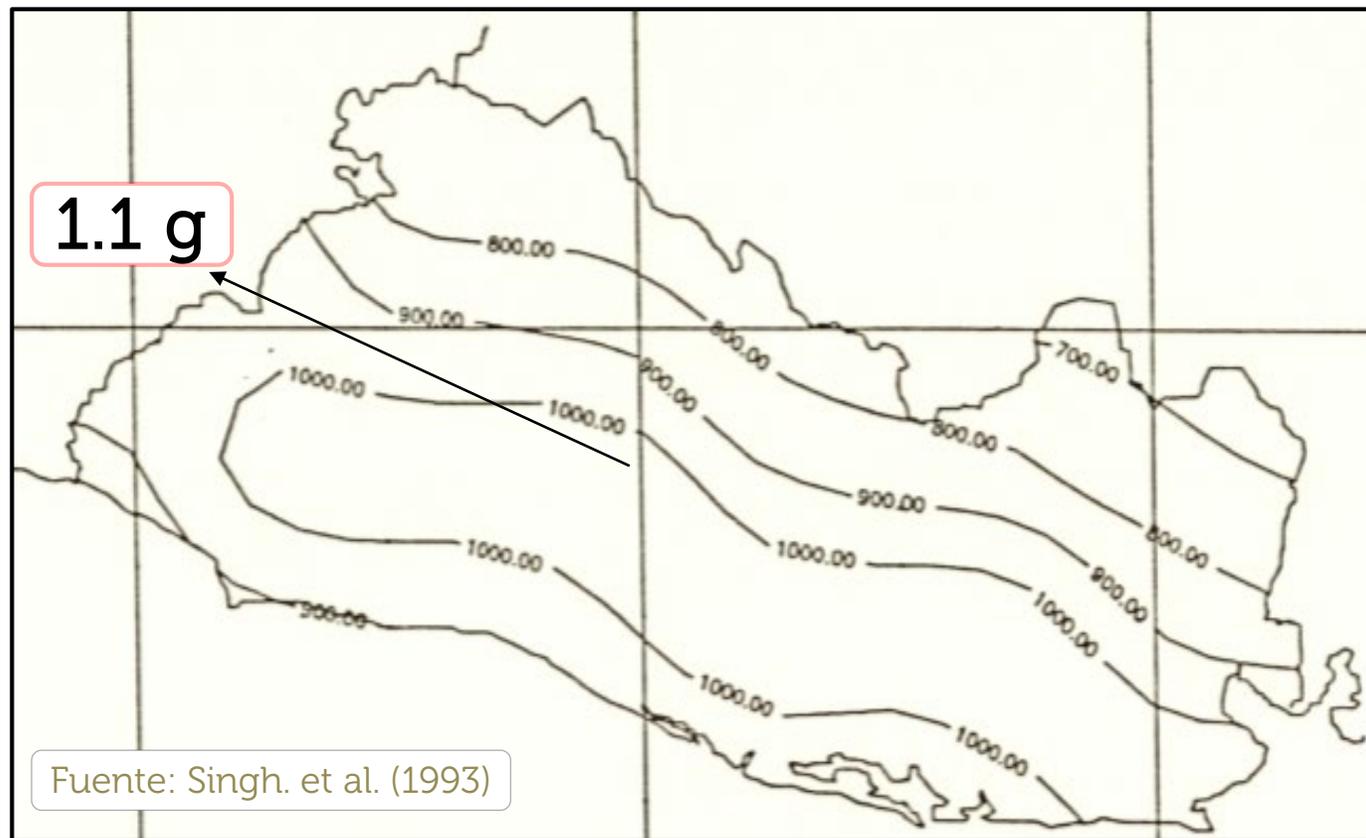
Contenido

1. Marco sísmo-tectónico
2. Concepción de fuentes sísmicas
3. Catálogo sísmico utilizado
4. Modelación de fuentes sísmicas
5. Enfoque para cálculo de amenaza probabilística
6. Evaluación de modelos de atenuación
7. **Antecedentes de evaluaciones de amenaza**
8. Filosofía de cálculo de amenaza utilizada en NTDS-1994
9. Resultados de amenaza probabilística en suelo firme
10. Desagregación sísmica para períodos estructurales de interés
11. Conclusiones



Antecedentes de PSHA en El Salvador

1994: Código Sísmico– Compañía Privada y equipo de la UNAM México (Singh, Ordaz, etc.) – Préstamo de Banco Mundial.



PGA - Período de Retorno = 500 años

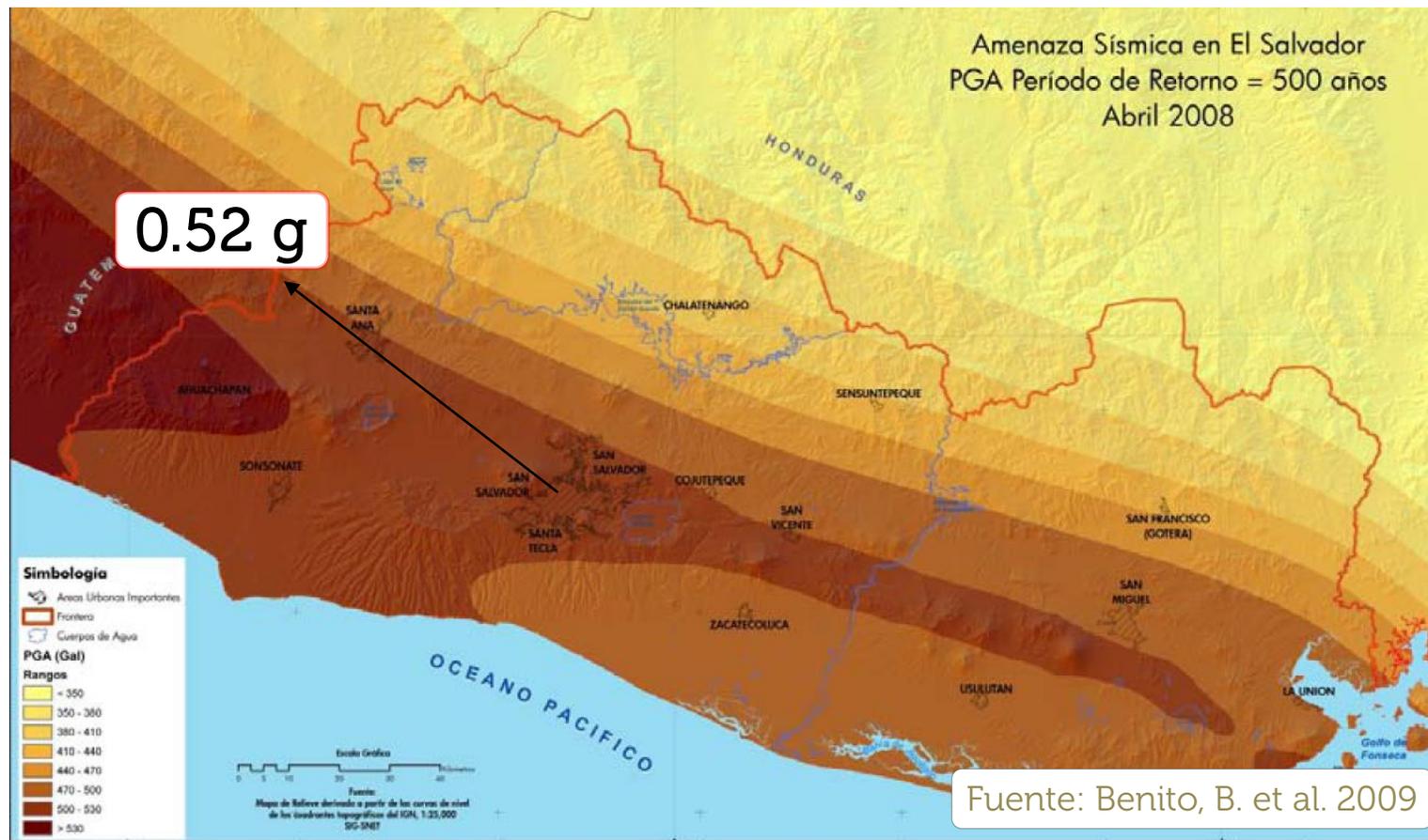
➤ Catálogo Sísmico utilizado = 1898 – 1988 (2790 eventos)

➤ Solamente fue utilizado 1 Modelo de Atenuación (GMPE) para suelo firme, utilizando registros acelerográficos de Centroamérica

➤ No se considero la incerteza epistémica (No árboles lógicos)

Antecedentes de PSHA en El Salvador

2008: RESISII – Evaluación de la Amenaza Sísmica en El Salvador (Benito B. et al 2009) – Gobierno de Noruega y Univ .Politécnica de Madrid.



PGA - Período de Retorno = 500 años

➤ Catálogo Sísmico utilizado =
1522 – 2007

➤ Se han utilizado árboles lógicos con diferentes GMPES, para fuentes sísmicas específicas. **Se hizo calibración**

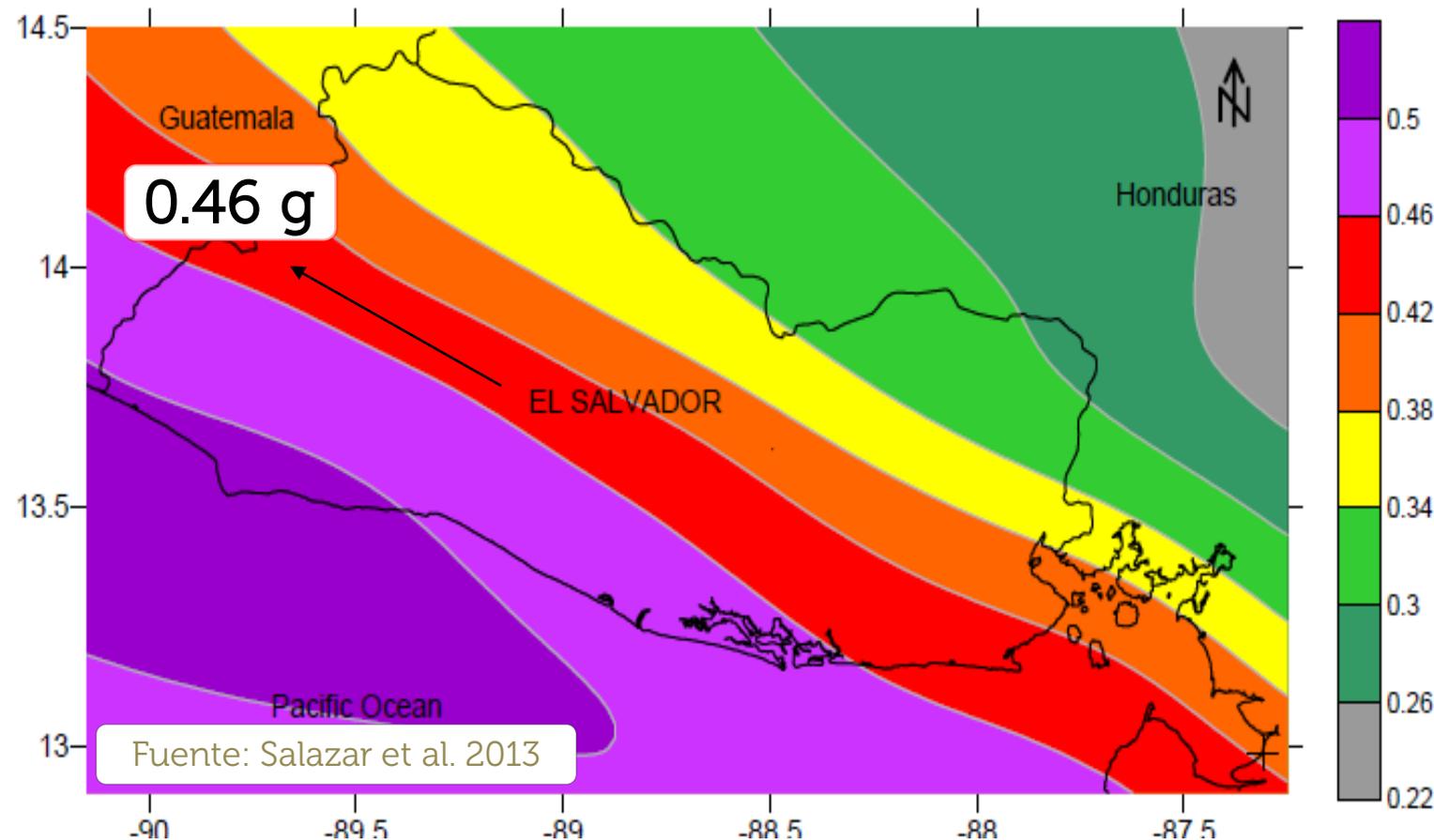
➤ 3 Períodos de Retorno: 500, 1000 y 2500 años, para suelo Firme

➤ Diferentes ordenadas espectrales: PGA, Sa(0.2 s) y Sa (1.0 s)

➤ Desagregación sísmica en San Salvador: PGA y Sa (1.0 s)

Antecedes de PSHA en El Salvador

2013: Walter Salazar – An Earthquake Catalogue for El Salvador and Neighbouring Central American Countries and its Implication in the Seismic Hazard Assessment



PGA - Período de Retorno = 475 años

➤ Catálogo Sísmico utilizado = 1528 – 2009

➤ Se han utilizado árboles lógicos con diferentes GMPES aplicables al ambiente tectónico del país, para Fuentes sísmicas específicas.

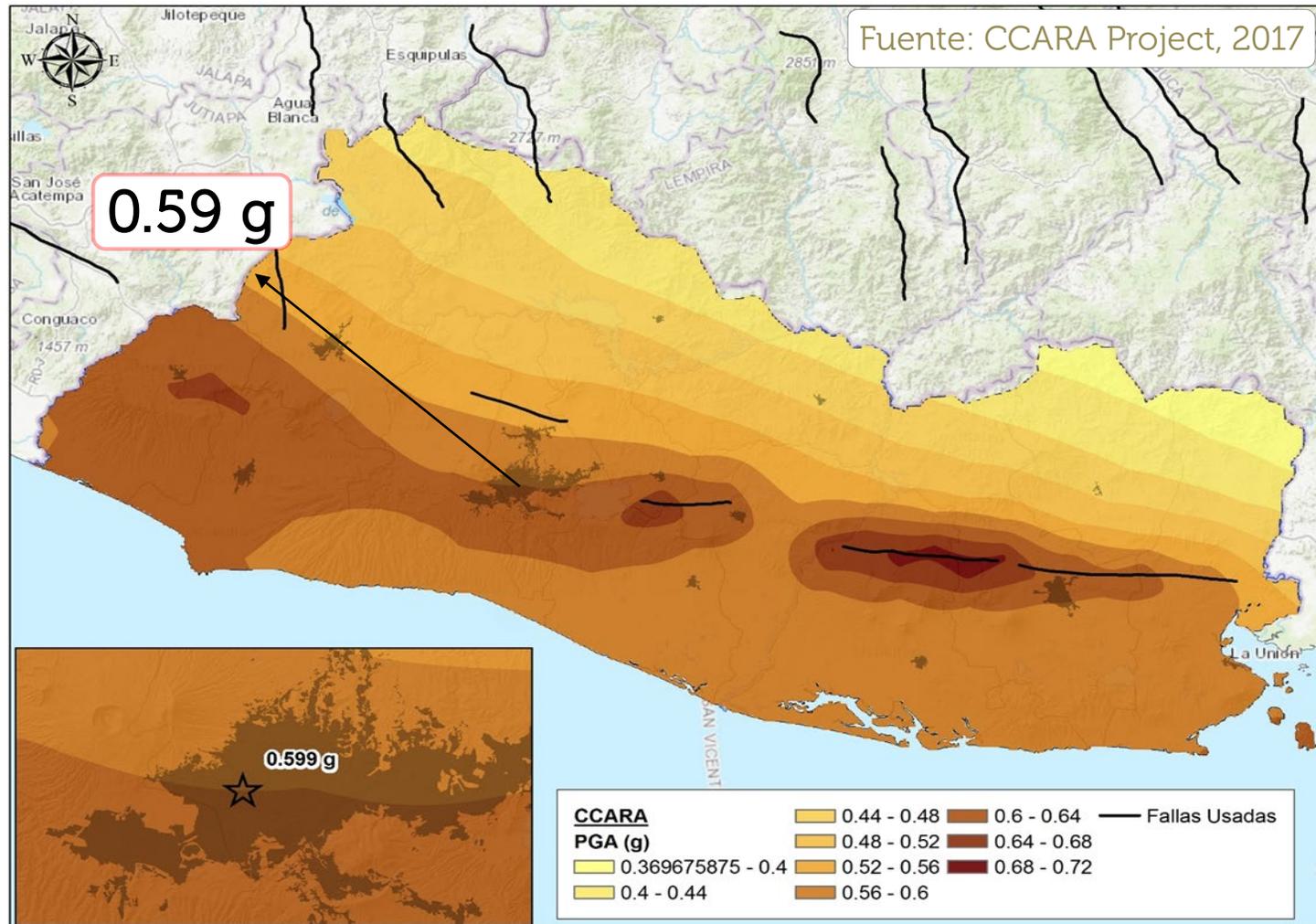
➤ 2 Períodos de Retorno: 475 y 2475 años, para suelo Firme

➤ Diferentes ordenadas espectrales: PGA, Sa(0.2 s) y Sa (1.0 s)

➤ Desagregación sísmica en San Salvador: PGA y Sa (1.0 s)

Antecedes de PSHA en El Salvador

2017: Proyecto CCARA– Assessing and Mitigating Earthquake Risk in the Caribbean and Central America.



