

Sismicidad, Propagación de ondas y PSHA

Xavier Vera Grunauer, Ph.D., D.GE., A.M. ASCE

Director

Instituto de Ingeniería (IIFIUC) de la Universidad Católica de
Santiago de Guayaquil.

Conceptos Generales de Sismología y Movimientos Vibratorios

- Generación de terremotos
- Ondas sísmicas
- Caracterización de movimientos del terreno
- Factores que afectan los movimientos del terreno
- PSHA vs DSHA

PLACAS LITOSFÉRICAS Y TECTÓNICA DE PLACAS

La Teoría de TECTONICA DE PLACAS explica y describe el origen y funcionamiento de las distintas construcciones y características morfológicas de la litosfera y superficie terrestres como resultado del movimiento de las placas litosféricas.

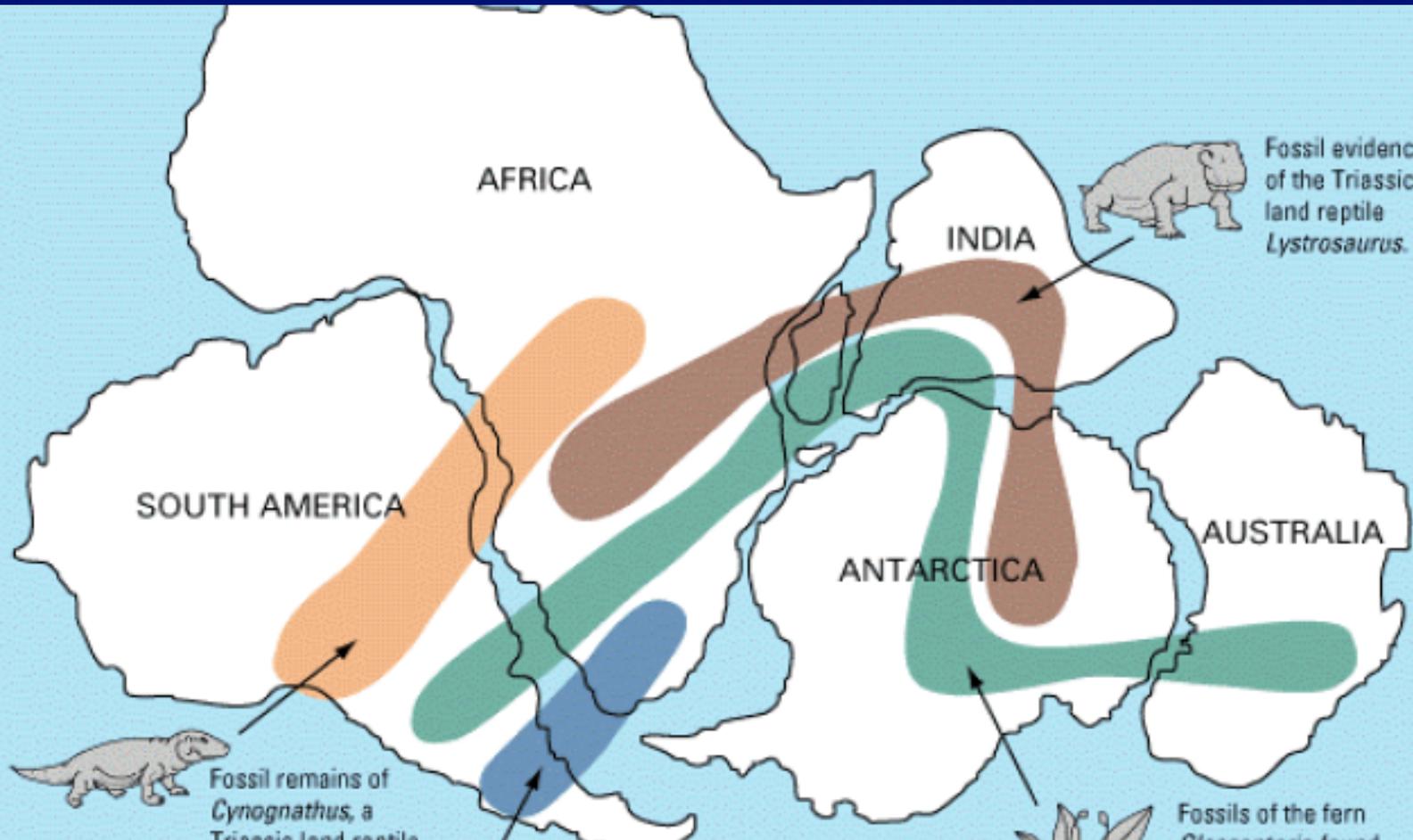
PLACAS LITOSFÉRICAS Y TECTÓNICA DE PLACAS

*Es decir que ...
la superficie
rocosa de la
Tierra se
mueve!*

*PANGEA, 250
millones de
años*



PANGEA



AFRICA

INDIA

SOUTH AMERICA

ANTARCTICA

AUSTRALIA

Fossil evidence of the Triassic land reptile *Lystrosaurus*.



Fossil remains of *Cynognathus*, a Triassic land reptile approximately 3 m long.



Fossil remains of the freshwater reptile *Mesosaurus*.



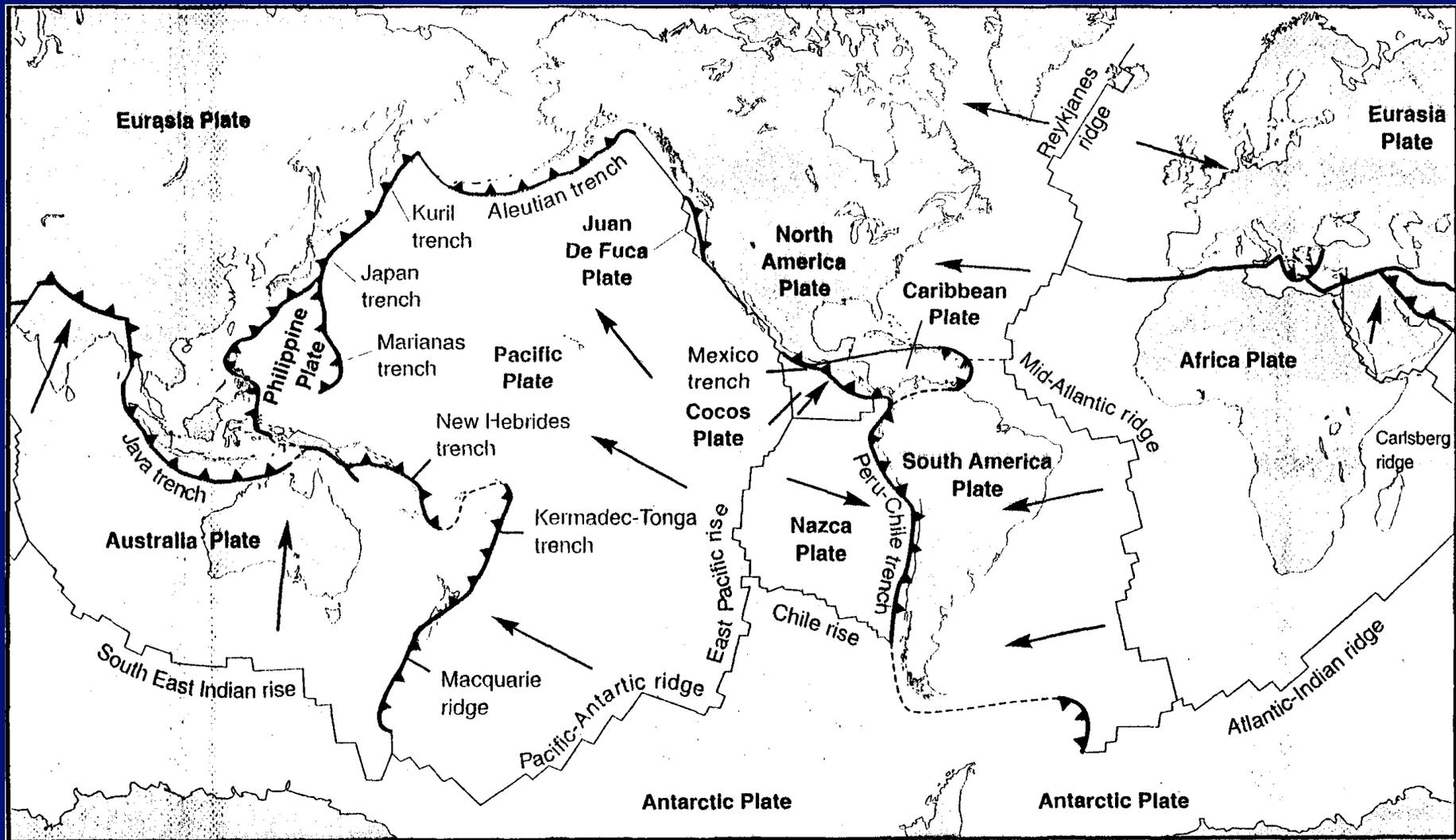
Fossils of the fern *Glossopteris* found in all of the southern continents, show that they were once joined.



Composición de la Tierra

Corteza

- La Corteza se divide en secciones o “Placas”
- 6 Placas “Continetales”:
 - África
 - América
 - Antártica
 - Australia – India
 - Euroásica
 - Pacífica
- Varias menores
 - Por ejemplo: NASCA frente al Ecuador



- Key
- Subduction zone
 - Strike-slip (transform) faults
 - Uncertain plate boundary
 - Ridge axis

Generación de Terremotos

Placas en movimiento → “Continental Drift”

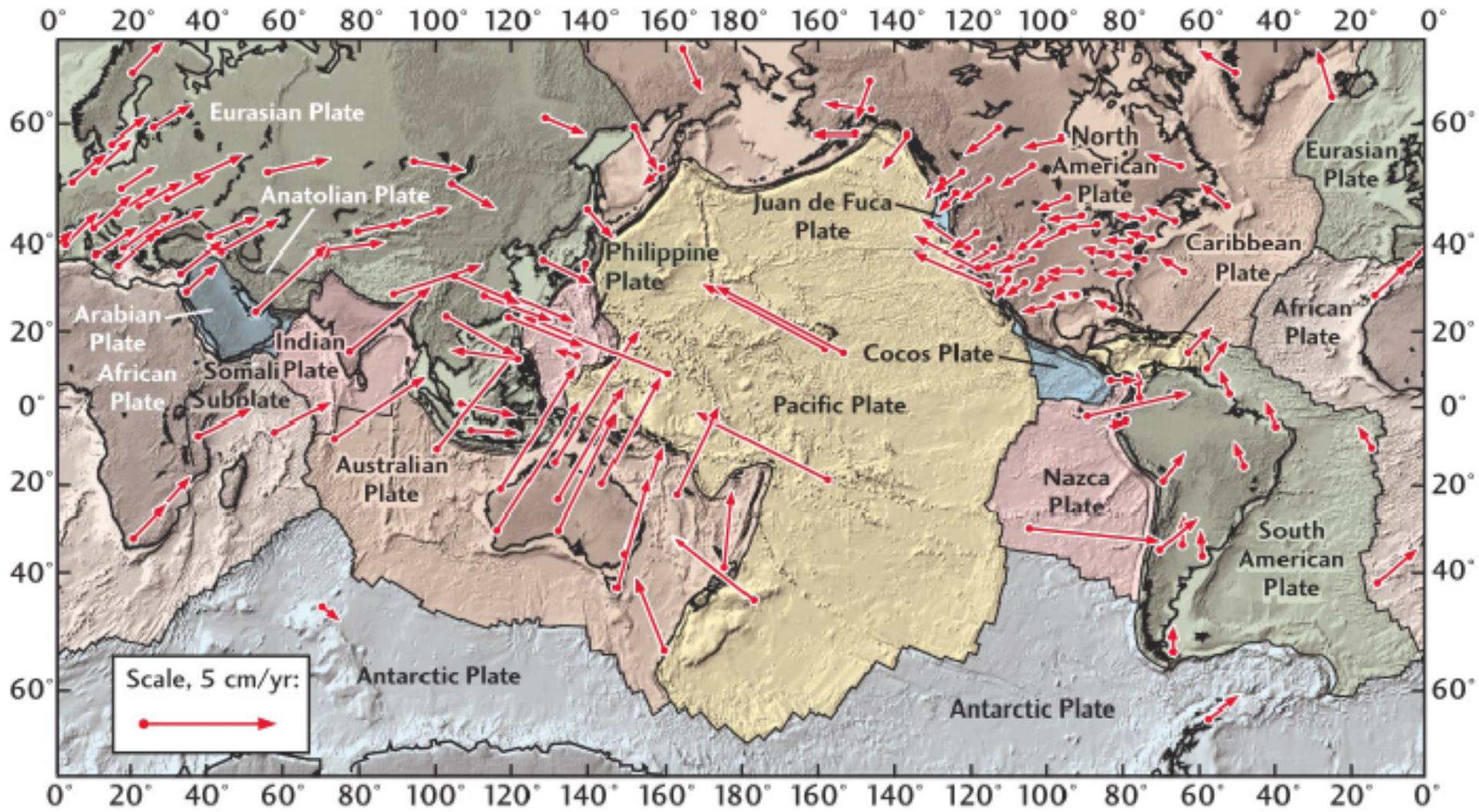
¿Qué causa el movimiento?

- Corrientes de convección en el manto
- Peso de la porción de corteza en subducción (“subduction pull”)
- Empuje de corteza regenerada en cordilleras sub-oceánicas

Generación de Terremotos

La mayoría de los terremotos ocurren en la zona de contacto entre dos placas debido al movimiento relativo entre estas placas.

Generación de Terremotos



Generación de Terremotos

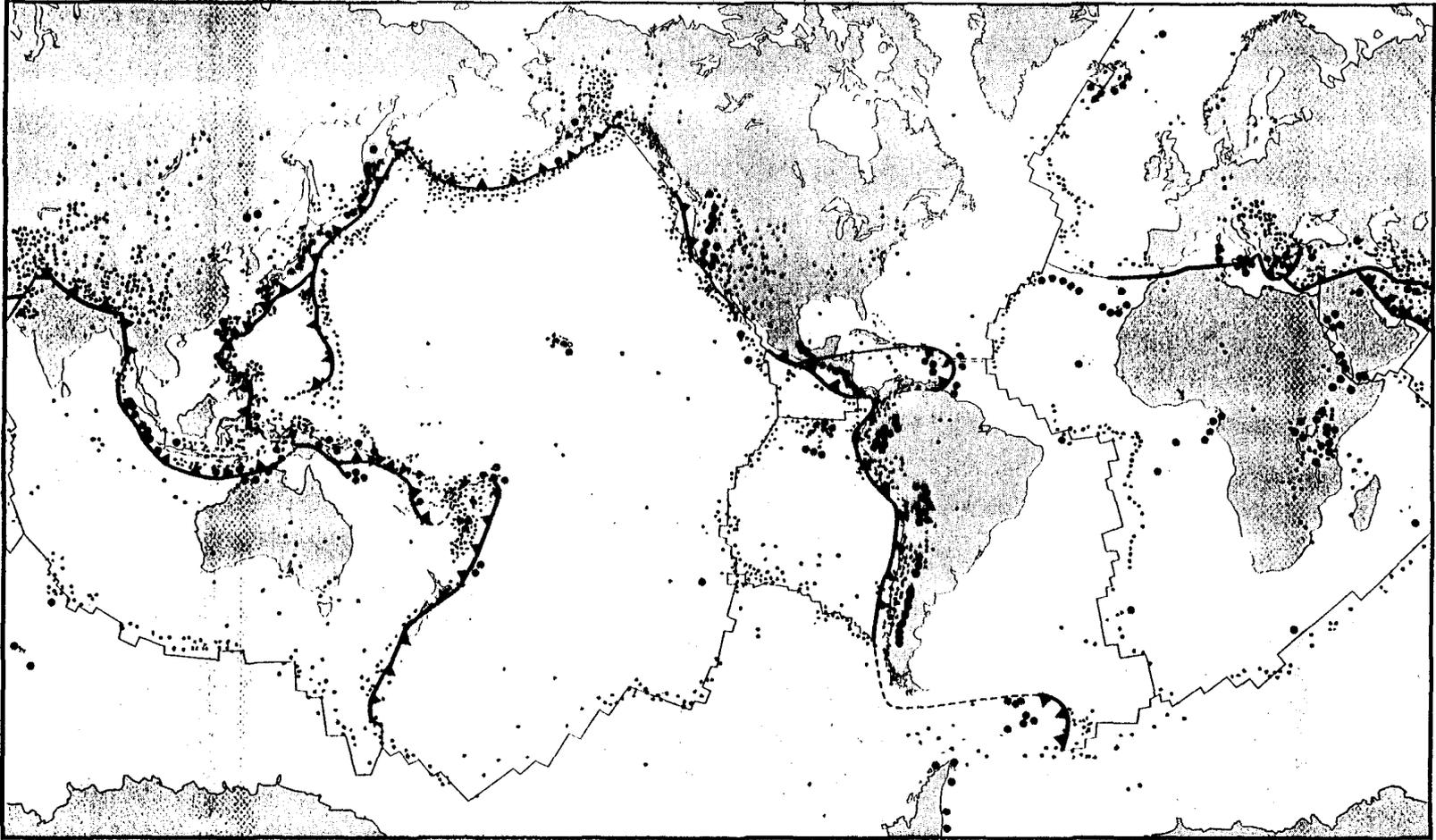
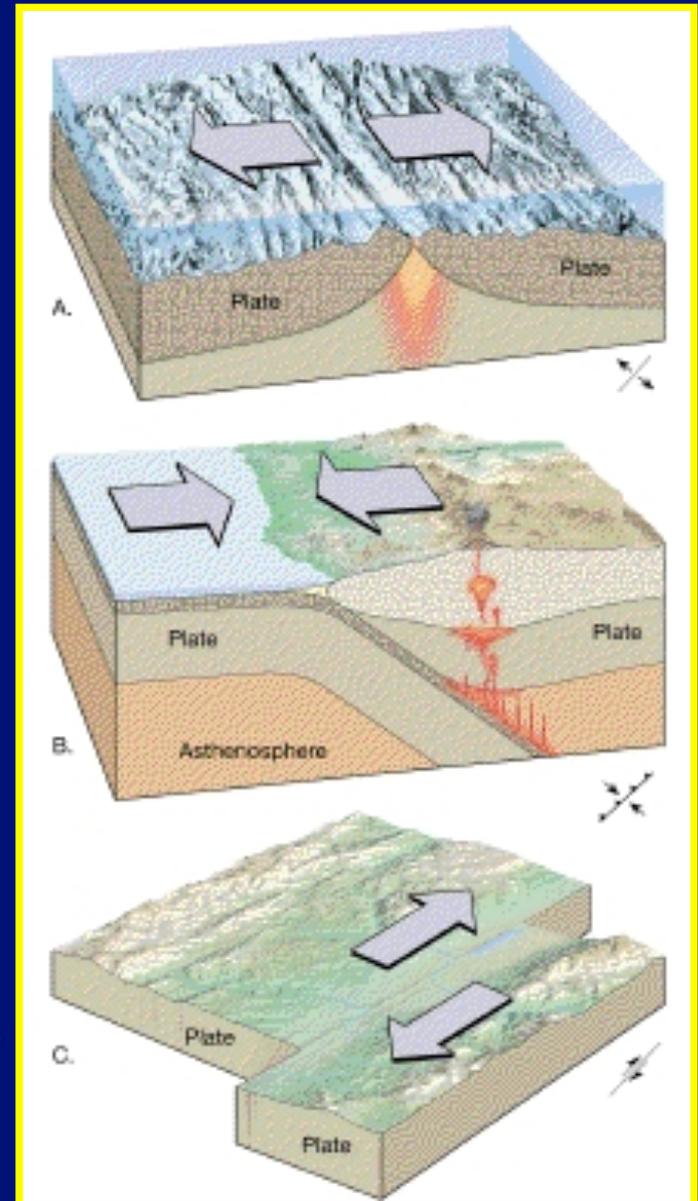


Figure 2.10 Worldwide seismic activity. The dots represent the epicenters of significant earthquakes. It is apparent that the locations of the great majority of earthquakes correspond to the boundaries between plates. (After Bolt, 1988.)

Generación de Terremotos

El tipo de contacto entre dos placas determina el tipo de terremotos que pueden llegar a generarse

- Contacto Divergente
- Contacto Convergente
- Contacto Transcurrente



Generación de Terremotos

Zonas Divergentes

- Generación de corteza
- Prevalencia de esfuerzos de tensión
- Asociada con actividad volcánica en cordilleras suboceánicas (por ej. Islandia)

Generación de Terremotos

Zonas Convergentes

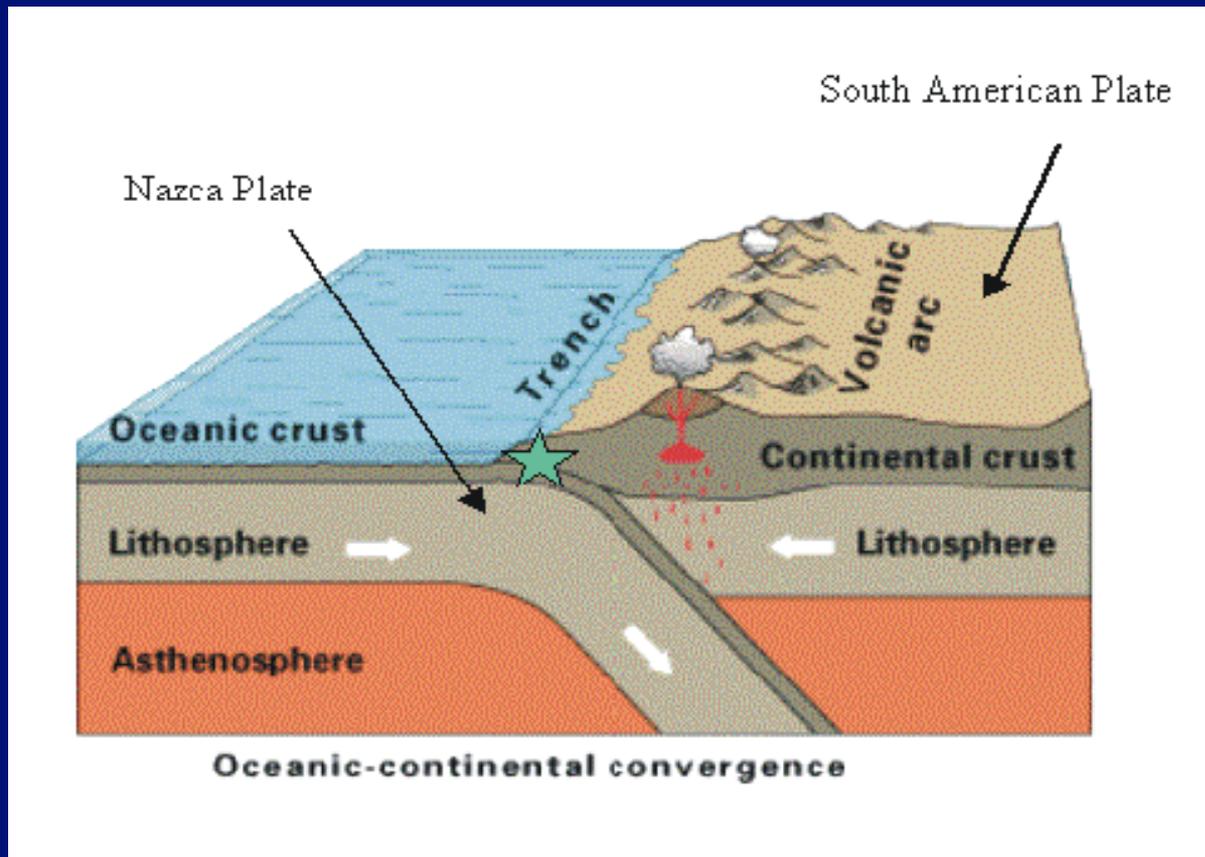
Colisión de placas:

- Oceánica con Oceánica
- Continental con Continental (por ej. Himalaya)
- Oceánica con Continental (por ej. Subducción en Ecuador)

Generación de Terremotos

Zona de Subducción

Placa Oceánica (más pesada) se hunde bajo la placa Continental

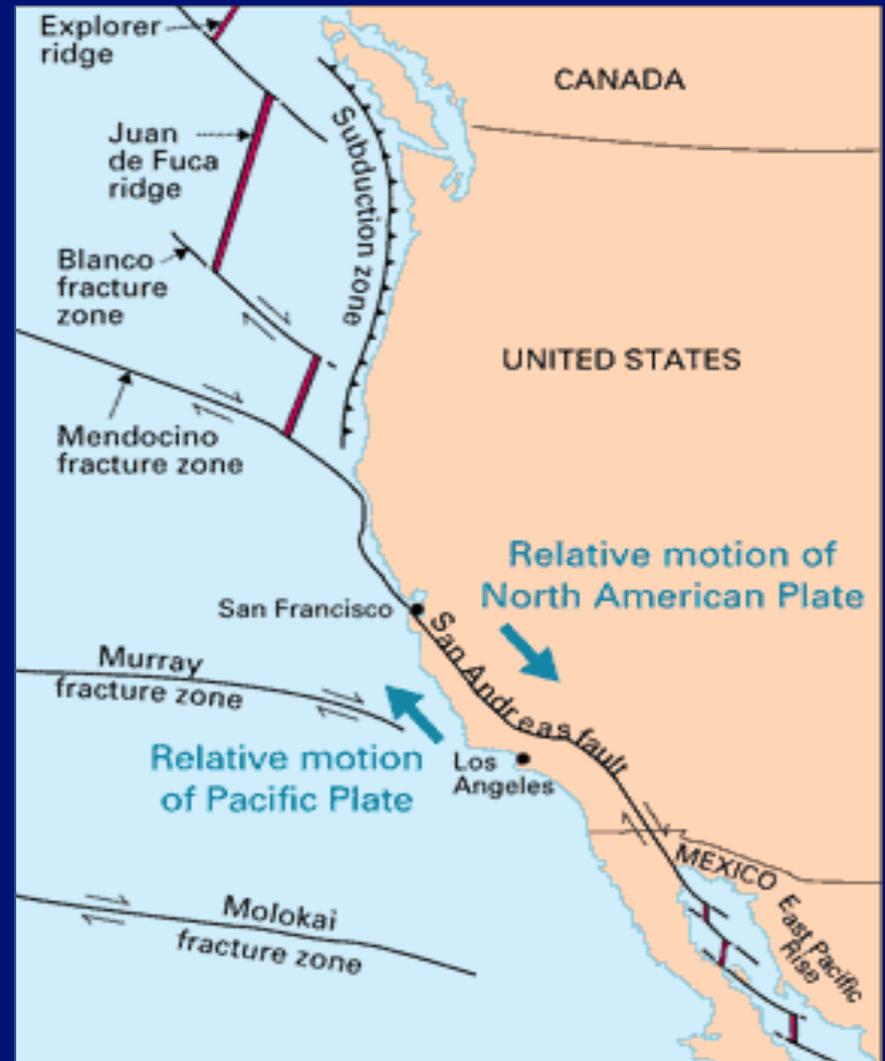


Generación de Terremotos

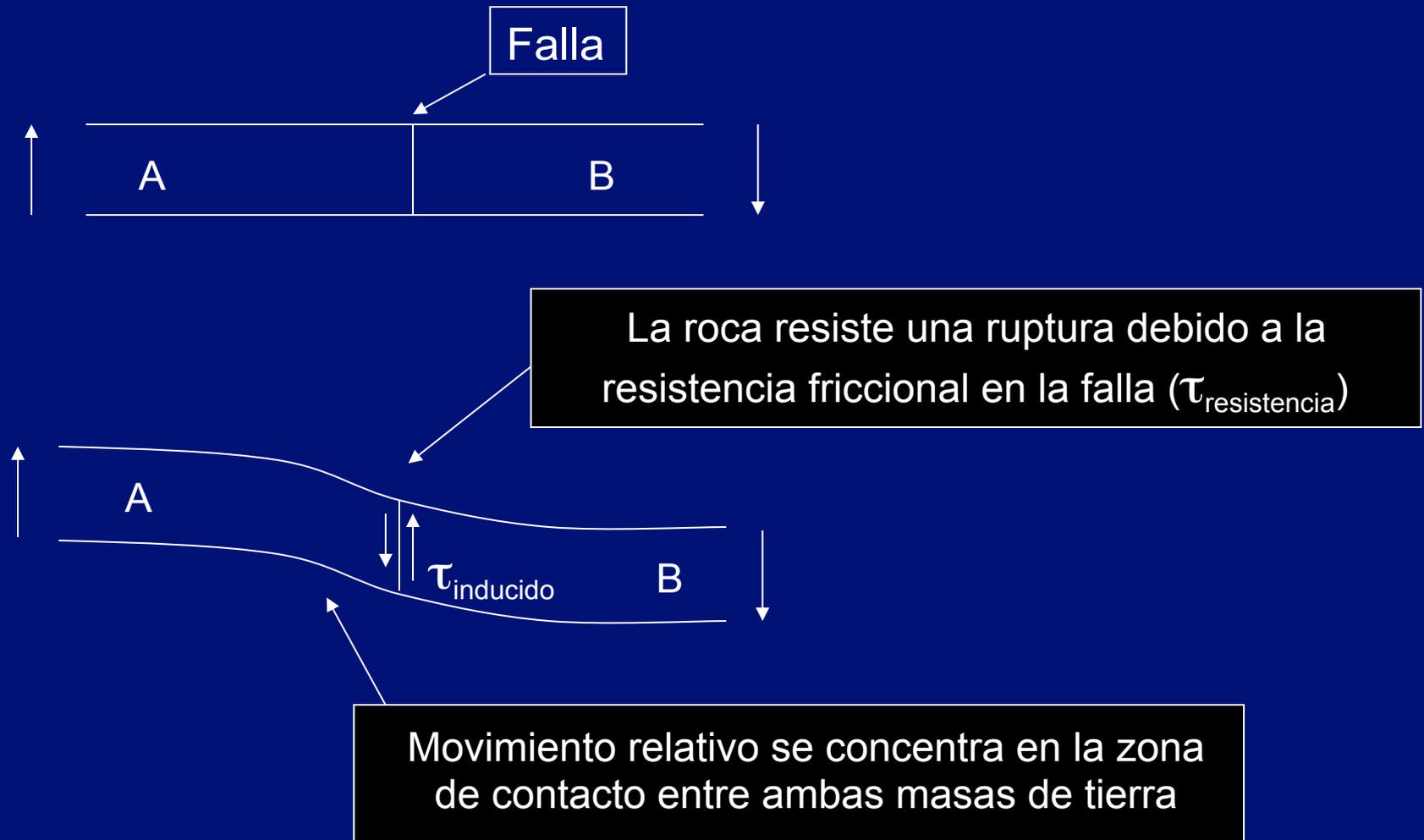
- La corteza es destruída (en general tiene que mantener un balance)
- Tipos de terremotos:
 - “**Intraplate**” → Dentro de la placa oceánica que se hunde bajo la placa continental (intraplaca, zona de Benioff)
 - De tipo de extensión
 - Debido a flexión en la corteza
 - “**Interplate**” → En el límite entre las dos placas
 - Terremoto de tipo de compresión (interface, Mega-strust)

