

CURSO ESPECIALIZADO
**PELIGROSIDAD
SÍSMICA**



Método Determinista
(DSHA)

Organizado por:



**SESIÓN 2:
CONCEPTOS
BÁSICOS DE
RIESGO SÍSMICO**

DOCENTE DEL CURSO

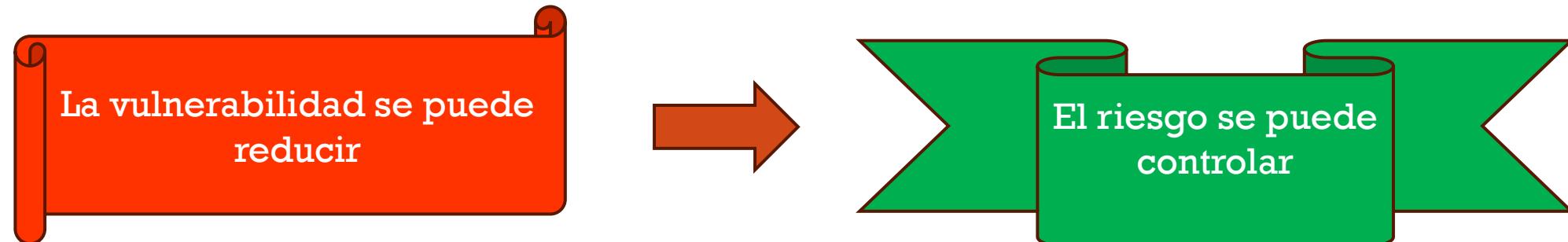
**Mag. Ing. Jorge
Trujillo**



RIESGO SÍSMICO=PELIGROSIDAD SÍSMICA*VULNERABILIDAD*EXPOSICIÓN*COSTOS

RIESGO SÍSMICO=PELIGROSIDAD SÍSMICA*VULNERABILIDAD*EXPOSICIÓN*COSTOS

- **Peligrosidad:** movimiento esperado con cierta probabilidad durante tiempo t
- **Vulnerabilidad:** capacidad de daño de la estructura ante cierto movimiento
- **Exposición:** densidad de población y/o de edificios en la zona
- **Coste:** Valor económico de la reparación de daños



Fuente: Dra. Benito



“Evaluar el riesgo es la única forma de establecer una base que permita la toma de decisiones sobre posibles terremotos” (McGuire, 2004)



¿CÓMO REDUCIR LAS PÉRDIDAS POR TERREMOTOS EN EL FUTURO?

- Mejorar la conciencia social en relación al riesgo
- Mejora del nivel de construcción (reducción de la vulnerabilidad)
- Mejorade la respuesta a las emergencias (planificación de desastres)
- Dimensionamiento de pérdidas para los seguros (GEM, 2008)

Salvar miles de vidas humanas (Terremoto Turquía y Siria, 2023)



Evitar perdidas de millones de soles

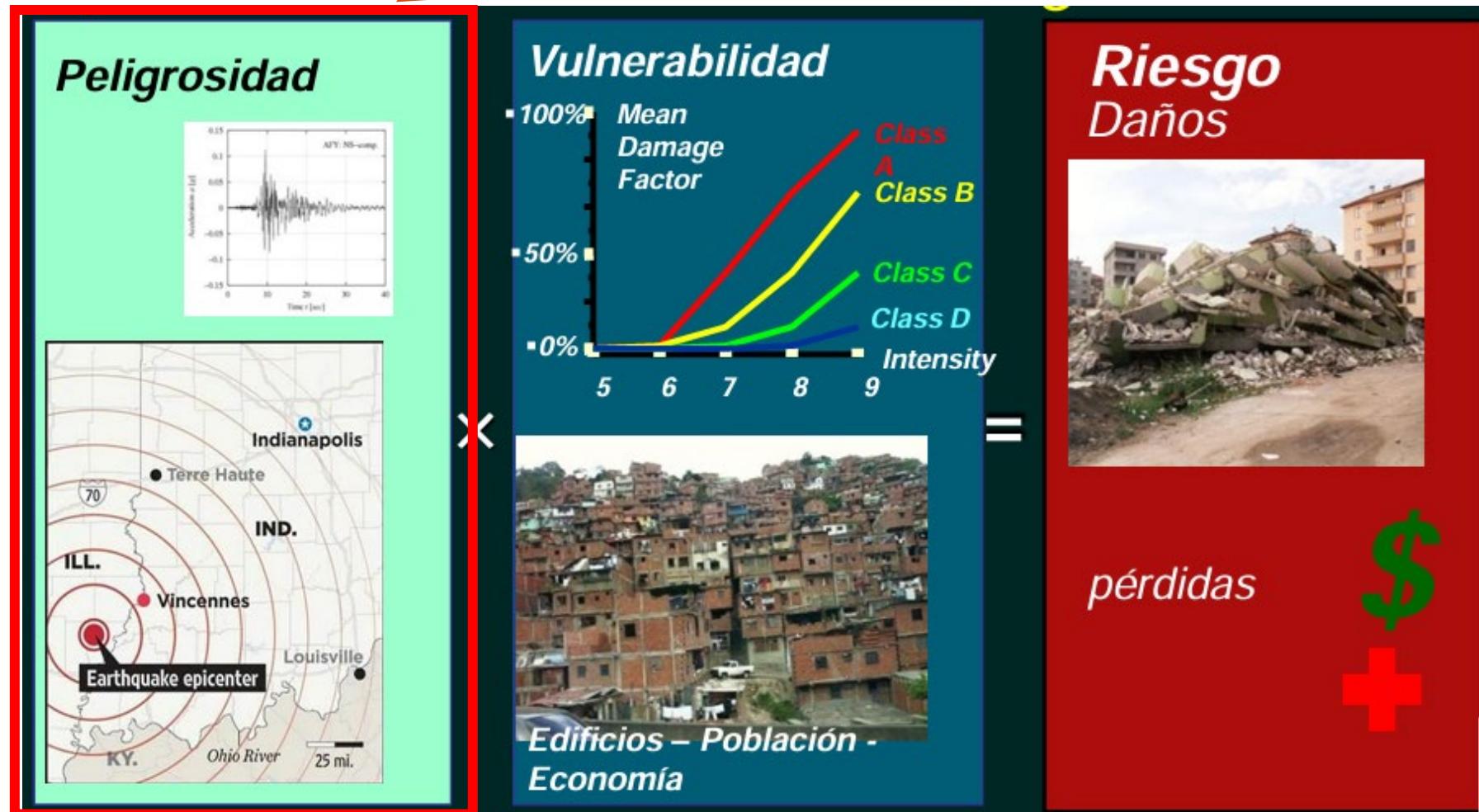


RPP



SEISMICX
DISEÑANDO Y CONSTRUYENDO SEGURO

RIESGO SÍSMICO = PELIGROSIDAD SÍSMICA * VULNERABILIDAD * EXPOSICIÓN * COSTOS

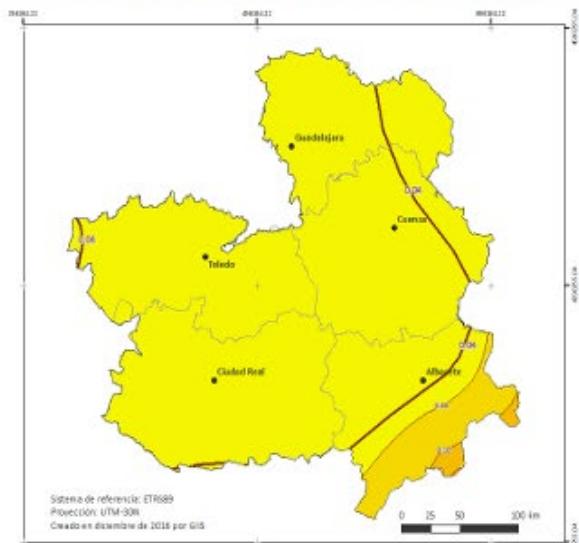


Fuente: Apuntes de Benito (2023)

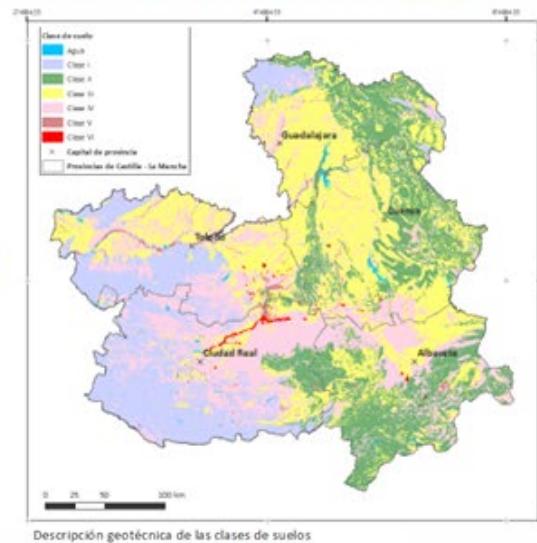
RIESGO SÍSMICO = PELIGROSIDAD SÍSMICA * VULNERABILIDAD * EXPOSICIÓN * COSTOS



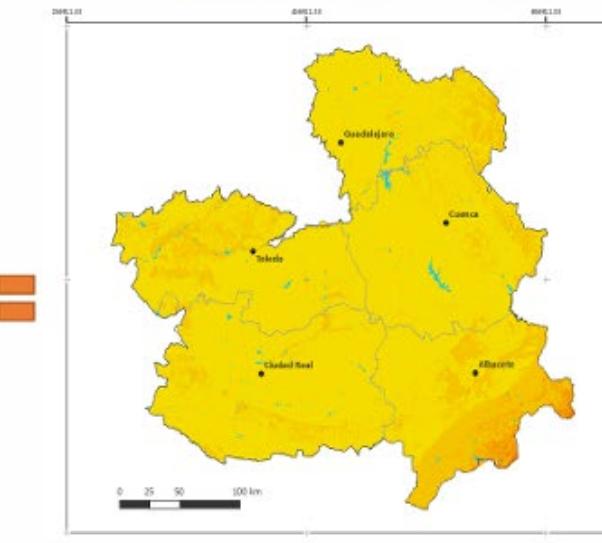
Peligrosidad sísmica en roca (g)



Efecto local (factores de amp.)