➤ Catálogo Sísmico utilizado =
1522 – 2015

➤ Se han utilizado árboles lógicos con diferentes GMPES, para Fuentes sísmicas específicas. **Sí se hizo calibración**

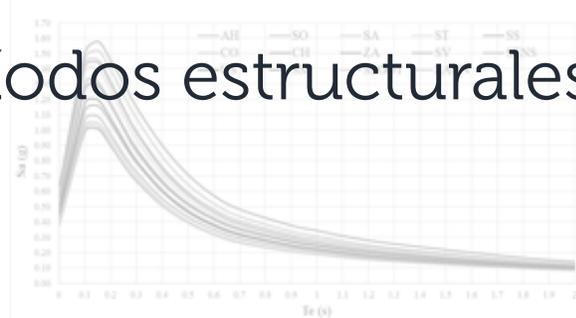
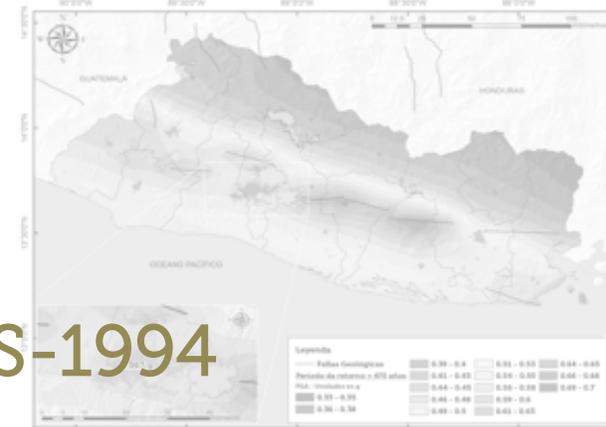
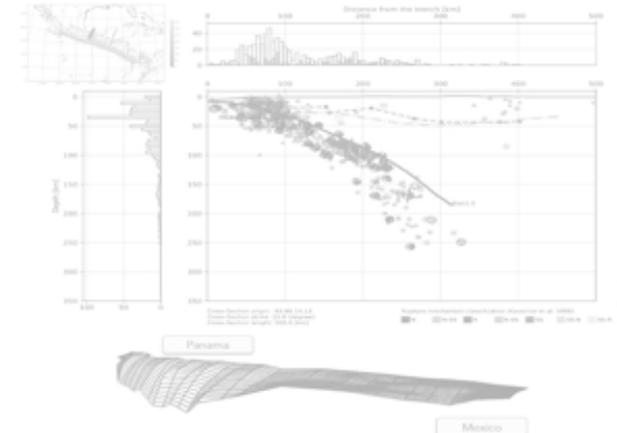
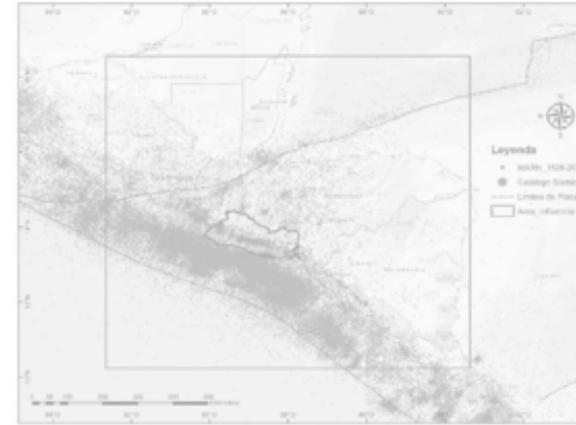
➤ Múltiples Períodos de Retorno: 73, 174, 475, 975 y 2475 años, para suelo Firme

➤ Diferentes ordenadas espectrales: PGA, Sa(0.1 s), Sa(0.2) ... Sa (1.0 s), Sa (2.0 s)

➤ No hay Desagregación sísmica

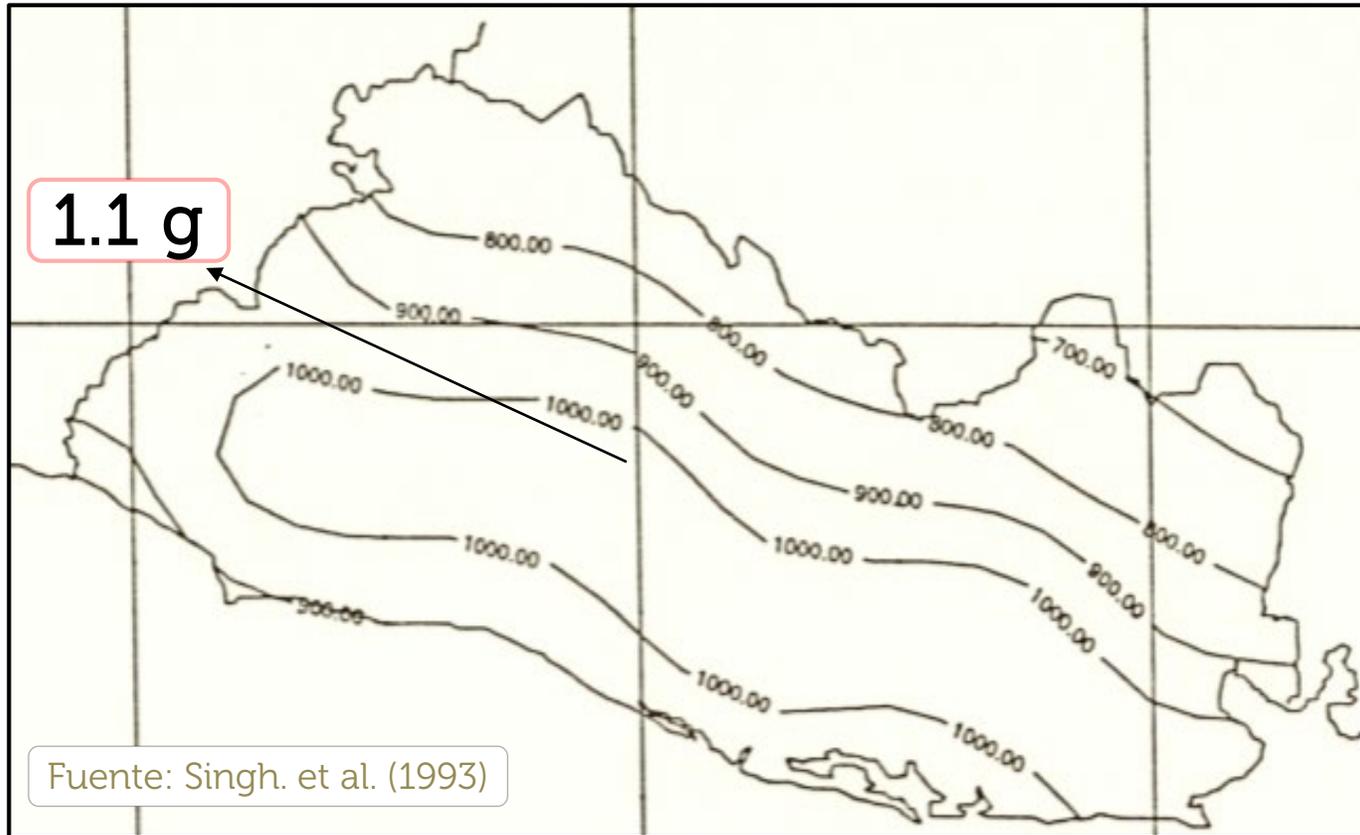
Contenido

1. Marco sísmo-tectónico
2. Concepción de fuentes sísmicas
3. Catálogo sísmico utilizado
4. Modelación de fuentes sísmicas
5. Enfoque para cálculo de amenaza probabilística
6. Evaluación de modelos de atenuación
7. Antecedentes de evaluaciones de amenaza
8. **Filosofía de cálculo de amenaza utilizada en NTDS-1994**
9. Resultados de amenaza probabilística en suelo firme
10. Desagregación sísmica para períodos estructurales de interés
11. Conclusiones



Peligro sísmico en El Salvador – NTDS94

1994: Código Sísmico– Compañía Privada y equipo de la UNAM México (Singh, K. et al. 1993) – Préstamo de Banco Mundial.



PGA - Período de Retorno = 500 años

➤ Catálogo Sísmico utilizado = 1898 – 1988 (2790 eventos)

➤ Solamente fue utilizado 1 Modelo de Atenuación (GMPE) para suelo firme, utilizando registros acelerográficos de Centroamérica

➤ No se considero la incerteza epistémica (No árboles lógicos)

Peligro sísmico en El Salvador – NTDS94

Catálogo sísmico utilizado

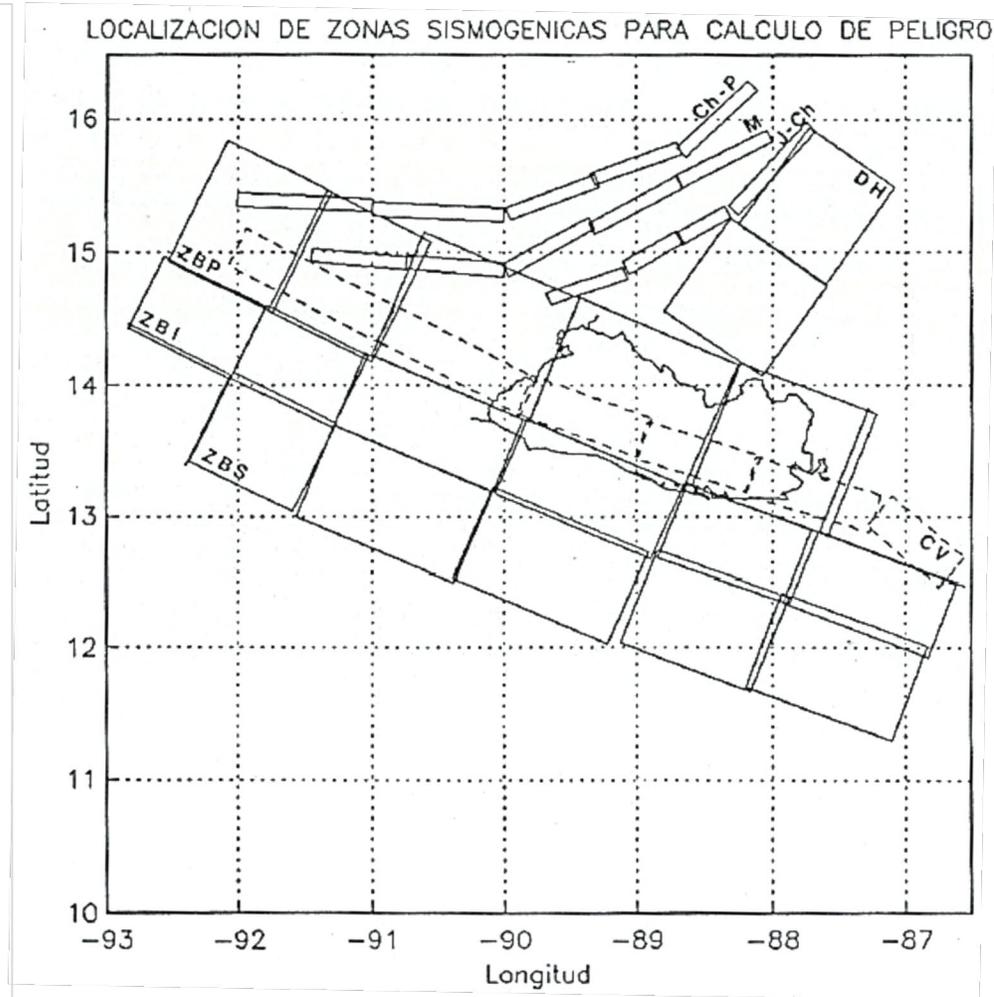
- ❑ El catálogo sísmico que finalmente se utilizó fue obtenido a partir de la base de datos del **USGS/NEIC** (*United States Geologic Survey/National Earthquake Information Center*), versión 1.0, hasta 1988.
- ❑ No se usó la fuente proporcionada por el Centro de Investigaciones Geotécnicas (CIG)
- ❑ **No se hizo distinción de tipos de magnitud** dependiendo de la onda sísmica usada en la determinación. Se eligió el valor máximo reportado. **No hubo homogenización de magnitudes.**



Peligro sísmico en El Salvador – NTDS94

Fuentes sísmicas empleadas - modeladas tipo Área-fuente

- ❑ **Cadena Volcánica (CV)** a todo lo largo del país, profundidad (0 – 30 km).
- ❑ **Zonas de Benioff (ZBS, Subducción somera)** (0 – 35 km).
- ❑ **Zonas de Benioff (ZBI, Subducción intermedia)** - (36 – 60 km).
- ❑ **Zonas de Benioff (ZBP, Subducción profunda)** (61 – 260 km).
- ❑ **Zonas de falla Chixoy-Polochic (Ch-P), Motagua (M) y Jocotán-Chamelecón (J-Ch)** (0 – 35 km).
- ❑ **Depresión de Honduras (DH)** (0 – 40 km).



Peligro sísmico en El Salvador – NTDS94

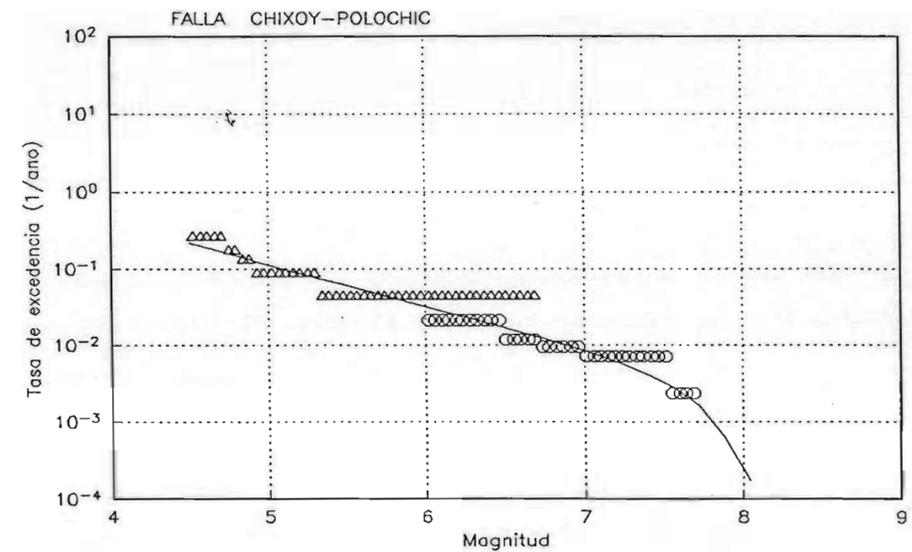
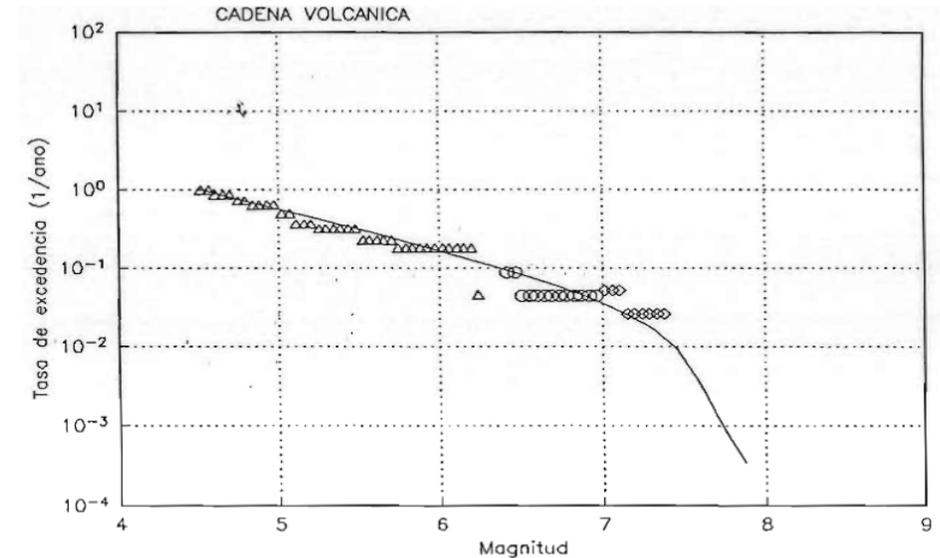


Modelo de ocurrencia temporal: Distribución de Poisson.

❑ Se utilizó para calcular la probabilidad del número de ocurrencias de ruptura

❑ El tiempo entre eventos se encuentra **exponencialmente distribuido**.

❑ Su distribución **no se altera** al aumentar el tiempo que ha transcurrido sin temblar



Peligro sísmico en El Salvador – NTDS94

Parámetros de Gutenberg-Richter para cada zona obtenidos

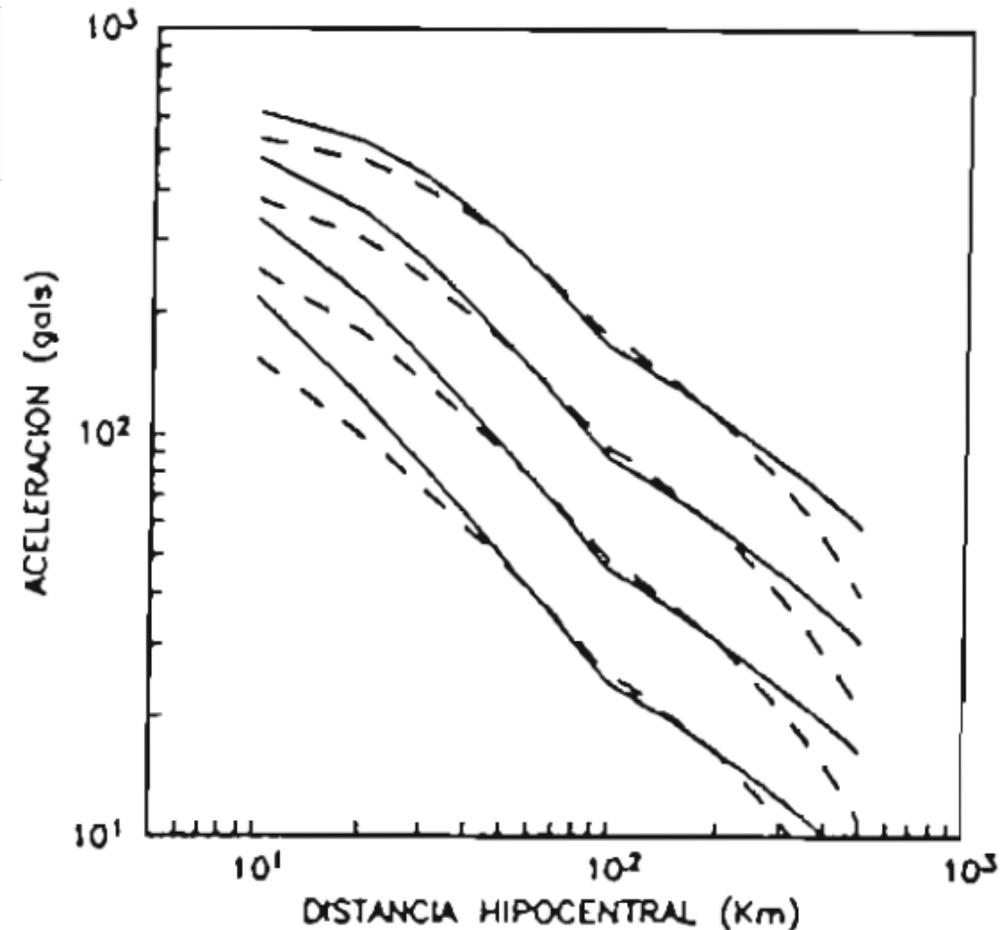
- ❑ Se determina una sola magnitud de completitud para todas las zonas sísmicas.