Contacto Transcurrente

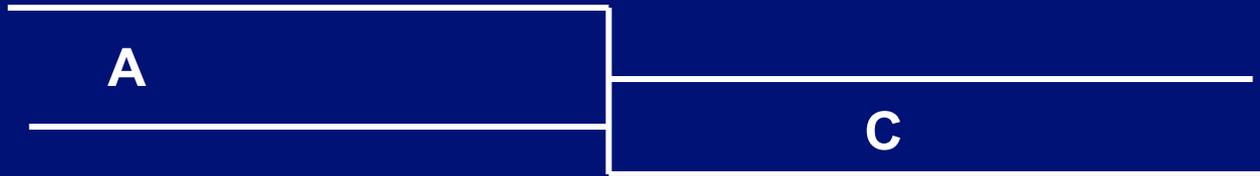
- Placas se mueven en una dirección paralela a la zona de contacto
- Corteza no se genera ni destruye



Teoría de “Elastic Rebound”



Teoría de “Elastic Rebound”



Cuando: $\tau_{\text{inducido}} > \tau_{\text{resistencia}}$

- Movimiento ocurre
- La energía de deformación se libera repentinamente como:
 - Ondas sísmicas
 - Energía sonora
 - Calor

Teoría de “Elastic Rebound”

Implicaciones Importantes

- Se puede estimar la energía acumulada en una falla:

$$M_o = \mu A_f D_{ave} \text{ (momento sísmico)}$$

$\mu \rightarrow$ Módulo de corte

$A_f \rightarrow$ Área de la falla

$D_{Ave} \rightarrow$ Desplazamiento promedio en la falla

- M_w (magnitud de momento) = $f (M_o)$

Generación de Terremotos

La zona tectónica influencia el tipo de terremoto

Zona de Divergencia

- A_f es pequeña
- Esfuerzos tensionales \rightarrow menor $\tau_{\text{resistencia}}$
- Se acumula menor D_{ave}
- Terremotos pequeños ($M_w < 7$)

Zona de Convergencia

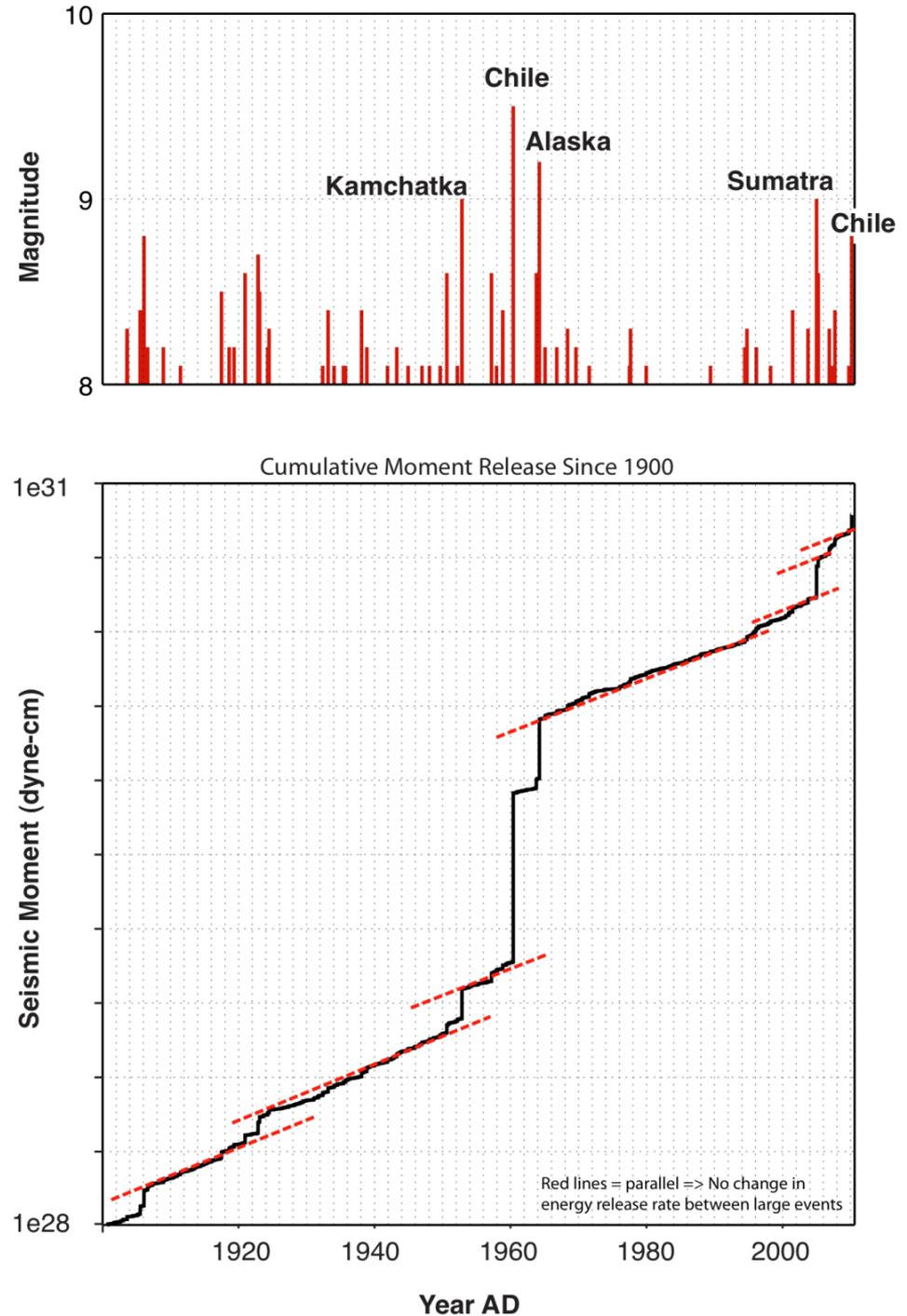
- A_f es mayor
- $\tau_{\text{resistencia}}$ mayor
- Grandes terremotos (por ej.: Chile, 1960; $M_w = 9.5$, Ecuador, 1906; $M_w = 8.8$; Ecuador 2016, $M_w = 7.8$)

Zona Transcurrente

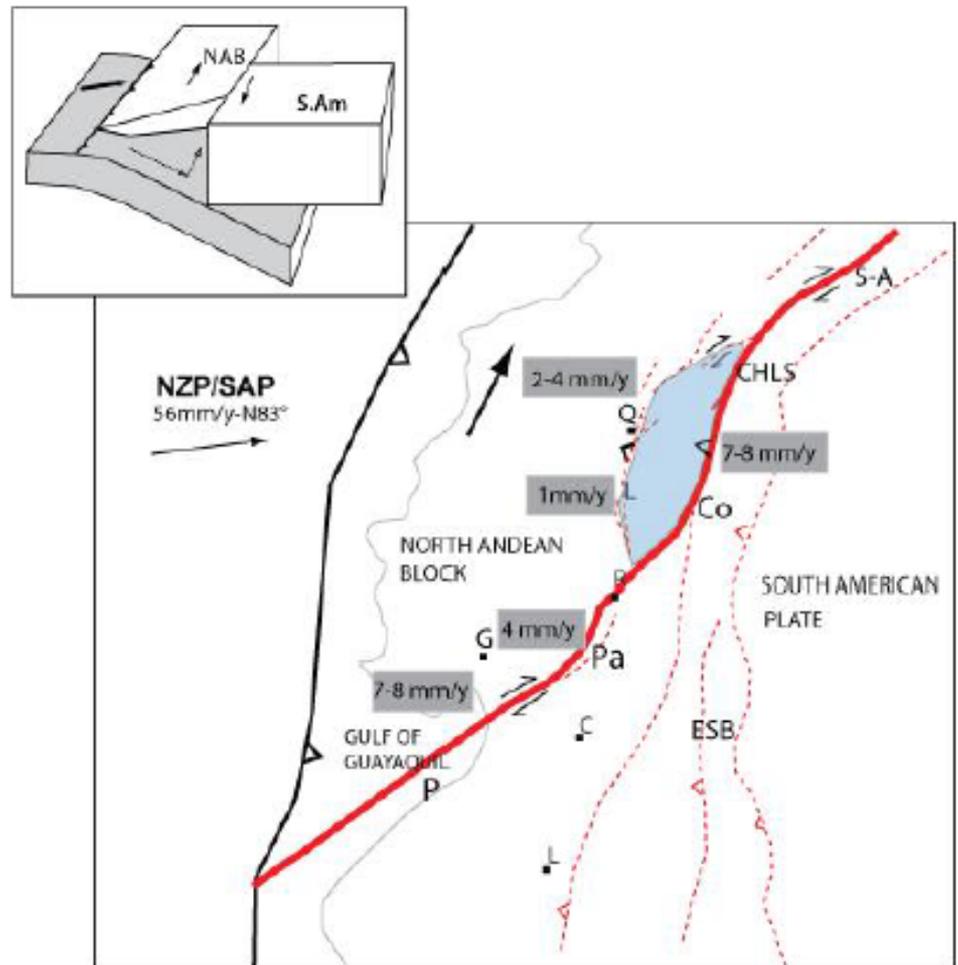
- Magnitud limitada por grosor de corteza

No existe cambio en
la tasa de liberación
de energía
entre grandes eventos

Fuente:
USGS



Alvarado, 2012



North Andean Block limit:

Puná P

Pallatanga Pa

Cosanga Co

Chingual -La Sofía CHLS

Sibundoy - Algeciras

Quito Q

Latacunga L

Riobamba R

Guayaquil G

Cuenca C

Loja L

Eastern Subandean Belt ESB

Convergence Nazca Plate-South American Plate NAB/S.Am

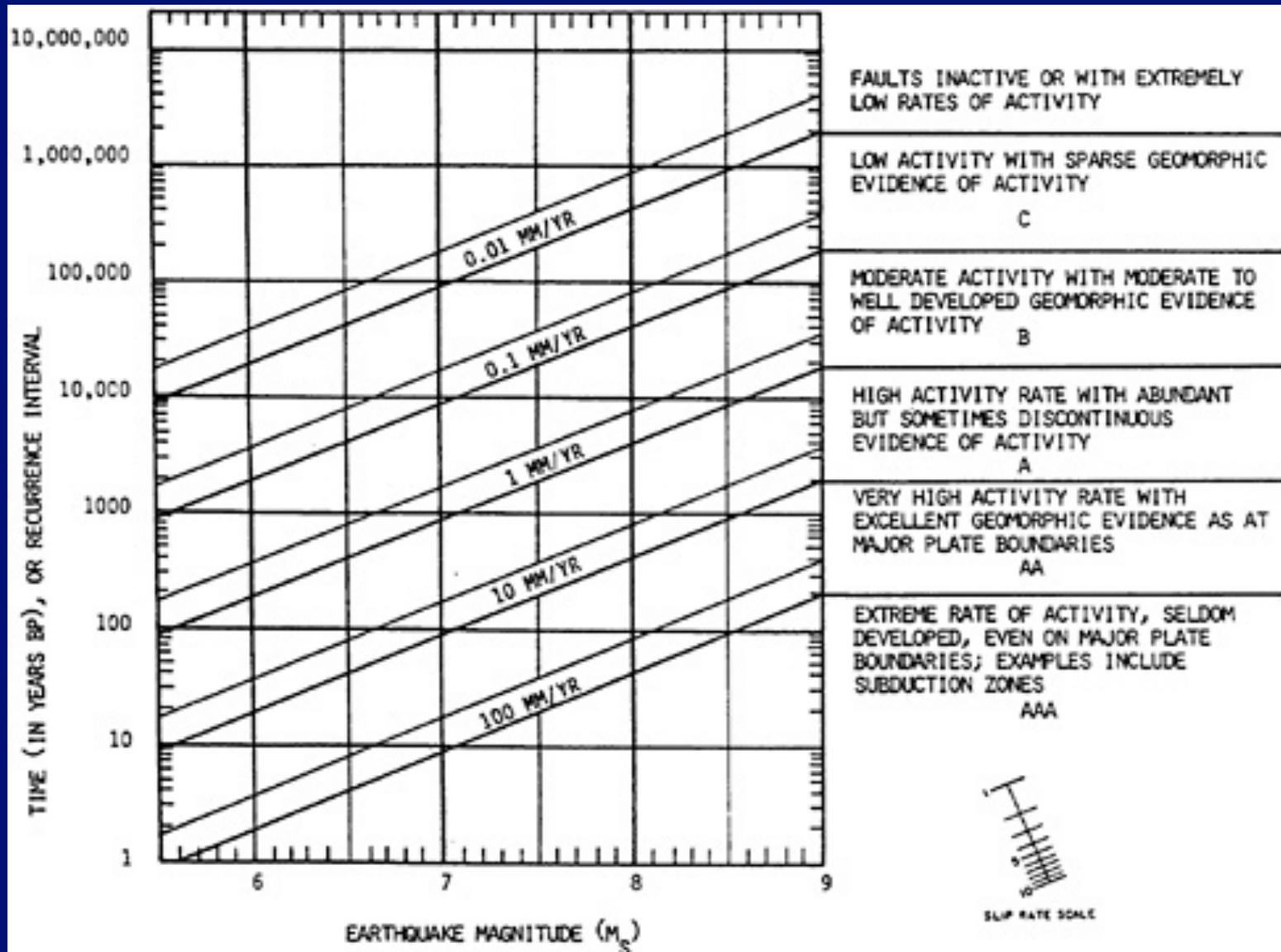
4 mm/y relative GPS velocity

Quito-Latacunga micro block

TERREMOTOS DESTRUCTIVOS EN ECUADOR

- **Esmeraldas - 1906, 1958, 1976**
- **Guayaquil - 1942, 1980**
- **Ambato - 1949**
- **Loja - 1970**
- **Oriente - 1987, 1995**
- **Quito - 1990**
- **Pujilí - 1996**
- **Bahía de Caráquez – 1998**
- **Muisne, Pedernales - 2016**

Tasa de desplazamiento de una falla SR, actividad sísmica



Generación de Terremotos

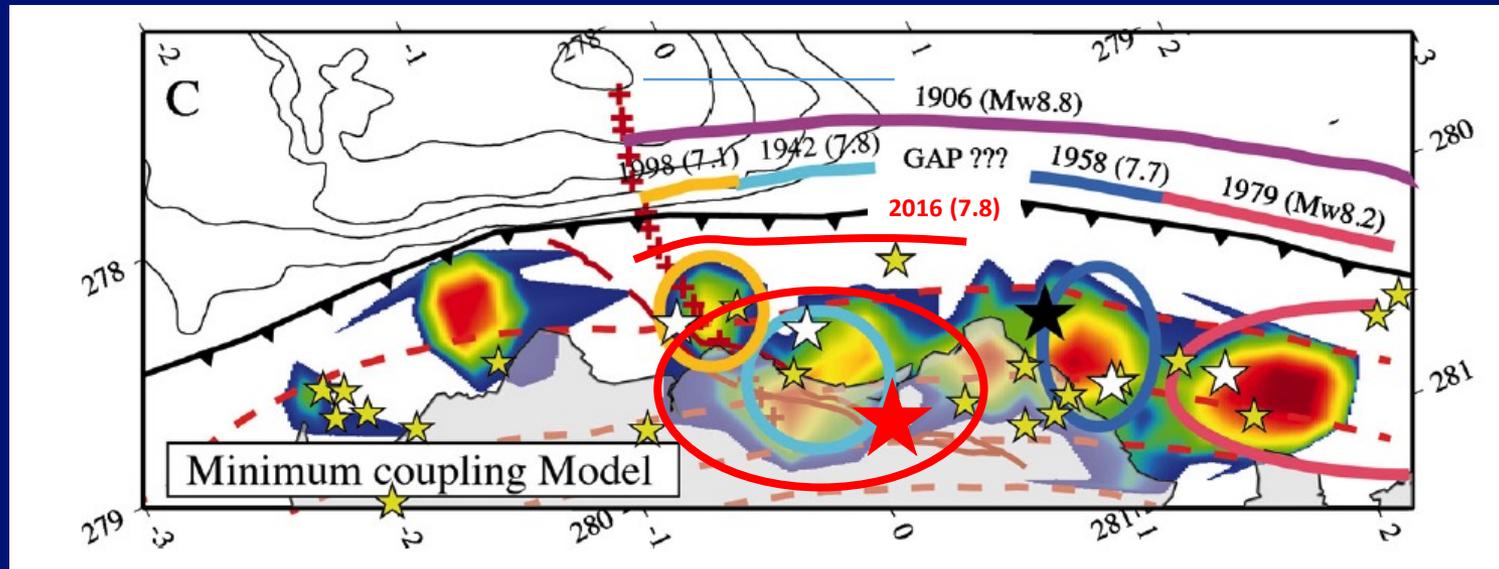
Distribución temporal de terremotos

Mientras mayor sea el tiempo transcurrido desde el último sismo en una falla dada, más energía se acumula, y mayor es la probabilidad de que ocurra un terremoto

Generación de Terremotos

Percepción: “... las rupturas de 1942, 1958, 1979 cubrían el area de rupture del 1906, por lo tanto no existía gap sísmico.”

Chlieh et al. (2014): “Se reconsidera usando un modelo ISC (Interseismic couple model): **Existe unas asperidad entre las rupturas de 1942 y 1958 ... la cual no se ha roto desde 1906. un evento con $M_w > 7.5$ con un Tsunami puede ocurrir en la próxima década....”**



Caracterización de Fallas

Fallas: no son homogéneas

Réplicas

- Liberación de energía en zonas más resistentes de la falla que no cedieron durante el terremoto principal.

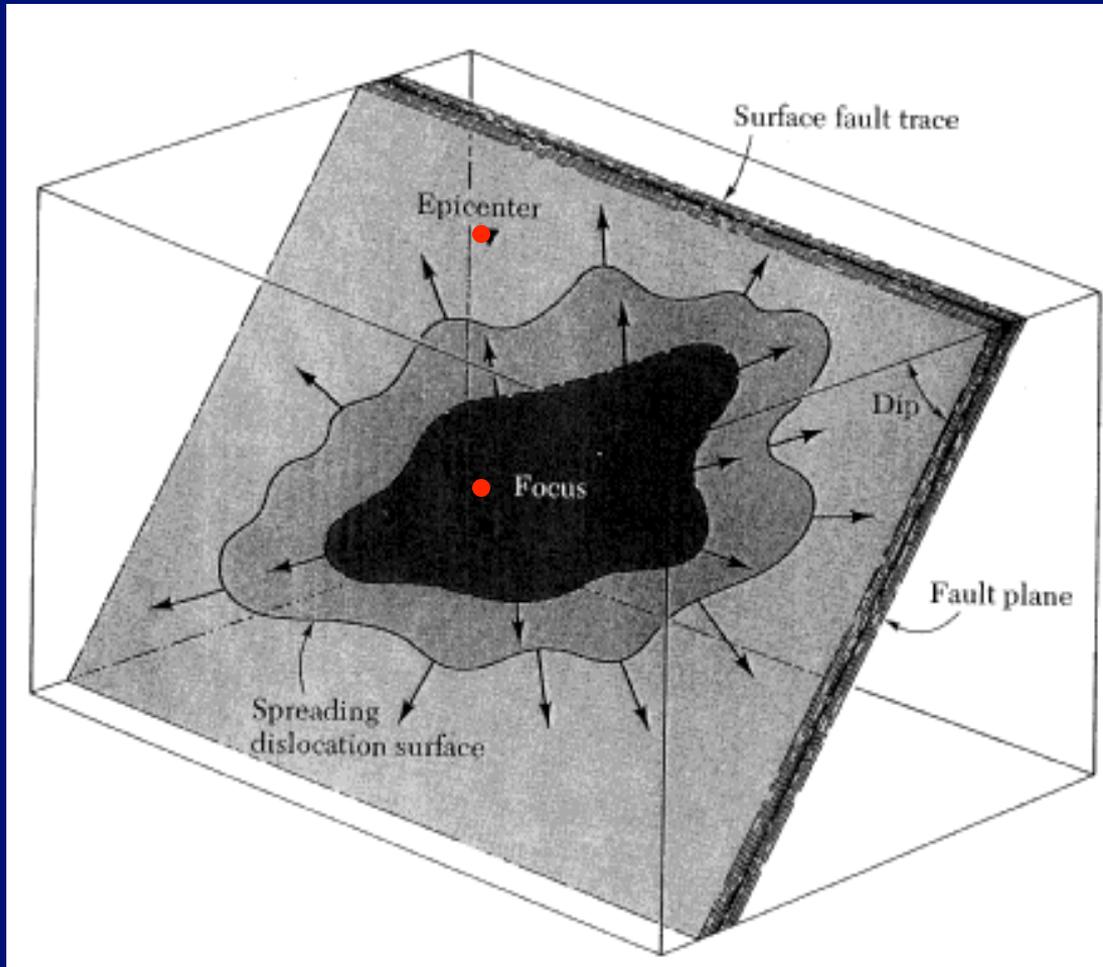
“Foreshocks”

- Terremotos menores que preceden al terremoto principal
- Se originan de zonas “débiles” que ceden antes que el resto de la falla lo haga
- Terremotos de gran magnitud pueden ser “foreshocks” si luego sobreviene un terremoto mayor en la misma falla

Predicción de Terremotos

- Espacial y Temporal
 - *Espacial:* Conocimiento del régimen tectónico permite la predicción espacial
 - *Temporal:* ¿Cuándo ocurre el sismo?
- Investigación: Fuerte inversión en China, URSS y EE.UU
- Se asume que existen ciertos precursores
 - Cambios en propiedades de rocas, levantamiento del suelo, emisiones de radón
 - Observación de “foreshocks”
- Pocos casos documentados de una predicción correcta del momento de ocurrencia de un terremoto
 - **No es fiable como método de prevención de daños**
- Predicción de Riesgo Sísmico:
 - Predicción de intensidad en un lugar dado
 - **Permite una planificación racional de recursos**

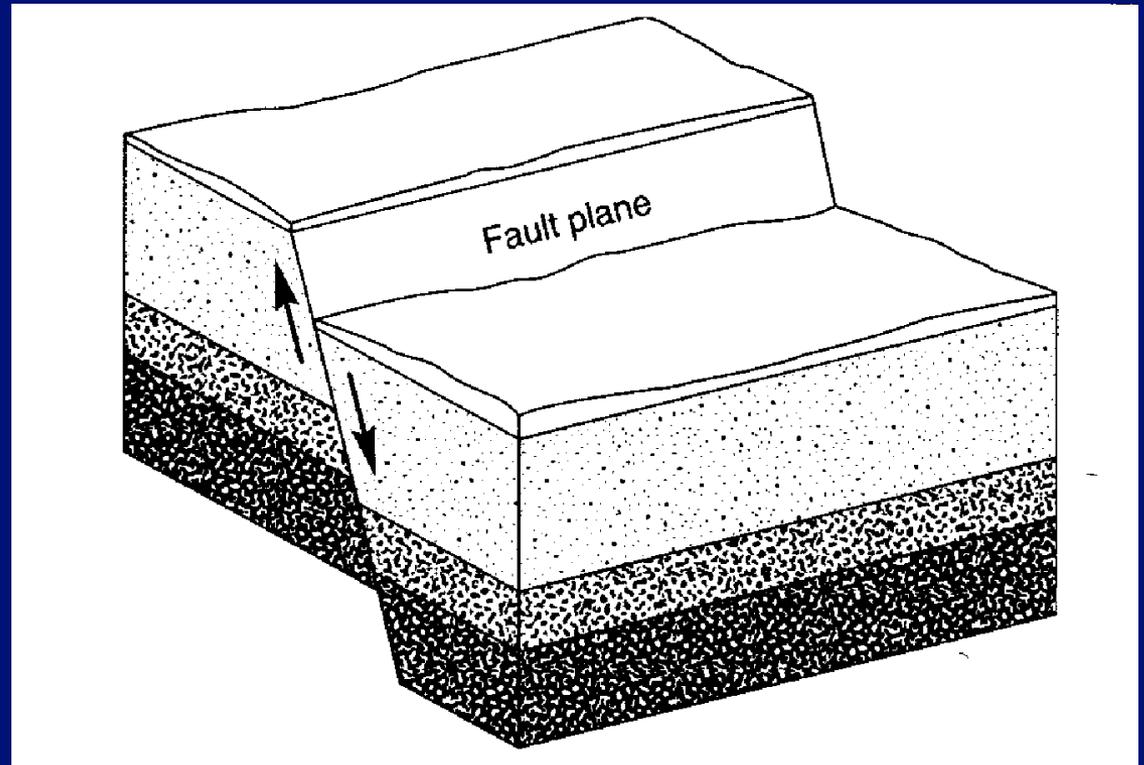
Caracterización de Fallas



- Rumbo (“strike”)
- Buzamiento (“dip”)
- Hipocentro o foco: punto de generación de la ruptura
- Epicentro: proyección del hipocentro en la superficie

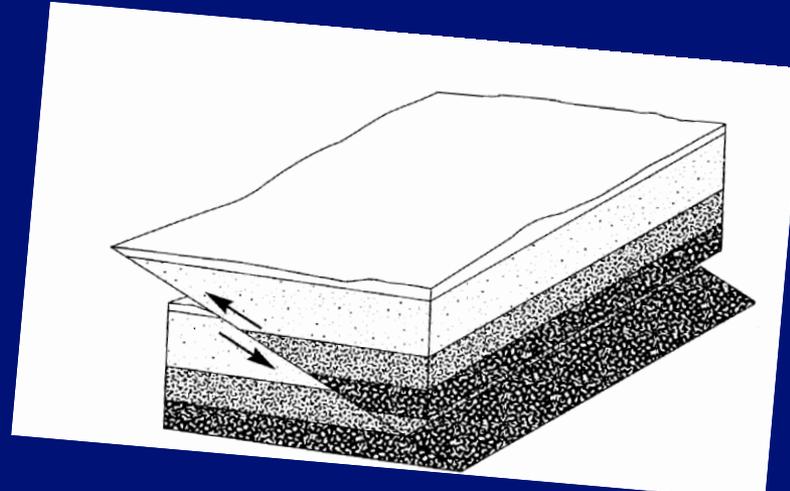
Clasificación basada en el tipo de movimiento

Falla Normal
(Extensión)



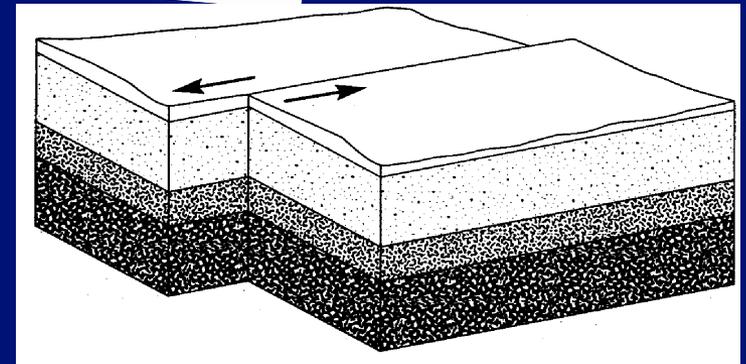
Clasificación basada en el tipo de movimiento

Falla Inversa



Falla Sinistral

(movimiento en sentido opuesto es dextral)



Existen fallas con combinación de movimientos:
Dextral-Normal, Sinistral-Inversa, etc.