Movimiento esperado (g)

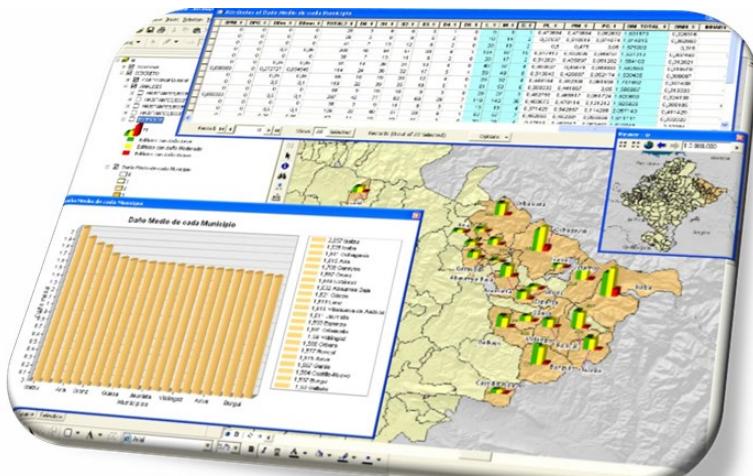


Fuente: Apuntes de Dra.Benito (2023) UPM



RIESGO SÍSMICO=PELIGROSIDAD SÍSMICA*VULNERABILIDAD*EXPOSICIÓN*COSTOS

- Definición de unidad de trabajo
- Número de edificios expuestos
- Tipología constructiva y código de diseño sismorresistente
- Datos de población: número de habitantes por vivienda



Fuente: Apuntes de Dra. Torres (2023) UPM



SEISMICX

DISEÑANDO Y CONSTRUYENDO SEGURO

RIESGO SÍSMICO=PELIGROSIDAD SÍSMICA* **VULNERABILIDAD*** EXPOSICIÓN*COSTOS

“La fragilidad relativa de un edificio ante una acción sísmica determinada”



RIESGO SÍSMICO=PELIGROSIDAD SÍSMICA* **VULNERABILIDAD*** EXPOSICIÓN*COSTOS

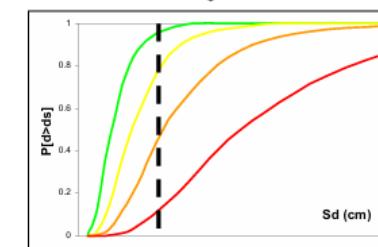
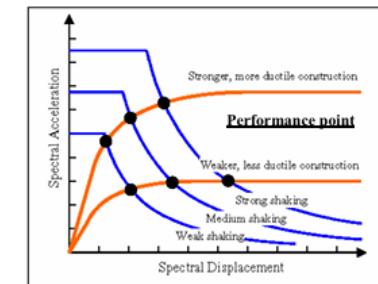
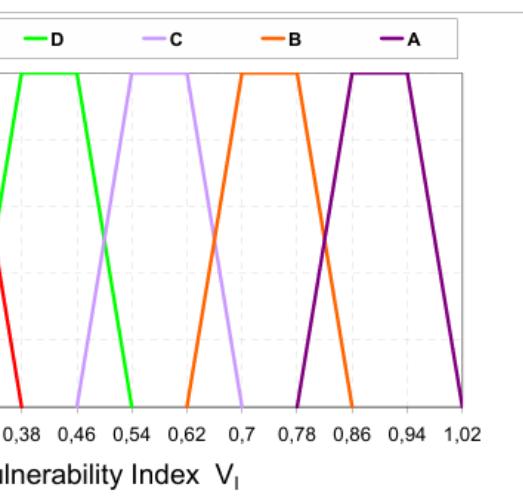
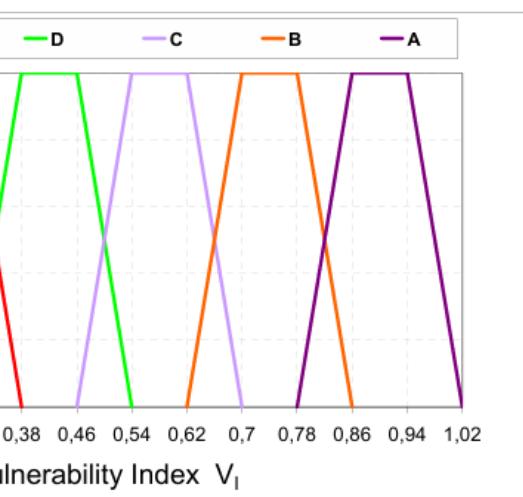
EMS 98

Índice Vulnerabilidad

Hazus

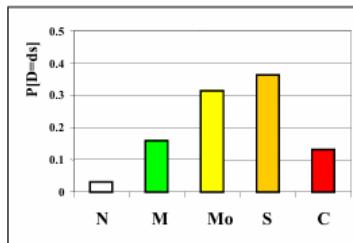
Tipo de Estructura	Clase de Vulnerabilidad A B C D E F
Paredes de peña viva / roca de cantera	O O O O O O
Adobe (ladrillo de tierra)	O O O O O O
Roca simple	O O O O O O
Roca masiva	O O O O O O
Unidades de roca manufacturada	O O O O O O
Ladrillo no reforzado, pisos de HA	O O O O O O
Reforzado o confinado	O O O O O O
Armadizo sin diseño sismorresistente (DSR)	I O I O I O
Armadizo con un nivel moderado de DSR	I O I O I O
Armadizo con un alto nivel de DSR	I O I O I O
Paredes sin DSR	I O I O I O
Paredes con un nivel moderado de DSR	I O I O I O
Paredes con un nivel alto de DSR	I O I O I O
Estructuras de acero	I O I O I O
Estructuras de madera	I O I O I O

Clasificación del daño a edificios de mampostería	
Grado 1: Sin daños o daños leves (sin daño estructural, daño no estructural leve)	
Grietazas muy delicadas en muy pocos muros. Caída de pequeños pedazos de yeso o enfoscado.	
Caída de rocas sueltas desde la parte alta de edificios en muy pocos casos.	
Grado 2: Daños moderados (daño estructural leve, daño no estructural moderado)	
Grietazas en muchos muros.	
Caída de pedazos grandes de guarnecido.	
Colapso parcial de chimeneas.	
Grado 3: Daños sustanciales a severos (daño estructural moderado, daño no estructural severo)	
Grietazas largas y extensas en casi todos los muros.	
Caída de tejas. Fractura de las chimeneas en la línea del techo; fallo de los elementos individuales no estructurales (particiones, frontones).	
Grado 4: Daños muy severos (daño estructural severo, daño no estructural muy severo)	
Fallo serio de los muros; fallo estructural parcial de techos y pisos.	
Grado 5: Destrucción (daño estructural muy severo)	
Colapso total o casi total.	



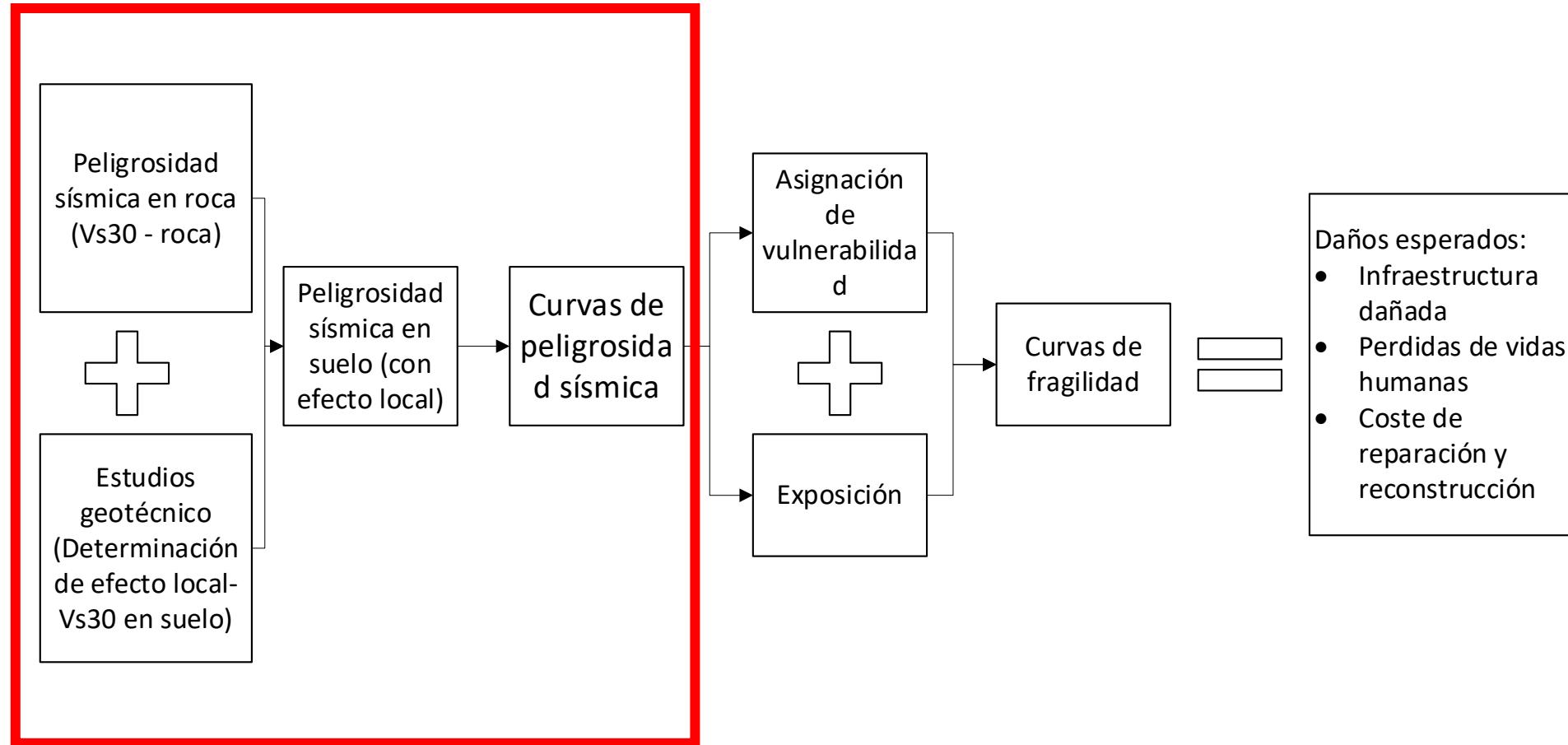
Damage States

No.	Label	Description	Name
1	M1L	Low-Rise	
2	M1M	Mid-Rise	
3	M12L	Low-Rise	
4	M12M	Simple stone Mid-Rise	
5	M12H	High-Rise	
6	M13L	Low-Rise	
7	M13M	Massive stone Mid-Rise	
8	M13H	High-Rise	



¿Como se hace un estudio de riesgo sísmico?

PELIGROSIDAD SÍSMICA



Fuente: Elaborado por Mag. Ing. Jorge Trujillo modificado de apuntes de Dra.Benito

PELIGROSIDAD SÍSMICA

- **Método determinista:**

El movimiento sísmico del suelo se debe a un escenario sísmico concreto, relacionado con la ocurrencia de un único terremoto.

El escenario definido dado por:

- La localización del terremoto, que determina la **distanzia fuente- emplazamiento**
- el **tamaño** del terremoto (normalmente, la magnitud).



SEISMICX

DISEÑANDO Y CONSTRUYENDO SEGURO

PELIGROSIDAD SÍSMICA

- Método determinista:

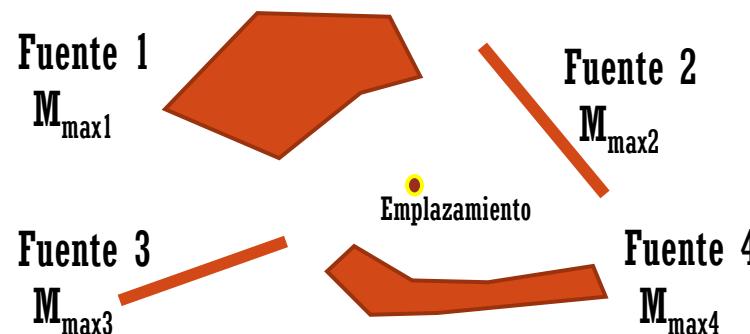
Generalmente se elige el caso más desfavorable, es decir, el terremoto que produciría el mayor movimiento en el emplazamiento, y se calcula el movimiento según este esquema:

1. Identificación de fuentes sísmicas en el entorno. Magnitud (máxima) esperable
2. Cálculo distancia fuente-emplazamiento. Normalmente la más corta.
3. Cálculo del movimiento en el emplazamiento aplicando un modelo de atenuación ψ , generalmente para las combinaciones M_i y D_i que dan mayor movimiento A_i .
4. Selección del movimiento del suelo (consideración de la incertidumbre).