Zona	Betha	b-value	Mu	Mmax_catalogo
Benioff superficial	2.198	0.95	8.04	7.3
Benioff intermedia	2.111	0.92	8.16	7.7
Benioff profunda	2.366	1.03	8.01	7.4
Cadena volcánica	1.133	0.49	7.7	7.4
Jocotán-Chamelecón	1.997	0.87	7.56	7.2
Motagua	2.15	0.93	8.1	7.5
Chixoy-Polochic	1.213	0.53	8.07	7.7
Depresión Honduras	2.38	1.03	6.93	6.3

Peligro sísmico en El Salvador – NTDS94

Respecto al modelo de atenuación utilizado

- ❑ Se utilizó una sola medida de intensidad para predecir el movimiento fuerte, **esta es la PGA.**
- ❑ Se utilizó un solo modelo de atenuación basada en una regresión no lineal de varios parámetros, con mínimos cuadrados; **para sitios de terreno firme.**
- ❑ **Un total de 11 sismos** registrados por dos o más estaciones. Fueron estos los únicos que se utilizaron para construir la ecuación de atenuación.



Peligro sísmico en El Salvador – NTDS94

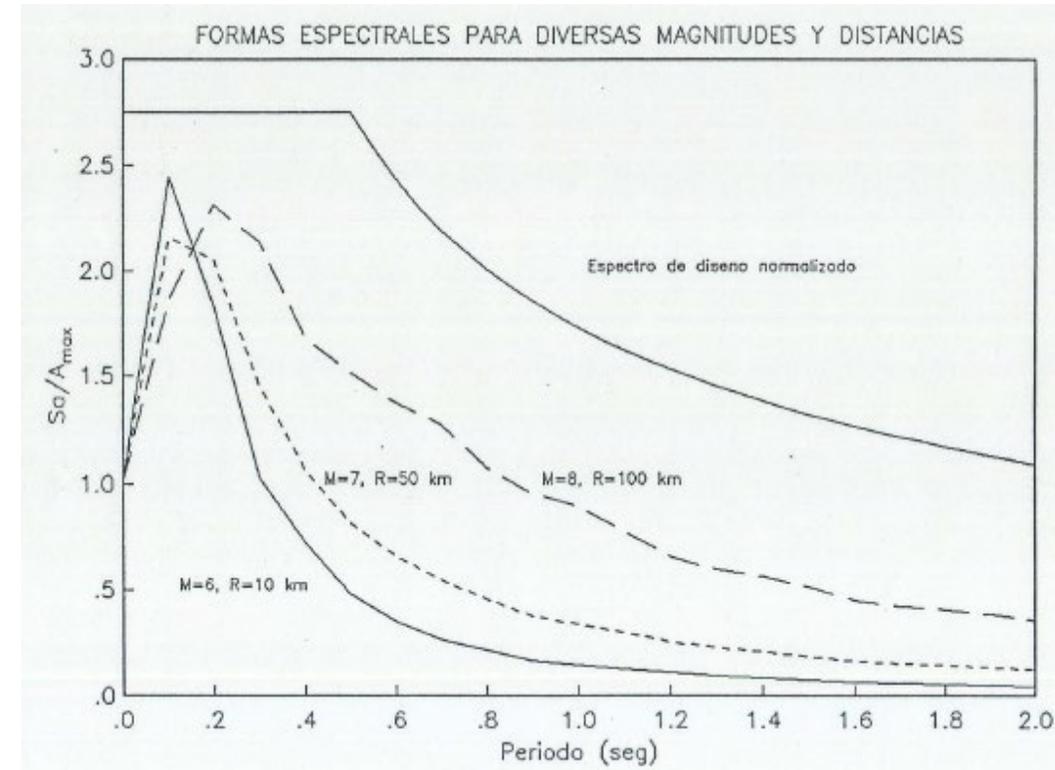


Respecto a ley de atenuación para ordenadas espectrales

1. Se examinaron las formas espectrales esperadas para sismos de varias magnitudes registrados a diversas distancias focales.

2. Al observar “diferencias mínimas” no se hizo un cálculo de peligro sísmico para las diferentes ordenadas espectrales de interés.

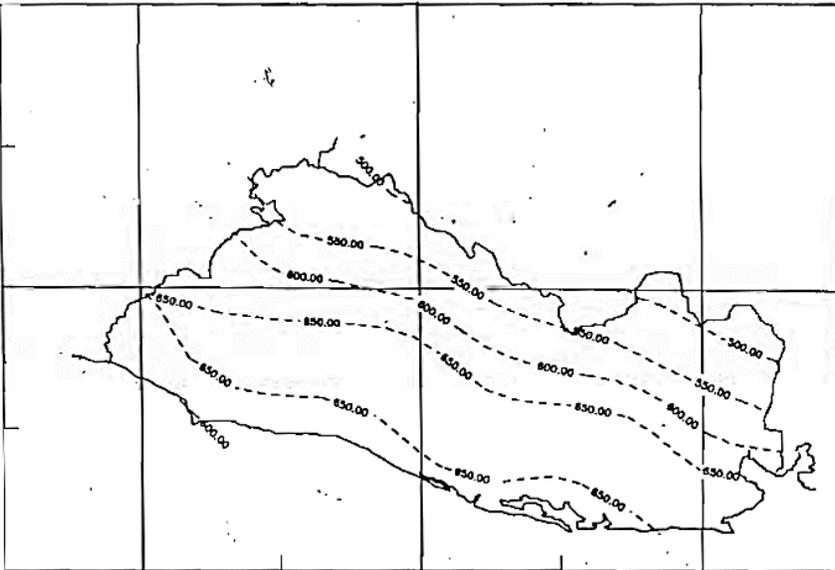
3. Por lo que el peligro sísmico solo fue calculado para la PGA y diferentes períodos de retorno.



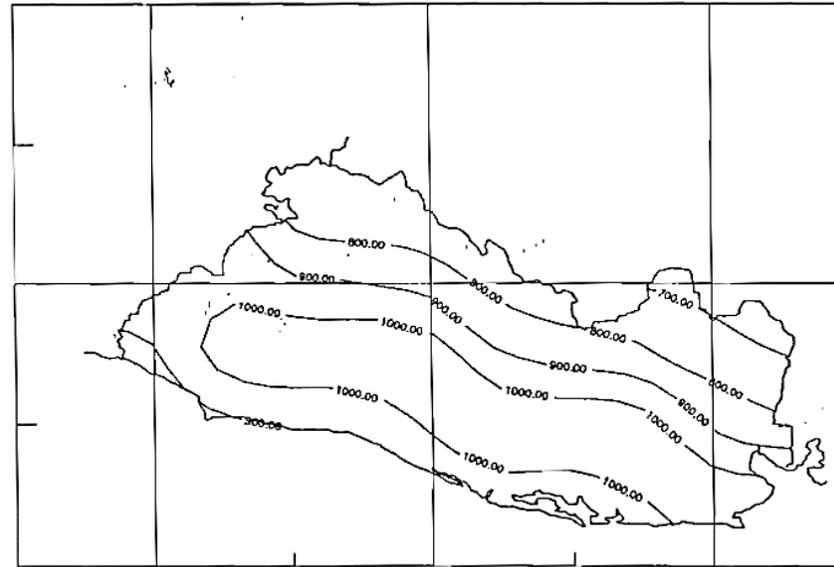
Peligro sísmico en El Salvador – NTDS94

Mapas de amenaza sísmica – solo para PGA y 3 PR.

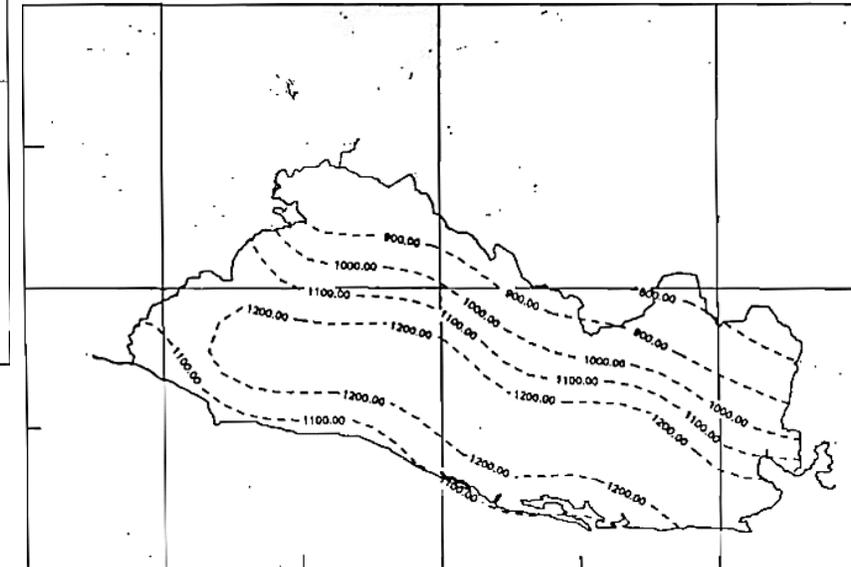
Amax, Tr=100 años



Amax, Tr=500 años



Amax, Tr=1000 años



Peligro sísmico en El Salvador – NTDS94

Respecto a espectros de diseño propuestos

- ❑ Se utilizó los **criterios del ATC (*Applied Technology Council*)**, para convertir las aceleraciones máximas (asociados a períodos de retorno) **a fuerzas para diseño sísmico de edificaciones**, verificándose sus resultados con lineamientos que se usan en México.
- ❑ Se sigue la práctica del SEAOC 90, UBC 91 y UBC 90; donde el espectro de diseño se establecen a partir de un valor de aceleración máxima del terreno (Período estructural de 0 segundos), la cual debe modificarse y reducirse por:
 1. La ocurrencia del PGA solo es una vez en toda la excitación sísmica.
 2. Efectos de duración de la sacudida.

Peligro sísmico en El Salvador – NTDS94



Respecto a espectros de diseño propuestos: PGA efectiva

- ❑ Esta modificación de la medida de intensidad de PGA, se le denomina: "Aceleración Máxima Efectiva, AME o EPA, en inglés).
- ❑ Este valor de AME se calcula a partir del promedio de las amplitudes espectrales entre 0.1 y 0.5 segundos; dividido entre 2.5. Acá es donde se supone se presentan los mayores valores de aceleración espectral.

$$a_{ef} = \frac{1}{2,5n} \left(\sum_{i=1}^n S_{a,i} \right)$$

Peligro sísmico en El Salvador – NTDS94



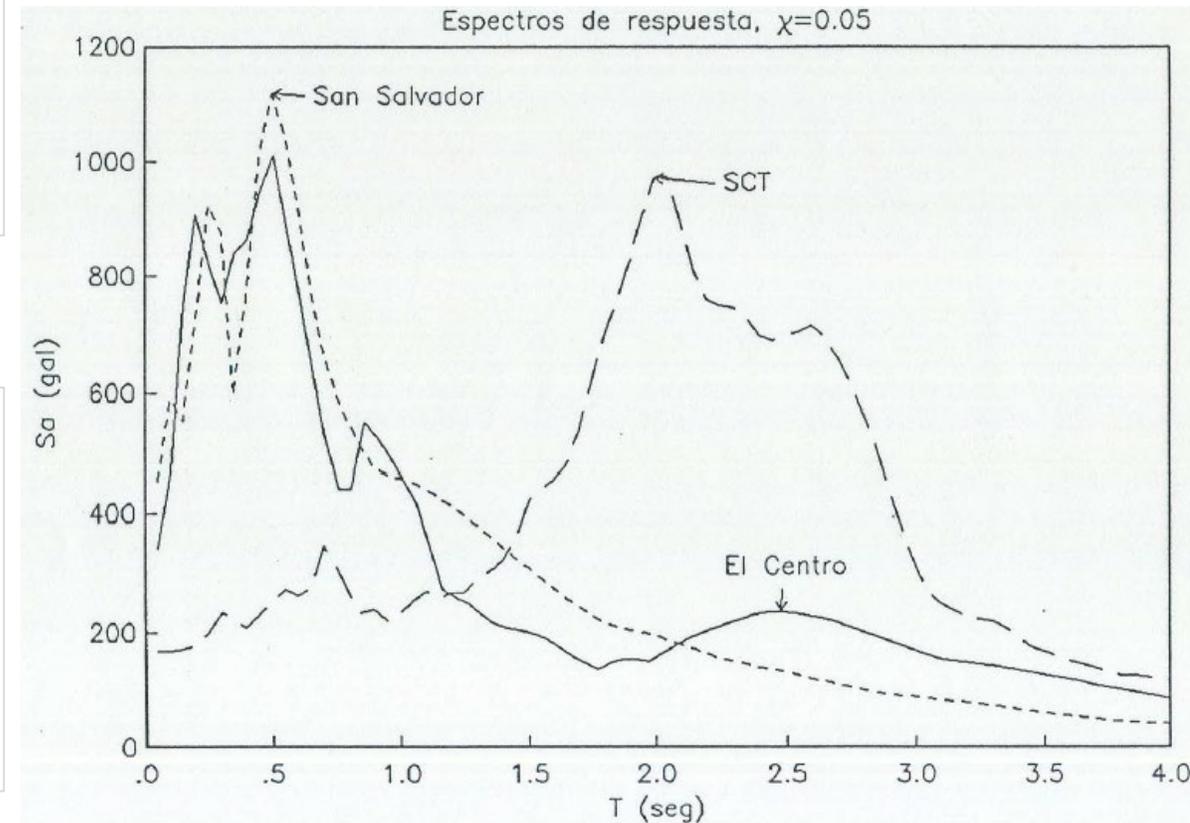
Respecto a espectros de diseño propuestos: PGA efectiva

- ❑ De la aplicación de su definición a espectros de respuesta reales como los registrados en El Salvador, **resulta que esta cantidad es aproximadamente el 70% de la PGA**
- ❑ Los autores argumentan que no bastaría multiplicar por 0.7 los valores presentados en los mapas de peligro sísmico; dado que la **incertidumbre en la predicción de la AME es apreciablemente menor que la asociada a la PGA.**

Peligro sísmico en El Salvador – NTDS94

Respecto a espectros de diseño propuestos: Duración de sismos

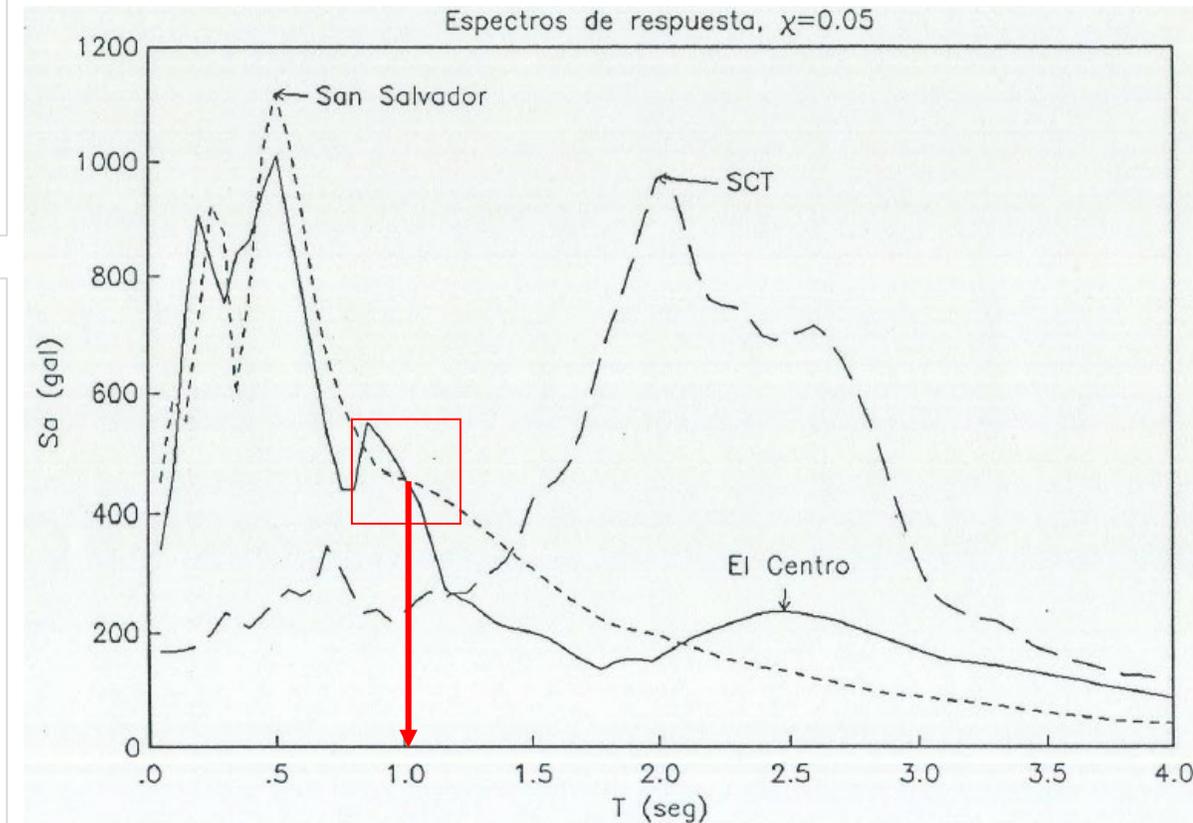
- ❑ Al ser criterios adaptados por el ATC, y su base de daños en California, **se analizan la similitud entre los sismos ocurridos en El Salvador y California.**
- ❑ Se argumenta que los sismos que han **ocurrido en California, son de mayor magnitud** a los que usualmente han provocado daños en El Salvador, **y por lo tanto, de mayor duración.**



Peligro sísmico en El Salvador – NTDS94

Respecto a espectros de diseño propuestos: Duración de sismos

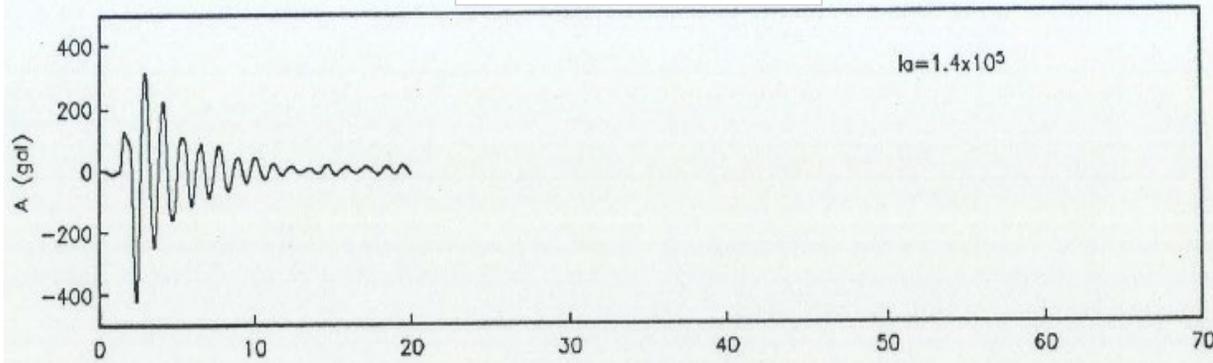
- ❑ Desde el punto de vista de respuesta elástica, los sismos de San Salvador y el Centro, estarían asociados al mismo nivel de daños.
- ❑ Sin embargo, se hizo un análisis de la respuesta de aceleración absoluta de un oscilador lineal con 5% de amortiguamiento y se seleccionó un período de 1.08 segundos. En este período los autores dicen que las respuestas máximas son comparables.