Otras Clasificaciones

Edad Geológica:

- Cuaternario {
 - Holoceno (≤ 11.000 años)
 - Pleisteceno (≤ 2 millones de años)
- Terciario (> 2 millones de años)

Actividad:

- Normalmente definida por entes reguladores:
 - Activas *Fallas que tuvieron desplazamiento en los últimos X años.*
 $X \rightarrow$ depende de ente regulador
 - Potencialmente Activas
 - Inactivas
- Definición geológica: *Fallas que tuvieron desplazamientos en el régimen tectónico actual*

Propagación de las ondas sísmicas

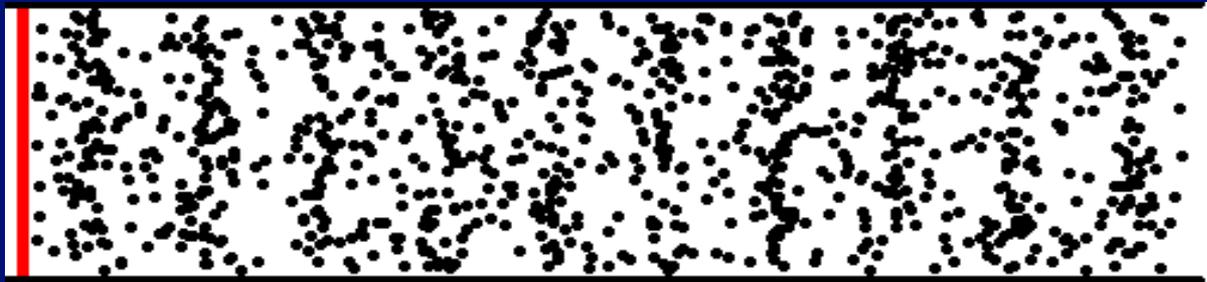
En un sismo, se producen dos tipos generales de onda:

- Ondas internas o de cuerpo
 - Ondas primarias (P)
 - Ondas secundarias (S)
- Ondas superficiales o largas (L)
 - Ondas LOVE
 - Ondas RAYLEIGH

Propagación de las ondas sísmicas

Ondas P:

- Longitudinales (compresión)
- Velocidades altas, entre 2 Km./s en sedimentos y 5-6 Km./s en roca dura.

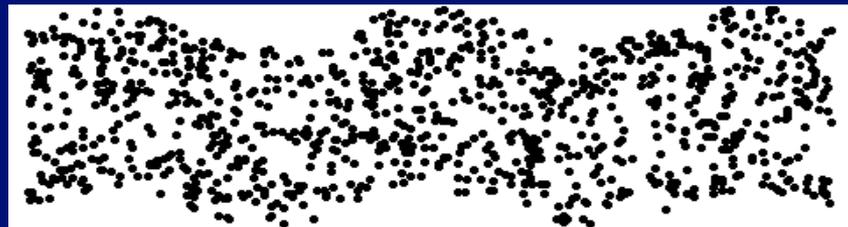


Dirección de propagación – vista en planta

Propagación de las ondas sísmicas

Ondas S:

- Transversales (de cizalla)
- Velocidad de propagación menor que la de las ondas P (en general, $V_p = 1.732 V_s$).



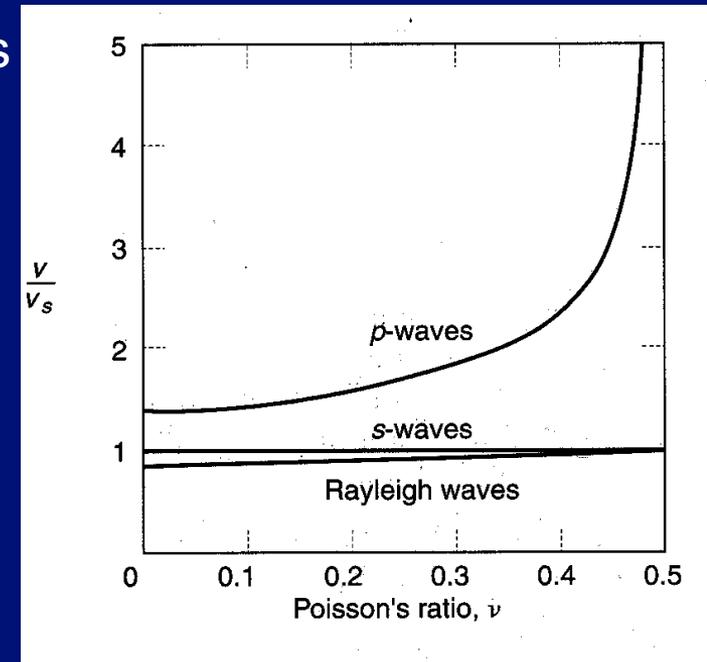
Dirección de propagación – vista en planta

Velocidad de ondas

$V_s \rightarrow 30 \sim 180$ m/s	arcillas blandas
~ 360 m/s	arcillas dura, arena
~ 500 m/s	grava, rocas meteorizadas
> 760 m/s	roca competente

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\mu)}{1-2\mu}}$$

μ = relacion de Poisson



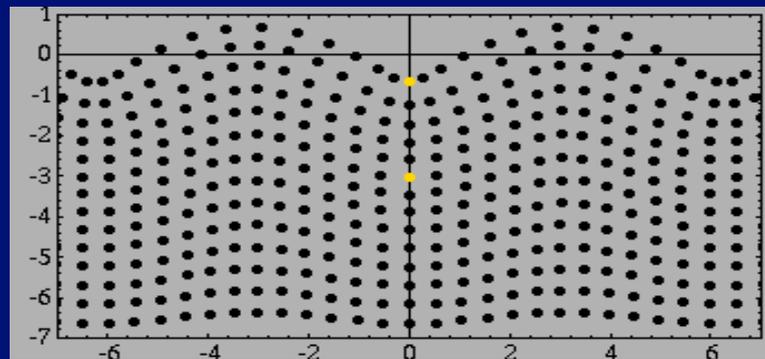
En general, todos los tipos de ondas se caracterizan por:

- Frecuencia (F) / Periodo (T) [$f = 1/T$]
- Amplitud de onda, λ [$V_s = \lambda f$]

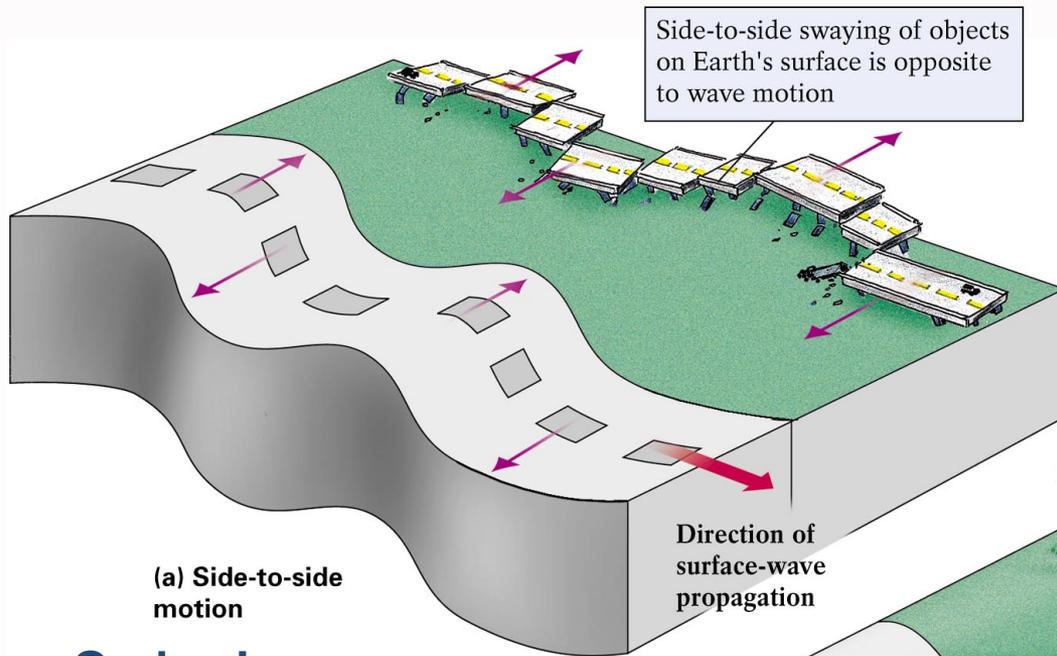
Propagación de las ondas sísmicas

Ondas Love: ondas de cizalla en el plano horizontal.

Ondas Rayleigh: ondas de cizalla en el plano vertical.

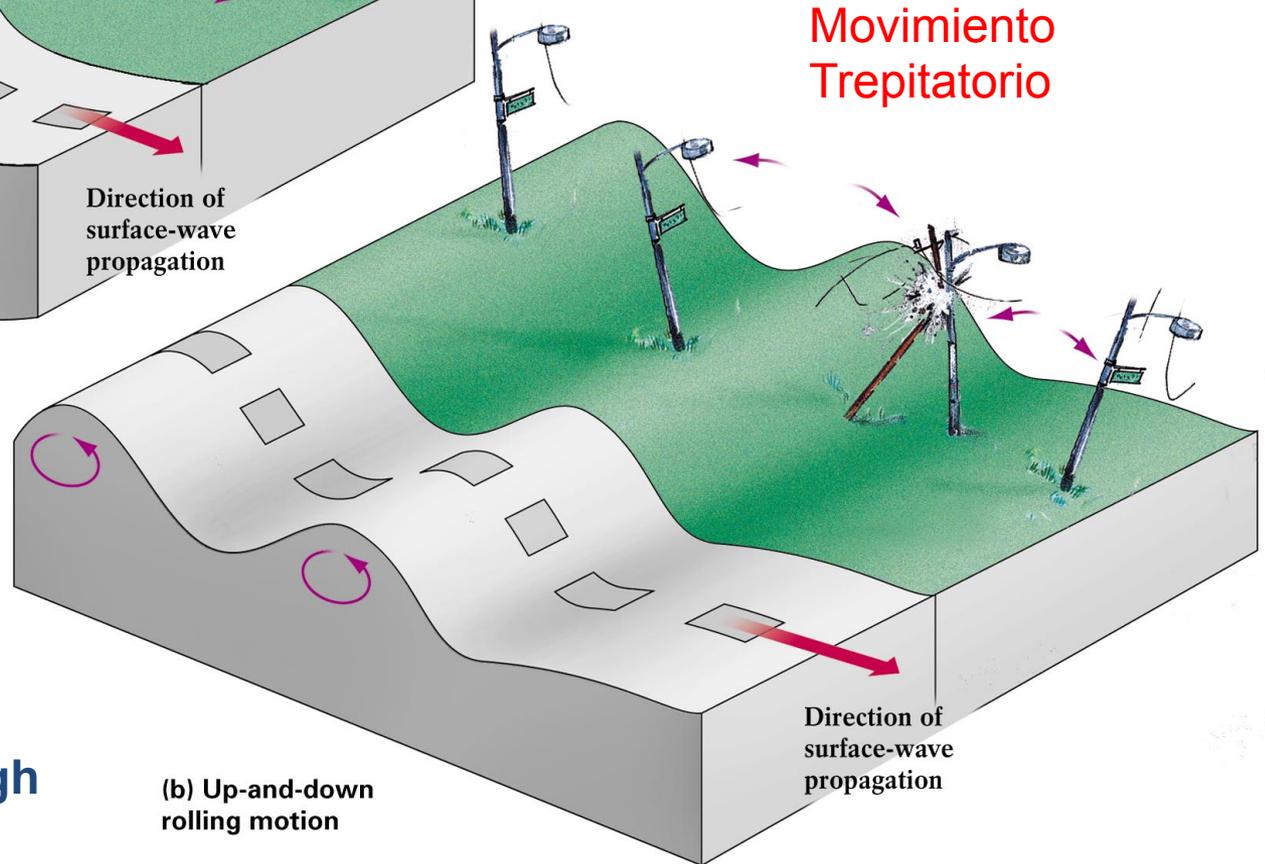


Ondas Rayleigh – vista en corte



Movimiento Oscilatorio

Ondas Love

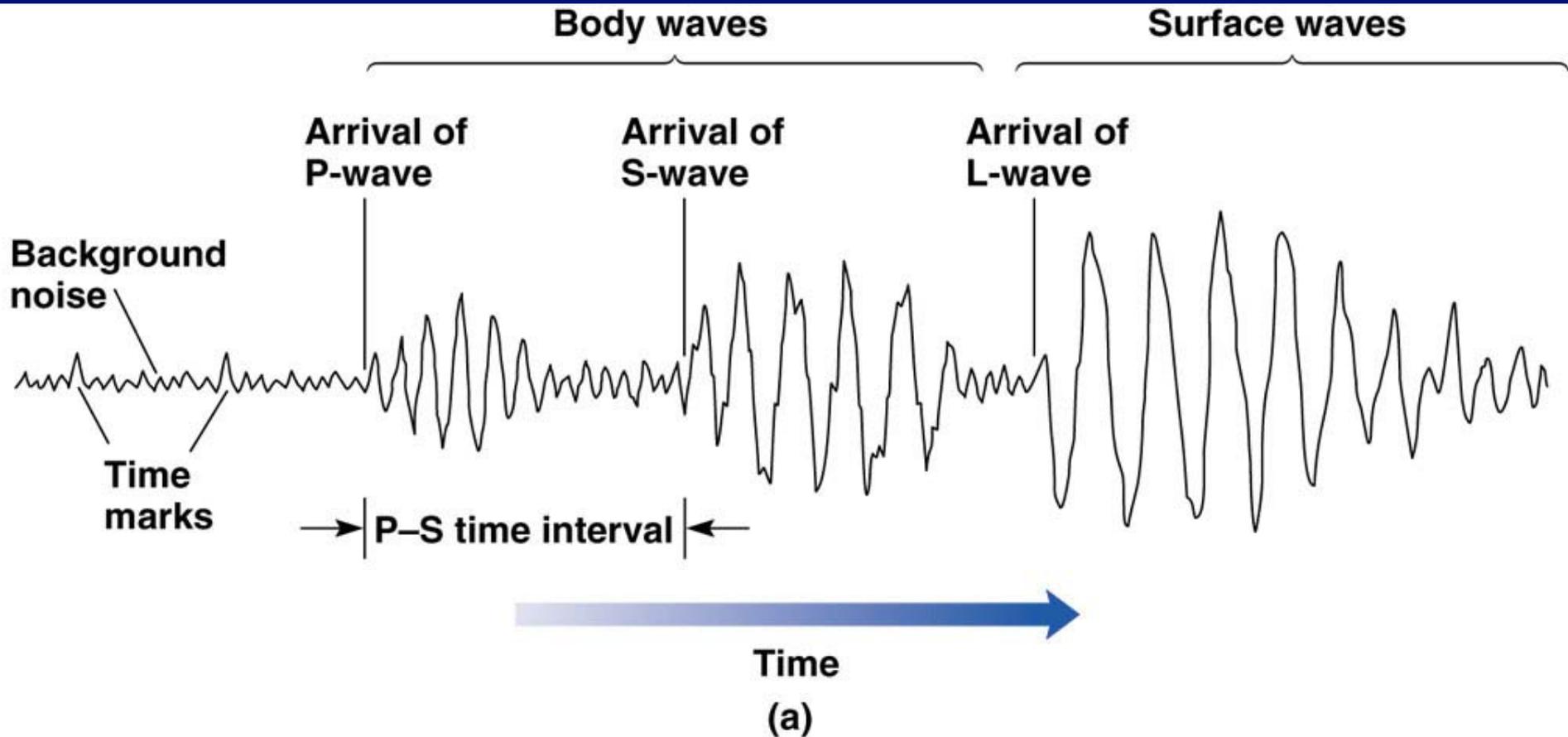


Movimiento Trepitatorio

Ondas Rayleigh

(b) Up-and-down rolling motion

Ondas Sísmicas



Cuantificación de Terremotos

INTENSIDAD

- Varía dependiendo de la distancia del sismo y otros factores
- Descripción cualitativa de un observador (medida subjetiva)

vs.

MAGNITUD

- Basada en mediciones de ondas sísmicas
- Es una medida objetiva

Escala de Intensidad Modificada de Mercalli

I	Sentido por muy pocos, bajo condiciones especialmente favorables.
II	En estado de reposo sentido por pocos, sobre todo en la parte superior de edificios altos; objetos delicadamente suspendidos pueden oscilar.
III	Sentido por muchos, esp. en edificios altos, pero en muchos casos no se reconoce como terremoto; vibración similar a la de un camión en movimiento; la duración se puede estimar.
IV	De día y dentro de edificios, sentido por muchos; fuera, por pocos; algunos se despiertan por la noche; se sienten vibraciones en puertas y ventanas; sensación parecida a la del impacto un camión contra un edificio.
V	Sentido por casi todos, muchos se despiertan; vajillas, ventanas, etc. pueden romperse; algunos casos de grietas en paredes; objetos inestables pueden volcarse; relojes de péndulo pueden pararse.
VI	Sentido por todos; muchos, asustados, corren hacia el exterior; desplazamiento de muebles pesados; algunos casos de derrumbes de paredes; en general, el daño es leve.
VII	Todos corren hacia el exterior; el daño es insignificante si el diseño y la construcción son buenos, de leve a moderado en estructuras ordinarias bien construídas, considerable en estructuras mal diseñadas; algunas chimeneas rotas; sentido dentro de automóviles en movimiento.

Escala de Intensidad Modificada de Mercalli

VIII	El daño es leve en estructuras especialmente diseñadas, considerable en estructuras de construcción ordinaria (con derrumbe parcial) e importante en estructuras mal diseñadas; caída de muchas chimeneas, columnas, monumentos y paredes; arena y barro expulsados en pequeñas cantidades; cambios en el nivel freático; personas manejando vehículos a motor considerablemente alteradas.
IX	Daños considerables en estructuras especialmente diseñadas e importantes en edificios grandes, con derrumbe parcial; edificios desplazados de sus cimientos; grietas notorias en el suelo; tuberías subterráneas rotas.
X	Algunas estructuras de madera de buen diseño destruidas; la mayoría de las estructuras de albañilería destruidas; suelo severamente agrietado; vías ferroviarias dañadas; deslizamientos considerables en pendientes pronunciadas y en bancos de ríos.
XI	Muy pocas o ninguna estructura de albañilería intactas; puentes destruidos; grandes fisuras en el suelo; sistema de cañerías subterráneas completamente fuera de servicio; deslizamientos generalizados; vías ferroviarias completamente dobladas.
XII	Daño total; prácticamente toda construcción severamente dañada o completamente destruida; ondas observadas en el suelo; línea del horizonte distorsionada; objetos arrojados por el aire.

Modified Mercalli Scale (after Bolt, 1993)

Average peak velocity (cmx/sec)	Intensity value and description MMI	Average peak acceleration (g =9.80 m/s ²)
PGV	<p>I. Not felt except by a very few under especially favorable circumstances. (I Rossi-Forel scale)</p> <p>II. Felt only by a few persons at rest, especially on upper floors of buildings. Delicately suspended objects may swing.(I to II Rossi-Forel scale)</p> <p>III. Felt quite noticeably indoors, especially on upper floors of buildings, but many people do not recognize it as an earthquake. Standing automobiles may rock slightly. Vibration like passing of truck. Duration estimated. (III Rossi-Forel scale)</p>	PGA
1-2	IV. During the day felt indoors by many, outdoors by few. At night some awakened. Dishes, windows, doors disturbed; walls make creaking sound. Sensation like heavy truck striking building. Standing automobiles rocked noticeably. (IV to V Rossi-Forel scale)	0.015g-0.02g
2-5	V. Felt by nearly everyone, many awakened. Some dishes, windows, and so on broken; cracked plaster in a few places; unstable objects overturned. Disturbances of trees, poles, and other tall objects sometimes noticed. Pendulum clocks may stop.(V to VI Rossi-Forel scale)	0.03g-0.04g
5-8	VI. Felt by all, many frightened and run outdoors. Some heavy furniture moved; a few instances of fallen plaster and damaged chimneys. Damage slight. (VI to VII Rossi-Forel scale)	0.06g-0.07g
8-12	VII. Everybody runs outdoors. Damage negligible in buildings of good design and construction; slight to moderate in well-built ordinary structures; considerable in poorly built or badly designed structures; some chimneys broken. Noticed by persons driving cars. (VIII Rossi-Forel scale)	0.10g-0.15g
20-30	VIII. Damage slight in specially designed structures; considerable in ordinary substantial buildings with partial collapse; great in poorly built structures. Panel walls thrown out of frame structures. Fall of chimneys, factory stack, columns, monuments, walls. Heavy furniture overturned. Sand and mud ejected in small amounts. Changes in well water. Persons driving cars disturbed. (VIII + to IX Rossi-Forel scale)	0.25g-0.30g
45-55	IX. Damage considerable in specially designed structures; well-designed frame structures thrown out of plumb; great in substantial buildings, with partial collapse. Buildings shifted off foundations. Ground cracked conspicuously. Underground pipes broken. (IX + Rossi-Forel scale)	0.50g-0.55g
More than 60	<p>X. Some well-built wooden structures destroyed; most masonry and frame structures destroyed with foundations; ground badly cracked. Rails bent. Landslides considerable from river banks and steep slopes. Shifted sand and mud. Water splashed, slopped over banks. (X Rossi-Forel scale)</p> <p>XI. Few, if any, (masonry) structures remain standing. Bridges destroyed. Broad fissures in ground. Underground pipelines completely out of service. Earth slumps and land slips in soft ground. Rails bent greatly.</p> <p>XII. Damage total. Waves seen on ground surface. Lines of sight and level distorted.</p>	More than 0.60g

Bolt, 1993

Cuantificación de Terremotos

Magnitud – Varias Definiciones

- Richter o Magnitud Local
- Magnitud de Ondas de Superficie
- Magnitud de Ondas de Cuerpo
- Magnitud del Instituto Meteorológico de Japón
- Magnitud de Coda
- Magnitud de Duración
- “Moment Magnitude”

Cuantificación de Terremotos

M_w → “Moment Magnitud”

- Basado en momento sísmico
- $M_w = 2/3 \log (M_0) - 10.7$

M_0 → Energía del Sismo (en dinas-cm)

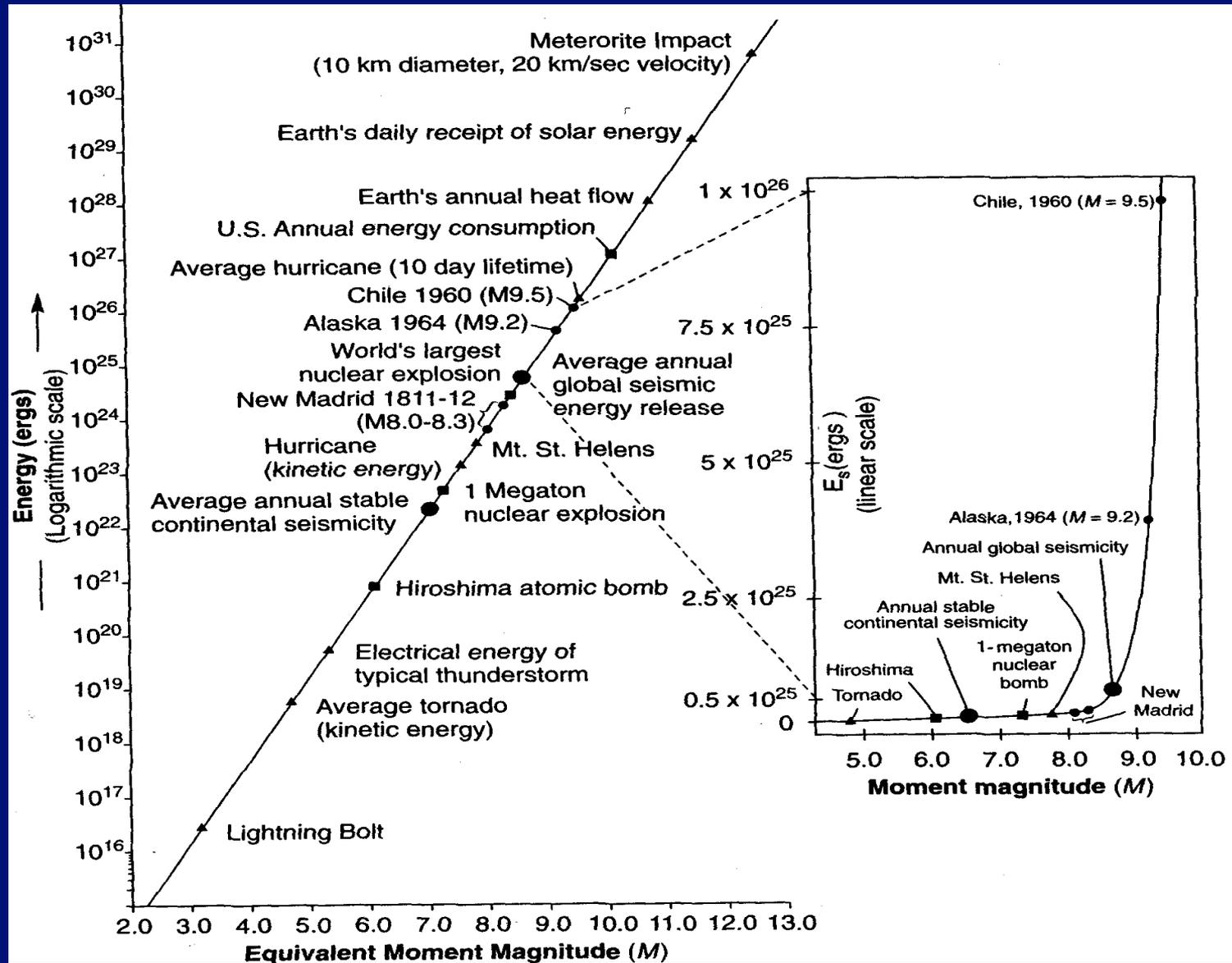
∴ M_w relacionado directamente a energía.