Métodos deterministas

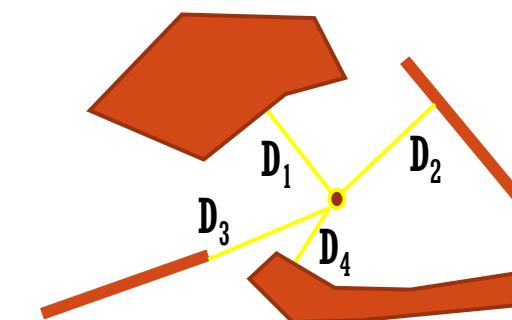
1

Identificación de fuentes sísmicas en el entorno. Magnitud (máxima) esperable.



2

Cálculo distancia fuente-emplazamiento. Normalmente la distancia más corta.

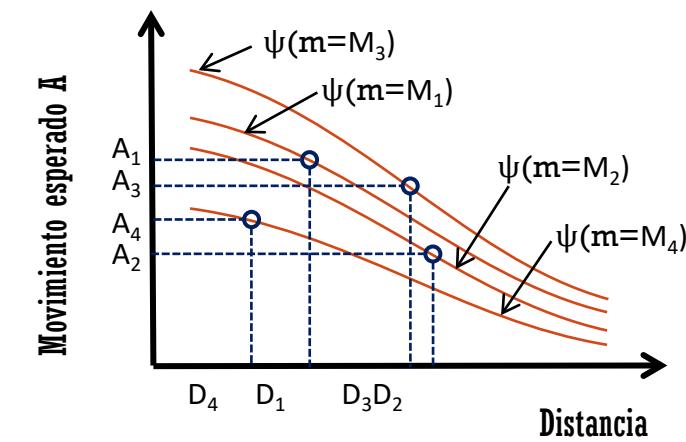


3

Cálculo del movimiento en el emplazamiento aplicando un modelo de atenuación ψ , generalmente para las combinaciones M_i y D_i que dan mayor movimiento A_i .

4

Selección del nivel de movimiento. Habitualmente el mayor, en el ejemplo A_1 .

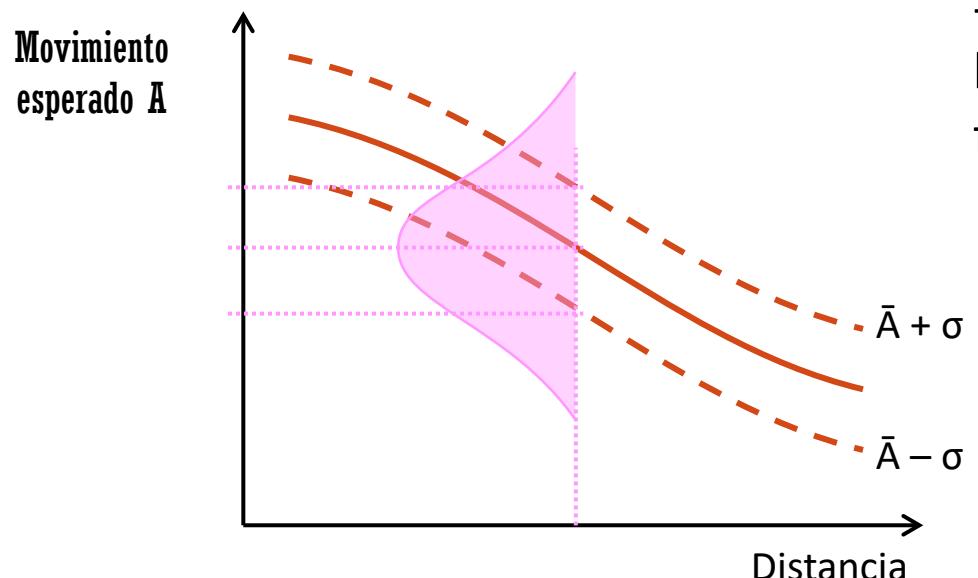


Métodos deterministas

4

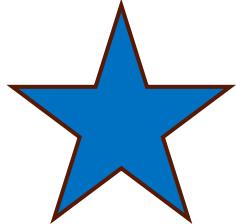
Selección del nivel de movimiento

Pero, si calcula el movimiento esperado para una magnitud y una distancia, el modelo de atenuación no nos da un valor único, nos da una distribución de valores. Entonces, ¿cuál escoger? ¿con la media? ¿con la mediana? ¿con la media más un sigma?



- Habitualmente se elige el percentil 84 la distribución de valores de movimiento fuerte para la M y la D consideradas.

- Por tanto, en el método determinista la probabilidad también se tiene en cuenta de alguna manera.



Copiar y pegar en Python, ejemplo pequeño:

```
import numpy as np

# Lista de aceleraciones (en g)
aceleraciones = [0.10, 0.15, 0.18, 0.22, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50]

# Calcular el percentil 84
percentil_84 = np.percentile(aceleraciones, 84)

print("Percentil 84:", percentil_84)
```

PELIGROSIDAD SÍSMICA

- **Método probabilista:**

El movimiento sísmico del suelo se debe al conjunto de las fuentes sísmicas que afectan al emplazamiento, con sus diversas probabilidades de ocurrencia y distribuciones de magnitud.

Por tanto, no se obtiene el movimiento producido por un evento concreto, sino por el conjunto de las fuentes sísmicas con sus respectivas probabilidades

PELIGROSIDAD SÍSMICA

- **Método probabilista:**

La implementación del método probabilista implica seguir estas fases:

1. Identificación y caracterización espacial de fuentes sísmicas en el entorno.
2. Caracterización de la sismicidad de la fuente tanto en el tiempo como en el tamaño de los terremotos, por medio de un modelo de recurrencia.
3. Cálculo del movimiento en el emplazamiento aplicando un modelo de atenuación ψ a todos los terremotos que se pueden generar en todas las fuentes sísmicas.
4. Estimación de la peligrosidad mediante la agregación de las contribuciones probabilidades de excedencia de un nivel de movimiento preestablecido en el emplazamiento a causa de todas las fuentes, con todas las distribuciones de probabilidades mencionadas.

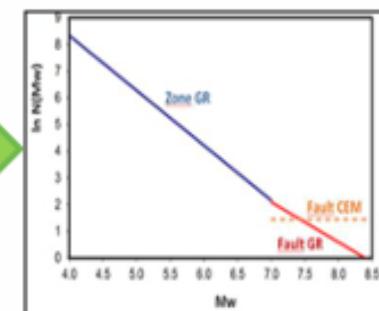
TECTÓNICA



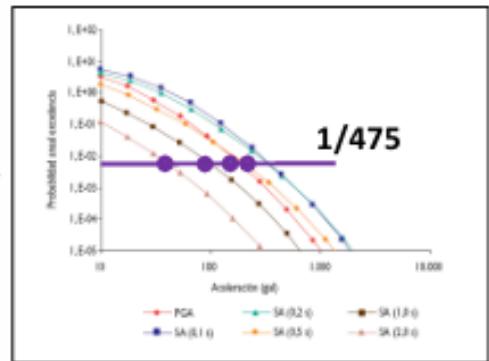
Zonificación



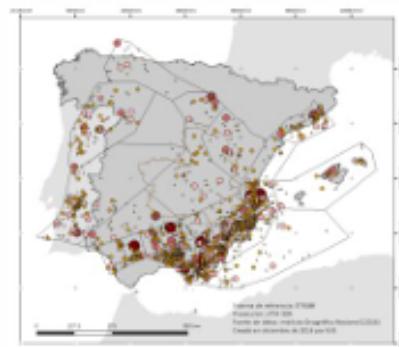
Ley de recurrencia



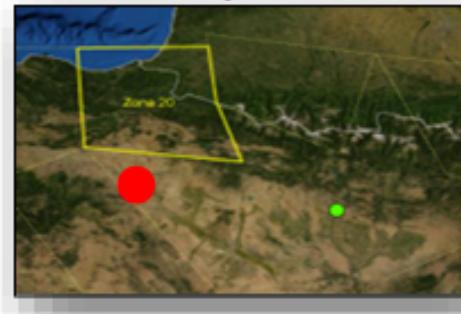
Curva de Peligrosidad



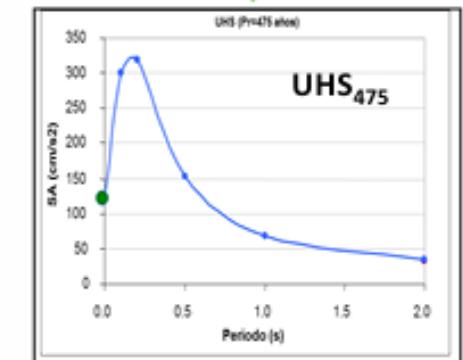
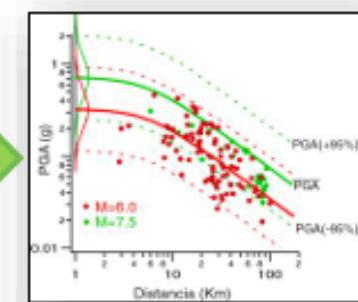
SISMICIDAD



Fuente-emplazamiento



Ley de atenuación



$$P_{\text{anual}}(y > Y) = \lambda_{\text{anual}}(y > Y) \tau \iiint P(y > Y | m, r, \varepsilon) \cdot p(m) \cdot p(r) \cdot p(\varepsilon) dm dr d\varepsilon$$

Fuente: Dra. Belén Benito UPM (2023)

PELIGROSIDAD SÍSMICA

La **Peligrosidad Sísmica (H)** se define como la probabilidad P de que un cierto valor Y del parámetro de movimiento “y” sea excedido en un emplazamiento específico durante un determinado tiempo de exposición t.

$$H = P(y \geq Y, t)$$

Por tanto, para calcular la peligrosidad es necesario:

1. indicar **el nivel de movimiento Y** para el que se calcula la probabilidad de excedencia (parámetro de movimiento y valor que toma el parámetro).
2. indicar el tiempo de exposición el tiempo de exposición t.