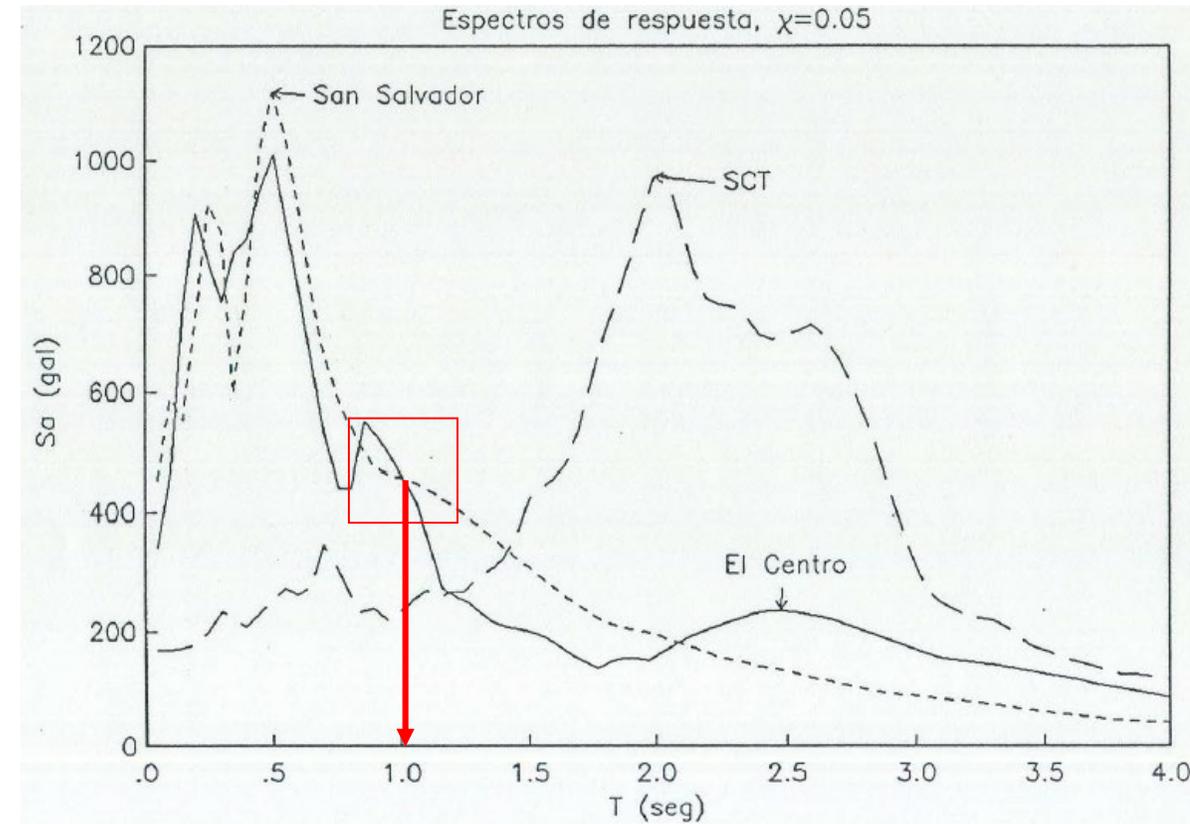
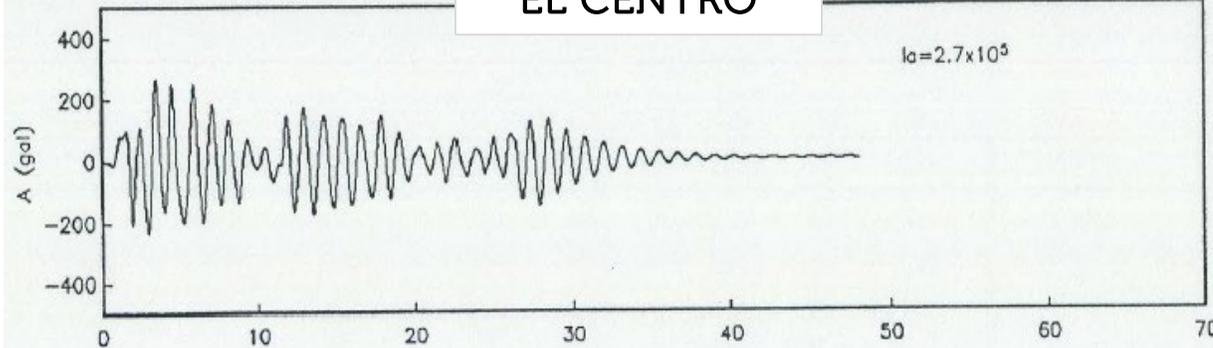
Peligro sísmico en El Salvador – NTDS94

Respecto a espectros de diseño propuestos: Duración de sismos

SAN SALVADOR



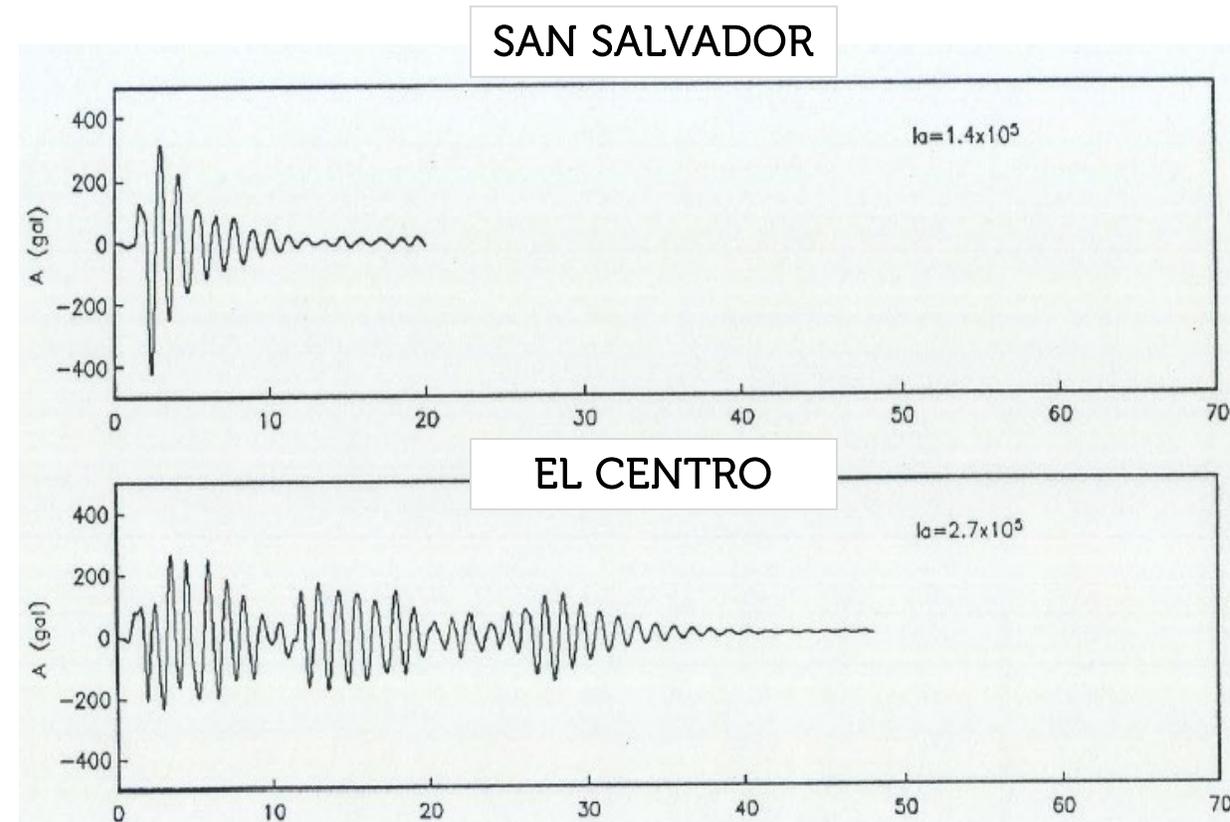
EL CENTRO



Peligro sísmico en El Salvador – NTDS94

Respecto a espectros de diseño propuestos: Duración de sismos

- De los resultados se observa que el mayor número de ciclos de carga y descarga presente en el acelerograma del Centro, conduciría a mayores daños en estructuras reales que el evento de San Salvador. Por lo que se busca un artificio para reducir las amplitudes del AME.

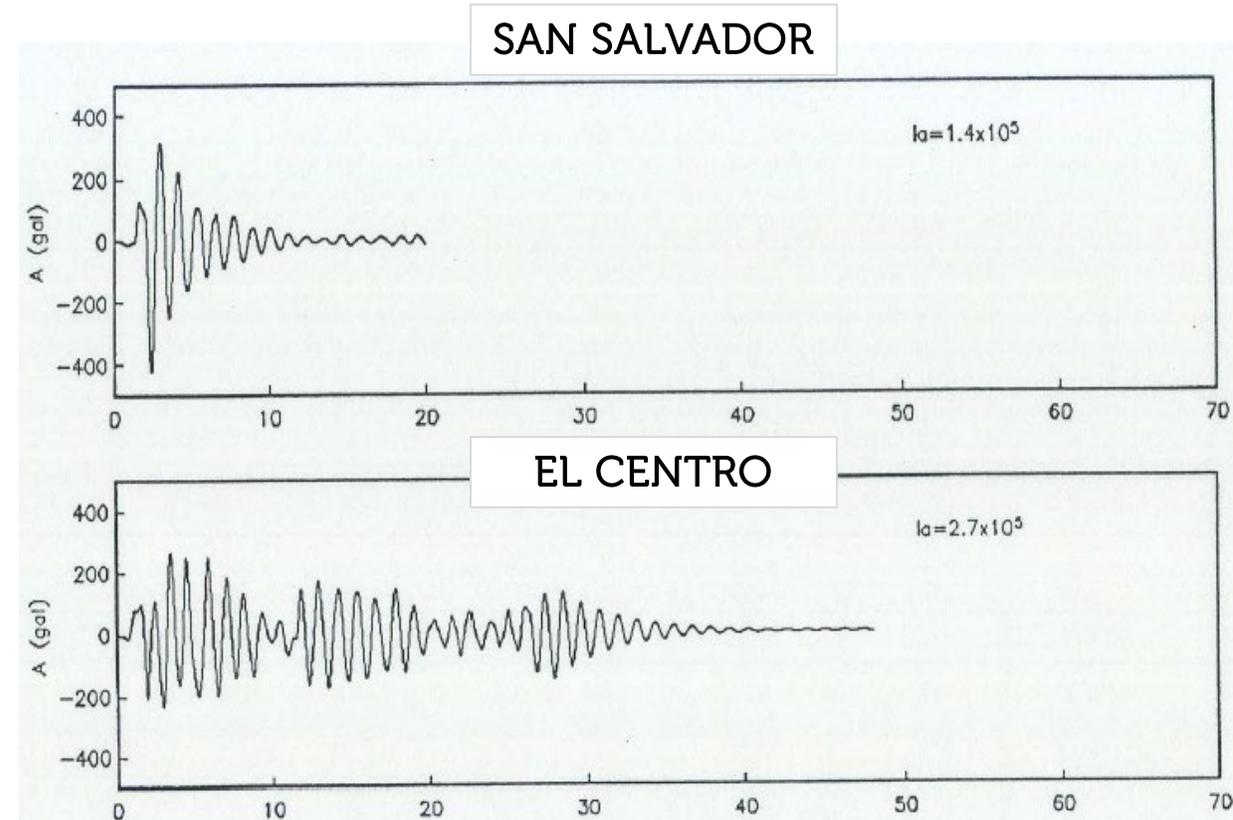


Peligro sísmico en El Salvador – NTDS94

Respecto a espectros de diseño propuestos: Duración de sismos

- Este factor de reducción por duración (FRD) se basa en utilizar la relación entre las intensidades de Arias de ambos terremotos; de modo que las respuestas elásticas de ambos sismos tuviesen la misma Intensidad de Arias.

$$FRD = \sqrt{\frac{\text{Intensidad de Arias}(\text{San Salvador})}{\text{Intensidad de Arias}(\text{El Centro})}}$$



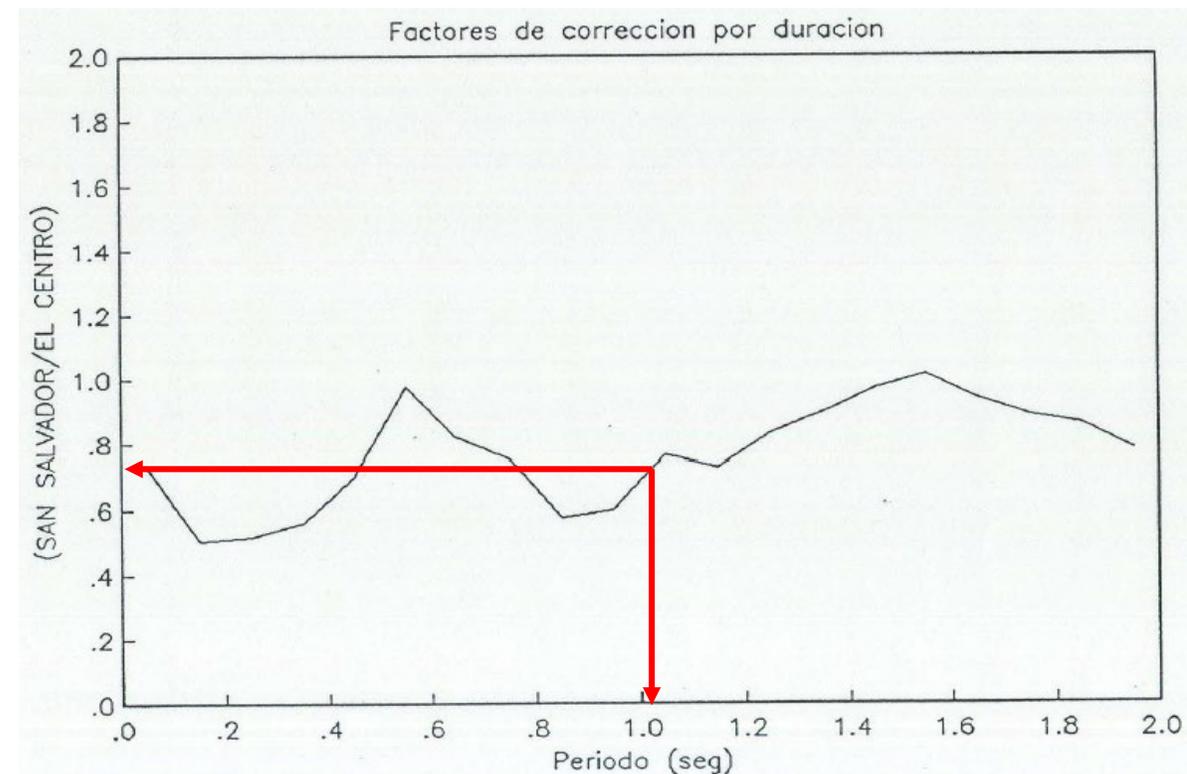
Peligro sísmico en El Salvador – NTDS94

Respecto a espectros de diseño propuestos: Duración de sismos

❑ Lo anterior se hace para los diferentes períodos estructurales de los espectros de respuesta; donde para 1.08 segundos, resultaba de 0.72. (raíz cuadrada de 1.4/2.7).