Obsérvese:

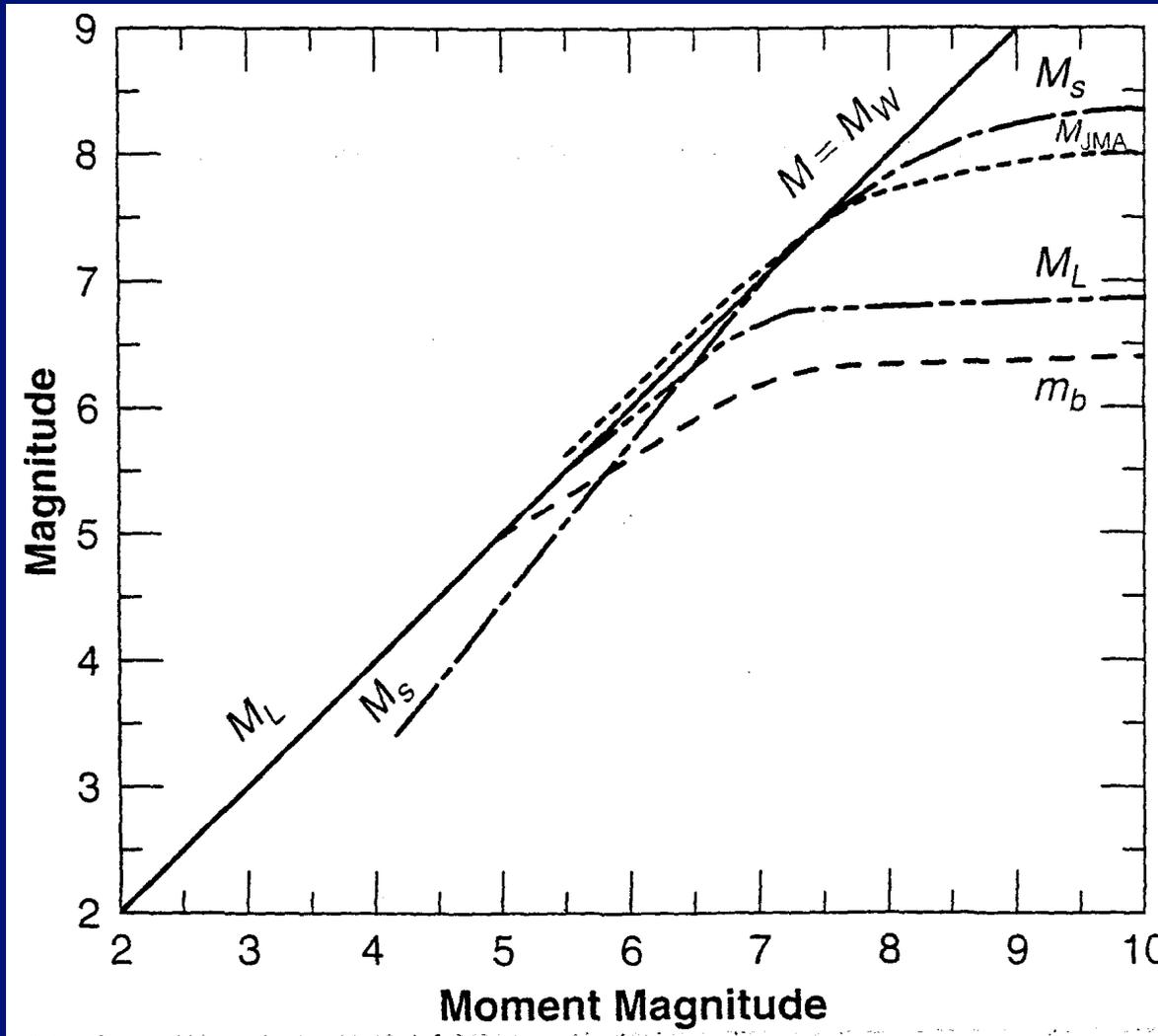
$$\log M_0 = 10.7 + 1.5 M_w$$

Si M_w aumenta 1 unidad, la Energía aumenta $10^{1.5} = 32$ veces!

Cuantificación de Terremotos

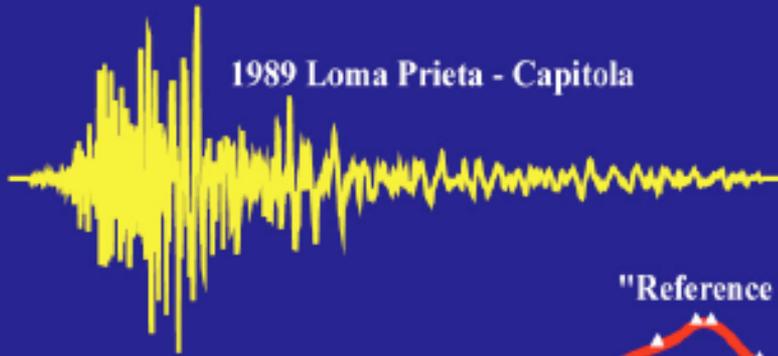


Cuantificación de Terremotos

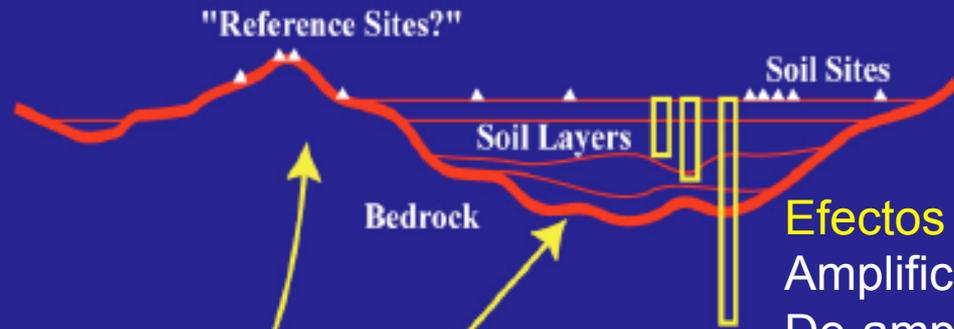


$M_W = \rightarrow$ Medida más adecuada para magnitud \rightarrow No se satura

Movimientos del Suelo

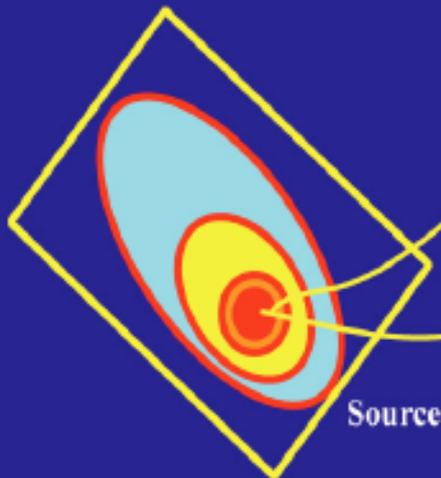


$$= \text{Source} * \text{Path} * \text{Site}$$



- Efectos de Fuente (Source)**
- Zona de liberación Energía
 - Patrón de Ruptura
 - Distribución de asperidad
 - Distribución del deslizamiento (slip)

- Efectos de Sitio**
- Amplificación
 - De-amplificación
 - Incremento duración



Path

- Efectos de Trayectoria (Path)**
- Dispersión de ondas (Wave Scattering)
 - Atenuación Anelástica (absorción)
 - Dispersión geométrica (inc. Área)

(J. Steidl)

Características que definen un movimiento sísmico

- Intensidad

PGA, PGV, PGD

- Duración

Duración significativa, D5-95%

Intensidad Arias

- Contenido de frecuencia

Espectro de aceleración

Periodo espectral medio, T_m

Parámetros que describen los movimientos del terreno

▪ Objetivo

Obtener variables que describan los movimientos del terreno y que tengan correlación con daños sísmicos.

▪ Parámetros de intensidad

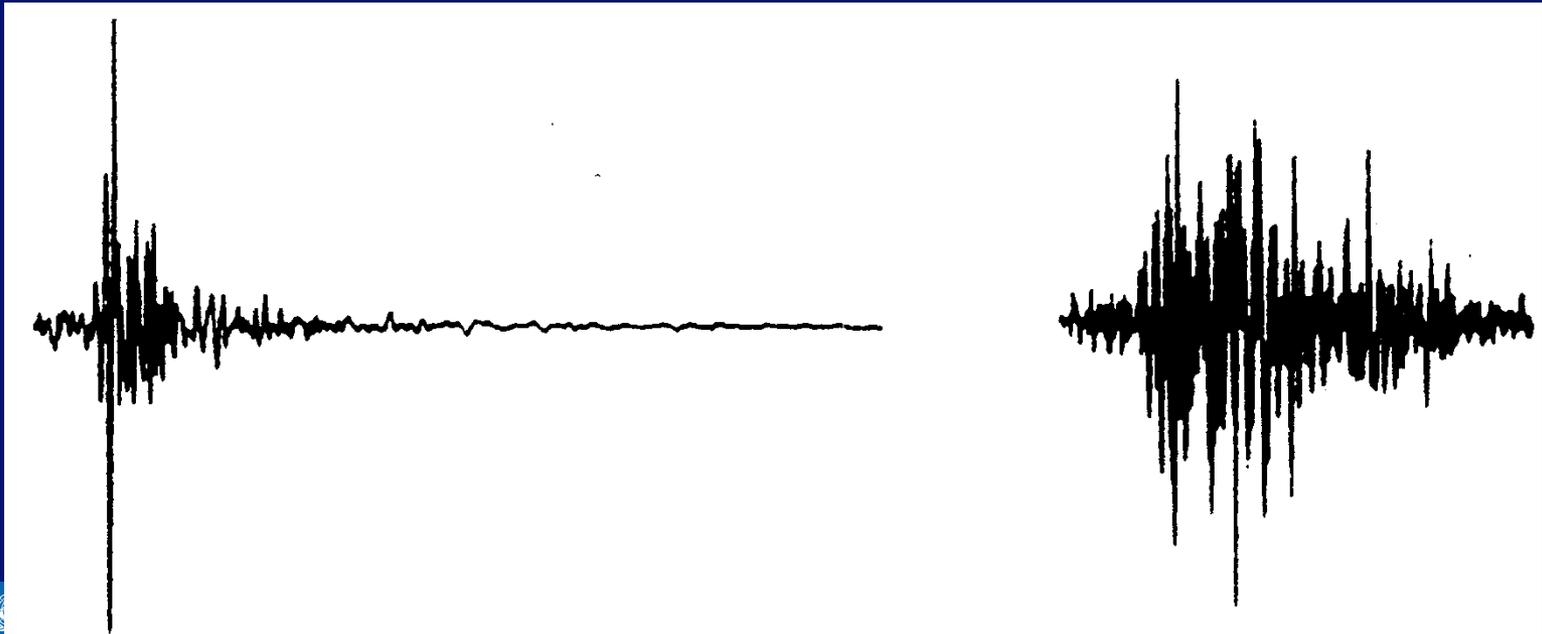
- Aceleración máxima a_{\max} (MHA, PGA)
- Velocidad máxima v_{\max} (PGV)
- Desplazamiento máximo d_{\max}
- Intensidad Arias

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} [a(t)]^2 dt \quad \rightarrow \text{(se usa en licuefacción)}$$

- Representa una medición de la energía del acelerograma

Parámetros que describen los movimientos del terreno

- La máxima aceleración (a_{max}) se usa mucho, pero el parámetro por sí solo no es una descripción completa de los movimientos del terreno

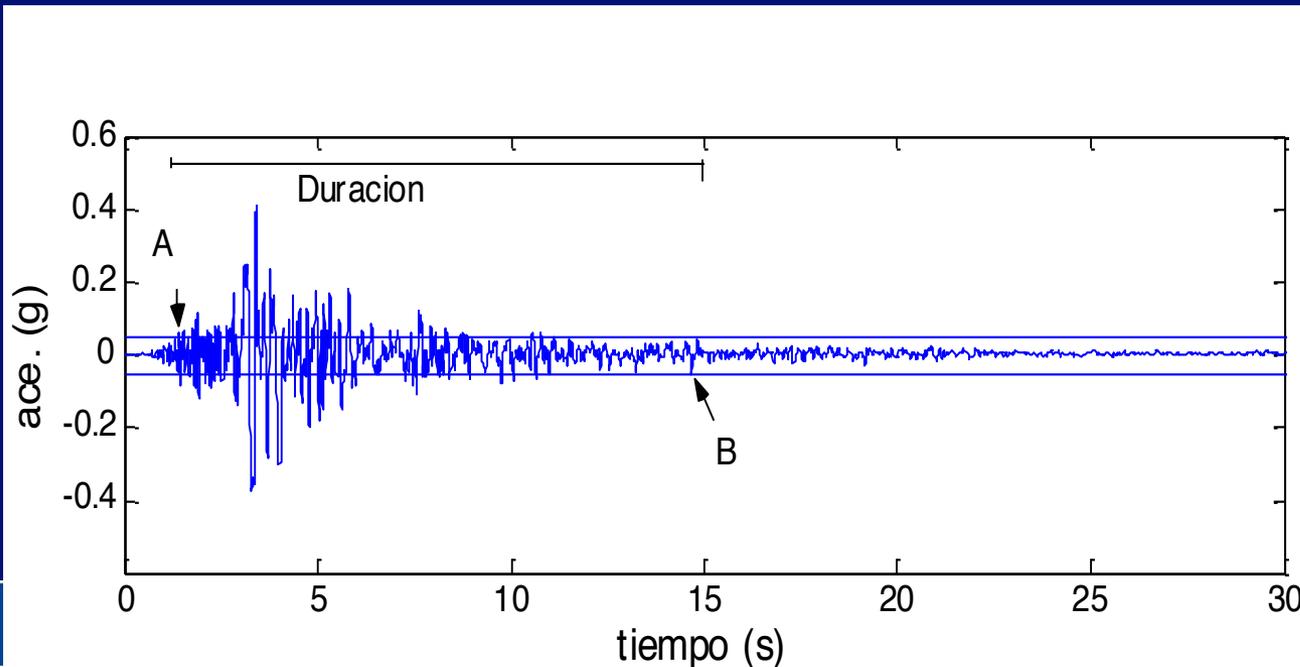


Parámetros que describen los movimientos del terreno

Parámetros de duración:

■ Duración agrupada

- Duración de aceleraciones mayores a 0.05g



A: aceleración
excede 0.05g por
primera vez

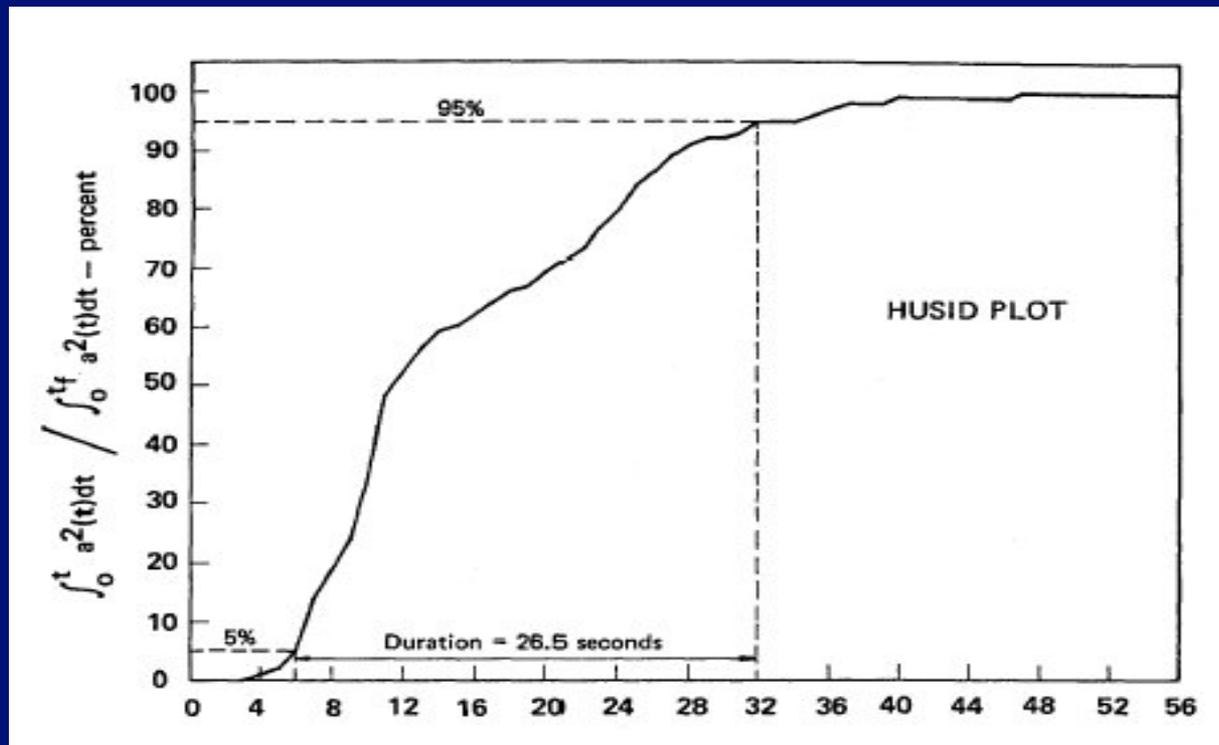
B: aceleración
excede 0.05g por
última vez

Parámetros que describen los movimientos del terreno

Parámetros de duración:

- Duración significativa

- Periodo de tiempo en el cual la energía está siendo generada (5% – 95% Intensidad Arias)



Parámetros que describen los movimientos del terreno

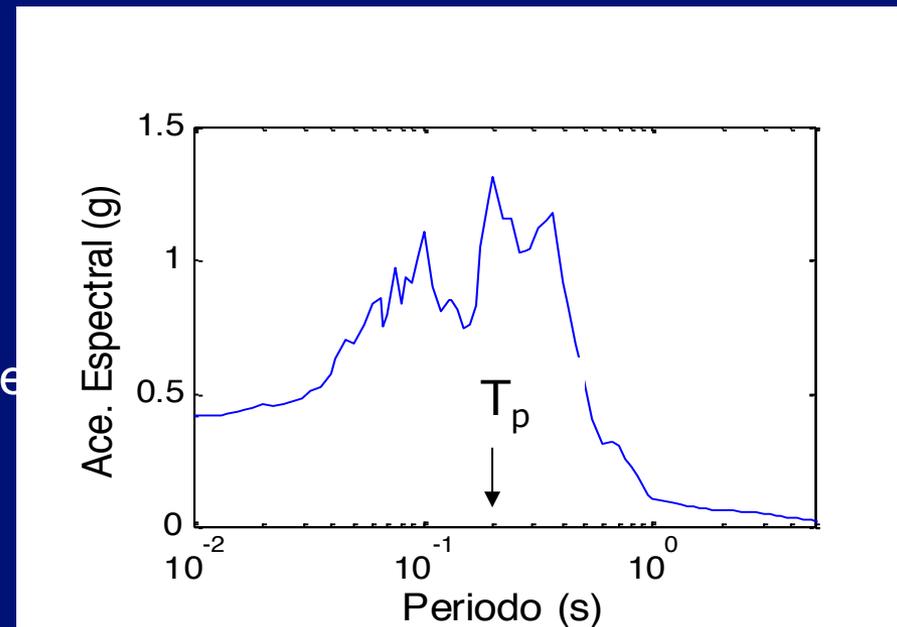
Parámetros de Frecuencia:

– Cada aceleración espectral (S_a) es a la vez un parámetro de frecuencia y un parámetro de intensidad:

- Proporcional al contenido de energía del movimiento de suelo en esa frecuencia
 - S_a ($T = 0.3$ s)
 - S_a ($T = 1.0$ s)

– Periodo Predominante

- Periodo que corresponde a la máxima aceleración espectral



Parámetros que describen los movimientos del terreno

- Periodo cuadrado medio

$$T_m = \frac{\sum_i C_i^2 \cdot \left(\frac{1}{f_i} \right)}{\sum_i C_i^2}$$

para $0.25 < f_i < 20\text{Hz}$

C_i : Coeficientes de Fourier

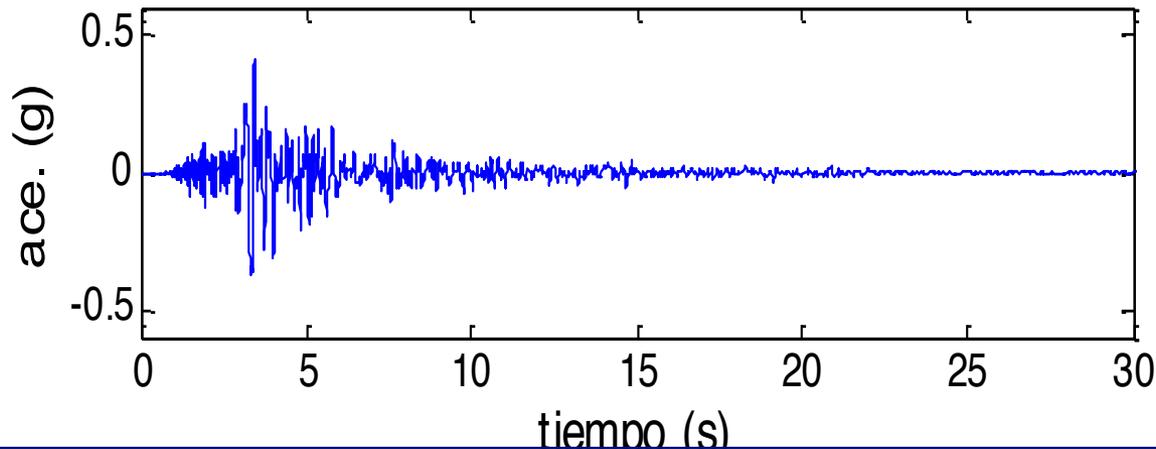
Factores que afectan los movimientos del terreno



Falla

A: Campo cercano

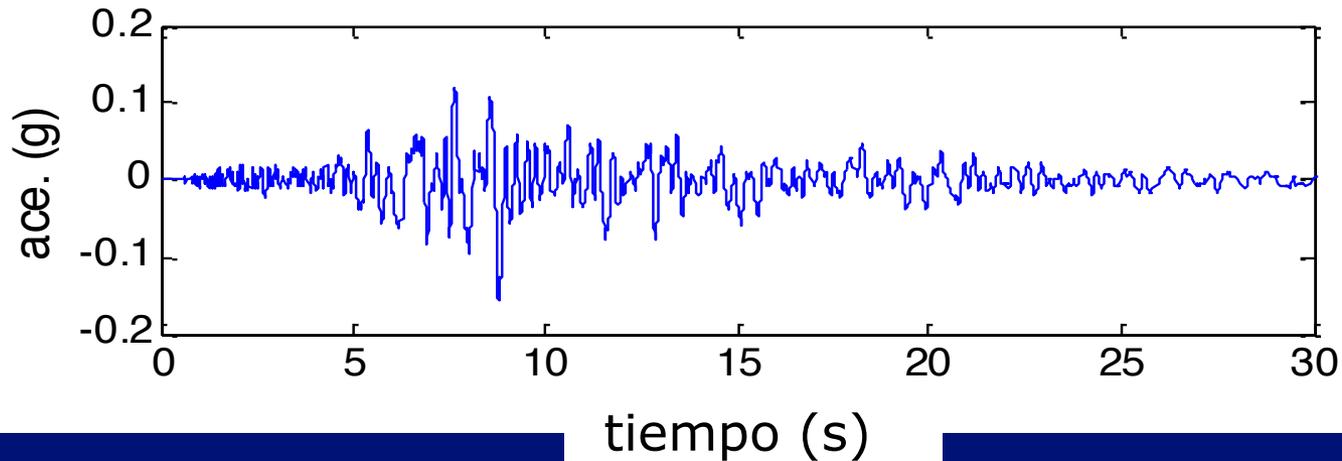
- Duraciones cortas (ondas P y ondas S llegan al mismo tiempo)
- Altas intensidades



Gilroy #1, terremoto de Loma Prieta (R = 11 km)

Factores que afectan los movimientos del terreno

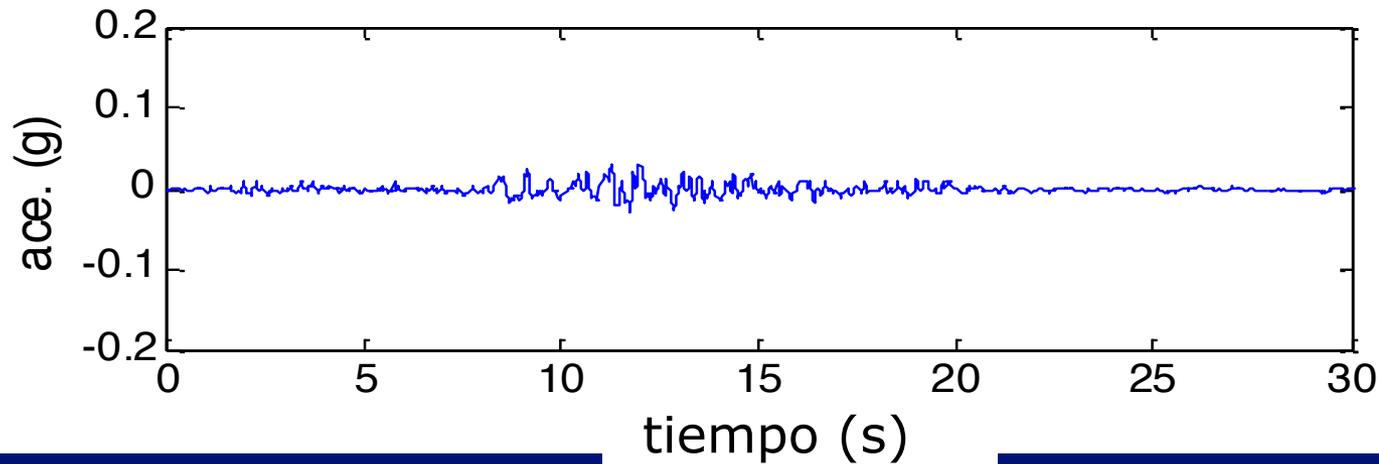
B: Campo Intermedio



- Ondas P y ondas S comienzan a separarse
- Intensidad se atenúa

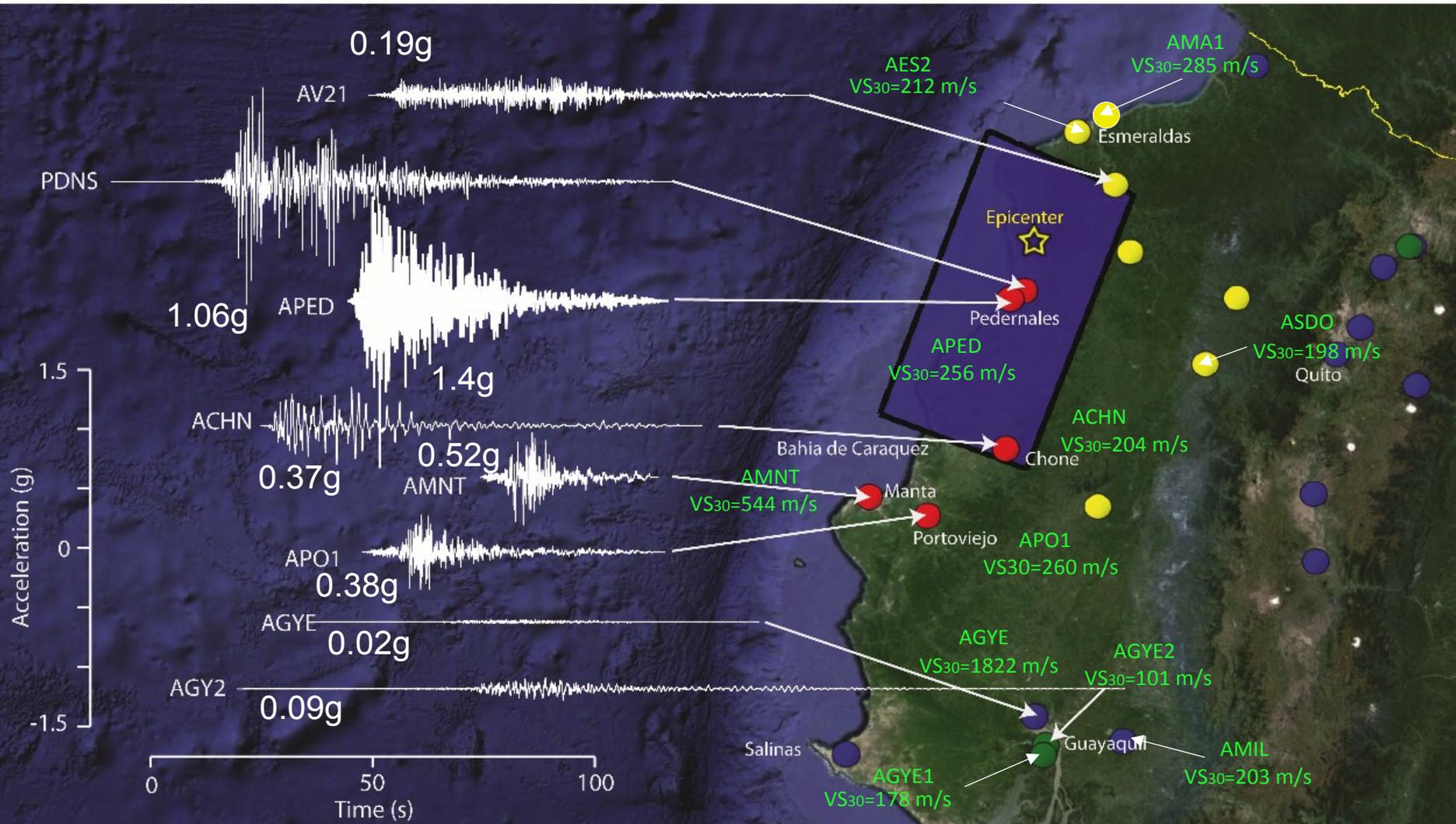
Factores que afectan los movimientos del terreno