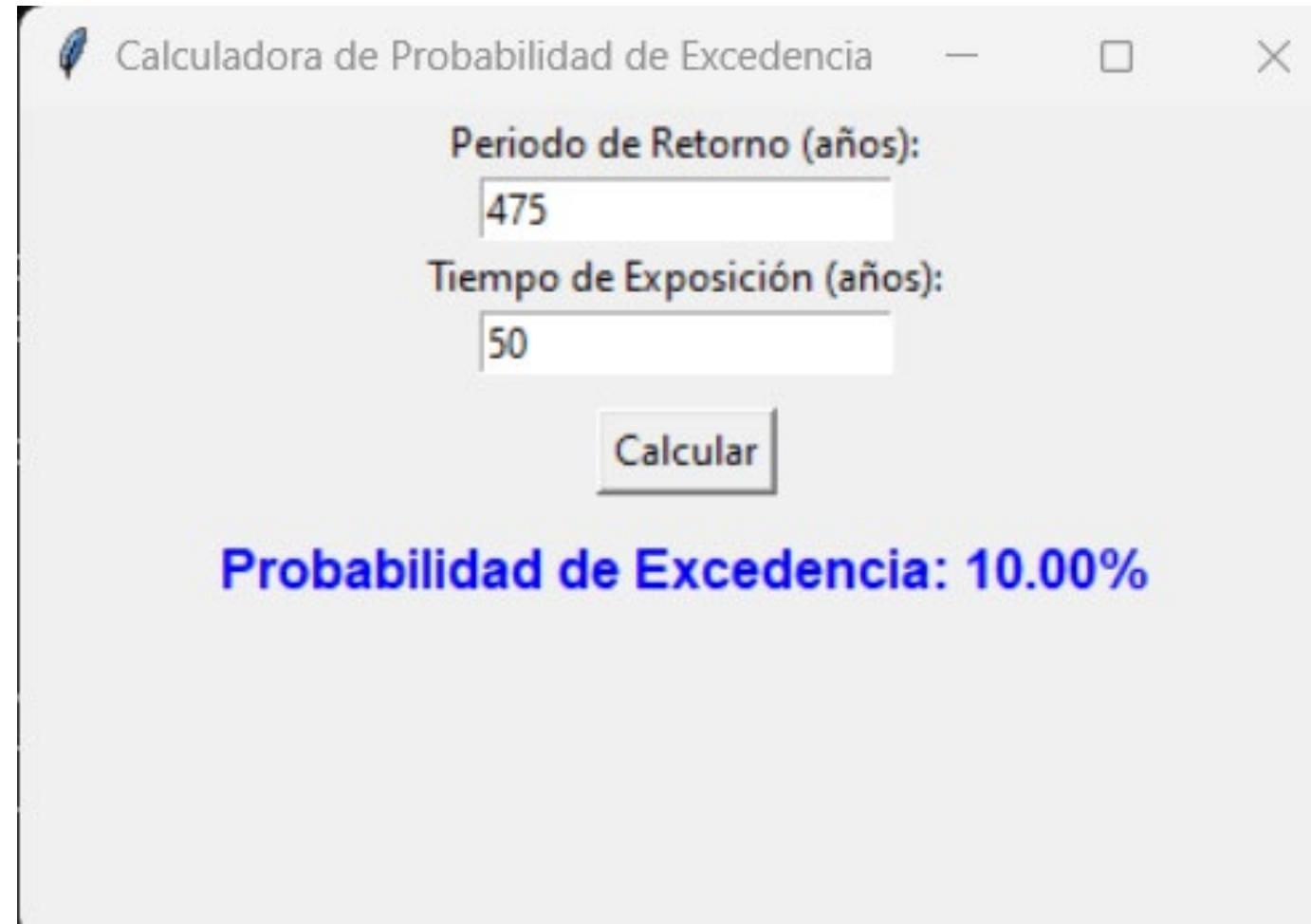
$$P[y > Y] = P[y > Y|m, r, \varepsilon] \cdot P[m] \cdot P[r] \cdot P[\varepsilon]$$

$$P[y > Y \text{ en } t] = 1 - e^{-t/T_r}$$

$$T_r = 475 \text{ años} \quad \dots \quad P_{\text{exced}} = 0.1 \text{ en 50 años, o más comúnmente:}$$

Fuente: Dra. Belén Benito UPM (2023)

Código de python iterativo para calcular Pexcedencia (sabiendo periodo de retorno y años de exposición)



```
import tkinter as tk
from tkinter import ttk

def calcular_probabilidad():
    try:
        tr = float(entry_tr.get()) # Periodo de retorno
        t_exp = float(entry_t_exp.get()) # Tiempo de exposición

        # Cálculo de la probabilidad de excedencia
        prob_excedencia = 1 - (1 - 1/tr) ** t_exp
        label_resultado.config(text=f"Probabilidad de Excedencia: {prob_excedencia * 100:.2f}%")
    except ValueError:
        label_resultado.config(text="Ingrese valores válidos.")

# Crear ventana
root = tk.Tk()
root.title("Calculadora de Probabilidad de Excedencia")
root.geometry("400x250")

# Etiquetas y entradas
tk.Label(root, text="Periodo de Retorno (años)").pack()
entry_tr = tk.Entry(root)
entry_tr.pack()

tk.Label(root, text="Tiempo de Exposición (años)").pack()
entry_t_exp = tk.Entry(root)
entry_t_exp.pack()

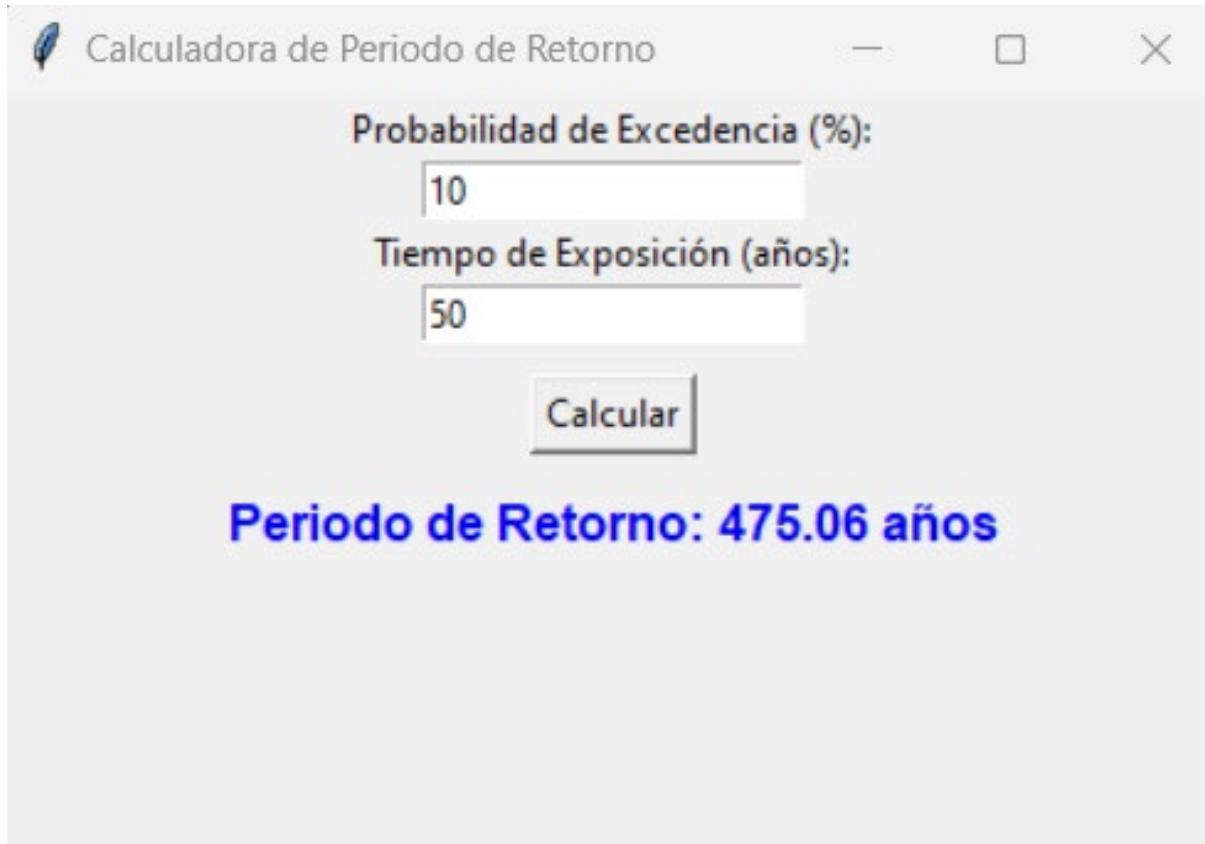
# Botón Calcular
boton_calcular = tk.Button(root, text="Calcular", command=calcular_probabilidad)
boton_calcular.pack(pady=10)

# Etiqueta de resultado
label_resultado = tk.Label(root, text="Probabilidad de Excedencia: -", font=("Arial", 12, "bold"), fg="blue")
label_resultado.pack()

# Iniciar la ventana
root.mainloop()
```



Código de python iterativo para calcular Tr (sabiendo Excedencia y años de exposición)



```
import tkinter as tk
from tkinter import ttk

def calcular_periodo_retorno():
    try:
        prob_excedencia = float(entry_prob_excedencia.get()) # Probabilidad de excedencia
        t_exp = float(entry_t_exp.get()) # Tiempo de exposición

        # Cálculo del periodo de retorno
        periodo_retorno = 1 / (1 - (1 - prob_excedencia / 100) ** (1 / t_exp))
        label_resultado.config(text=f'Periodo de Retorno: {periodo_retorno:.2f} años')
    except ValueError:
        label_resultado.config(text="Ingrese valores válidos.")

# Crear ventana
root = tk.Tk()
root.title("Calculadora de Periodo de Retorno")
root.geometry("400x250")

# Etiquetas y entradas
tk.Label(root, text="Probabilidad de Excedencia (%):").pack()
entry_prob_excedencia = tk.Entry(root)
entry_prob_excedencia.pack()

tk.Label(root, text="Tiempo de Exposición (años):").pack()
entry_t_exp = tk.Entry(root)
entry_t_exp.pack()

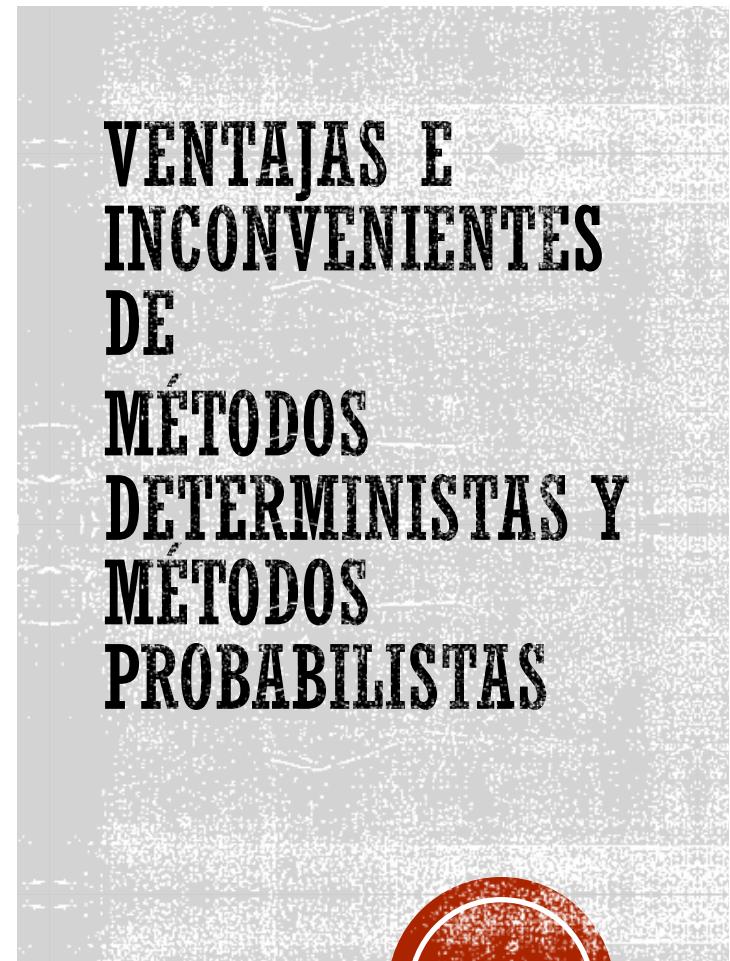
# Botón Calcular
boton_calcular = tk.Button(root, text="Calcular", command=calcular_periodo_retorno)
boton_calcular.pack(pady=10)

# Etiqueta de resultado
label_resultado = tk.Label(root, text="Periodo de Retorno: -", font=("Arial", 12, "bold"), fg="blue")
label_resultado.pack()

# Iniciar la ventana
root.mainloop()
```