❑ Una vez teniendo todos los períodos se sacó un promedio; el cual fue de 0.75.

$$FRD = \sqrt{\frac{\text{Intensidad de Arias}(\text{San Salvador})}{\text{Intensidad de Arias}(\text{El Centro})}}$$



Peligro sísmico en El Salvador – NTDS94

Respecto a espectros de diseño propuestos: Duración de sismos

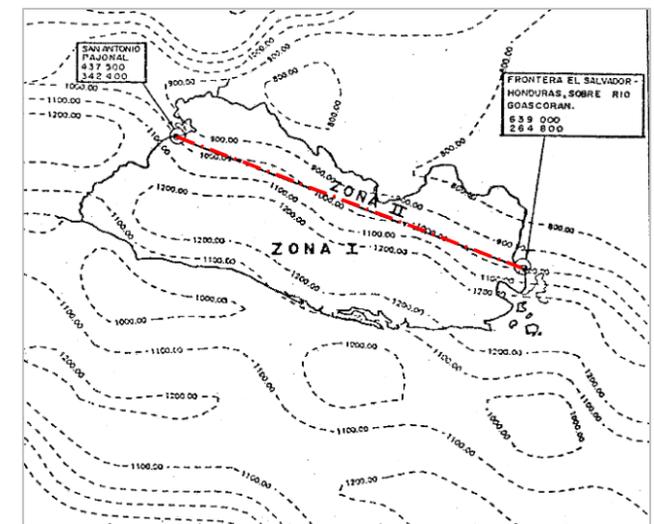
- Y es este valor, el que se multiplica al AME (recién reducido por el 0.70, por ocurrencia de PGA), y se define con la letra Z, específicamente para el cálculo de las **aceleraciones máximas equivalentes asociadas a 500 años** de períodos de retomo; el cual se usa de base para fijar espectros de diseño en las dos zonas sísmicas de El Salvador

Zona	AME	$Z = 0.75 * AME$	$S_a = 2.75 * Z$
A	480	360	990
B	360	270	740

NORMA TECNICA PARA DISEÑO POR SISMO

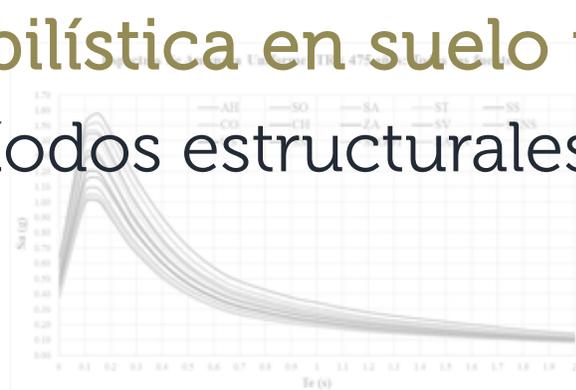
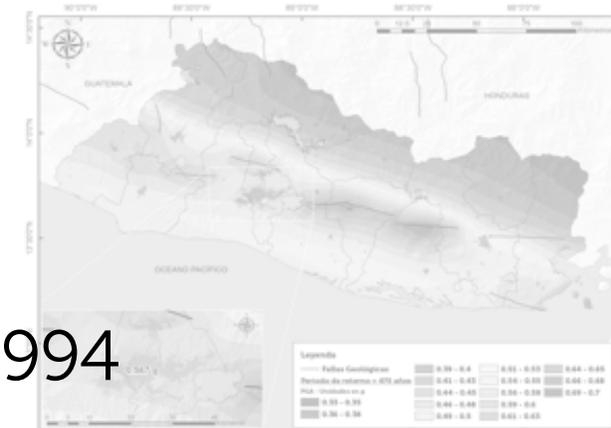
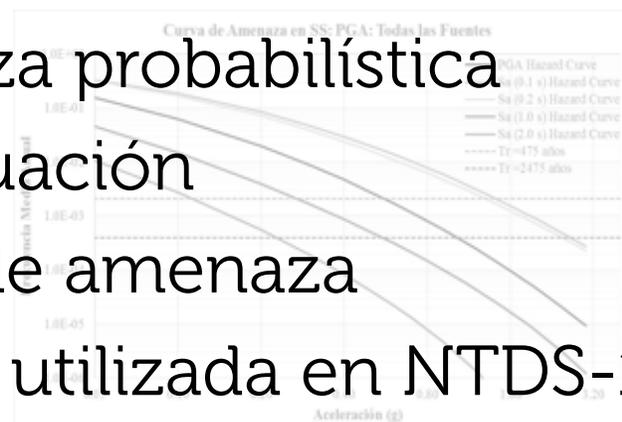
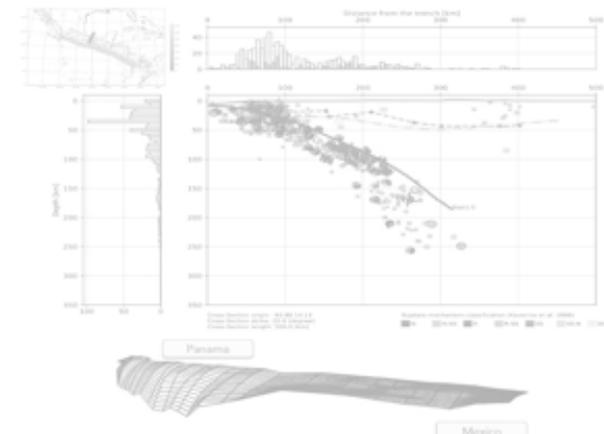
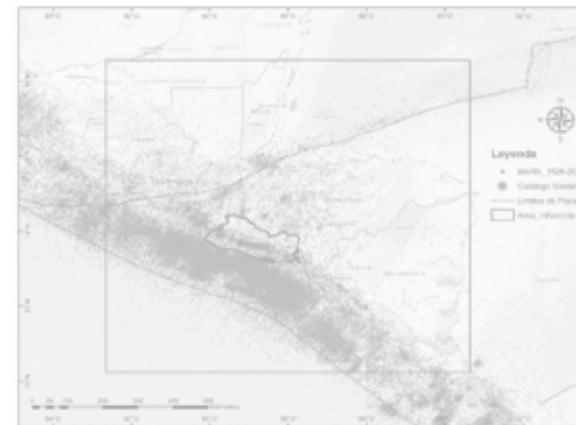
TABLA 1
FACTOR A DE ZONIFICACION SISMICA

ZONA *	FACTOR A
1	0.40
2	0.30



Contenido

1. Marco sísmo-tectónico
2. Concepción de fuentes sísmicas
3. Catálogo sísmico utilizado
4. Modelación de fuentes sísmicas
5. Enfoque para cálculo de amenaza probabilística
6. Evaluación de modelos de atenuación
7. Antecedentes de evaluaciones de amenaza
8. Filosofía de cálculo de amenaza utilizada en NTDS-1994
9. **Resultados de amenaza probabilística en suelo firme**
10. Desagregación sísmica para períodos estructurales de interés
11. Conclusiones



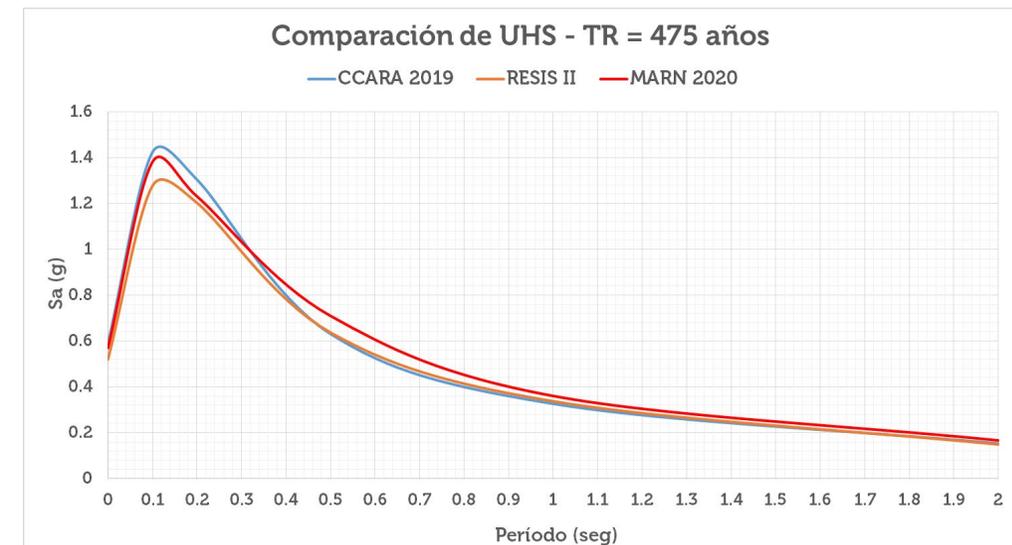
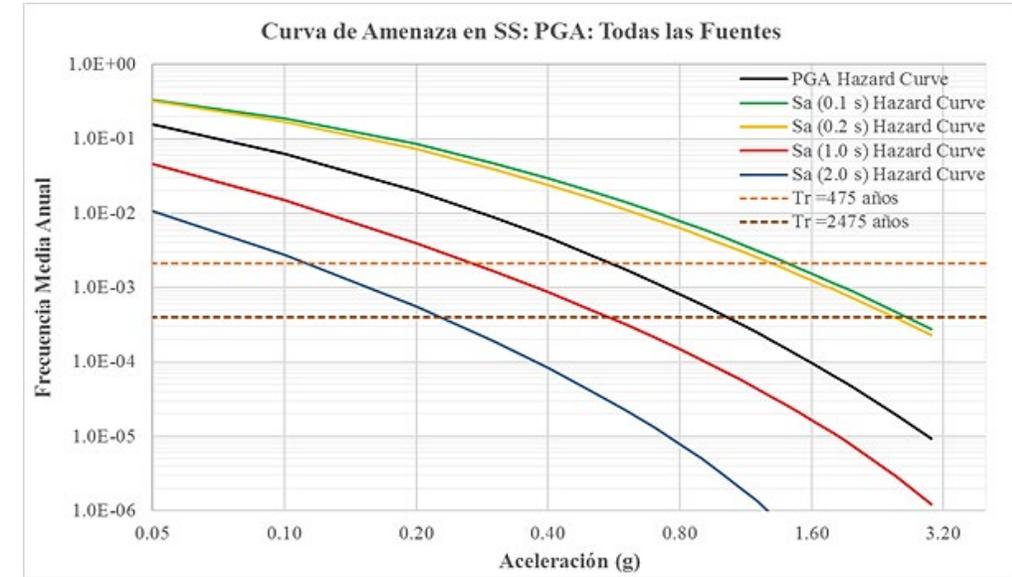
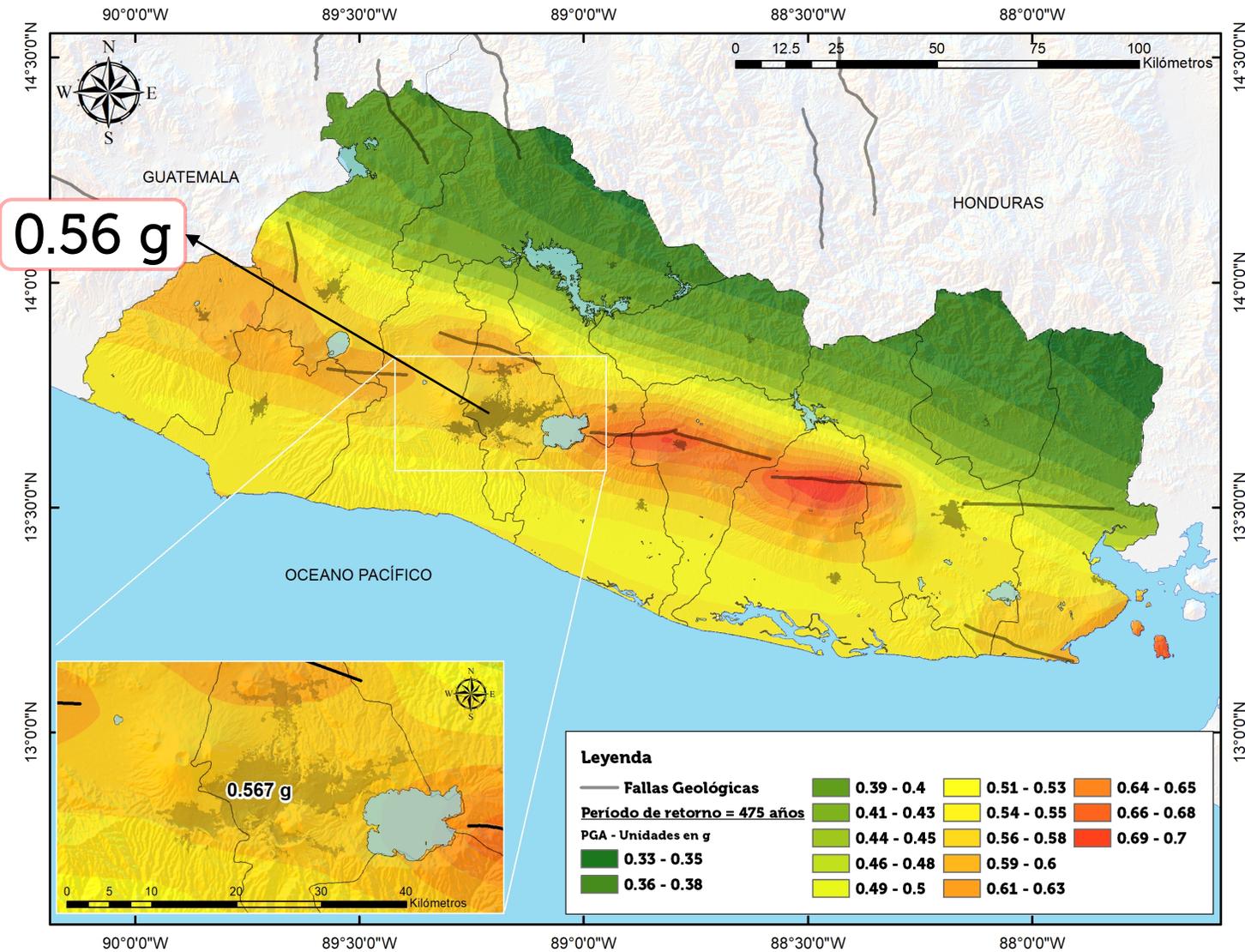
Resultados de amenaza sísmica en roca

Parámetros de cálculo

- Se calculó la amenaza sísmica en el país **con una resolución de 5 km**, obteniéndose una grilla de 1970 puntos.
- Se evaluaron **14 medidas de intensidad** asociadas a períodos estructurales que van desde la **PGA hasta SA (4.0 seg)**
- Se obtuvieron **14 curvas de amenaza** extendidas hasta niveles de **aceleración del terreno de 10g**
- Se obtuvieron los **espectros de amenaza uniforme (UHS)**, tanto por todas las fuentes como separado por fuente sísmica.
- Se evaluaron 8 períodos de retorno: **17, 37, 73, 174, 225, 475, 975 y 2475 años**

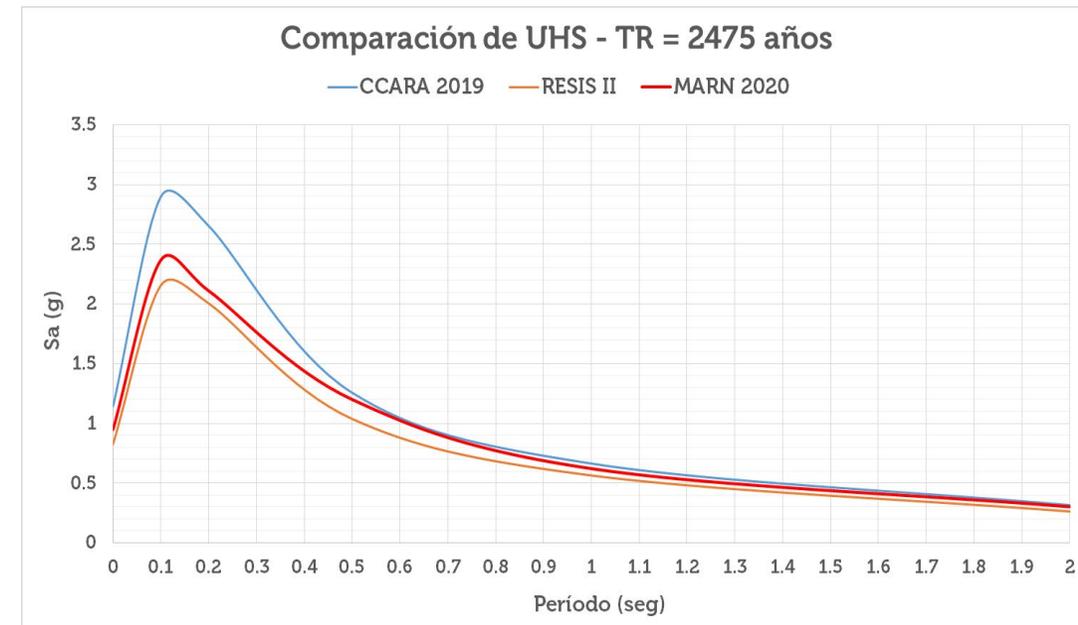
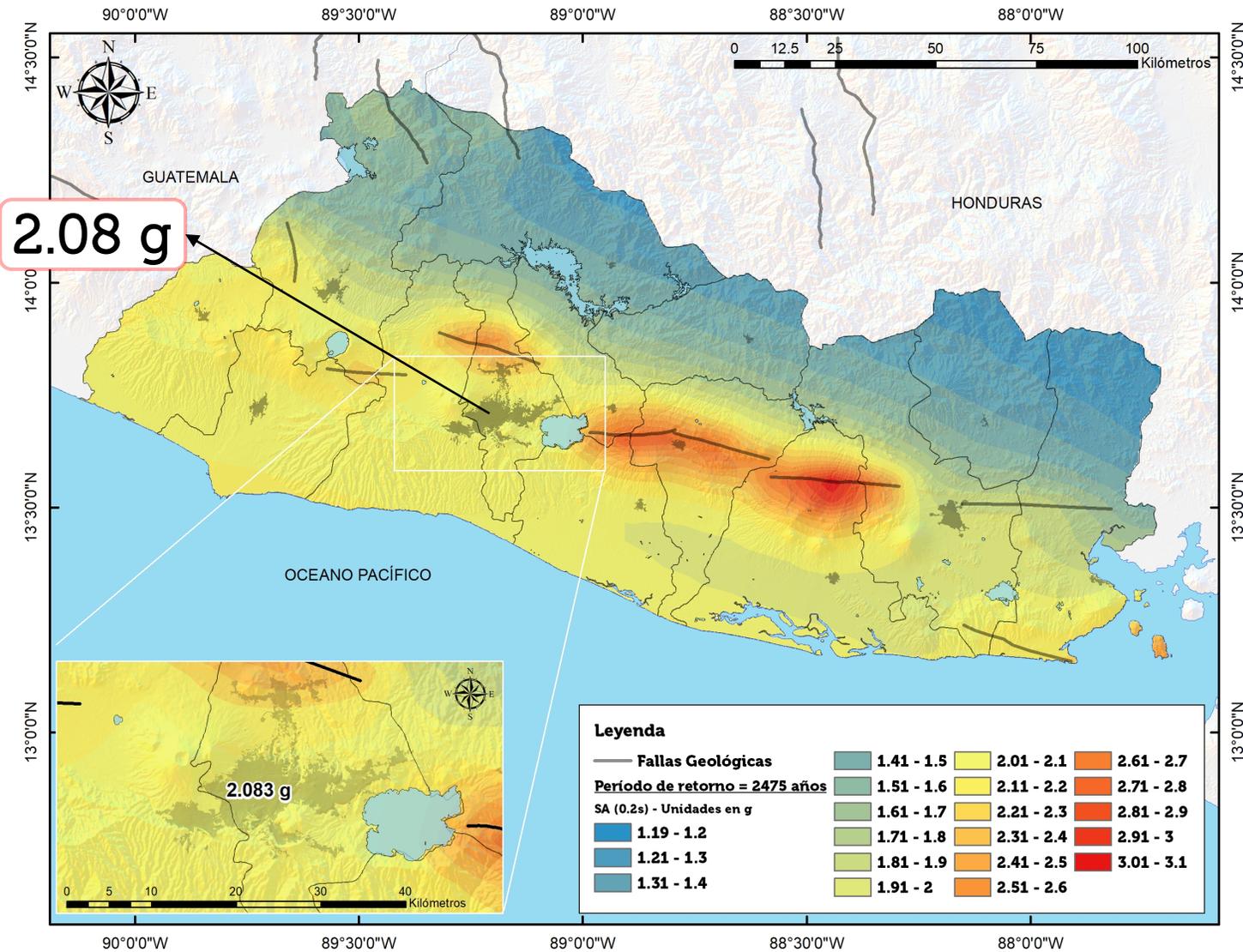
Resultados de amenaza sísmica en roca