C: Campo Lejano



- Bajas frecuencias predominan
- Periodo predominante aumenta
- Duración aumenta
- Niveles de interferencia aumentan
- Ondas de superficie cobran importancia

Registros de aceleraciones de la componente EW



GEER report (2016), Terremoto 16 Abril, 2016, Mw 7.8

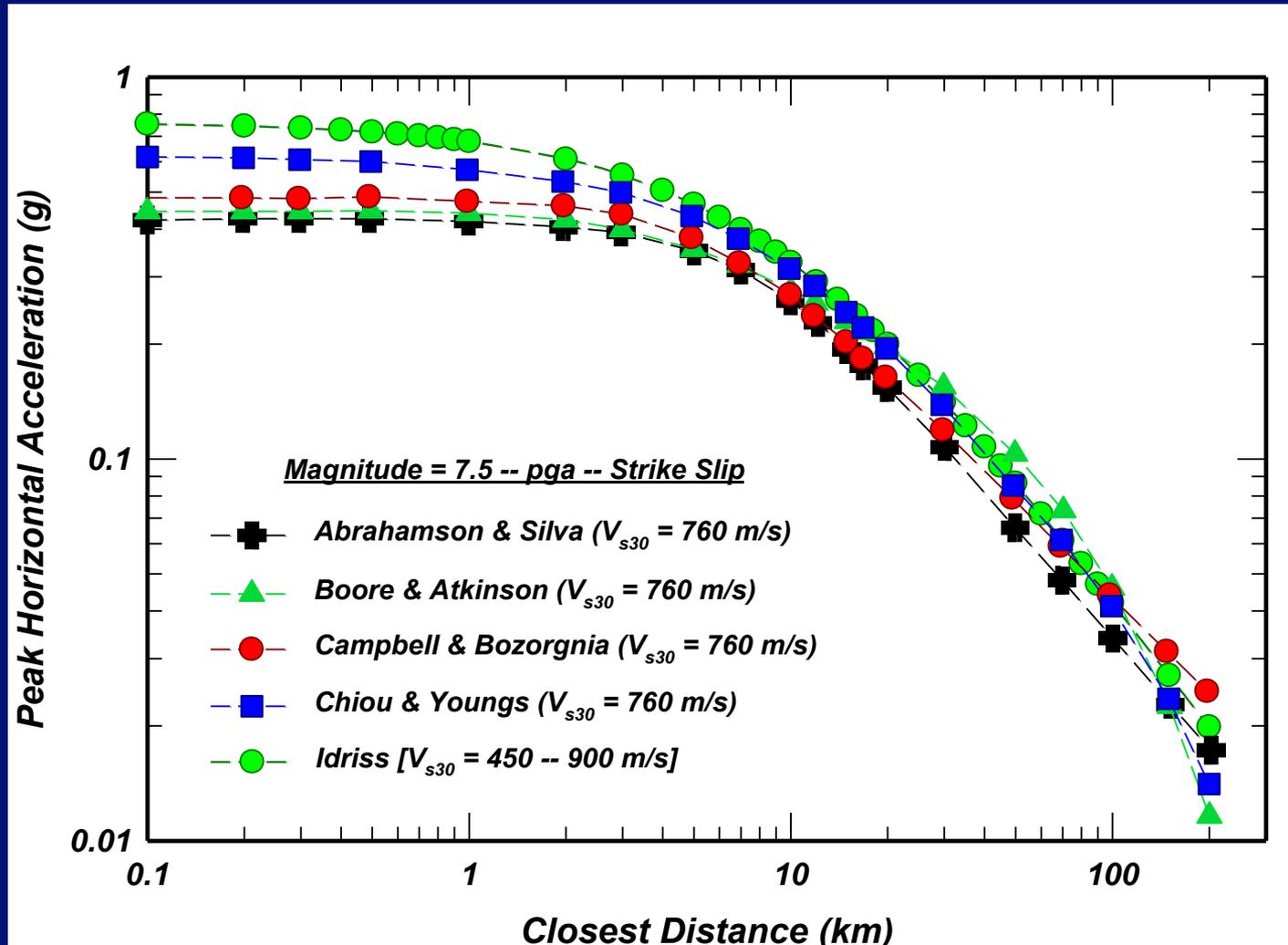
Fuente: GEER report (2016)

Empirical Ground Motion Prediction Equations (GMPEs)

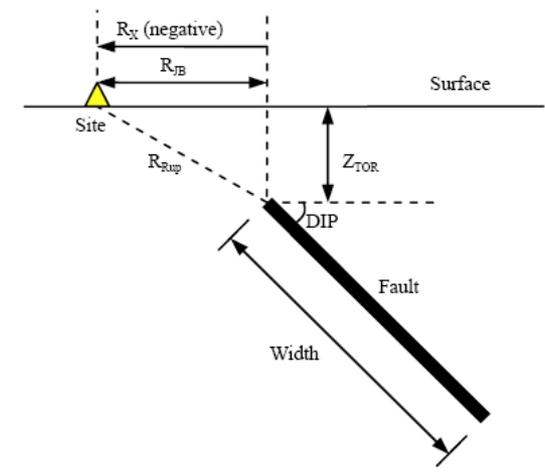
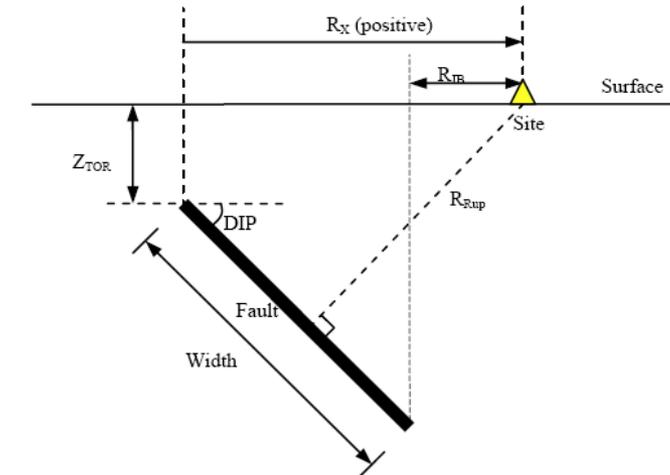
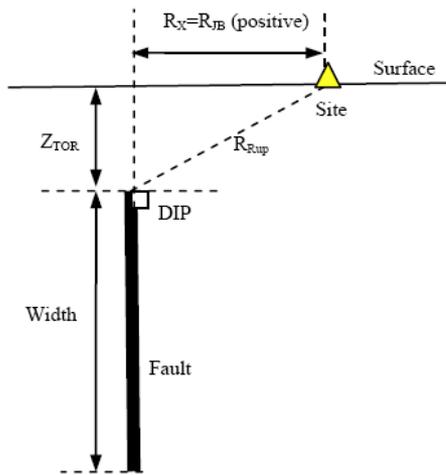
- Estimate Ground Motion Parameters (e.g. PGA, $S_a(T)$, T_m , D_{5-95}) as a function of:
 - Tectonic Region
 - Source-to-Site Distance (R)
 - Site Conditions (S)
 - Magnitude (M_w)
 - Fault Type
 - Also, special effects, such as Near-Fault Forward-Directivity

Cannot get acceleration-time history directly

Shallow Crustal Earthquakes: Next Generation Attenuation (NGA) GMPE: PGA for Strike-Slip, M 7.5, $V_s = 760$ m/s



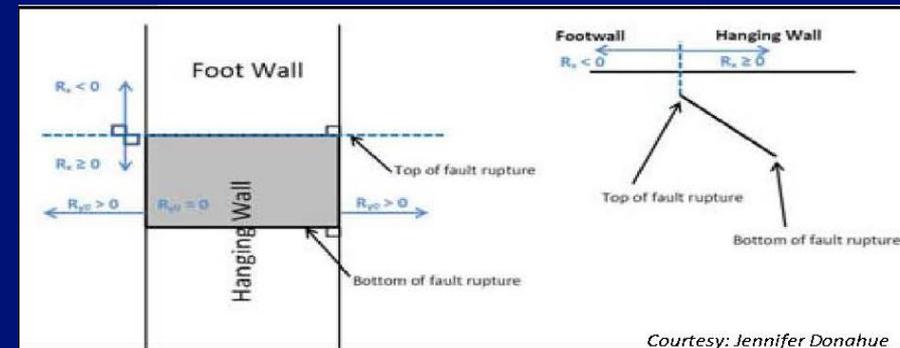
NGA Site-to-Source Distance (R)



(a) Strike slip faulting

(b) Reverse or normal faulting, hanging-wall site

(c) Reverse or normal faulting, foot-wall site



Courtesy: Jennifer Donahue

R_{RUP} = Closest distance to coseismic rupture (km)

R_{JB} = Closest distance to surface projection of coseismic rupture (km)

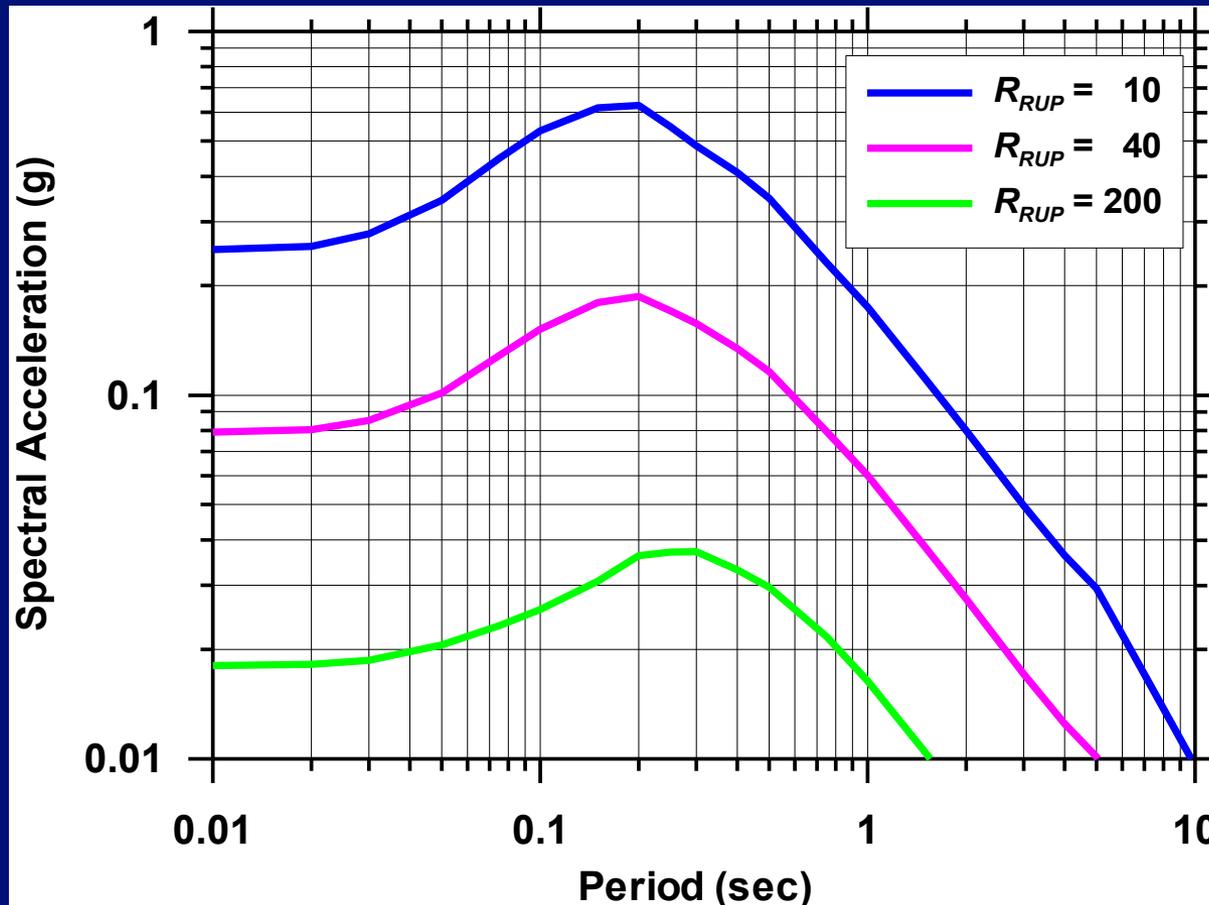
R_x = Horizontal distance from top of rupture measured perpendicular to fault strike (km)

R_{y0} = Horizontal distance off the end of the rupture measured parallel to strike (km)

NGA: Campbell-Bozorgnia (2008)

Effect of Distance (R)

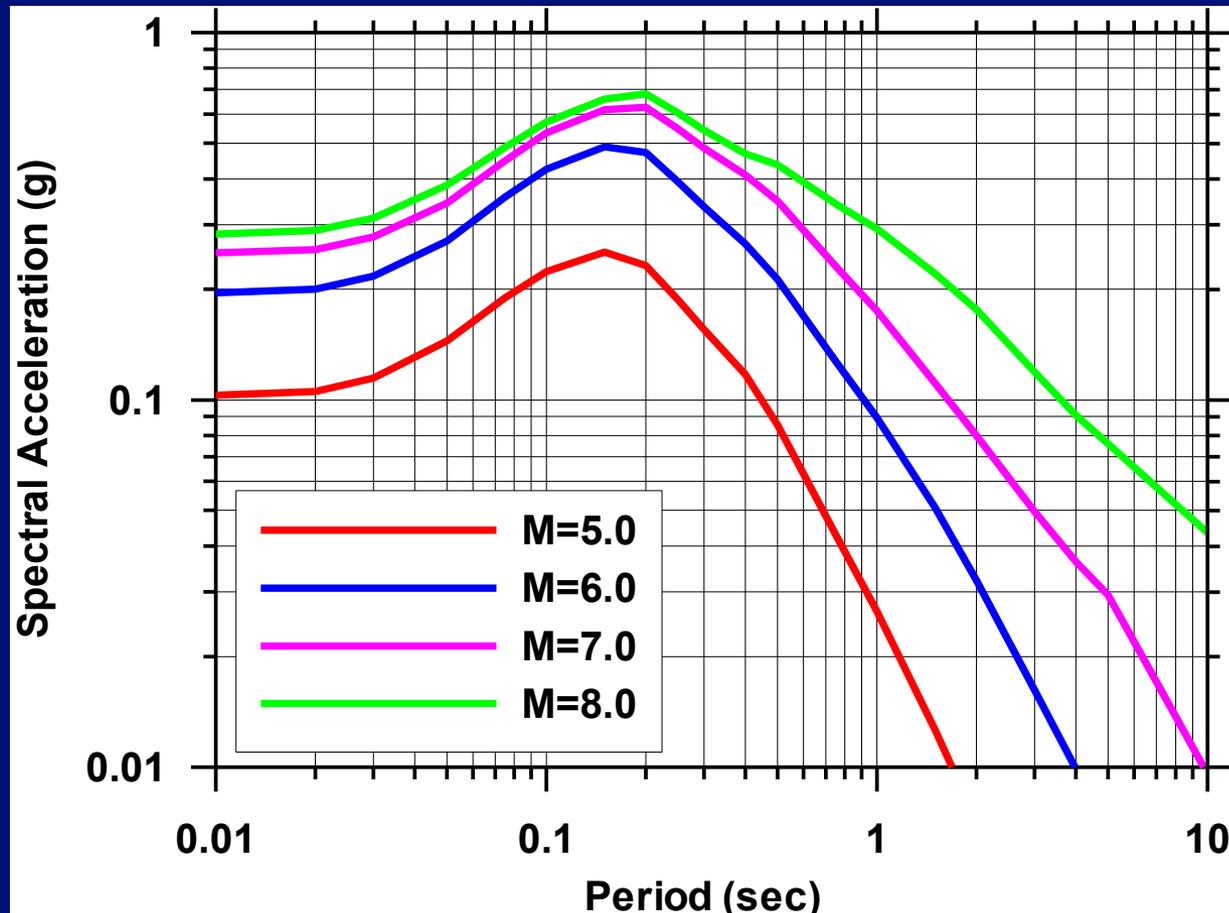
Strike Slip, $M = 7.0$, $V_{S30} = 760$ m/s



NGA: Campbell-Bozorgnia (2008)

Effect of Magnitude (M_w)

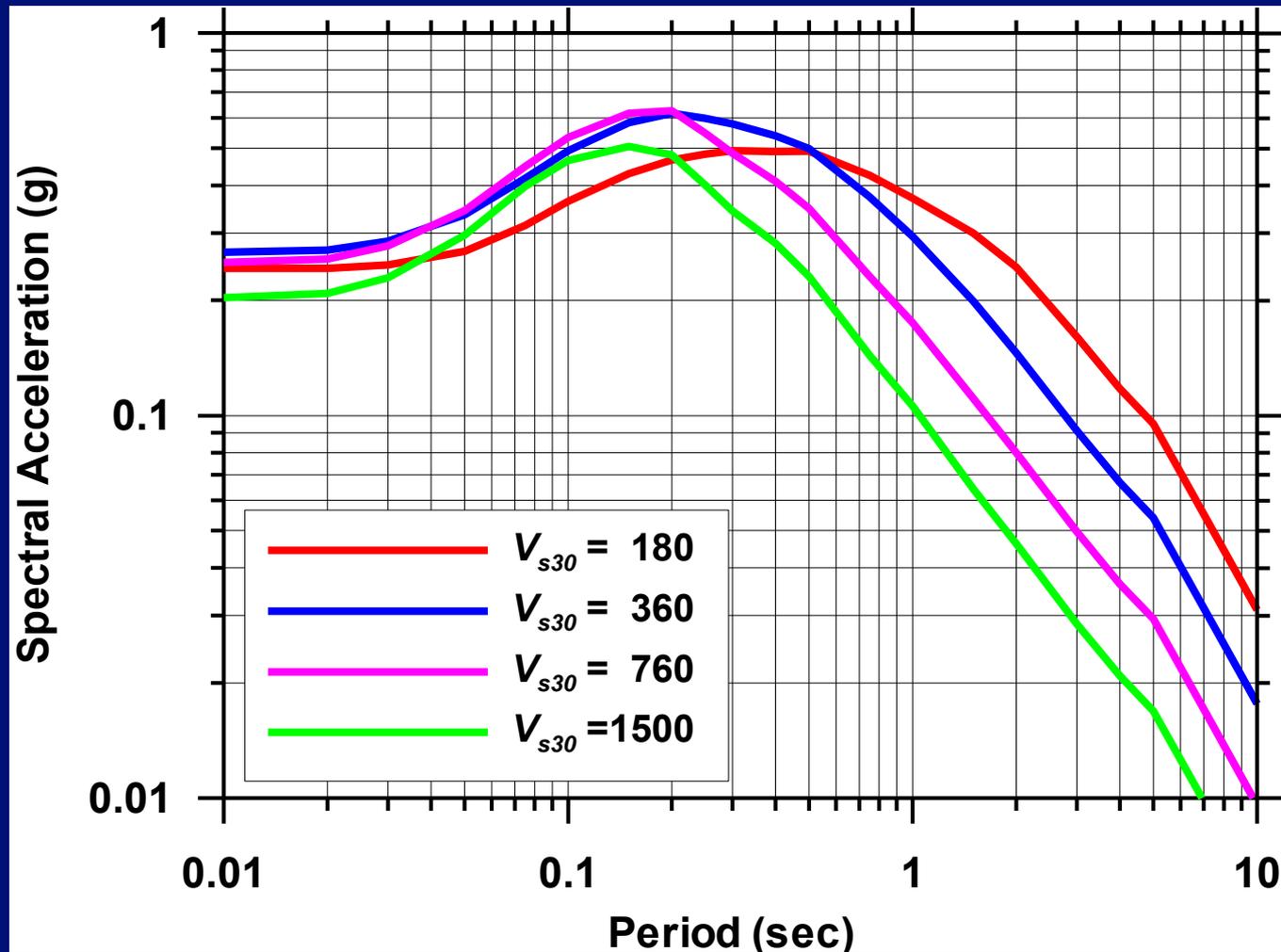
Strike Slip, $R_{RUP} = 10$ km, $V_{S30} = 760$ m/s



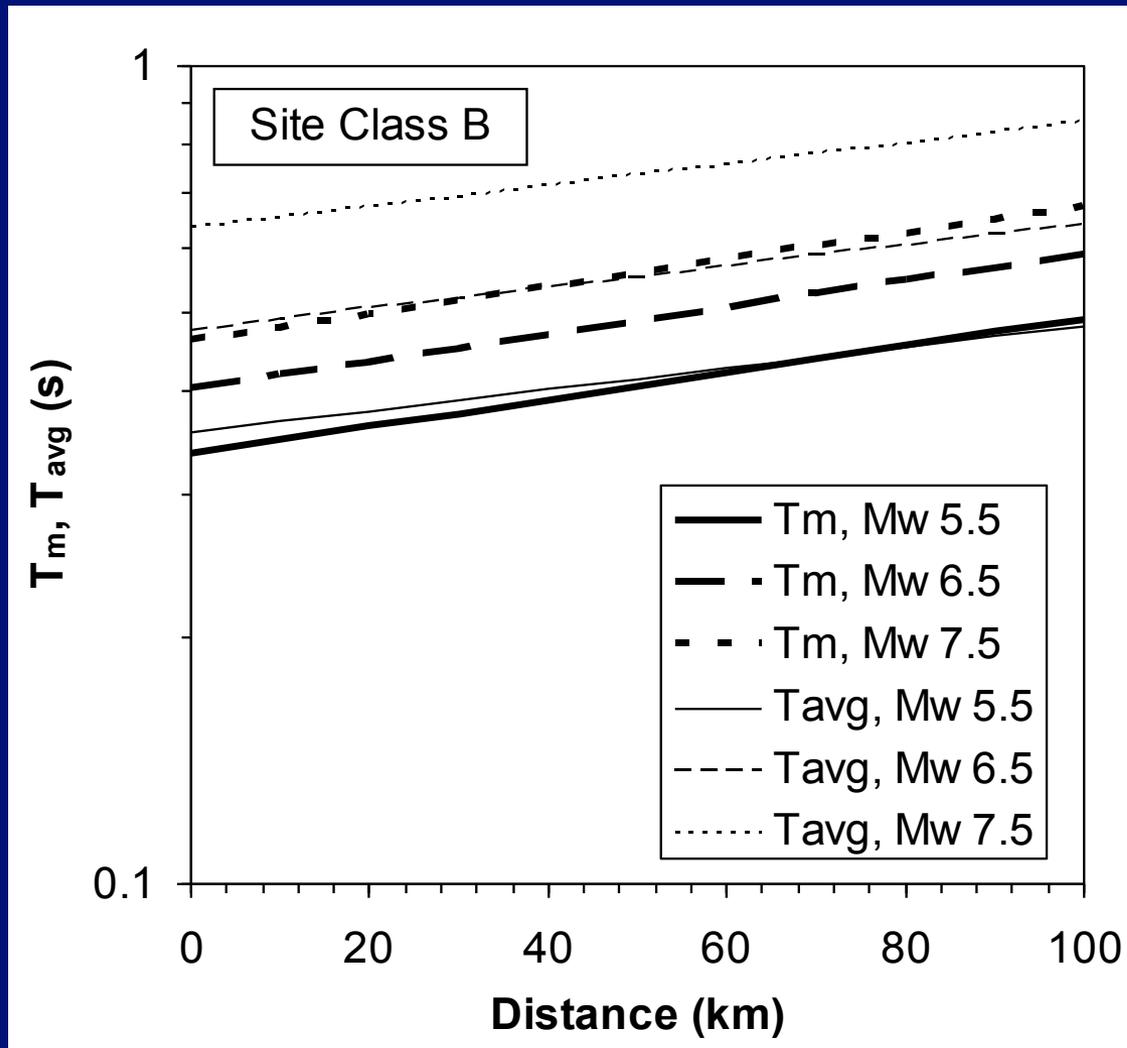
NGA: Campbell-Bozorgnia (2008)

Effect of Site Condition (V_{s30})