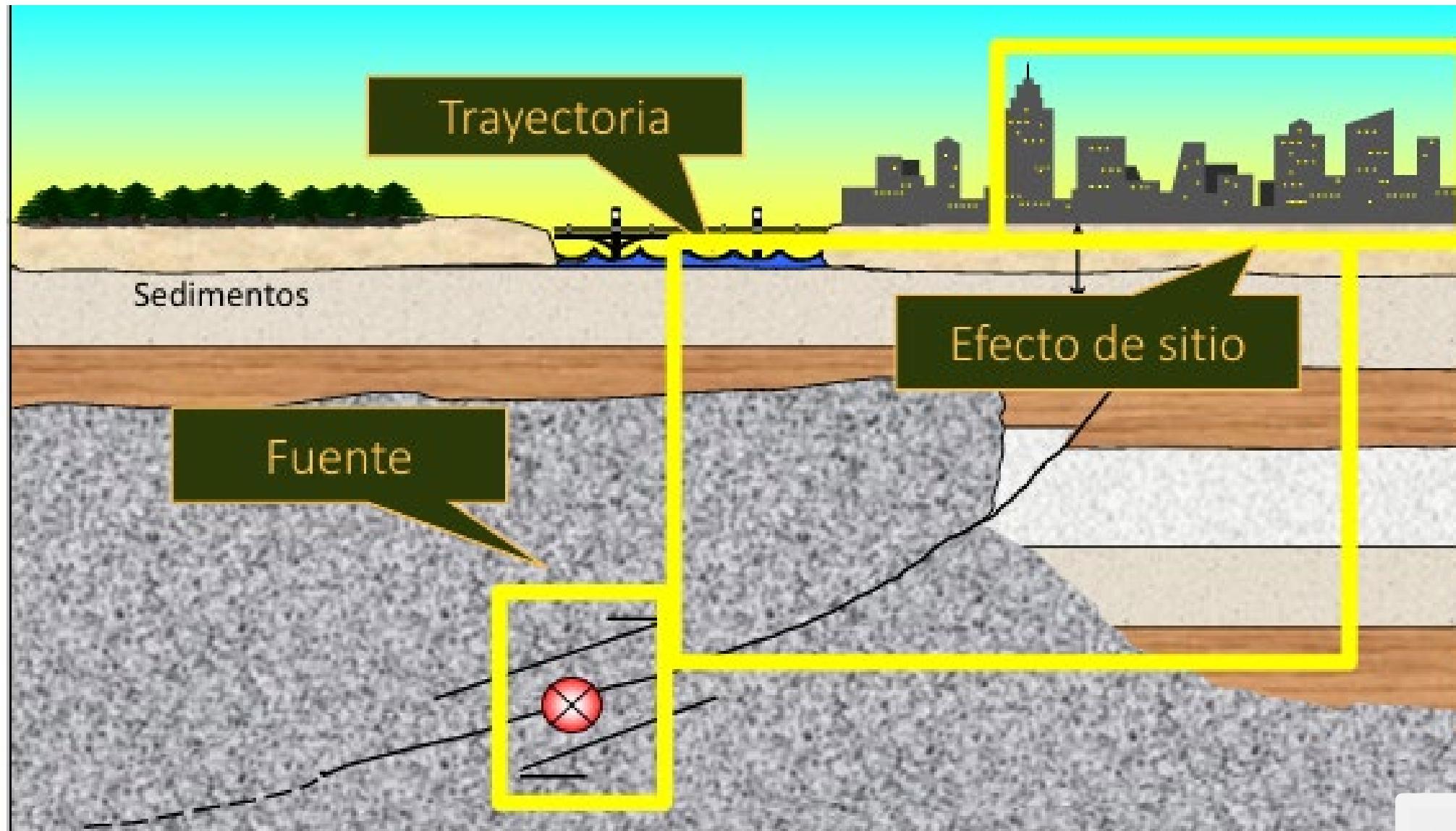


Métodos Deterministas		Métodos Probabilistas	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
- Definen un escenario sísmico	- No dan medida de incertidumbre	- Definen la acción sísmica con su probabilidad asociada	- Se pierde el concepto de terremoto de diseño
- Son transparentes y de simple aplicación	- Frecuentemente se interpreta como el peor escenario, aunque no sea así.	- Da un nivel de peligrosidad consistente para todos los sitios	- Los resultados son más difíciles de interpretar y verificar
- Es fácil verificar el sismo de diseño y el movimiento del suelo predicho	- La combinación del terremoto máximo y el máximo movimiento fuerte (grande) es un caso muy poco probable	- Considera la tasa de actividad de los terremotos, no solo M_{max}	- No definen un escenario sísmico
- No requieren dar un nivel de seguridad aceptable	- No llevan probabilidad asociada	- Integra estimaciones de incertidumbre	- Integra diferentes modelos alternativos



Fuente: Apuntes de Peligrosidad sísmica Dra. Belén Benito UPM (2023)

FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL MOVIMIENTO FUERTE DEL TERRENO



Fuente: Apuntes de Peligrosidad sísmica Dra. Belén Benito UPM (2023)

¿CUÁL ES EL TERREMOTO QUE SE USA PARA DEFINIR EL ESCENARIO?

Hay varias respuestas:

Terremoto máximo creíble: el máximo terremoto que puede ocurrir en el marco tectónico conocido en una falla o fuente específica.

Terremoto máximo de diseño: el terremoto que se espera genere el mayor nivel de movimiento en un emplazamiento.

Terremoto máximo considerado: usado en códigos sismorresistentes (IBC, ASCE 7-05, NEHRP, etc.) para definir el movimiento esperado en 50 años con un 2% de probabilidad de excedencia.

Terremoto de nivel de contingencia. Terremoto que produce daño significativo, pero reparable.

Terremoto base de operación. Terremoto de diseño cuya acción sobre una estructura permite que esta permanezca operativa, con daño un grado de daño que sea rápidamente reparable.

Terremoto de parada segura. Terremoto de diseño cuya acción sobre una estructura obliga a que esta pare de forma controlada (instalaciones nucleares) .

Terremoto de control. Terremoto que más contribuye a un nivel de movimiento concreto, denominado movimiento objeto.

Fuente: Apuntes de Peligrosidad sísmica Dra. Belén Benito UPM (2023)

FUENTE SÍSMICA

1. Tipo fuente:
 - Falla activa, segmento o ruptura parcial
 - Zonas de subducción
 - Otro
2. Caracterización fuente:
 - Magnitudes
 - Mecanismo focal
 - Geometría (x,y,z)

Fallas/Zonas de Subducción

- ¿Es activa?, ¿tasas de deformación (slip-rate)? ¿sismicidad asociada?
- Geometría, profundidad de bloqueo, rango de profundidades sismogenéticas.
- Mmax
- Ciclo símico (sismos o paleosismos), periodo de recurrencia, elapsed time (tiempo transcurrido desde el último terremoto).
- Zonas de subducción, gaps sísmicos o zonas de SSE.

¿Y que es una falla activa?

- Según IGME (BBDD QAFI). Fallas que muestra evidencia geológica de actividad durante el **Cuaternario** (últimos 2.6 millones de años).

TABLA CRONOESTRATIGRÁFICA INTERNACIONAL

Comisión Internacional de Estratigrafía

v 2023/04



www.stratigraphy.org

		Eonotema / Eón	Eraetema / Era	Sistema / Período	Serie / Época	Piso / Edad	GSSP	Edad (Ma)
Holoceno					Megalayiano	actualidad	0.0042	0.0042
					Norgripiano		0.0062	0.0062
					Groenlandiano		0.0117	0.0117
					Superior		0.129	0.129
					Chibaniiano		0.774	0.774
					Calabriano		1.80	1.80
					Gelasiano		2.58	2.58

		Eonotema / Eón	Eraetema / Era	Sistema / Período	Serie / Época	Piso / Edad	GSSP	Edad (Ma)
						Titoniano		~ 145.0
						Kimmeridgiano	▲	149.2 ± 0.7
						Oxfordiano		154.8 ± 0.8
						Calloviano		161.5 ± 1.0
						Bathoniano		165.3 ± 1.1
					Media			168.2 ± 1.2

		Eonotema / Eón	Eraetema / Era	Sistema / Período	Serie / Época	Piso / Edad	GSSP	Edad (Ma)
						Famenniano		358.9 ± 0.4
						Frasniano	▲	372.2 ± 1.6
					Superior			382.7 ± 1.6

		Eonotema / Eón	Eraetema / Era	Sistema / Período	GSSP	Edad (Ma)
					Ediacariano	▲
					Criogeniano	
					Toniano	

¿Qué es una falla "cuaternaria"? (USGS)

- Aquella que **se ha reconocido en la superficie y que se ha movido en los últimos 1.6 Ma.**
- Eso coloca el movimiento de fallas dentro del Período **Cuaternario**, que cubre los últimos **2.6 millones de años**.