Período de retorno: 475 años - PGA



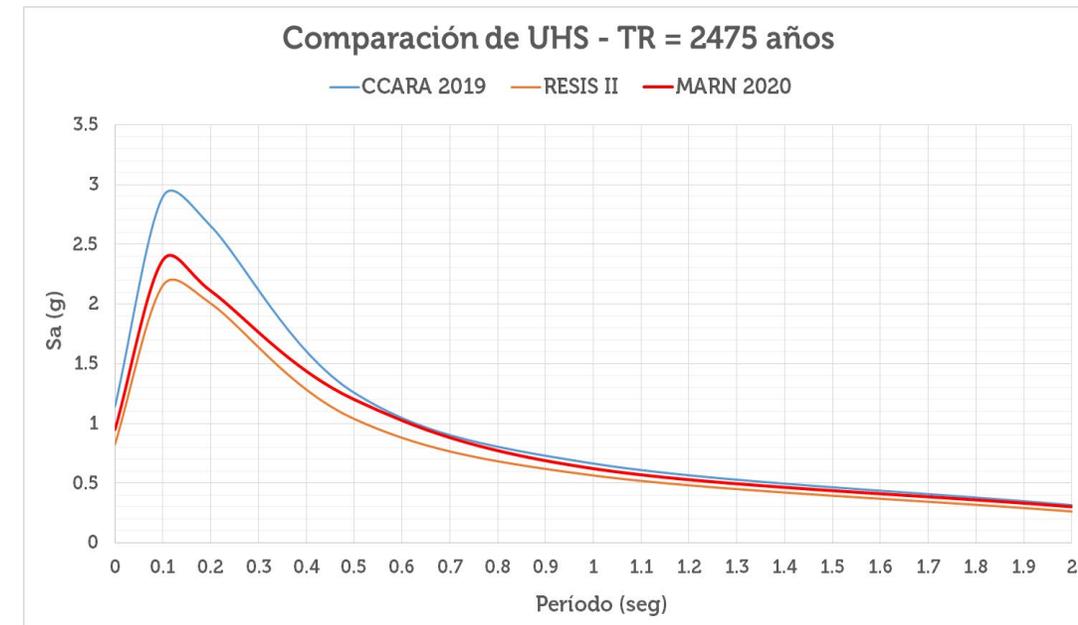
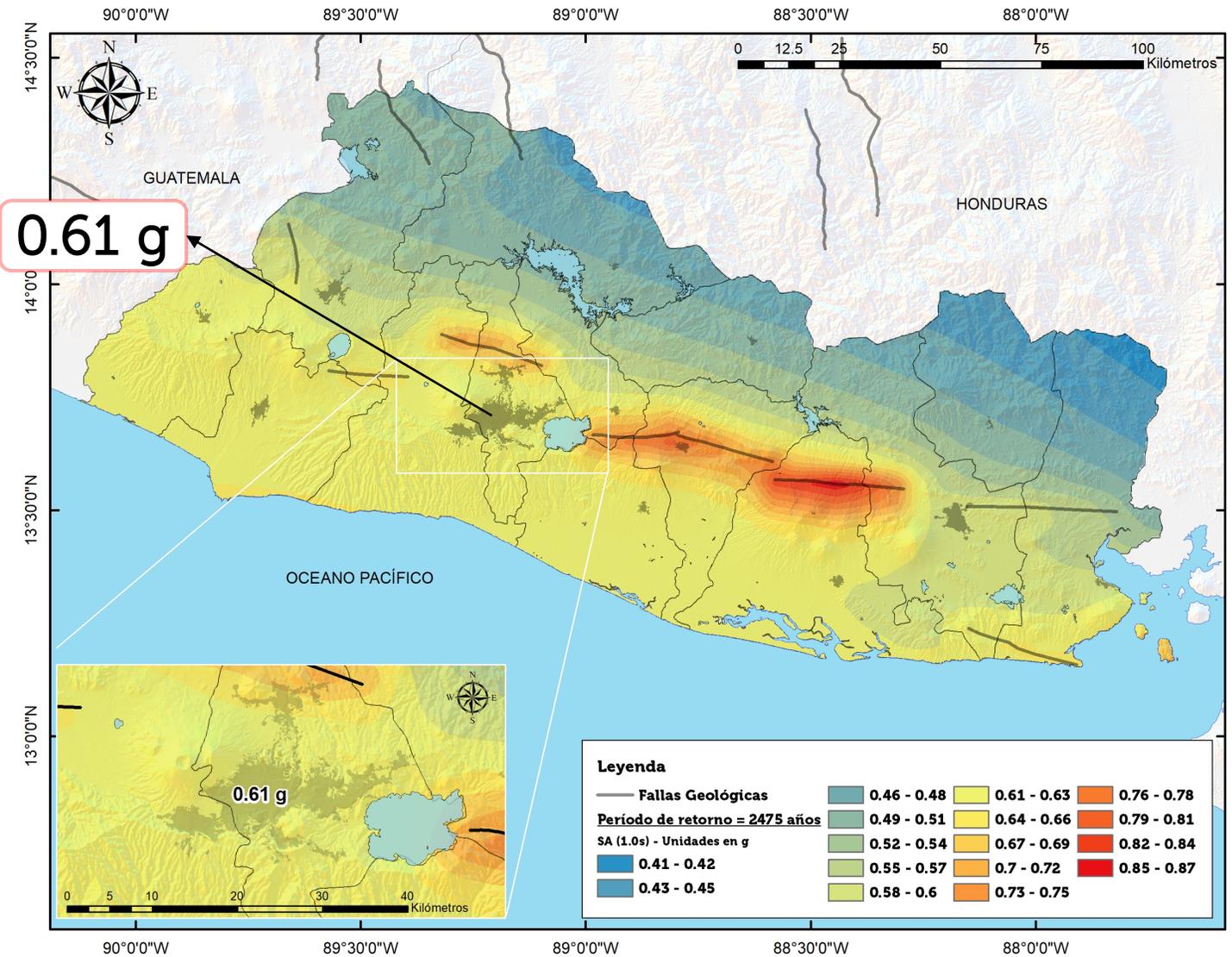
Resultados de amenaza sísmica en roca

Período de retorno: 2475 años – SA (0.2s)



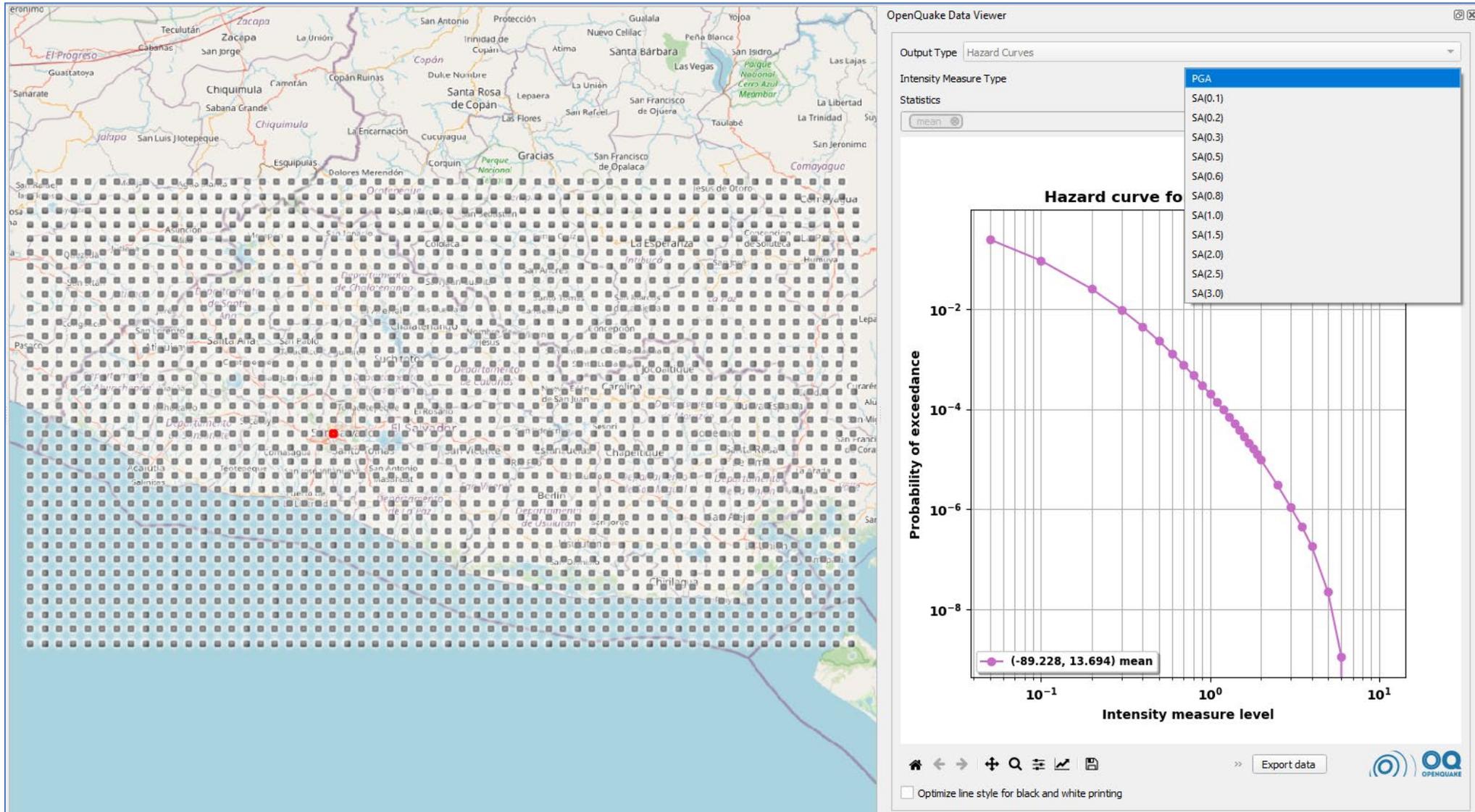
Resultados de amenaza sísmica en roca

Período de retorno: 2475 años – SA (1.0s)



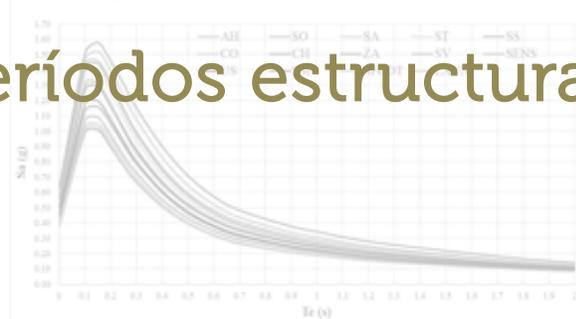
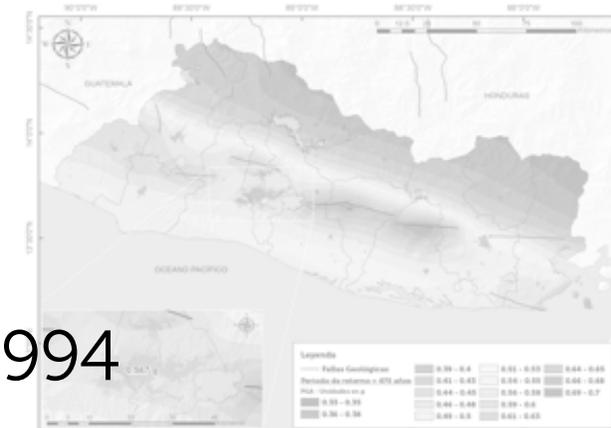
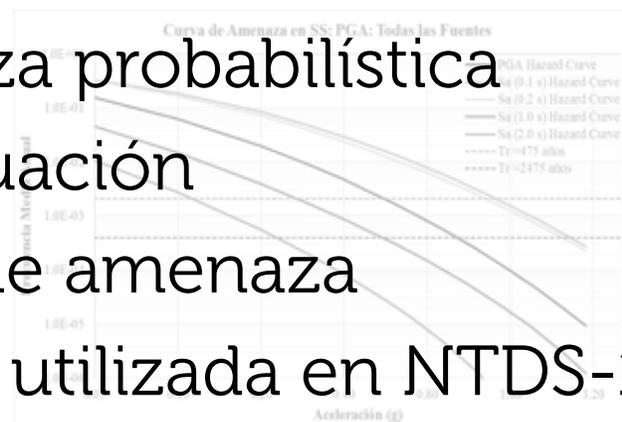
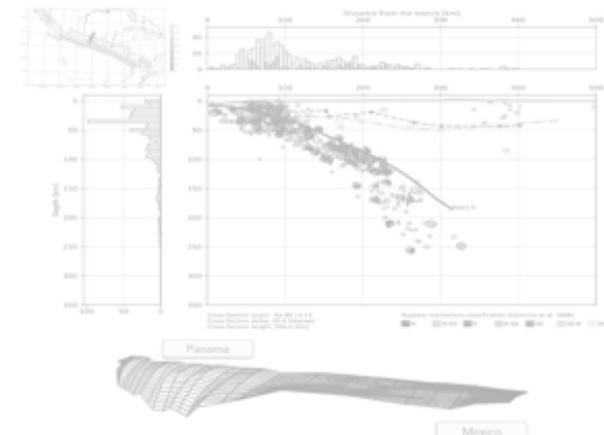
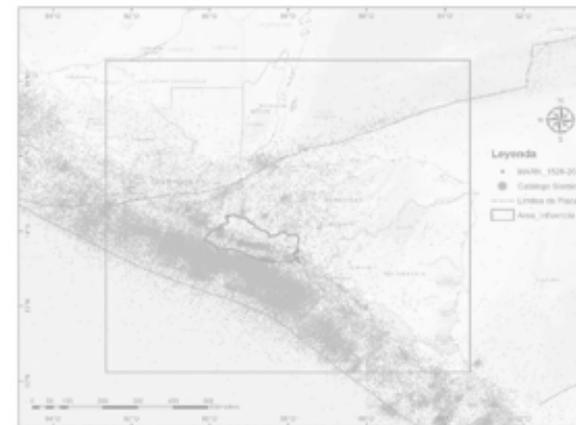
Resultados de amenaza sísmica en roca