Strike Slip, $M = 7.0$, $R = 10$ km

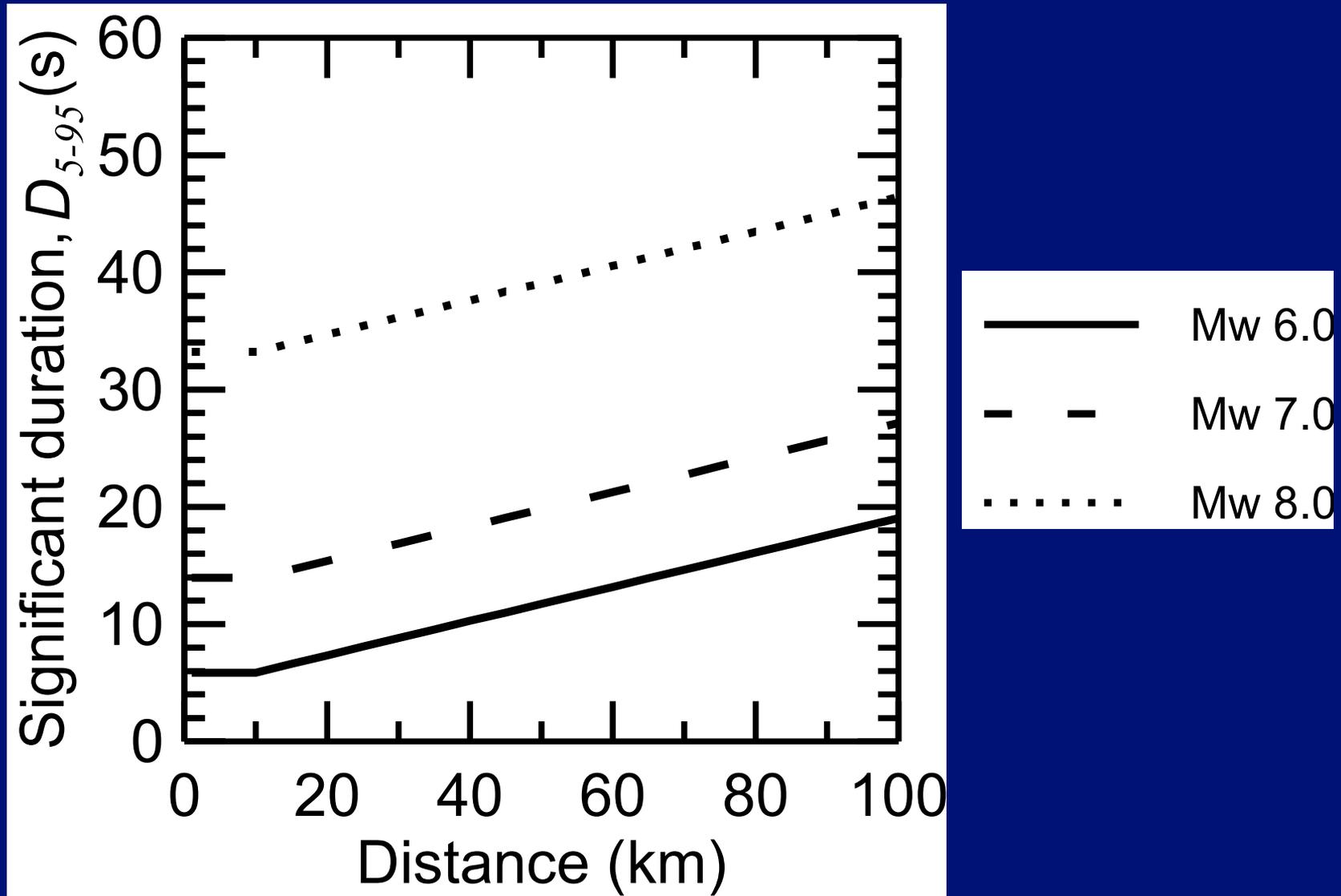


Rock T_m for Shallow Active-Plate Margin EQs (Rathje, Faraj, Russell, and Bray 2004)



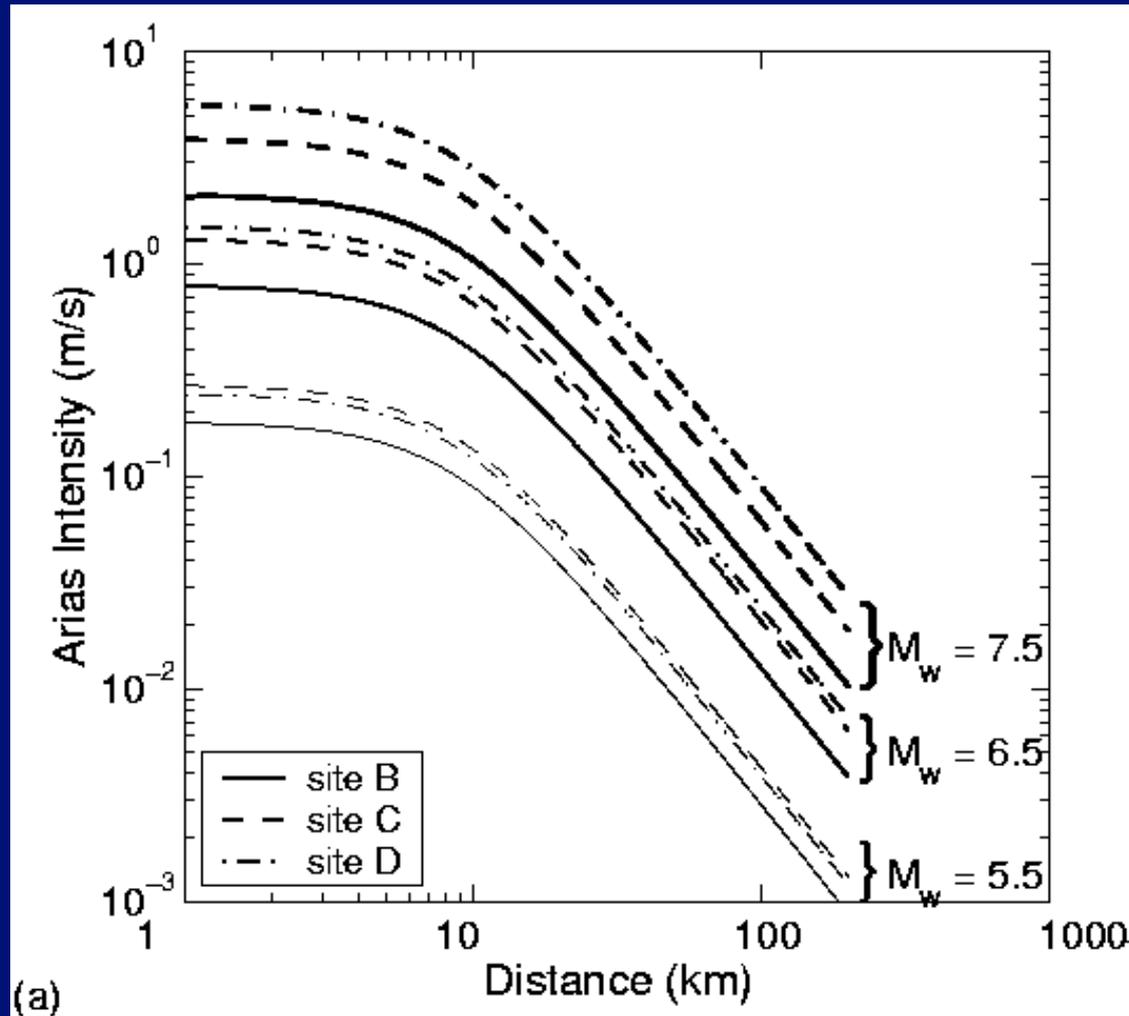
Rock D_{5-95} for Shallow Active-Plate Margin EQs

(Abrahamson and Silva, 1996) (an alternative is Kempton & Stewart 2006)



I_a for Shallow Active-Plate Margin EQs

(Travasariou, Bray & Abrahamson 2003)



SITE

B- rock

C- soft rock &
stiff shallow soil

D- deep stiff soil

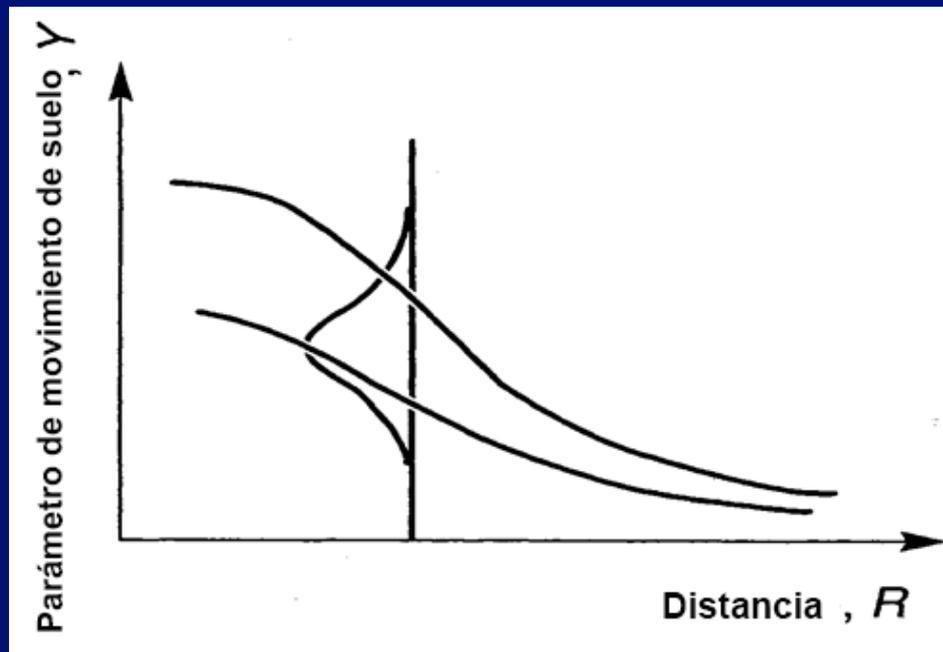
Importante:

- Relaciones de atenuación manejan aceleración horizontal promedio

$$Sa = \sqrt{Sa_1 \times Sa_2}$$

– Es un valor más estable desde el punto de vista estadístico

- Es importante predecir no sólo la media ($E[a_{max}]$), sino también la desviación. Es típico que se asuma una distribución logarítmica-normal



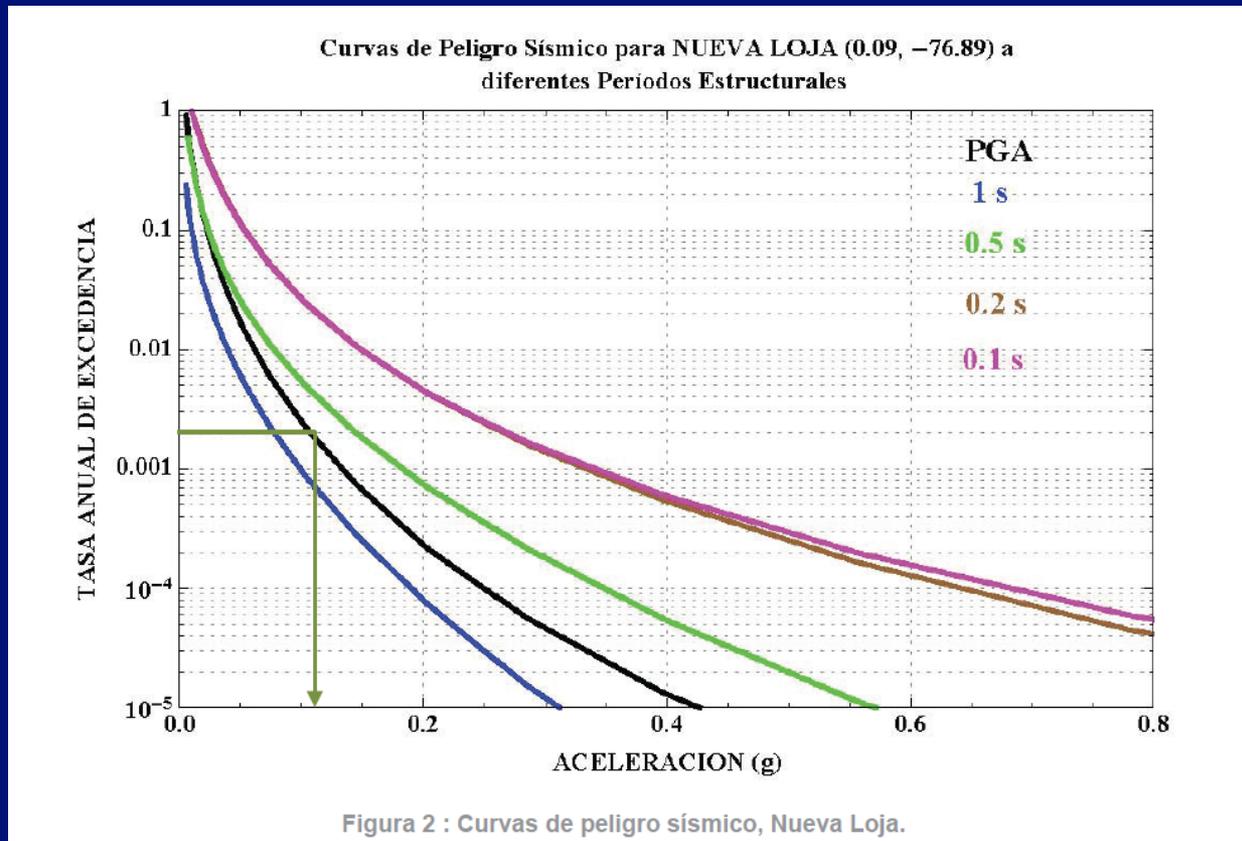
Análisis de Peligro Sísmico Determinístico (DSHA)

(Bray, 2017)

- Select a few characteristic earthquake scenarios, i.e., M & R pairs
- Use mean max. magnitude and closest R
- Compute the ground motion intensity measure (IM) for each scenario; typically, use IM at the 50% (or 84%) level for each EQ scenario.
- Select the earthquake scenario that gives the largest estimated IM irrespective of activity rate of source

Análisis Probabilístico de Peligro Sísmico (PSHA)

Decisiones relacionadas al riesgo sísmico se facilitan si se puede predecir la probabilidad de que parámetros de diseño sean excedidos. Para esto usamos... **Curvas de Peligro**



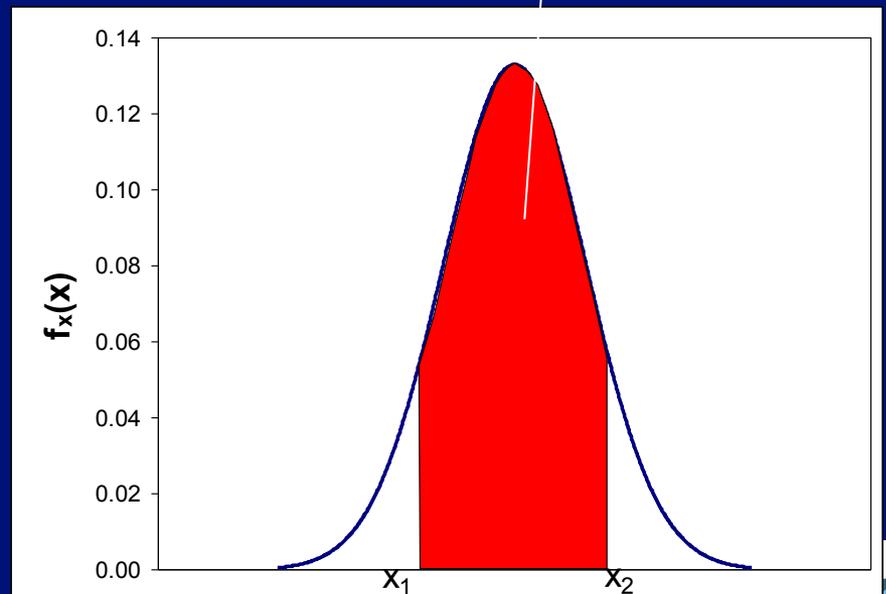
Conceptos Necesarios para PSHA

Definiciones:

- $P[X > x]$: Probabilidad de que la variable aleatoria X tenga un valor mayor a x
- $0 \leq P[X > x] \leq 1.0$
- Función de densidad de probabilidad (pdf, "probability density function") se denota por $f_x(x)$ y se define como:

$$P[x_1 < X \leq x_2] = \int_{x_1}^{x_2} f_x(x) dx$$

$$P[x_1 < X < x_2]$$



Conceptos Necesarios para PSHA

- **Modelo de Poisson:**

- Modela ocurrencias de un evento asumiendo:
 1. Ocurrencia del evento en el intervalo $[t_1, t_2]$ es independiente de que el evento haya ocurrido previamente (Modelo SIN MEMORIA)
 2. Probabilidad de ocurrencia en un intervalo de tiempo es precepcional a la duración del intervalo
 3. En un intervalo dado, el evento sólo ocurre una vez
- El modelo de Poisson se usa para predecir la ocurrencia de terremotos (Sin embargo, obsérvese que (1) no está de acorde a la teoría de “Elastic Rebound”)
- El uso del Modelo de Poisson todavía es prevalente excepto en algunas fallas donde la sismicidad está muy bien caracterizada

Conceptos Necesarios para PSHA

- **Modelo de Poisson:**

$$P [\text{evento ocurra}] = 1 - e^{-\lambda t}$$

λ : velocidad (ratio) de ocurrencias del evento

t : tiempo (en años)

Definición:

$RI = 1/\lambda$: Intervalo de recurrencia (en promedio, cuantos años transcurren entre cada evento)

Obsérvese:

$$P_{\text{annual}} = \lambda \text{ para } \lambda \ll 1$$

Conceptos Necesarios para PSHA

- **Probabilidad Condicional: $P [A | (B,C)]$**

- Léase: Probabilidad de evento A dado que eventos B y C ocurren

- Asumiendo que eventos B y C son independientes:

$$P [A] = P [A | (B,C)] P[B] P[C]$$

- Por ejemplo: Considérese una falla con $M = M_w$, a una distancia R de una estructura. Entonces la probabilidad de que se sobrepase un parámetro de diseño como ser $a_{max} = 0.5 g$ es:

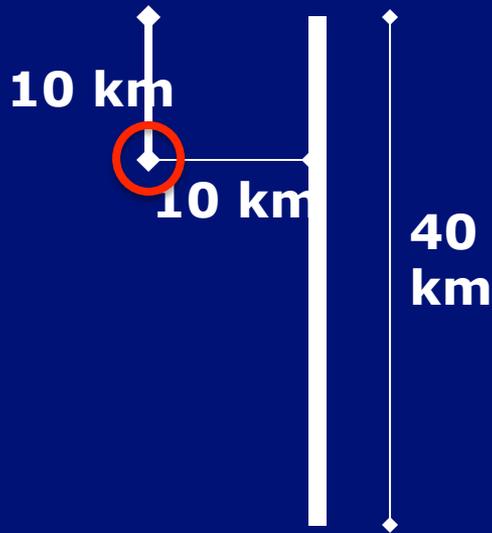
$$P[a_{max} > 0.5] = P[a_{max} > 0.5 | M_w, R] P[M=M_w] P[R=R]$$

$P[a_{max} > 0.5 | M_w, R]$ Se obtiene de una relación de atenuación

$P[M=M_w]$ Se obtiene del modelo de Poisson

$P[R=R]$ Función de la geometría del problema

PSHA: Ejemplo



- Considérese una sola fuente sísmica con las siguientes características:
 - La tasa (ratio) de ocurrencias de sismos mayores a $M_w = 5$ en la falla es $\lambda_{M>5} = 0.5$ por año
 - Dado que un sismo ocurra en la falla, sismos con dos magnitudes diferentes ocurren con la siguiente frecuencia
 - $P[M=6.0]=0.8$ (80%)
 - $P[M=7]=0.2$ (20%)

$$\lambda_{M>5} = N(M5) = 0.5 \text{ por año}$$

Balanceo de la tasa-momento en la Falla:

$$M_o = 10^{1.5M+16.05}$$

$$\text{Tasa de momento} = \mu A(SR), SR = S$$

$$\lambda(\text{tasaEq}) = \frac{\text{MomentRate}}{\text{Moment / Eqk}}$$

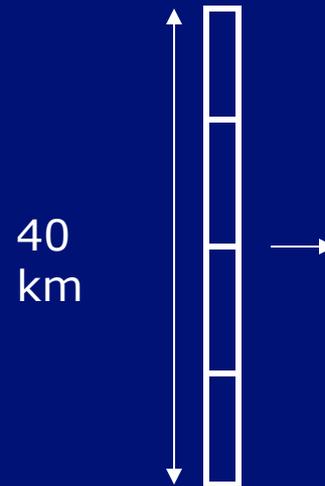


$$N(M_{\min}) = \frac{\mu AS}{10^{(1.5M+16.05)}}$$

PSHA: Ejemplo

- Dado un sismo, la ruptura tiene un largo fijo (o definido por una variable aleatoria)

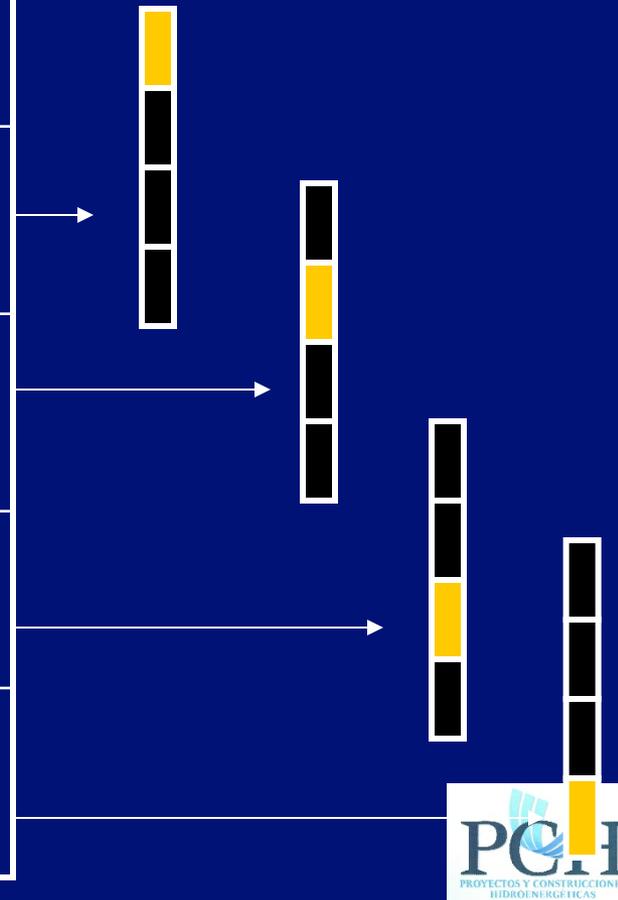
M	L_{Ruptura}
6	10 km
7	40 km



Probabilidad de ruptura en cada segmento es de 0.25 para $M_w=6$

Considérese todas las posibilidades

	M_w	$P[M_w=x]$	R	$P[R=10]$
Caso 1	7	0.2	10	1
Caso 2	6	0.8	10	0.25
Caso 3	6	0.8	10	0.25
Caso 4	6	0.8	$\sqrt{200}$	0.25
Caso 5	6	0.8	$\sqrt{500}$	0.25



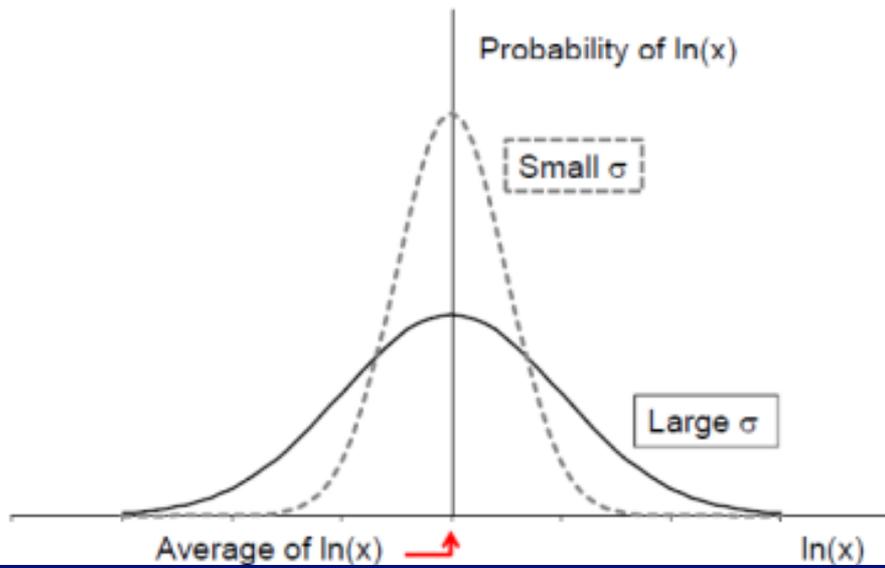
PSHA: Ejemplo

Considérese un parámetro y un valor de diseño $a_{\max} > 0.5 g$

	M	P[M=x] (1)	R	P[R=r] (2)	P[amax>0.5 M, R] (3)	(1)*(2)*(3)
Caso 1	7	0.2	10	1	0.24 (media = .37, desviación = 0.43)	$0.2 * 1 * .24 = \mathbf{0.048}$
Caso 2	6	0.8	10	0.25	0.07 (media = .22, desviación = 0.56)	$0.8 * .25 * .07 = \mathbf{0.014}$
Caso 3	6	0.8	10	0.25	0.07 (media = .22, desviación = 0.56)	$0.8 * .25 * .07 = \mathbf{0.014}$
Caso 4	6	0.8	14.4	0.25	0.02 (media = .15, desviación = 0.56)	$0.8 * .25 * .02 = \mathbf{0.004}$
Caso 5	6	0.8	22.4	0.25	0.002 (media = .10, desviación = 0.56)	$0.8 * .25 * .02 = \mathbf{0.0004}$

$P [a_{\max} > 0.5 | M > 5 \text{ ocurre}]$

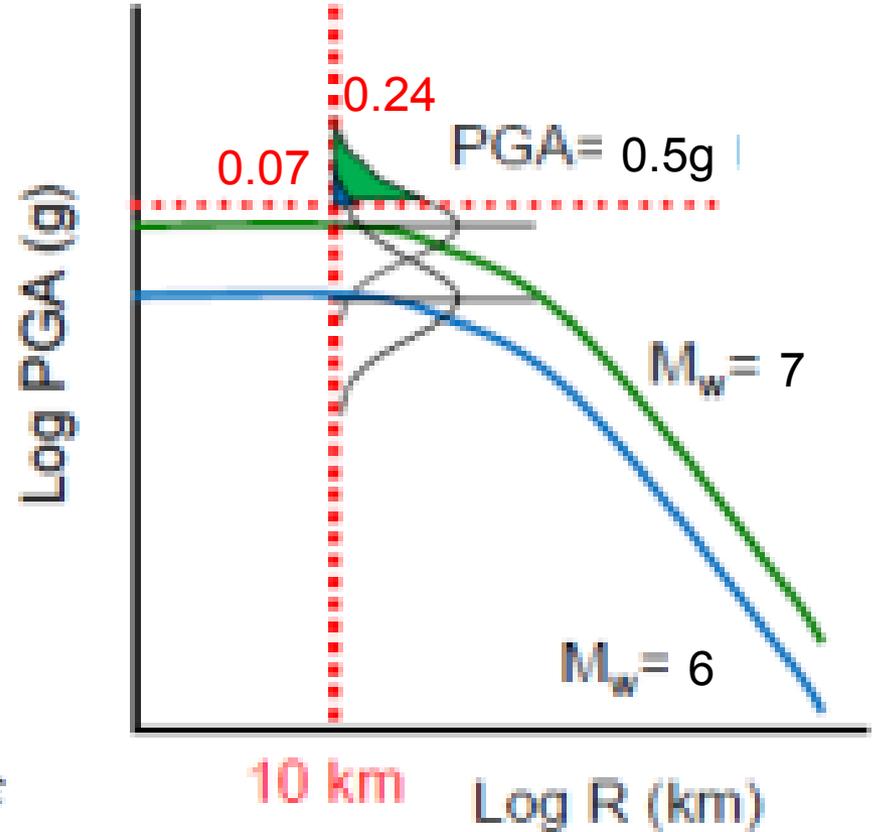
Suma total = 0.081



$$Sa = Sa_{med} \exp(\epsilon\sigma)$$

$$P(\epsilon_1 < \epsilon < \epsilon_2) = \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\epsilon^2}{2}\right) d\epsilon$$

$$P(\epsilon_1 < \epsilon < \epsilon_2) = \text{NORMDIST}(\epsilon_2, 0, 1, 1) - \text{NORMDIST}(\epsilon_1, 0, 1, 1)$$



PSHA: Ejemplo

- Esta probabilidad asume que se da un terremoto mayor a 5, por lo tanto, el resultado obtenido hasta ahora se lee como
 - La probabilidad de que la aceleración máxima sobrepase 0.5 g dado que un sismo mayor a 5 ocurra es de 0.081 (8.1%)
- La probabilidad absoluta se obtiene usando el modelo de Poisson para incorporar la variabilidad temporal (recordar: $\lambda_{M>5} = 0.5 / \text{año}$)

- Definición:

$\lambda_{a_{\max}>x}$: velocidad (ratio) de ocurrencias de $a_{\max} > x$

$$\lambda_{a_{\max}>x} = \lambda_{M>5} P [a_{\max} > 0.5 | M > 5 \text{ ocurre}]$$

$$\lambda_{a_{\max}>x} = 0.5 * .081 = .0405 / \text{año}$$

PSHA: Ejemplo

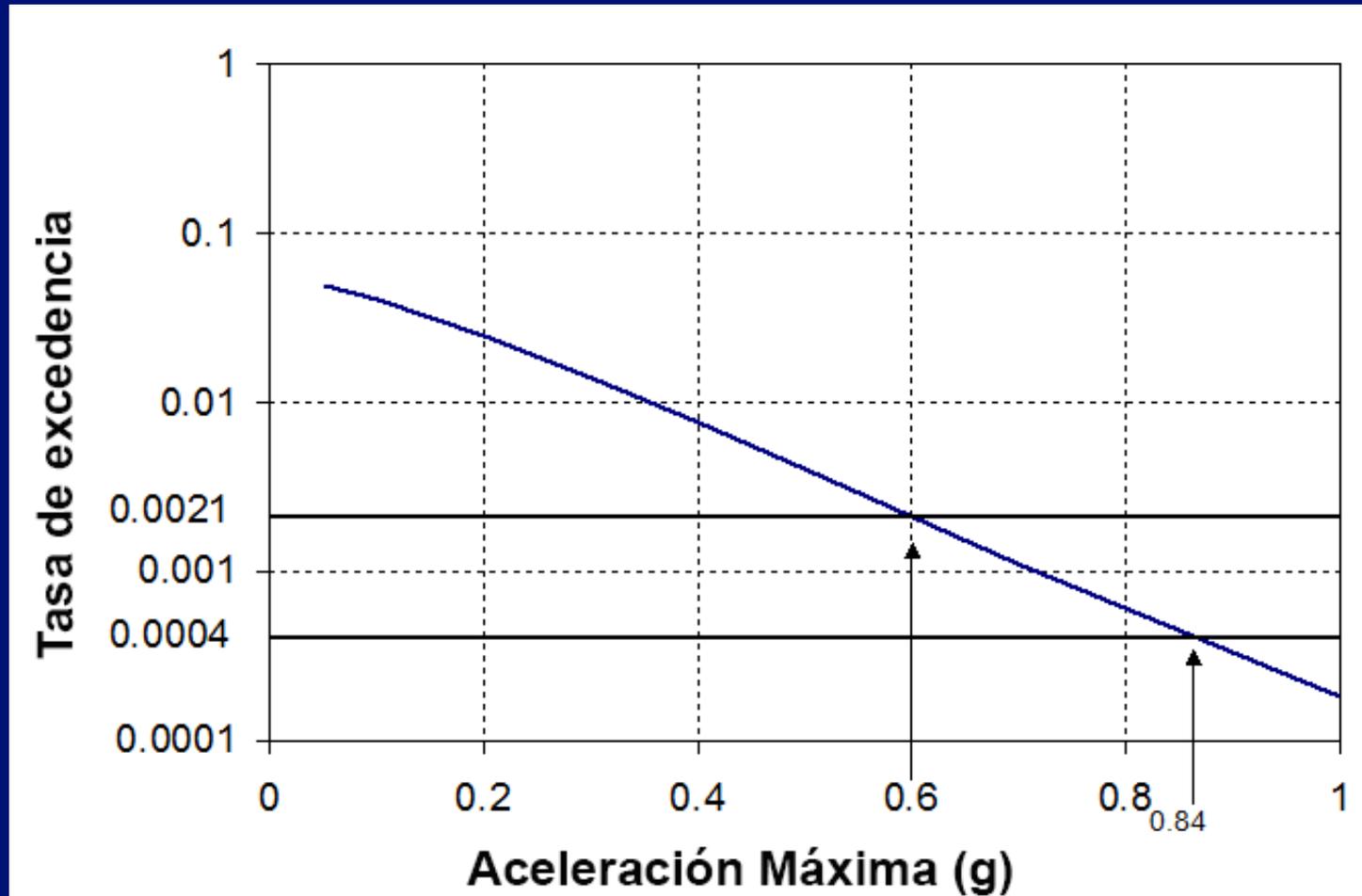
$$\lambda_{a_{\max} > 0.5} = 0.5 * .081 = .0405$$

Observaciones:

- Probabilidad de que a_{\max} sobrepase 0.5 en un año es
 - $P[a_{\max} > 0.5] = 1 - \exp(-0.0405/\text{año} * 1 \text{ año}) = 3.96\%$
- Probabilidad de que a_{\max} sobrepase 0.5 en 50 años
 - $P[a_{\max} > 0.5] = 1 - \exp(-0.0405/\text{año} * 50 \text{ años}) = 87\%$

PSHA: Curva de Peligro Sísmico

- Si se repite el análisis para varios valores de diseño, se obtiene la curva de peligro sísmico.



PSHA

- En Ecuador, la norma de construcción utiliza dos niveles para el diseño sísmoresistente de estructuras:
 - Prevención de daños: Probabilidad de 10% en 50 años
 - Equivale a PR. = 475 años, o $\lambda = 0.0021$
 - Prevención de colapso: Probabilidad 2% en 50 años
 - Equivale a PR. = 2475 años, o $\lambda = 0.0004$
- De la curva de peligro sísmico para nuestro problema obtenemos
 - Para probabilidad de 10% en 50 años: $a_{\max} = 0.6 \text{ g}$
 - (léase: La probabilidad de que las máximas aceleraciones excedan 0.6 g es de 10% en los siguientes 50 años)
 - Para probabilidad de 2% en 50 años: $a_{\max} = 0.84 \text{ g}$

PSHA

- Si hay más fuentes sísmicas se suman los promedios anuales.

$$\lambda_{a_{\max} > x} = \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{j=1}^{N_M} \sum_{k=1}^{N_R} \lambda_i P[a_{\max} > x | m_j, r_k] P[M > m_j] P[R > r_k]$$

N_S = Número de fuentes

N_M = Número de magnitudes en consideración

N_R = Número de distancias en consideración

PSHA para ECUADOR, Vera Grunauer, et al 2017

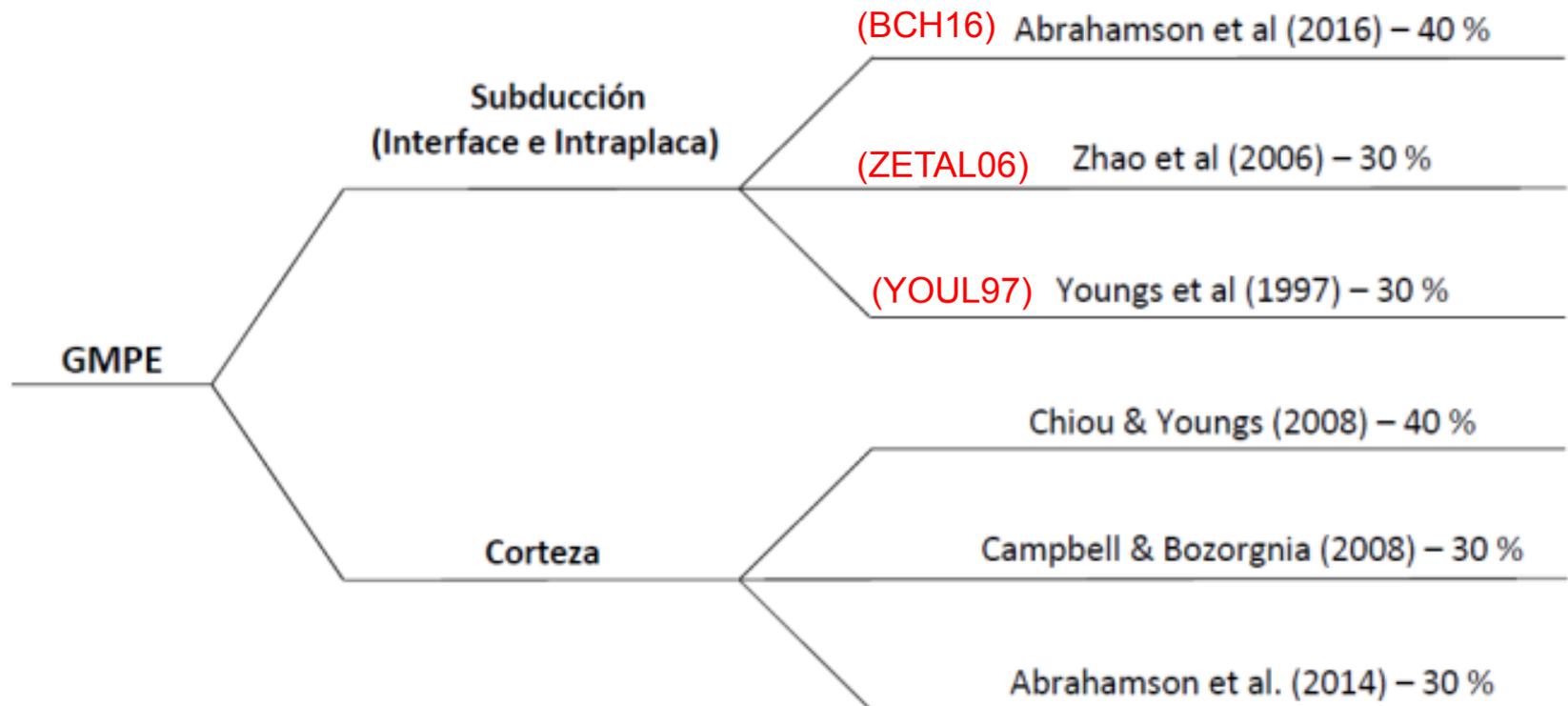
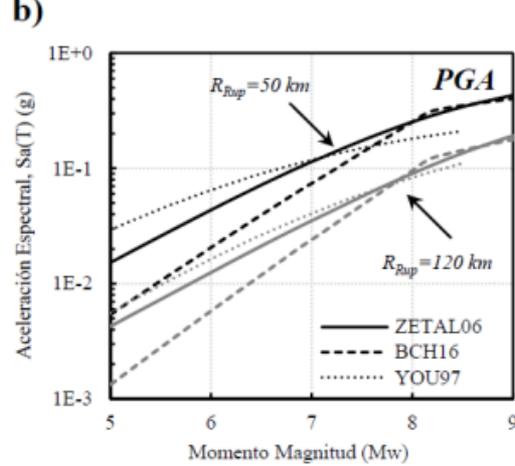
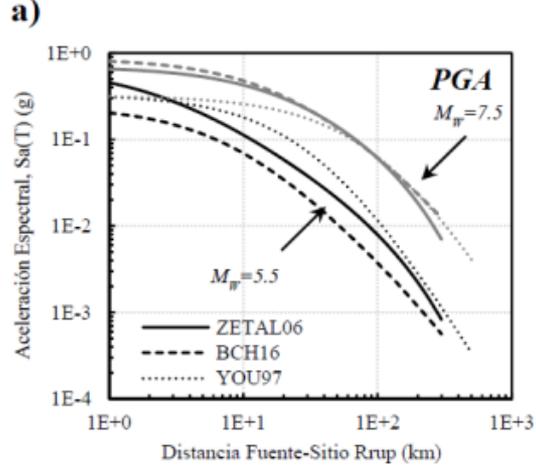
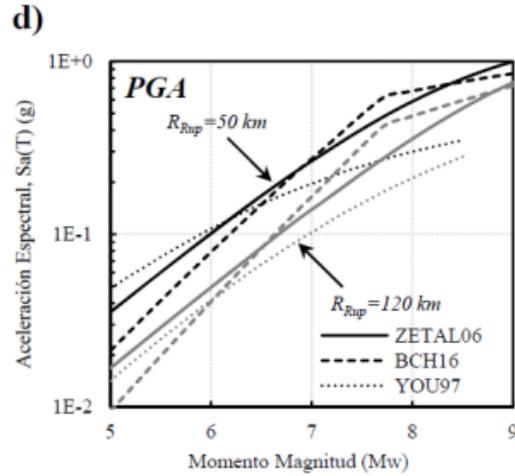
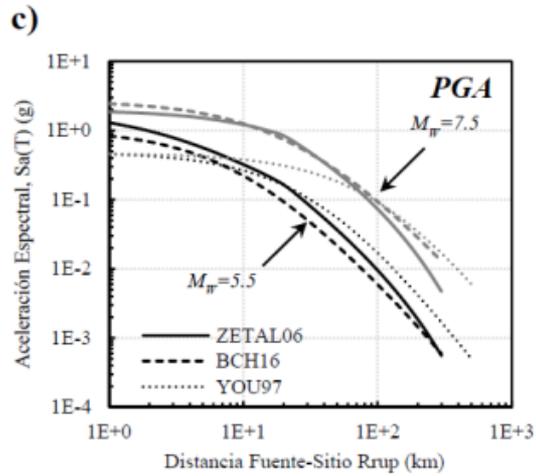


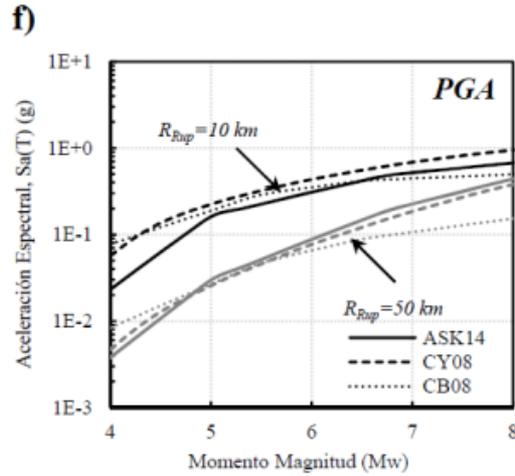
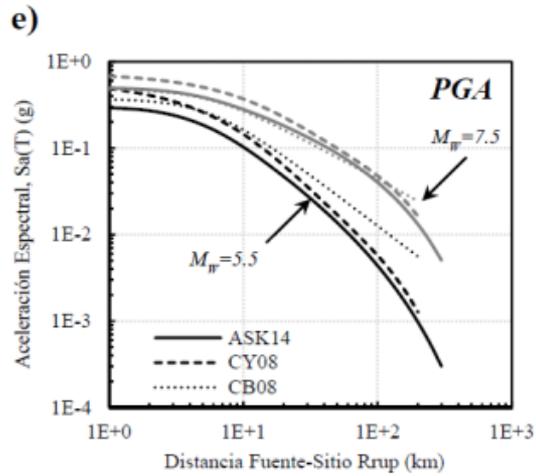
Figura 5.2: Árbol lógico utilizado para GMPE



sismos de subducción interface



sismos de subducción intraplaca (inslab)

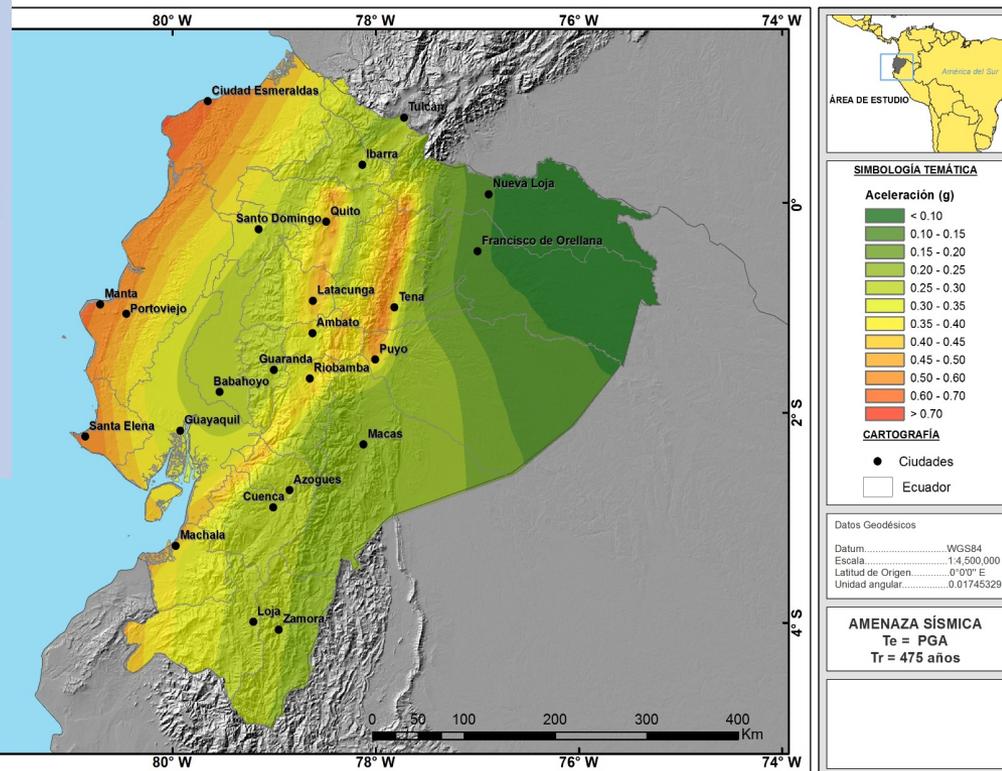
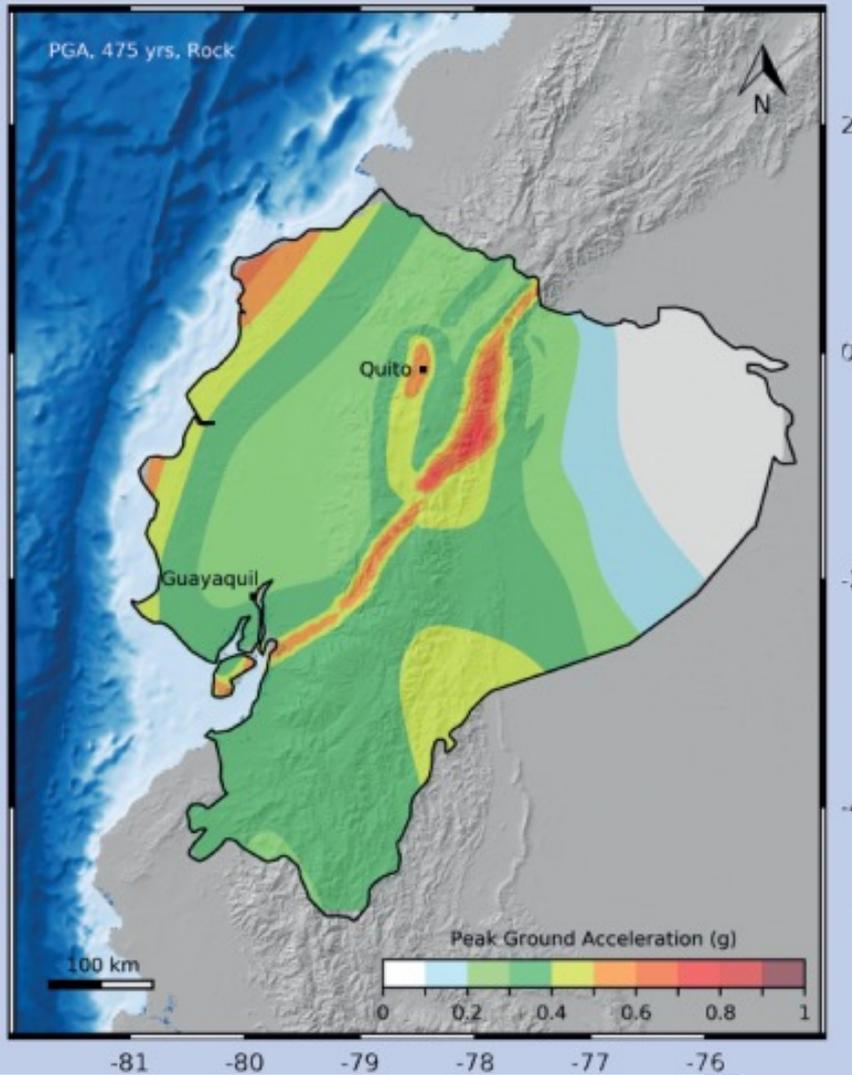


sismos de corteza.

Beauval, C et al (2017)

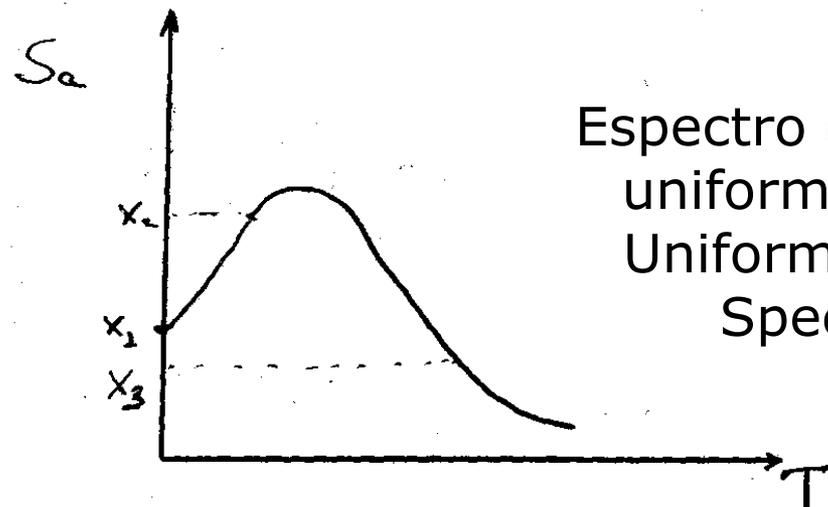
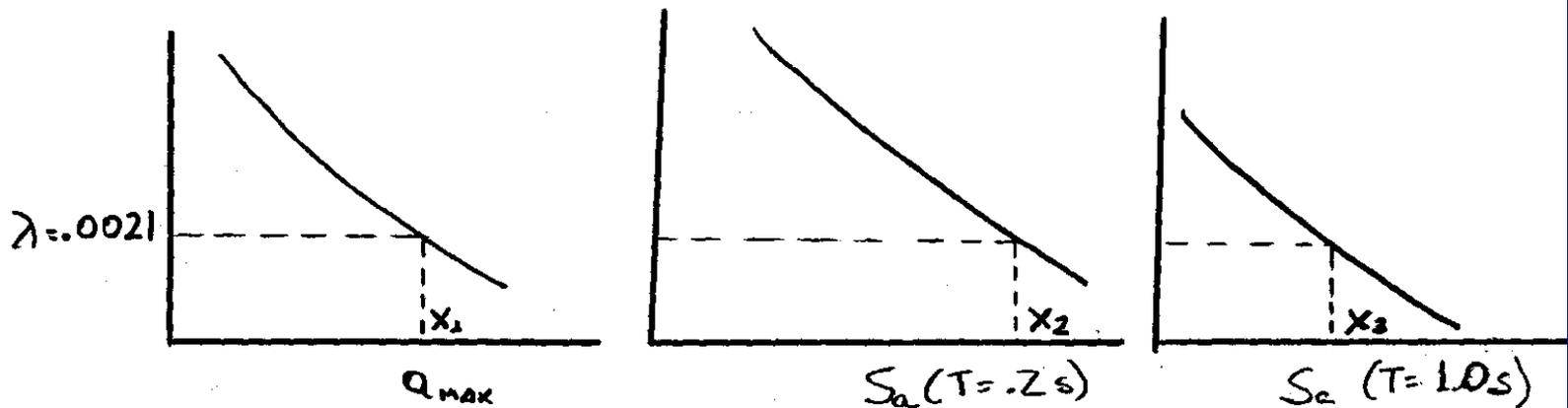
PGA para $T_r = 475$ yr

Vera Grunauer et al (2017)



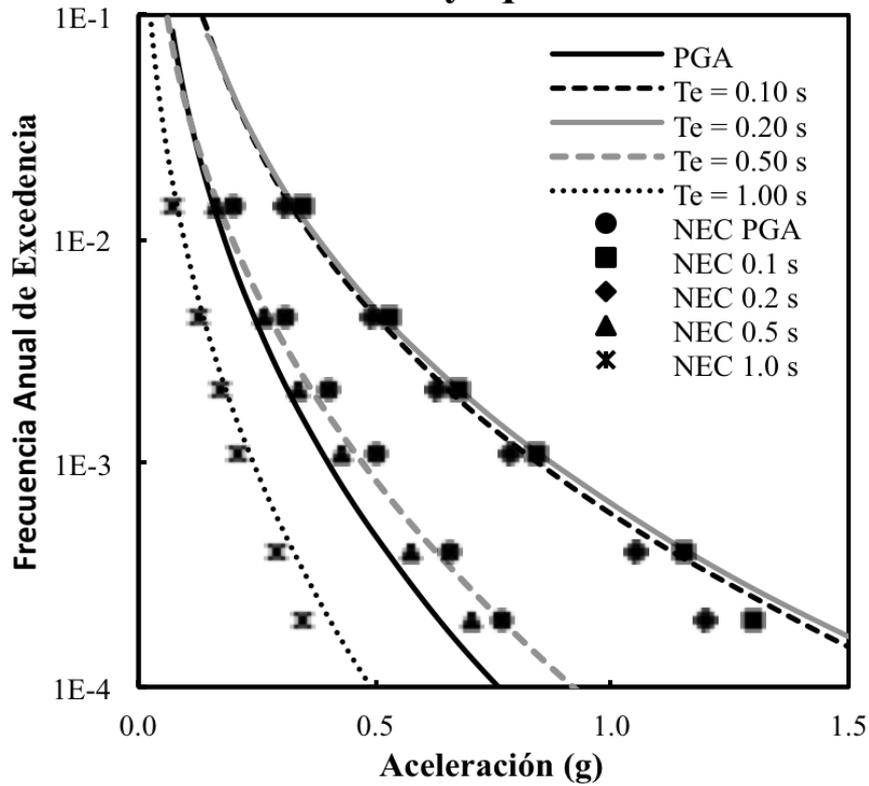
Observaciones respecto a PSHA

Por ej.: considérese una nivel de riesgo de 10% en 50 años ($\lambda = 0.0021$)

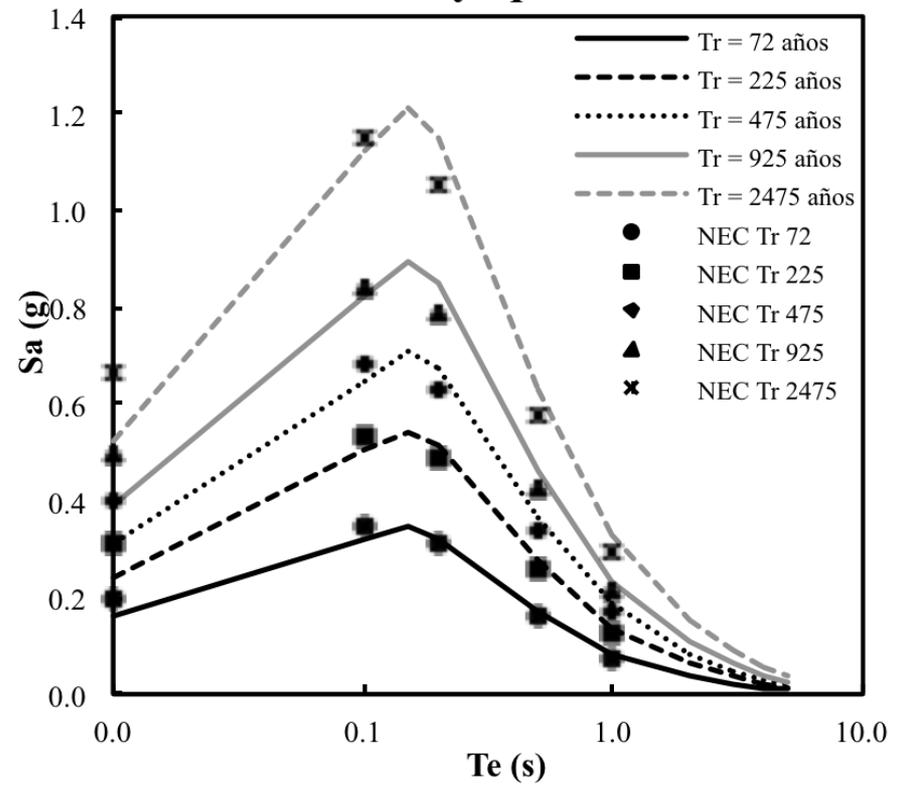


Espectro de peligro
uniforme (UHS:
Uniform Hazard
Spectra)