Cálculo de la Magnitud, Momento sísmico, tasa de momento sísmico y periodo de recurrencia de una falla

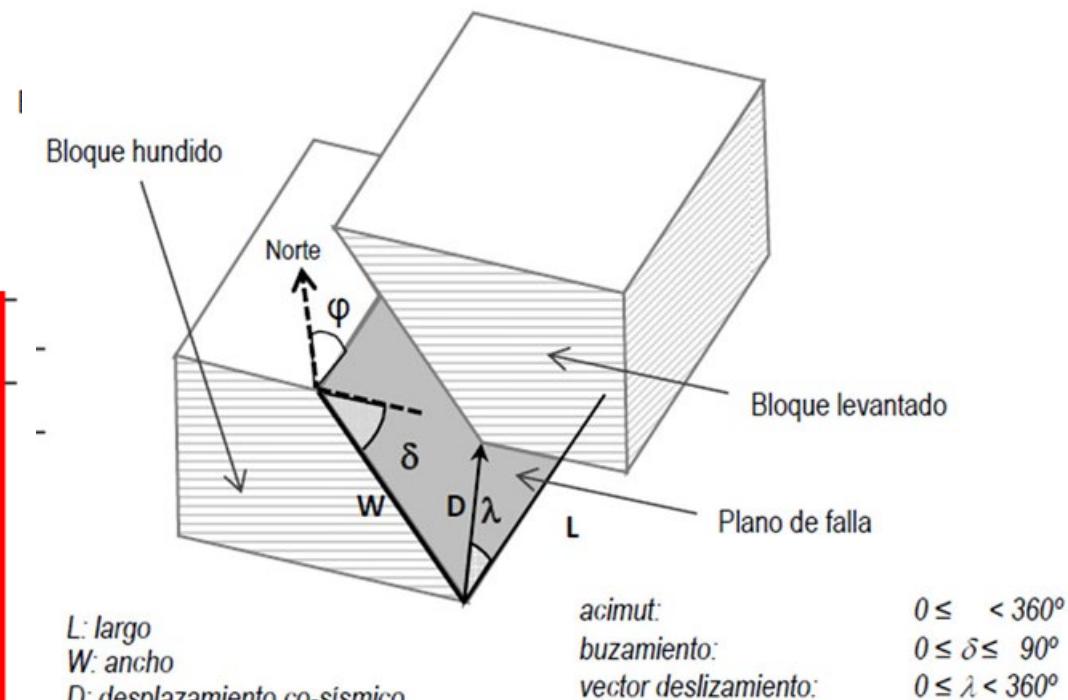
Magnitud -> $M_w = 5.16 + 1.12 \log L$ Wells & Coppersmith (1994)

Momento sísmico -> $\log(M_0) = 16,1 + 1,5M_w$ Hanks y Kanamori (1979)

Tasa de momento sísmico -> $\dot{M}_0 = \mu \cdot \dot{u} \cdot A$ Brune (1968)

Periodo de recurrencia -> $\frac{M_0}{\dot{M}_0} = T$ Slip-rate

Reference	Equations	$M_w^{(1)}$	$M_0^{(2)}$ (dyn·cm)	$\dot{M}_0^{(3)}$ (dyn·cm/y)	$T^{(4)}$ (years)
Hanks & Bakun (2008) $A < 537 \text{ km}^2$	$M_w = \log A + (3,98 \pm 0,03)$	6,4	4,8092E+25	7,0625E+23	68
Wesnousky (2008) strike-slip	$M_w = 5,56 + 0,87 \log L$	6,7	1,4638E+26	7,0625E+23	207
Leonard (2010)	$M_w = 3,99 + \log A$	6,4	4,9782E+25	7,0625E+23	70
Stirling et al. (2008)	$M_w = 4,18 + 2/3 \log W + 4/3 \log L$	6,7	1,2597E+26	7,0625E+23	178
Anderson et al. (1996)	$M_w = 5,12 + 1,16 \log L - 0,20 \log S$	6,5	6,1876E+25	7,0625E+23	88
Villamor et al. (2001)	$M_w = 3,9 + 1,33 \log A$	6,6	9,7512E+25	7,0625E+23	138



L: longitud de la superficie de ruptura (*surface rupture length*) (km); L = 21 km

A: área (*area*) (km^2); A = 256 km^2

W: ancho (*width*) (km); W = 12,2 km

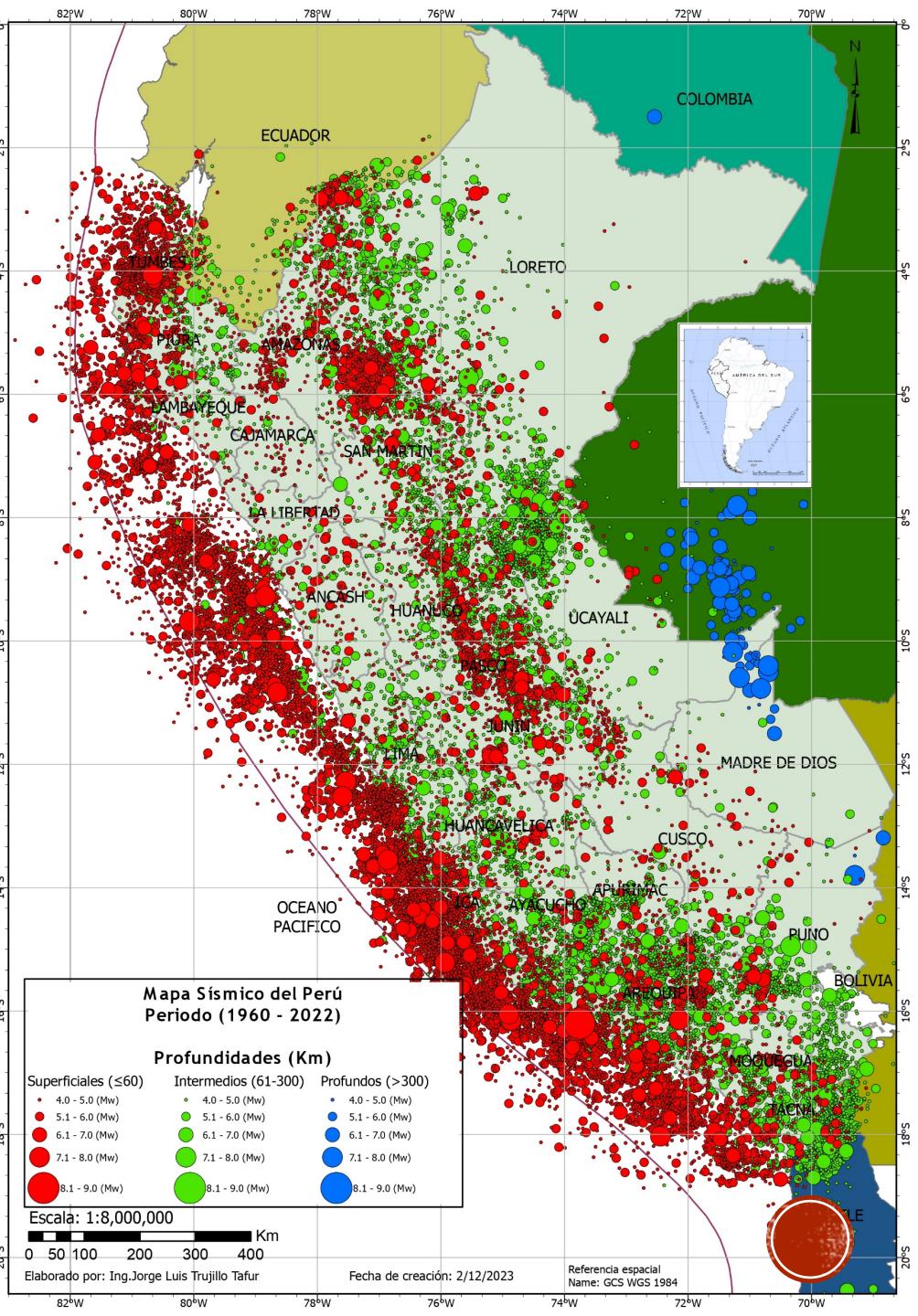
μ : módulo módulo de cizalla de la corteza terrestre (*crustal shear modulus*); $\mu = 3,00E+10 \text{ N/m}^2$

S: tasa de deslizamiento (*slip-rate*) (mm/y); S = 9,2 mm/y

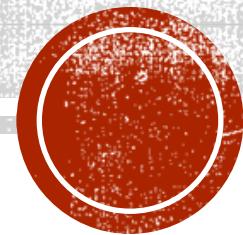
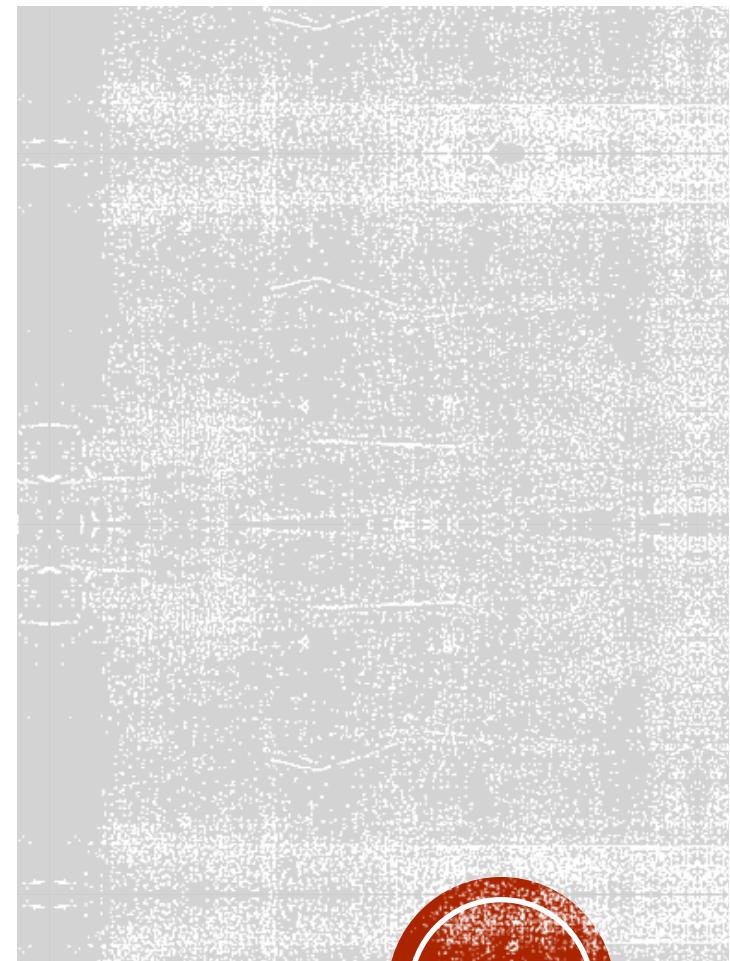
Fuente: Apuntes de Escenarios sísmicos Dr. Gaspar UPM (2023)

MAPA SÍSMICO DEL PERÚ

- En Perú se tiene una clara división de profundidades, desde menores de 60km se les conoce como sismos superficiales, para sismos entre 61 a 300km como intermedios y para mayores de 300km como profundos. Se ha procedido a digitalizar a partir de la información proporcionada por el IGP:



CUANTIFICACIÓN EFECTO DE PROPAGACIÓN



Fuente: Apuntes de Peligrosidad sísmica Dra. Belén Benito UPM (2023)

Índice

- Factores de atenuación de ondas
 - Atenuación geométrica
 - Atenuación anelástica
- Modelos de atenuación o ecuaciones de predicción del movimiento (GMPEs)
- Consideraciones sobre la atenuación



FORMA TÍPICA DE LAS ECUACIONES DE ATENUACIÓN GMPEs

$$Y = C_1 + C_2M + C_3M^{C_4} + C_5 \ln[R + C_6 \exp(C_6 M)] + C_8 R + f_{fuente} + f_{sitio} + \sigma$$

Donde cada término de la ecuación representa:

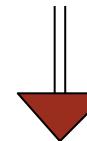
- Y = *Valor pico del movimiento fuerte*
- $C_2M + C_3M^{C_4}$ = *Factor referente a la magnitud del sismo*
- $C_5 \ln[R + C_6 \exp(C_6 M)] + C_8 R$ = *Factor referente a la distancia*
- $f_{fuente} + f_{sitio}$ = *Influencia del tipo de fuente y sitio*
- C_1, C_2, \dots, C_n = *Constantes de regresión*
- σ = *Desviación estándar.*

1. Factores de atenuación

Término de trayectoria: efecto de propagación

La energía de las ondas se atenúa en el trayecto de la fuente al emplazamiento

Por tanto, el movimiento del suelo en un emplazamiento no solo depende de la energía liberada en el foco (magnitud), sino también de la energía que se atenúa en la propagación de las ondas.