Malla de resultados de amenaza: UHS y Curvas de Amenaza



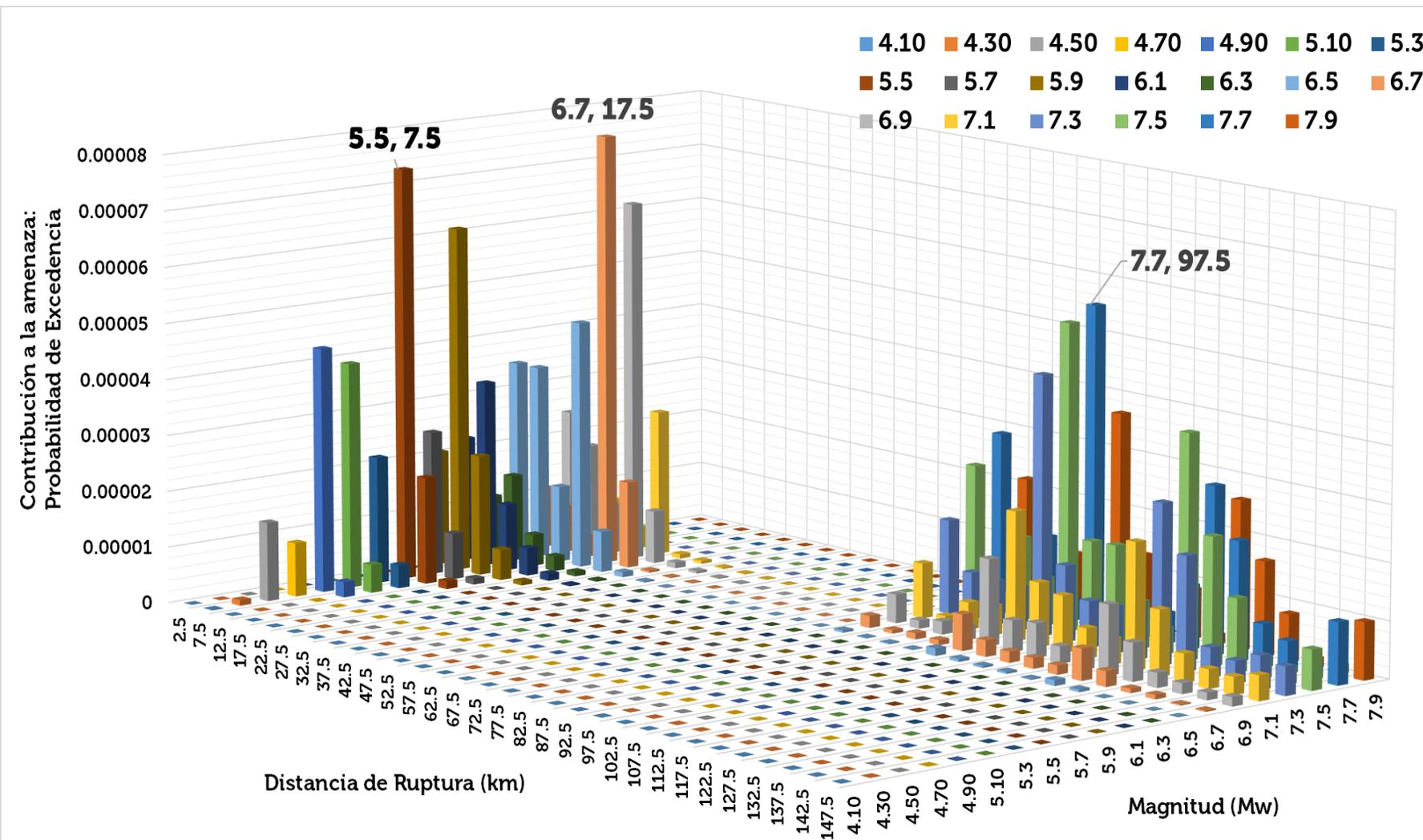
Contenido

1. Marco sismo-tectónico
2. Concepción de fuentes sísmicas
3. Catálogo sísmico utilizado
4. Modelación de fuentes sísmicas
5. Enfoque para cálculo de amenaza probabilística
6. Evaluación de modelos de atenuación
7. Antecedentes de evaluaciones de amenaza
8. Filosofía de cálculo de amenaza utilizada en NTDS-1994
9. Resultados de amenaza probabilística en suelo firme
- 10. Desagregación sísmica para períodos estructurales de interés**
11. Conclusiones



Resultados de desagregación sísmica

Período de retorno: 475 años – PGA. En San Salvador

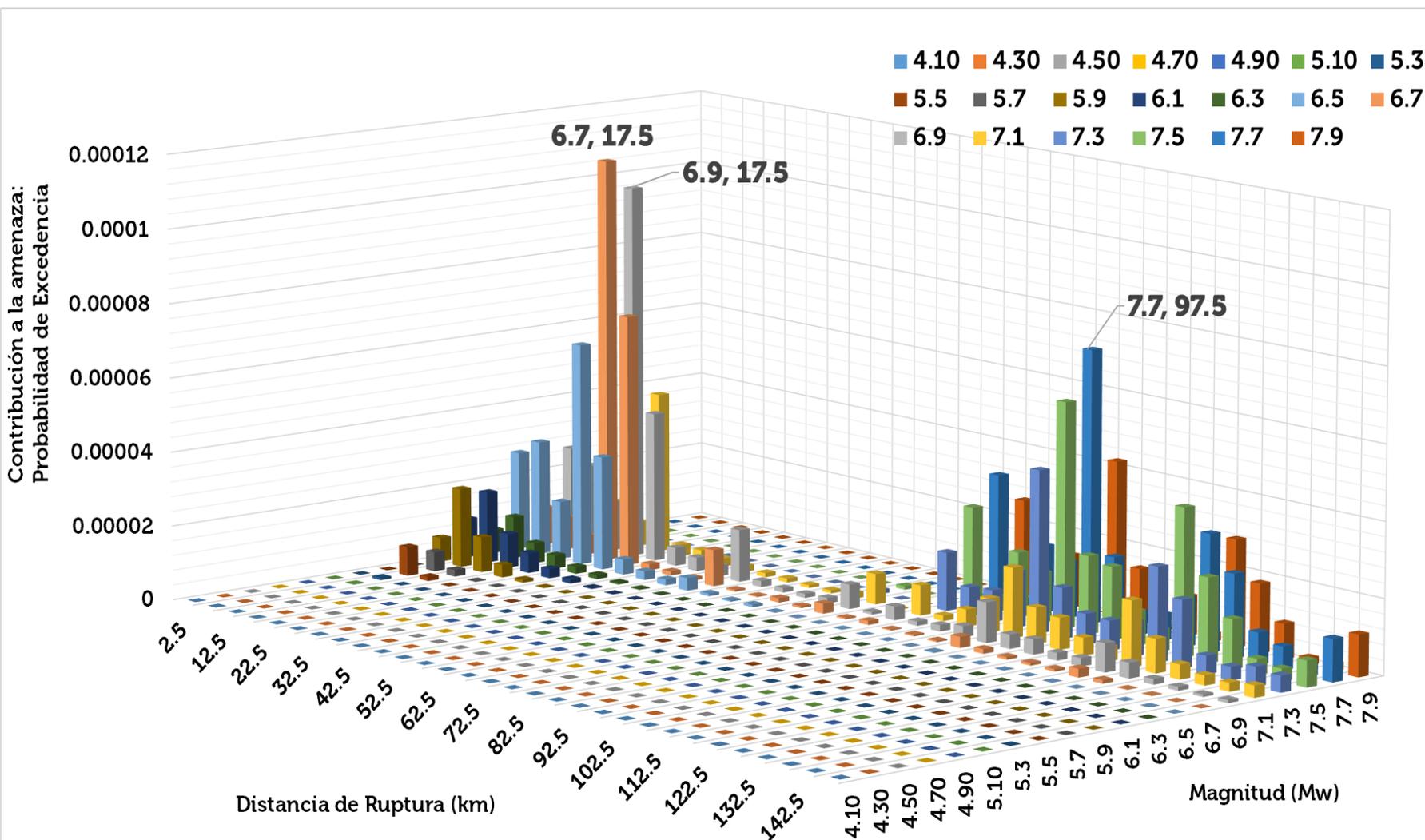


Un terremoto de **Mw 6.7** tiene casi la misma contribución al peligro sísmico que de un terremoto de **Mw 5.5** en la cadena volcánica

Ambiente tectónico	Poe	%
Active Shallow Crust	0.00118152	56%
Subduction Interface	3.52E-07	0%
Subduction IntraSlab	0.00092469	44%
Total	0.00210657	

Resultados de desagregación sísmica

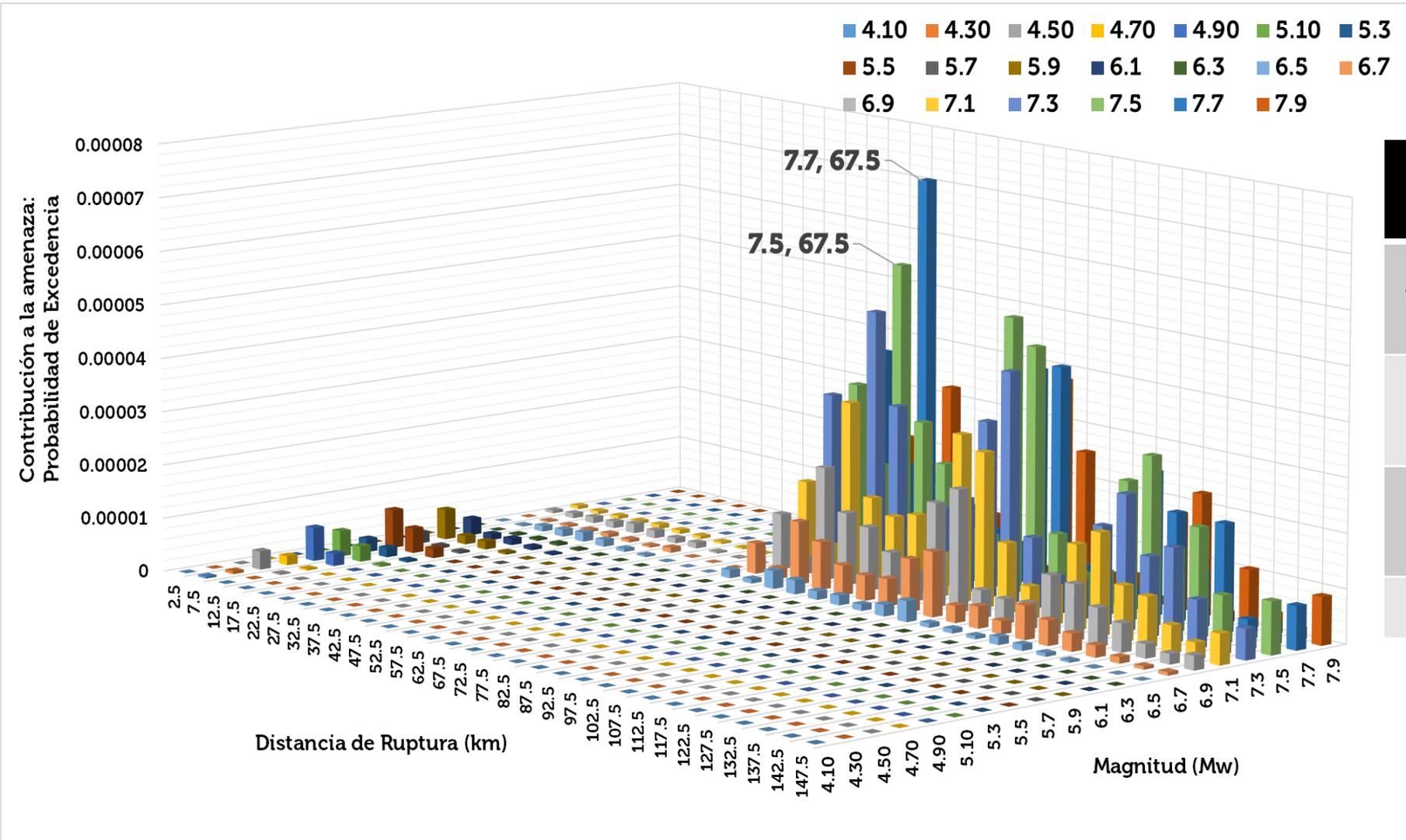
Período de retorno: 475 años – SA (1.0 seg). En San Salvador



Ambiente tectónico	Poe	%
Active Shallow Crust	0.00090842	43%
Subduction Interface	4.54E-05	2%
Subduction IntraSlab	0.00116753	55%
Total	0.00210657	

Resultados de desagregación sísmica

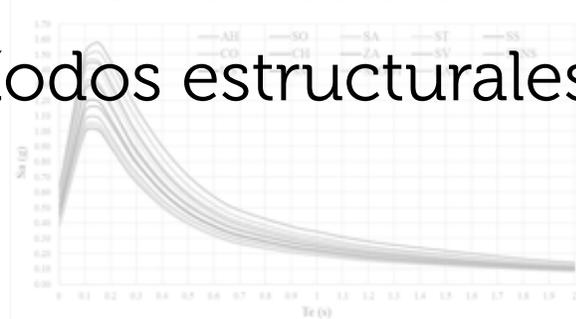
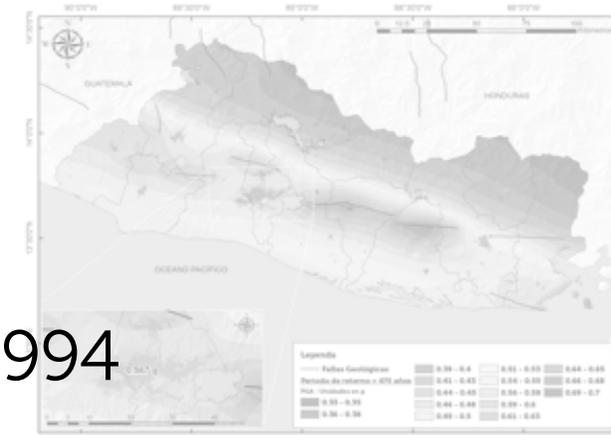
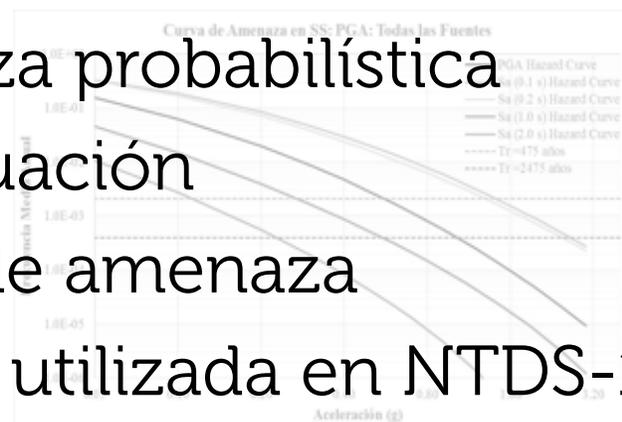
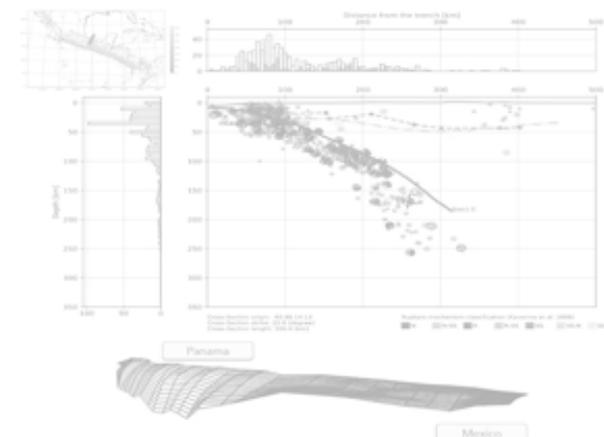
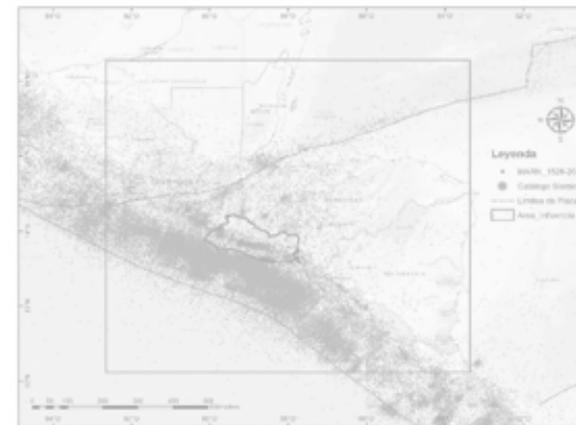
Período de retorno: 475 años – PGA. En Acajutla



Ambiente tectónico	Poe	%
Active Shallow Crust	8.73E-05	4%
Subduction Interface	4.69E-05	2%
Subduction IntraSlab	0.001980649	94%
Total	0.00210657	

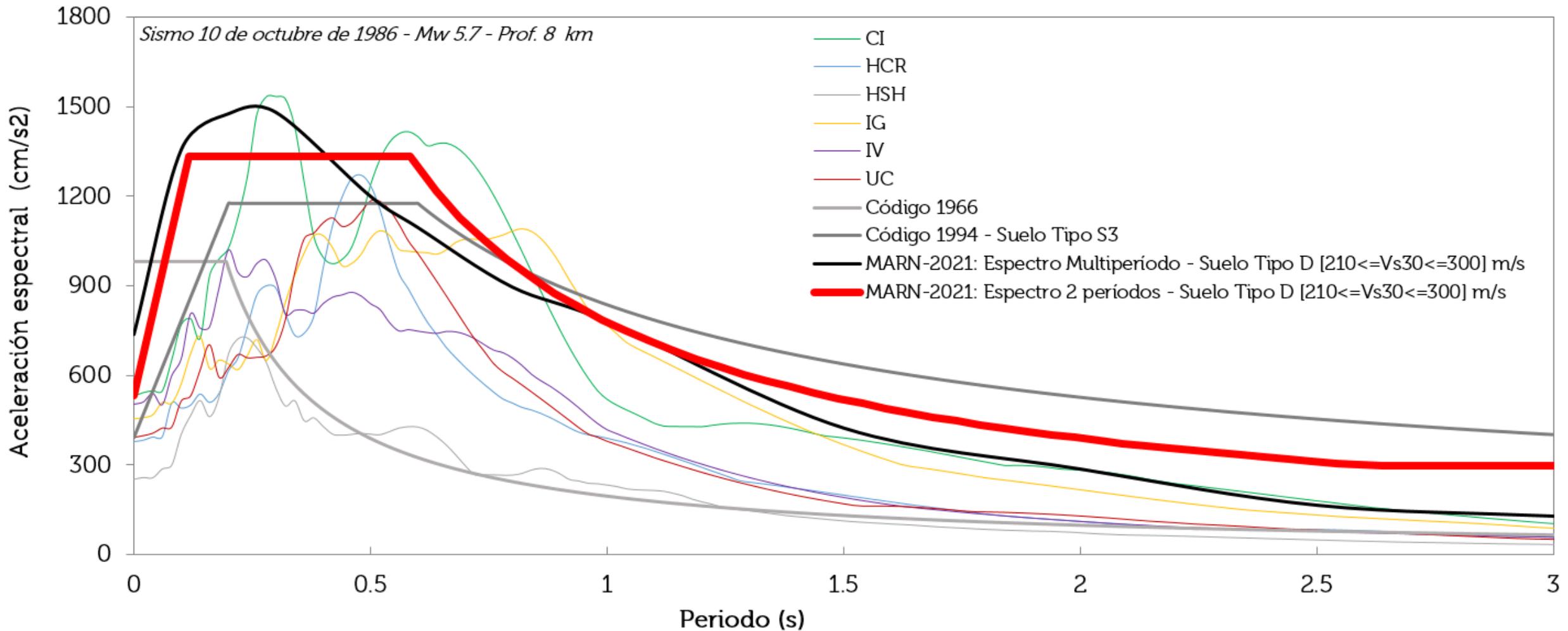
Contenido

1. Marco sísmo-tectónico
2. Concepción de fuentes sísmicas
3. Catálogo sísmico utilizado
4. Modelación de fuentes sísmicas
5. Enfoque para cálculo de amenaza probabilística
6. Evaluación de modelos de atenuación
7. Antecedentes de evaluaciones de amenaza
8. Filosofía de cálculo de amenaza utilizada en NTDS-1994
9. Resultados de amenaza probabilística en suelo firme
10. Desagregación sísmica para períodos estructurales de interés
11. Conclusiones