Guayaquil

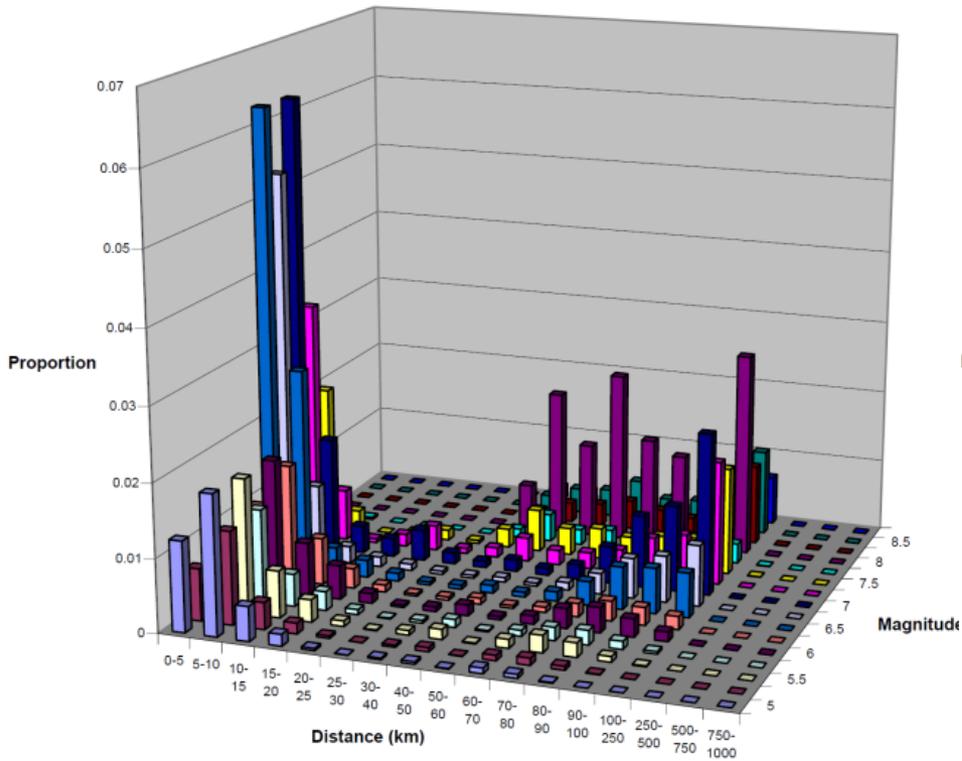


Guayaquil

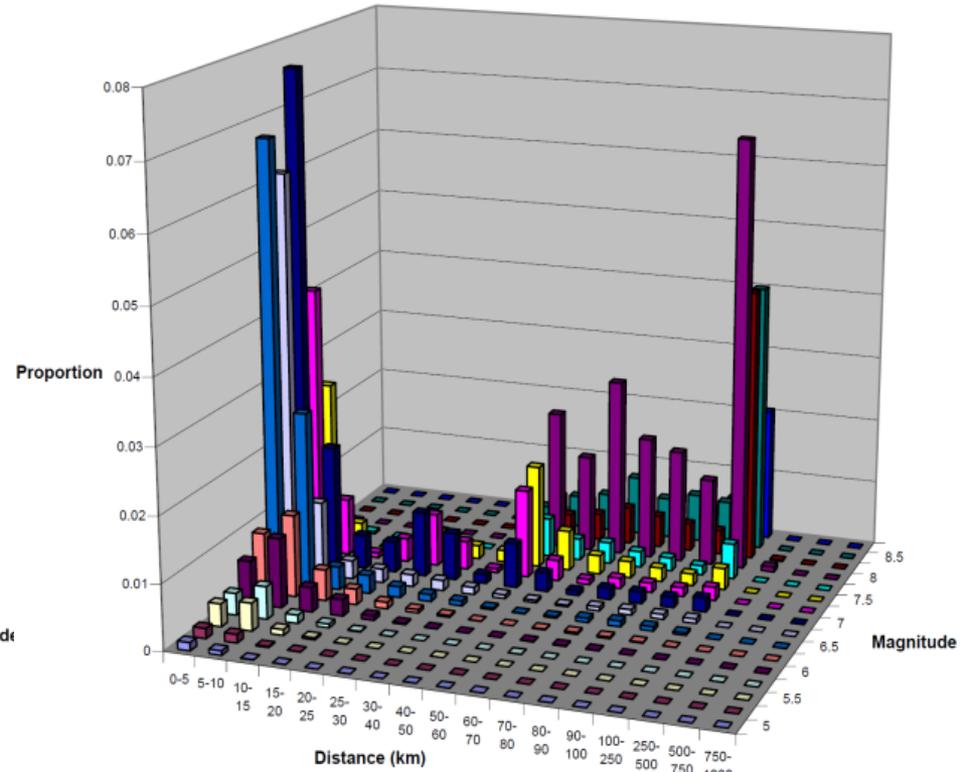


Desagregación del Peligro Sísmico

Guayaquil PGA Tr=475



Guayaquil T=1.0 SA Tr=475



Earthquake Ground Motions

EXAMINE: (Bray, 2017)

Descriptors:

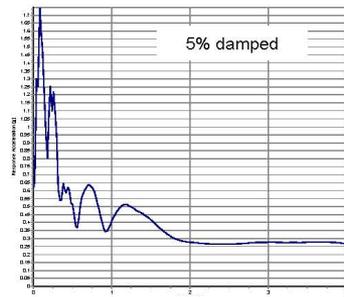
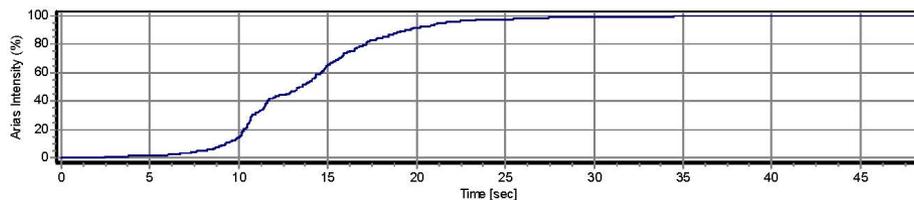
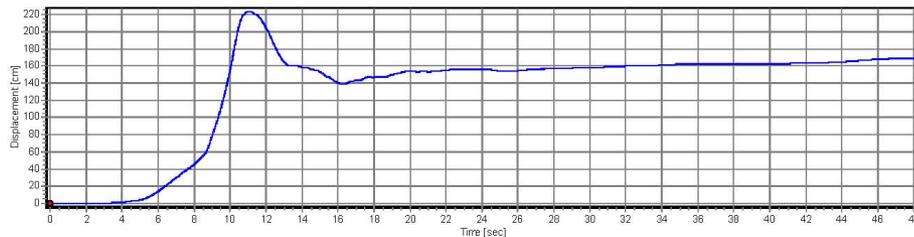
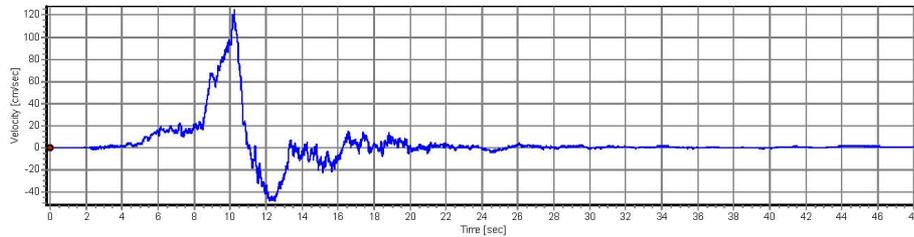
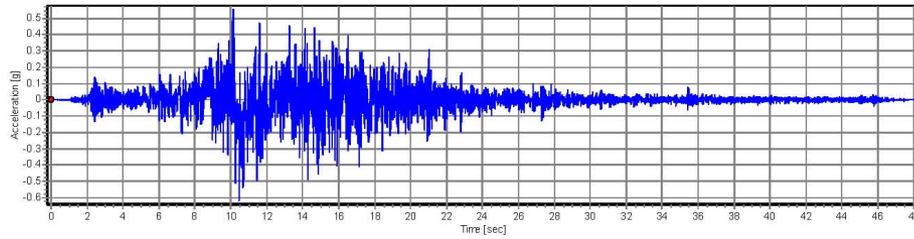
- Tectonic Environment
- Source-to-Site Distance
- Site Conditions (V_{s30})
- Magnitude (M_w)
- Fault Type

Ground Motion Parameters:

- 5% damped acceleration response spectrum
- PGA, PGV, PGD
- Mean Period (T_m)
- Significant Duration (D_{5-95})
- Arias Intensity (I_a)

Time Domain Aspects:

- Acceleration-time history
- Velocity-time history
- Displacement-time history
- Arias Intensity-time history



	Scaled Ground Motion		
PGA (g/s)	0.62	Scale Factor	0.85
PGV (cm/sec)	124.6	M_w	7.28
Mean Period, T_m (sec)	0.33	Closest Distance (km)	2.2
Bracketed Duration (sec)	PGD (cm) x	V_{s30} (m/sec)	685
Significant Duration (sec)	13.1	Arias Int.	x

Figure 7: GM#4 – Landers earthquake – Lucerne station recording – 260 component

December 2007

Buena Vista Landfill
Santa Cruz, California



Note: Graphs representative of the scaled ground motion

Developing Design Rock Motions

Deterministic Approach with Empirical Attenuation Relationships

(Bray, 2017)

1. Identify governing seismic sources and assign M and estimate R for each key scenario (often 2+ scenarios).
2. Use several GMPEs to develop geometric mean target “rock” ($V_{s30} = 600 - 1500$ m/s) acceleration response spectrum and other ground motion parameters (e.g., PGV, T_m , D_{5-95} , I_a) for each key scenario.

Develop “target spectrum” and parameters at median (50%) or “+ sigma” (84%) level.

Developing Design Rock Motions

(Bray, 2017)

3. Find suite of recorded “rock” motions from similar tectonic environment, distance, magnitude, & fault type for each key scenario. [Use ground motion database, eg. PEER: <http://ngawest2.berkeley.edu/>]

T: same tectonic region (e.g., shallow crustal EQs)

R: within $\pm 15\%$ on a log scale or within $\pm 10\text{km}$:

- $R_{\min} < R < R_{\max}$
- $R_{\min} = 10^{[\log(R) - 0.15\log(R)]}$; if $(R - R_{\min}) < 10\text{km}$, $R_{\min} = R - 10\text{km} \geq 0\text{km}$
- $R_{\max} = 10^{[\log(R) + 0.15\log(R)]}$; if $(R_{\max} - R) < 10\text{km}$, $R_{\max} = R + 10\text{km}$

S: within one Site Class (For rock, A to C motions)

M: within $\pm 0.5M$, except within $\pm 0.8M$ for $M > 7.4$

F: same fault type

O: consider rupture directivity, fling effects, etc.

Developing Design Rock Motions

(Bray, 2017)

4. Check spectral shape, and check PGA, PGV, T_m , D_{5-95} , & I_a values of these recorded “rock” motions, and keep those records that are reasonable (i.e., compare to estimates in Step 2).
5. Plot acceleration response spectra of these records and compare to “target” acceleration response spectrum for that scenario
6. If necessary, adjust amplitude of recorded acceleration-time histories by multiplying each acceleration value by a constant to achieve a better comparison with the “target” spectrum, particularly over the range of periods important for this project.

Developing Design Rock Motions

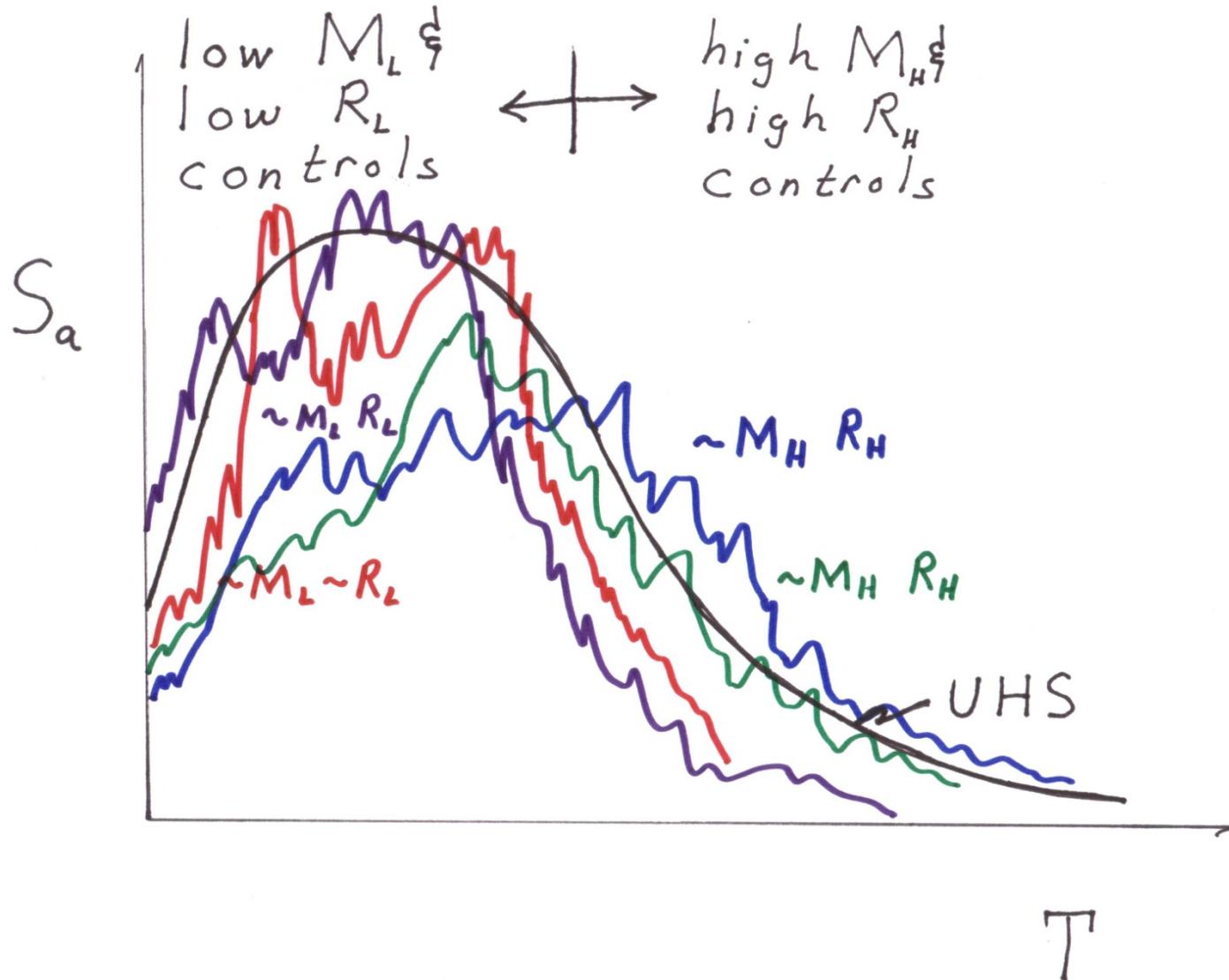
(Bray, 2017)

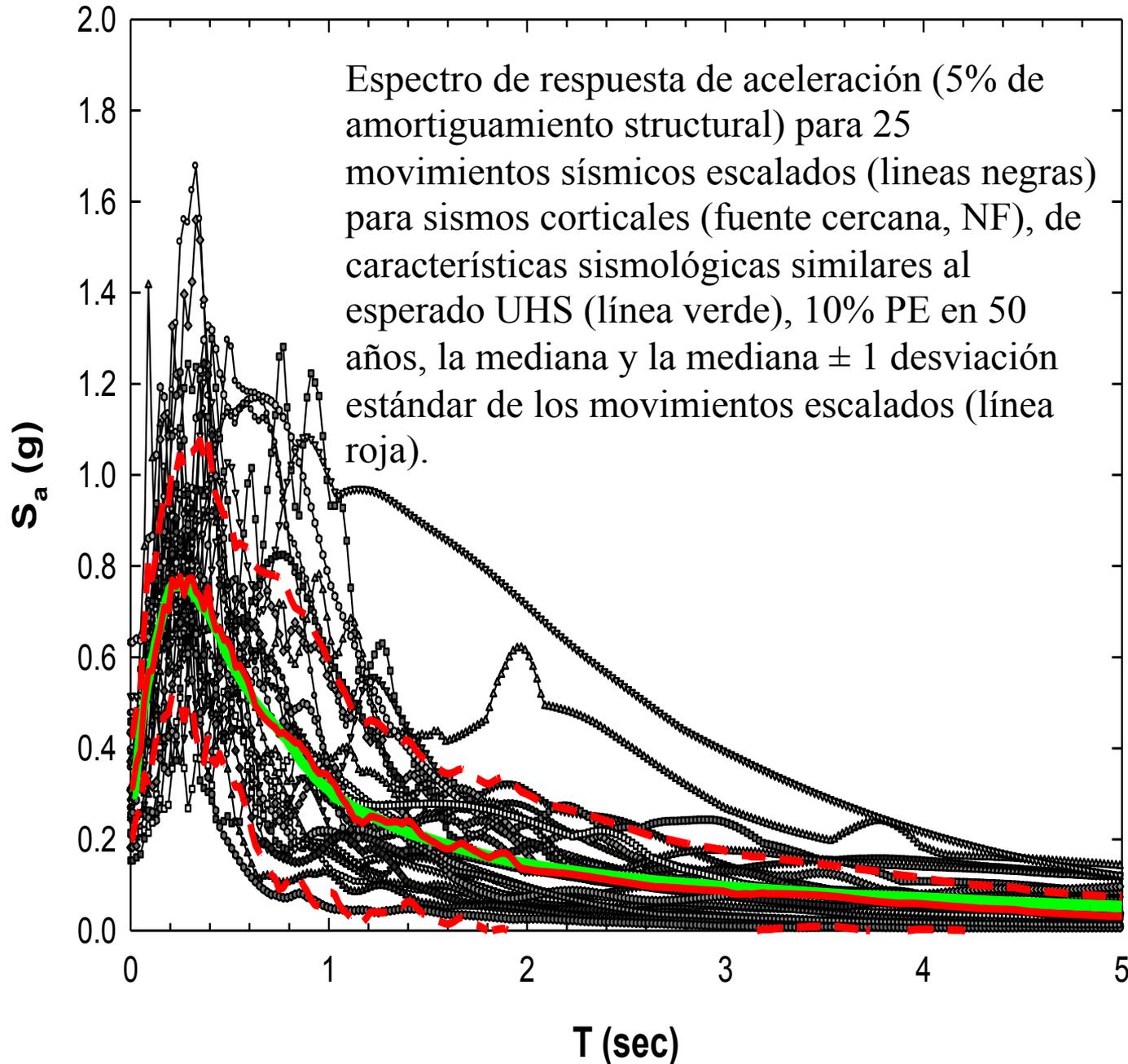
7. Select design suite of 7 – 11 acceleration-time histories for project that best captures the likely range of “rock” ground motions for the key scenarios. Check velocity and displacement-time histories as well. Note that average of spectra should “match” target, not necessarily each one individually.

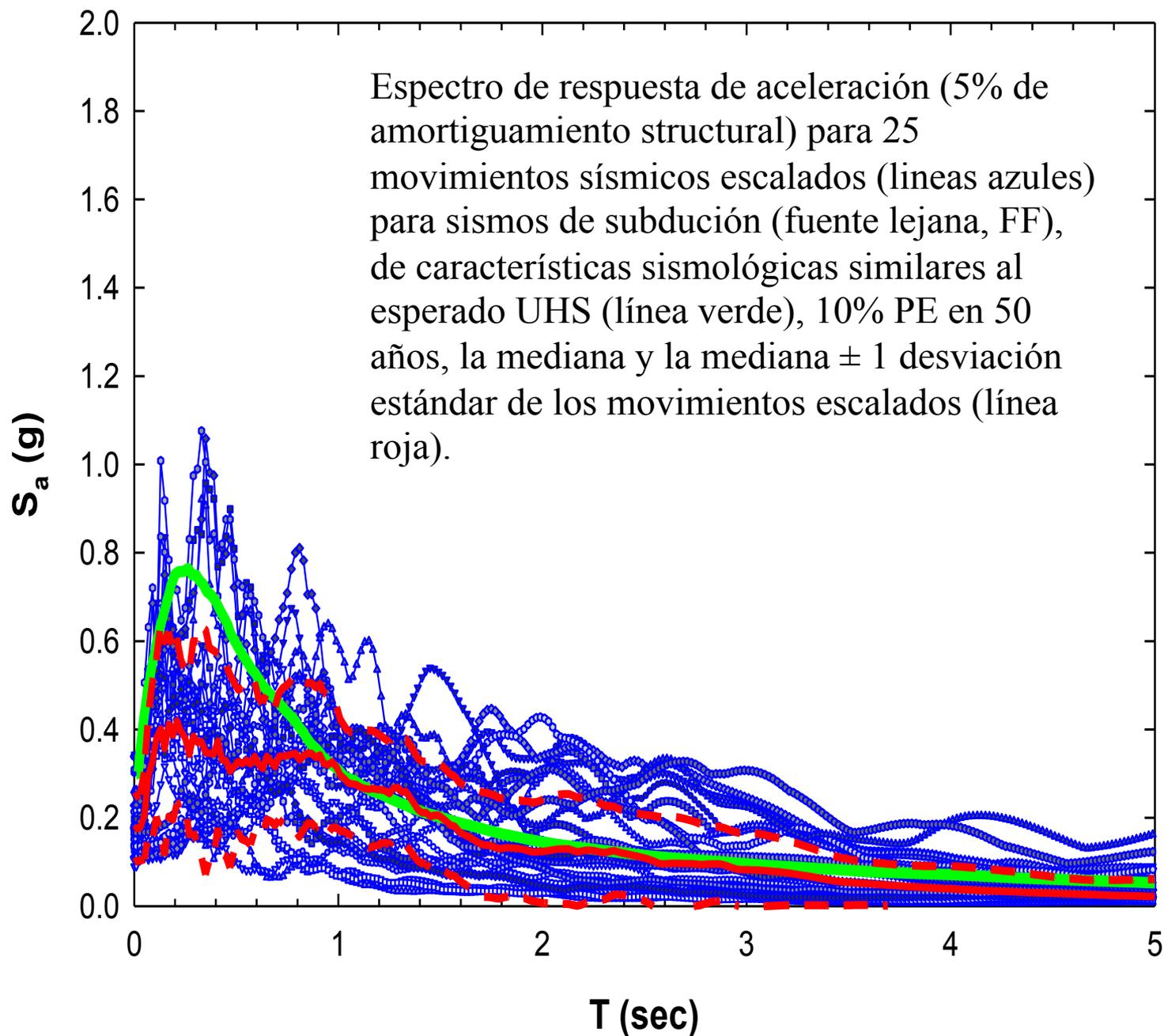
Accel.-Time Histories from PSHA Uniform (or Equal) Hazard Spectrum

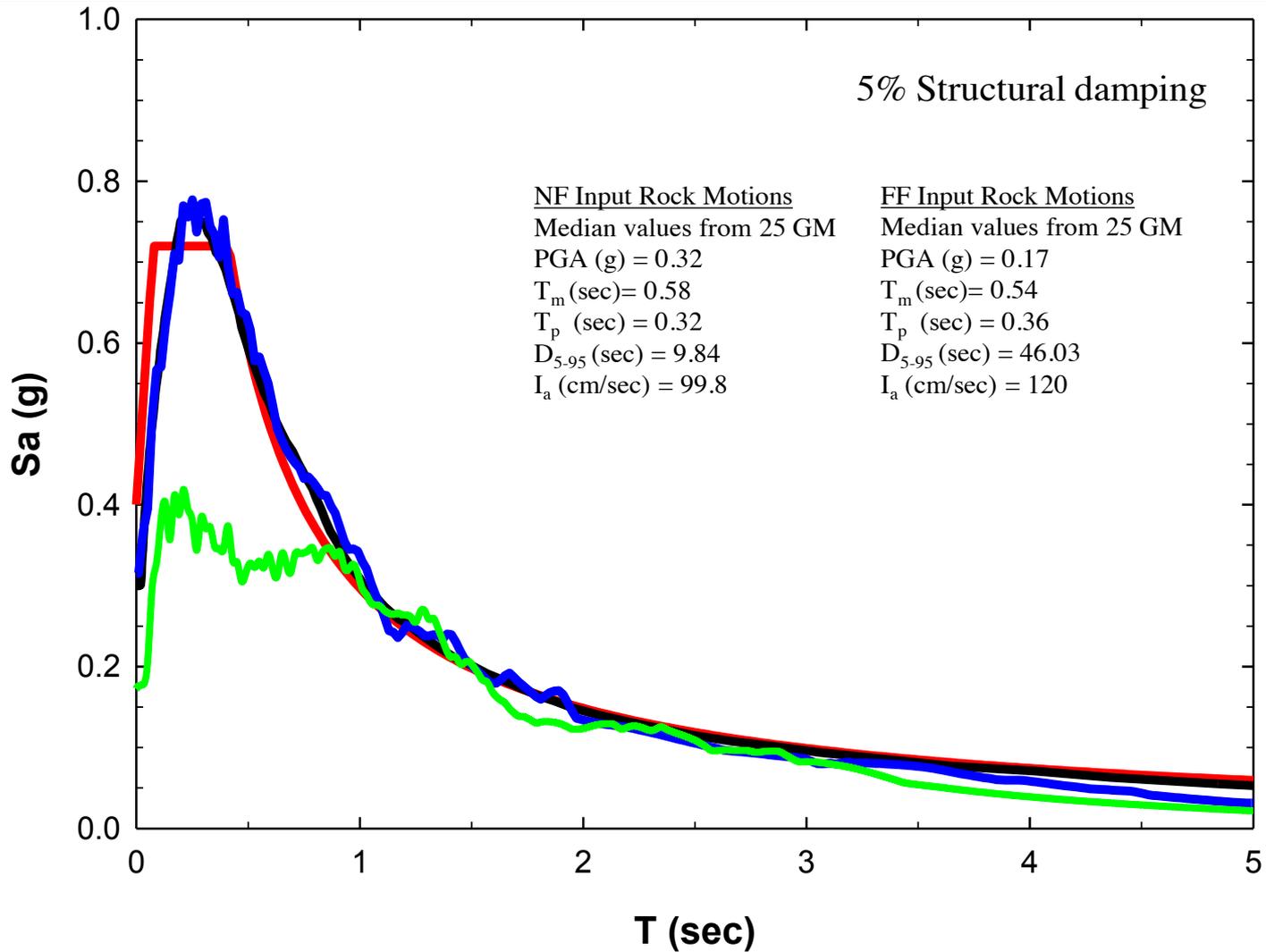
- Each spectral value has the same probability of being exceeded, but each spectral value is not necessarily from same earthquake scenario
- Use de-aggregation for spectral values at various periods to characterize contributing M & R for those values
- Select acceleration-time histories from events corresponding to contributing M & R for that range of spectral values (see Baker & Cornell 2006 for information on conditional mean spectrum)
- Low probability UHS is governed by 84% or higher spectral values from attenuation relations

Selection of PSHA Time Histories









- Design Response Spectrum for Guayaquil City, Soft rock (Type B), NEC 2011
- UHS, Hard Rock site, $T_r=475$ yr, from PSHA for Guayaquil (URS, 2007)
- Median NF Motions (25 scaled ground motions with a scaled factor from 0.6 to 1.4, include 5 FP & 5 FN)
- Median FF Motions (25 scaled ground motions with a scaled factor from 0.5 to 5)