El movimiento A en un emplazamiento depende de la magnitud M y de la distancia fuente-emplazamiento R.

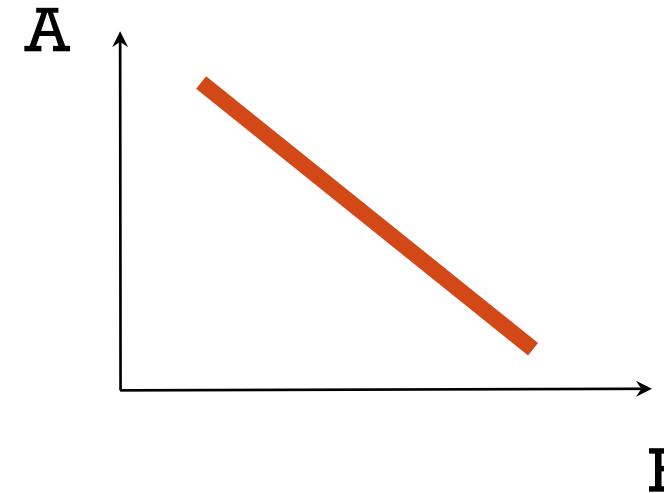
$$A = f(M, R)$$

Ley de atenuación

Ecuación de predicción del movimiento sísmico

Estas leyes permiten.

“Traducir” el movimiento en el foco al movimiento en un emplazamiento a una cierta distancia



1. Factores de atenuación.

Término de trayectoria: efecto de propagación

La amplitud de las ondas se atenúa en su propagación como consecuencia de:

- la *expansión geométrica del frente de ondas*
- la *anelasticidad del medio , $Q(f)$*

Necesidad de conocer la estructura entre la fuente y el emplazamiento



1. Factores de atenuación.

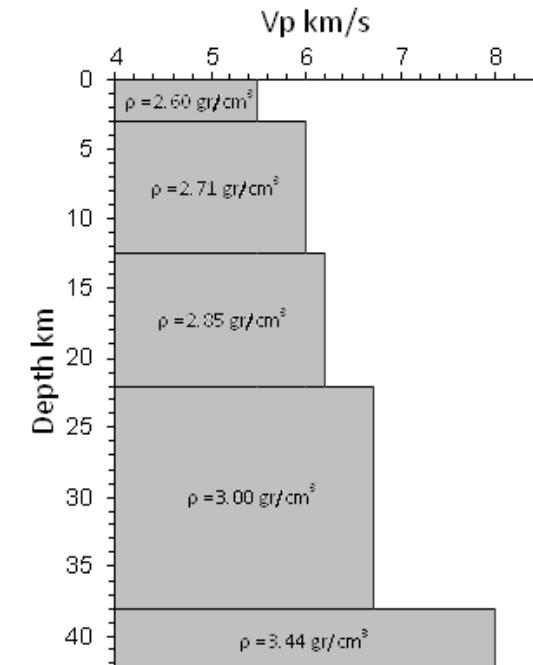
En la práctica, el problema se resuelve de dos formas posibles:

a

Estimando independientemente la atenuación atribuida a cada uno de los factores mencionados, por medio de modelos que representan la disipación de la energía en función de los parámetros influyentes.

Modelización de la corteza

- capas de velocidad de propagación uniforme
- profundidades de las capas

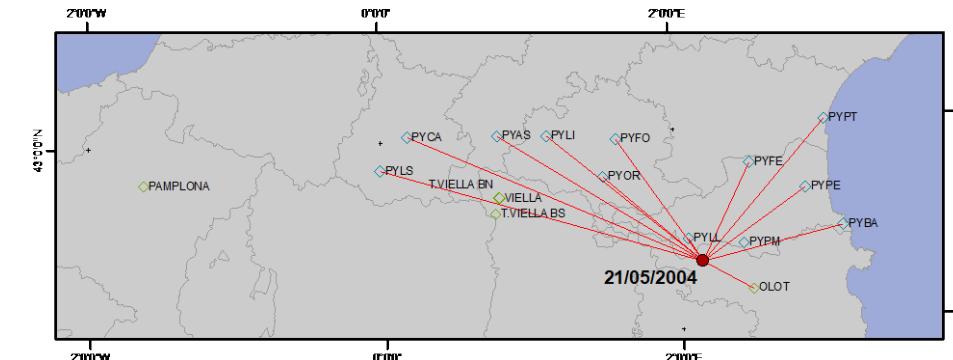


b

Calculando la atenuación conjunta por formulación de leyes empíricas que relacionen el parámetro representativo del movimiento A en un punto con la distancia fuente-emplazamiento R y con el parámetro que refleja la energía liberada en el foco A_F .