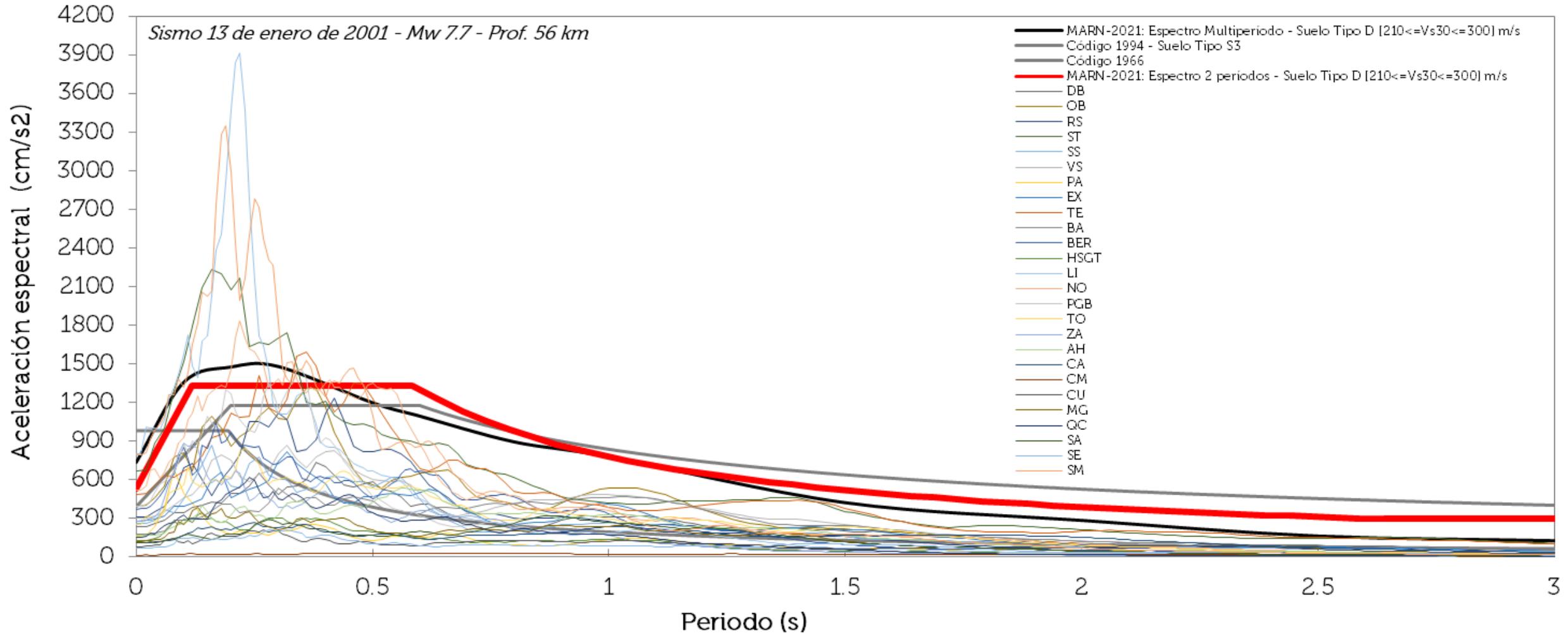
Conclusiones y recomendaciones

- 1) El Salvador presenta una amenaza sísmica considerada como **ALTA**, debido principalmente al aporte de la sismicidad local debido a la activación de fallas geológicas.



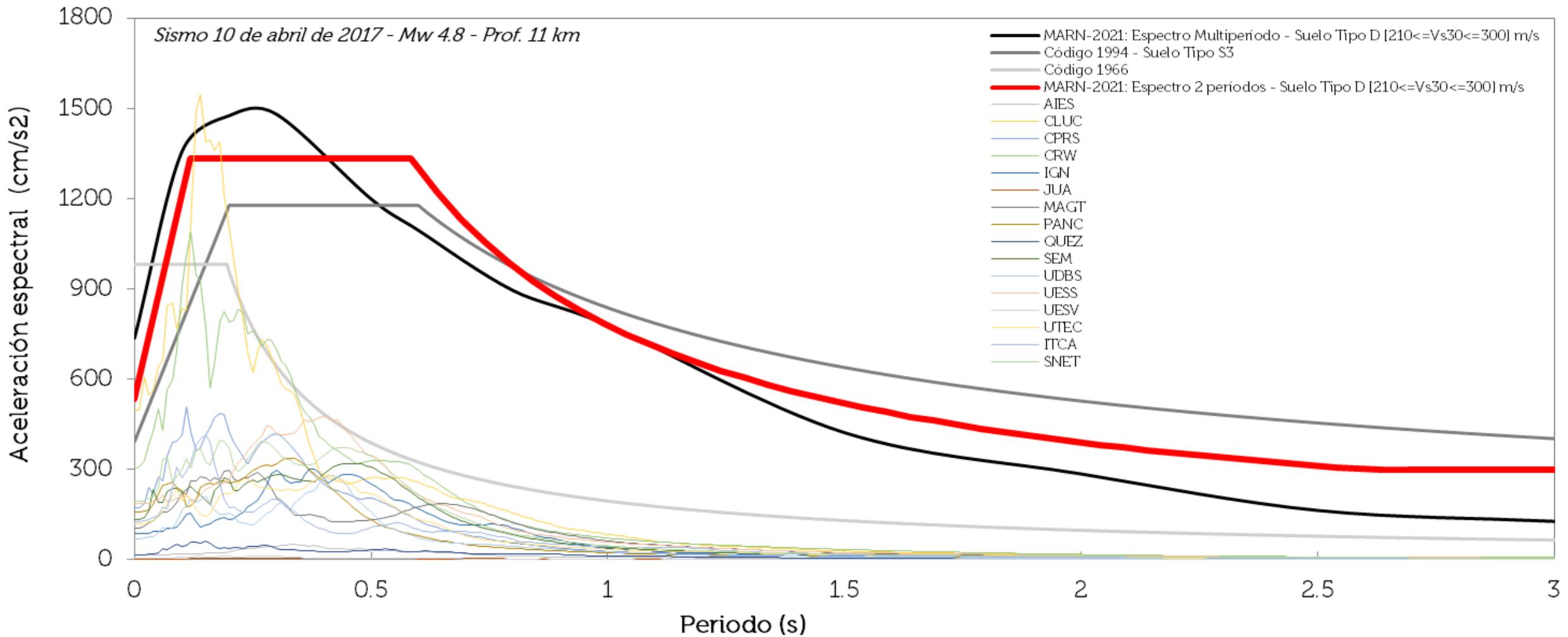
Conclusiones y recomendaciones

- 1) El Salvador presenta una amenaza sísmica considerada como **ALTA**, debido principalmente al aporte de la sismicidad local debido a la activación de fallas geológicas.



Conclusiones y recomendaciones

- 1) El Salvador presenta una amenaza sísmica considerada como **ALTA**, debido principalmente al aporte de la sismicidad local debido a la activación de fallas geológicas.



Conclusiones y recomendaciones

- 2) El catálogo sísmico utilizado abarca un período desde 1522 a diciembre de 2019, contabilizando **100,535 eventos sísmicos** con magnitudes que oscilan entre 1.5 y 8.1, logrando una regionalización por fuentes sísmicas gracias a la compilación de mecanismos focales y límites de profundidades.
- 3) Para la evaluación y selección de modelos de atenuación se utilizaron un total de **586 registros acelerográficos**, correspondientes a 80 eventos sísmicos; de los cuales 281(58), 185(12) y 120(10) registros(eventos) se asocian a las fuentes corticales ($M_w \geq 4$), subducción intraplaca ($M_w \geq 6.5$) e interfase ($M_w \geq 5.5$); respectivamente.
- 4) Es evidente que algunas fallas geológicas **no están mapeadas (ej. 1965, 1986, 2017, etc.)**. Esta es una de las razones por las que incluimos fuentes de **sismicidad distribuidas** ya que dan cuenta de la sismicidad que se produce en fallas desconocidas, con su recurrencia inherente.

Conclusiones y recomendaciones

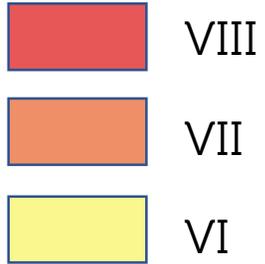
- 5) De acuerdo a la desagregación sísmica para un punto en San Salvador (emplazado en la cadena volcánica), la ocurrencia de escenarios sísmicos con $M_w 6.7$ y $M_w 5.5$, presentan aproximadamente la misma contribución al peligro sísmico.
- 6) La consideración de sismos de subducción intraplaca hasta $M_w 8.2$, respecto al máximo registrado de $M_w 7.7$; corresponden a un incremento promedio del 13% y 21% en los niveles de aceleración en San Salvador, para períodos cortos y largos; respectivamente.
- 7) Se sugiere considerar en estudios posteriores, otros modelos de ocurrencia temporal para el cálculo de probabilidades de rupturas en las fuentes sísmicas, es decir, **modelos dependientes del tiempo**.

Conclusiones y recomendaciones

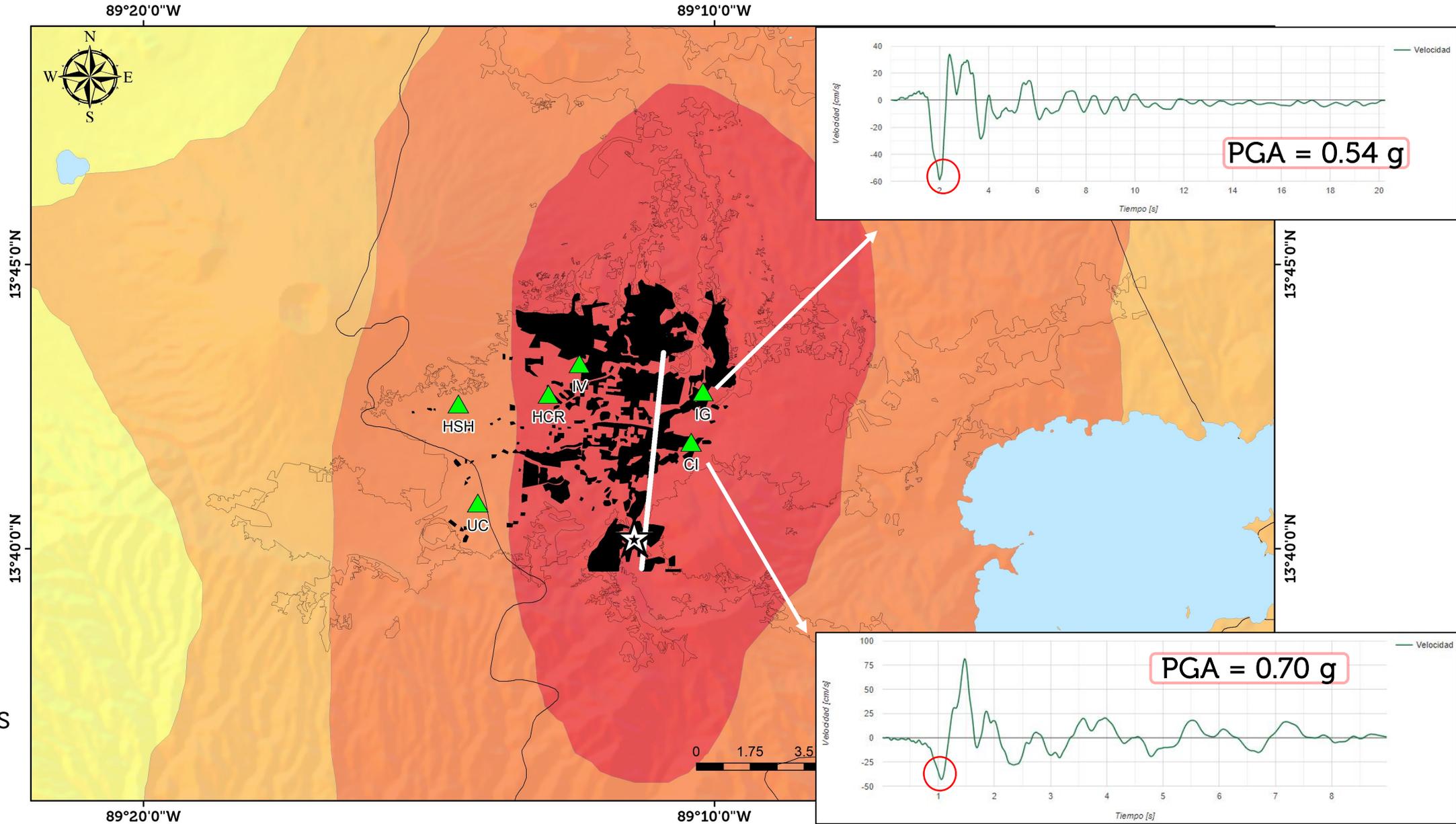
- 8) Se sugiere aplicar metodologías de **análisis determinístico (DSHA)** para las principales fallas geológicas y comparar sus resultados para diferentes períodos de retorno (principalmente los largos).
- 9) Para una consideración más robusta de la incerteza epistémica se sugiere engrandecer los árboles lógicos considerando la incertidumbre existente en la conformación **del catálogo sísmico, el modelo de fuentes sísmicas y los parámetros de recurrencia.**
- 10) Se recomienda considerar en estudios posteriores, modelos de atenuación corticales que tomen en cuenta el **efecto de directividad/falla cercana** de los sismos, es decir, concebidos con registros del tipo pulse-like (como lo observado en 1986); donde las componentes de largo período (arriba de 0.5 seg) se ven influenciados mayormente.

Conclusiones y recomendaciones

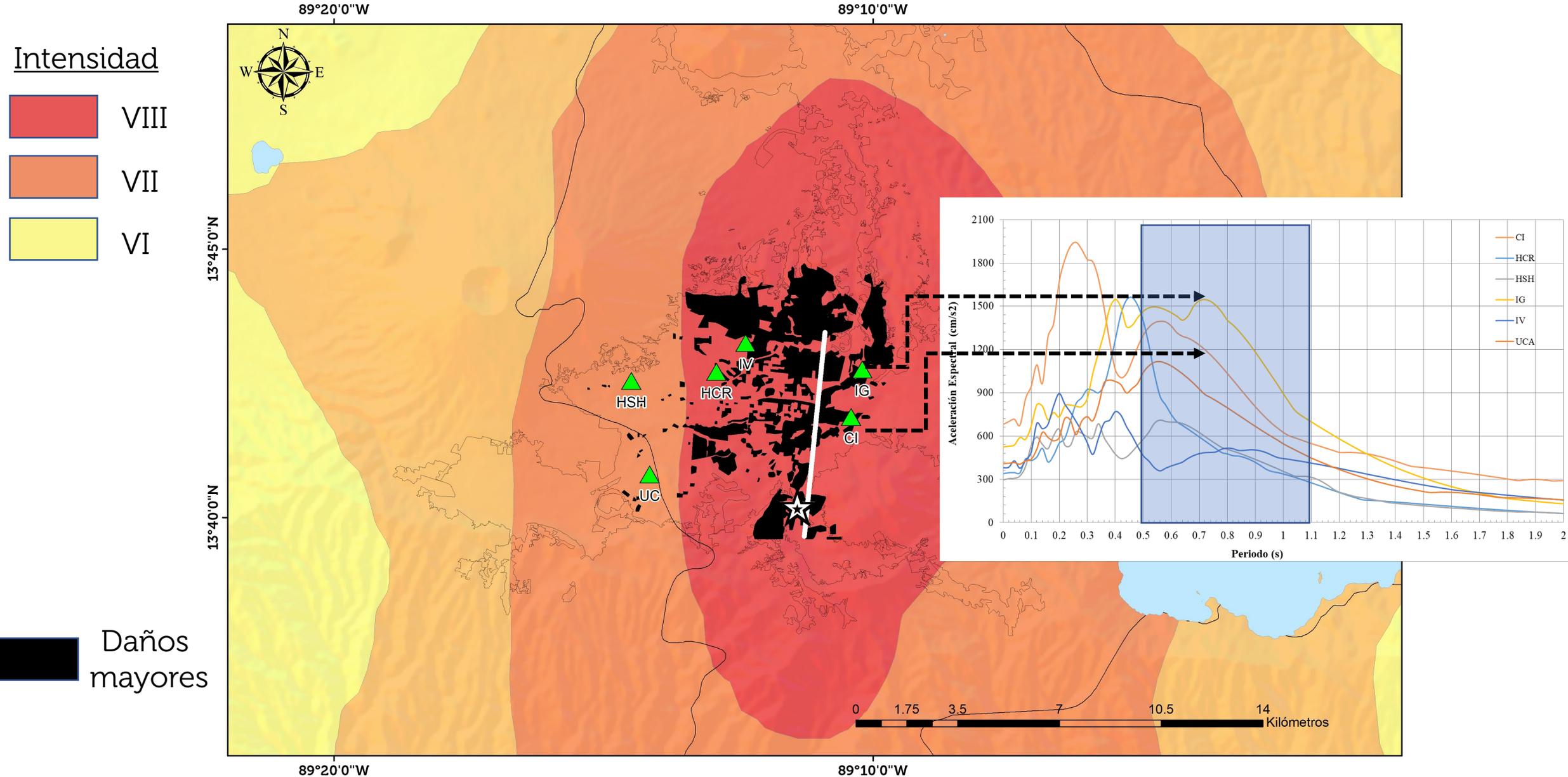
Intensidad



Daños mayores



Conclusiones y recomendaciones



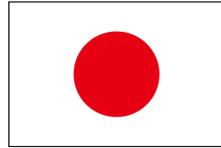


MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS
NATURALES

Gracias
Imixco@marn.gob.sv



Uníversidad Centroamericana
José Simeón Cañas



**Colaboración del
Pueblo Japonés**



MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE



MINISTERIO DE
OBRAS PÚBLICAS Y
DE TRANSPORTE