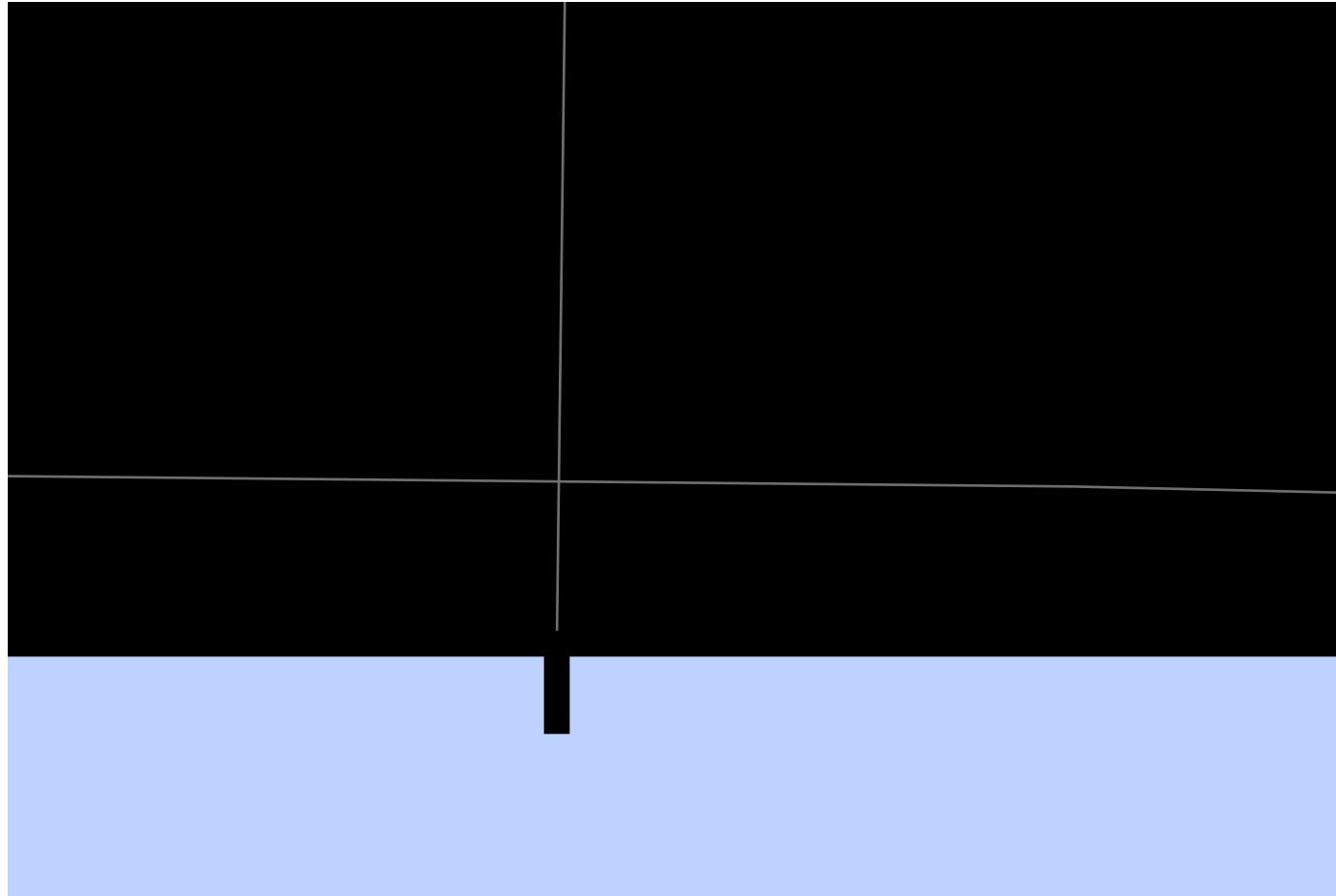
$$A = f(A_F, R)$$

*Desarrollados con
registros
acelerométricos reales*

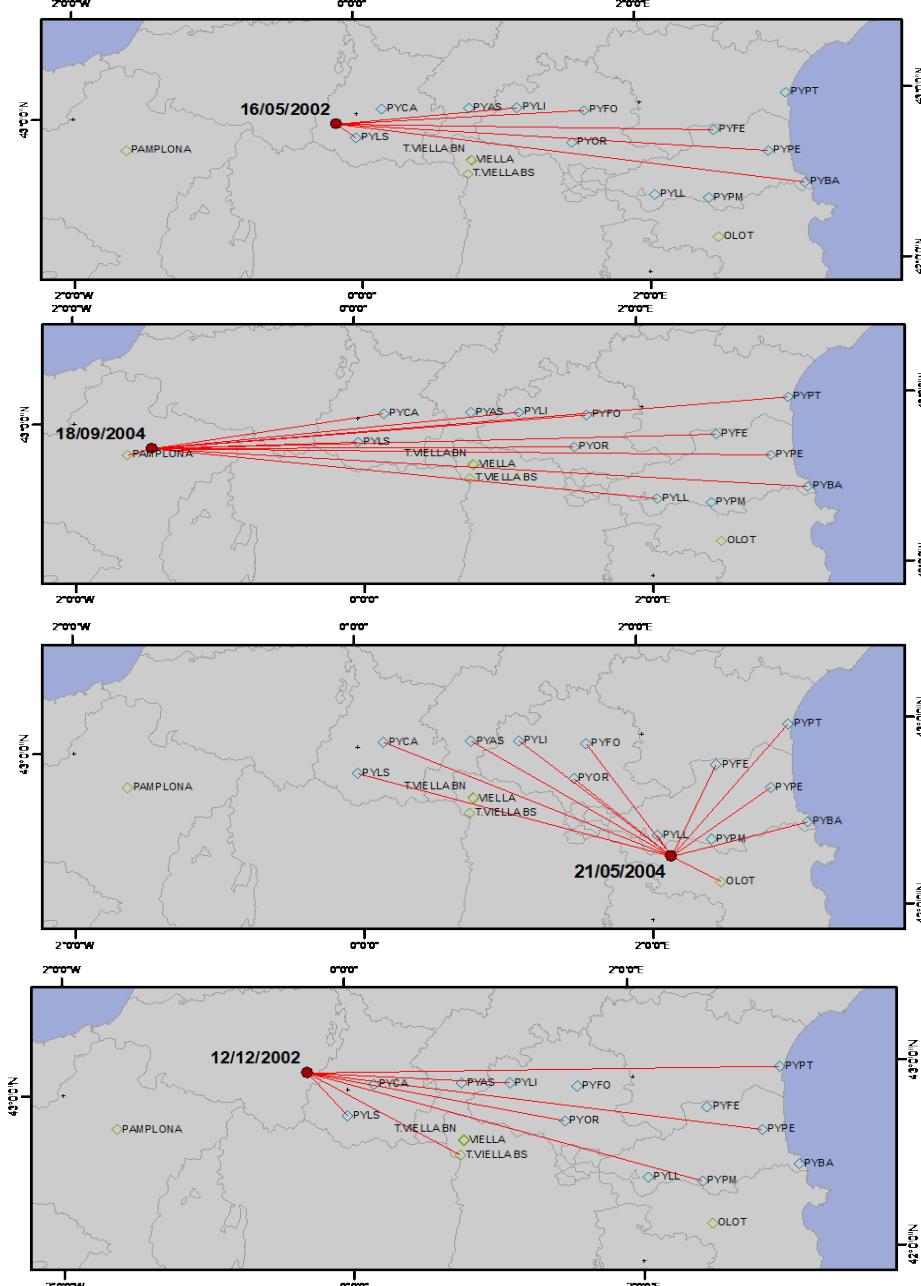


2. Modelos de atenuación (GMPEs)

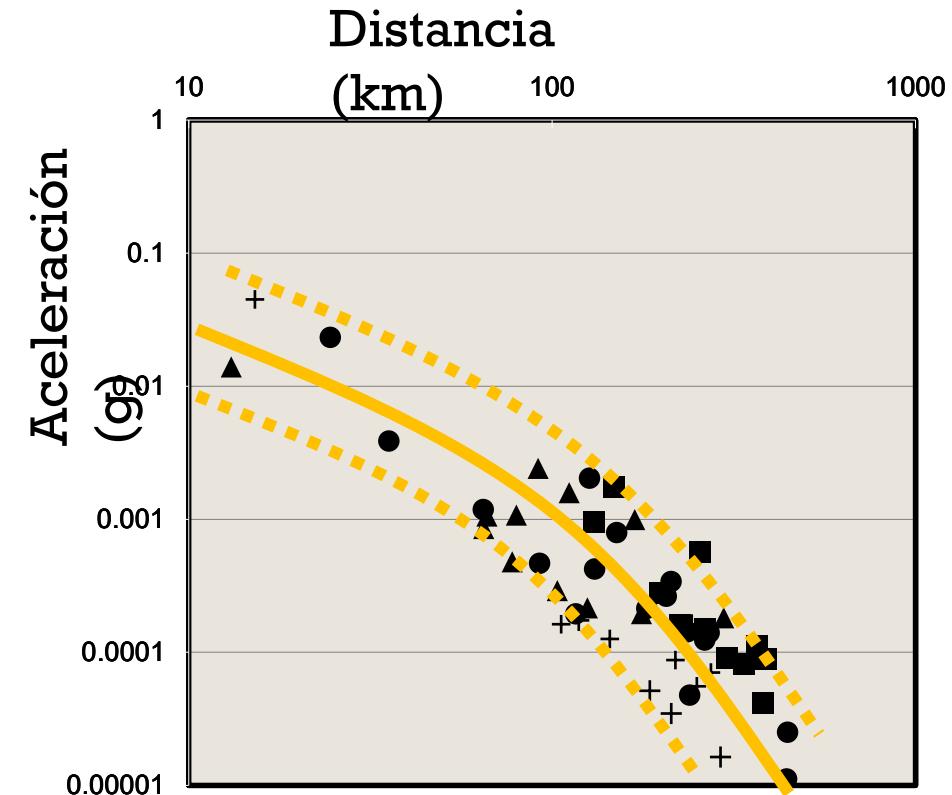
Método empírico: se ajusta una determinada forma funcional a las observaciones disponibles (valores registrados de aceleración) y determinando los coeficientes de la misma por análisis de regresión.



2. Modelos de atenuación (GMPEs)



Ajuste de observaciones de distintos terremotos

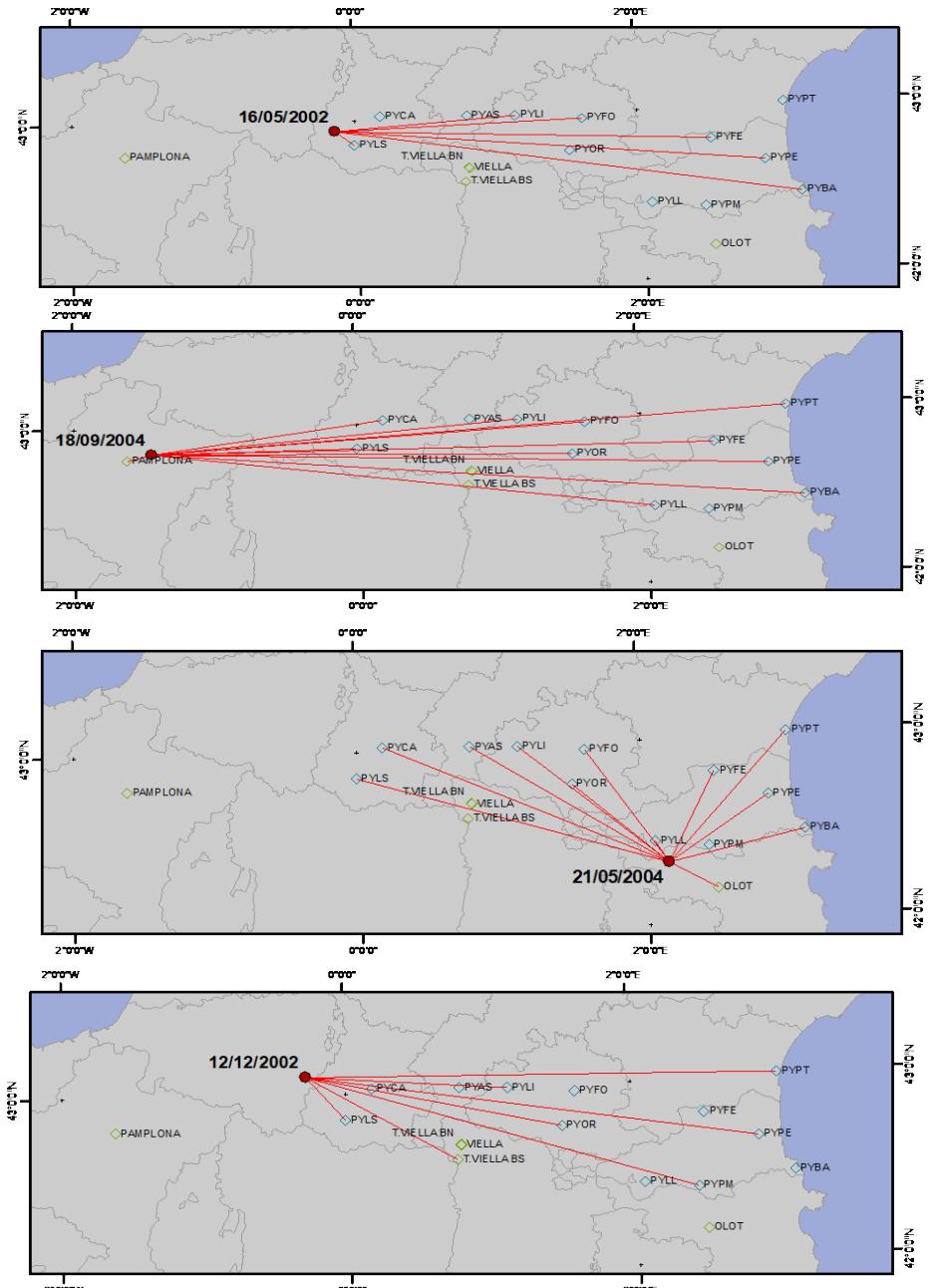


$$A = f(M, R)$$

Sismos de igual magnitud

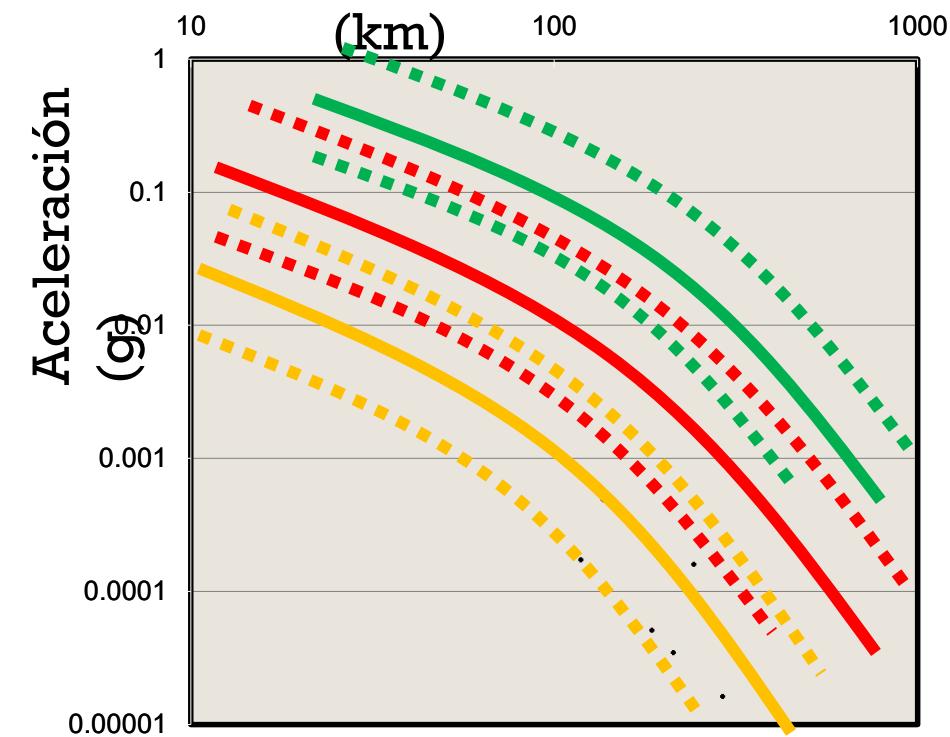


2. Modelos de atenuación (GMPEs)



Ajuste de observaciones de distintos terremotos

Distancia
(km)



Sismos de igual magnitud

Sismos de igual magnitud

Sismos de igual magnitud



2. Modelos de atenuación (GMPEs)

Término de trayectoria: cálculo de la ley de atenuación

Método empírico: se ajustan observaciones disponibles (valores registrados de aceleración) a una determinada forma funcional, y determinando los coeficientes de la misma por análisis de regresión.

$$\ln A = c_1 + \underbrace{c_2 M + c_3 M^{c_4}}_{\text{Dependencia en la magnitud}} + c_5 \ln(R + c_6 e^{c_7 M}) + c_8 R + c_{\text{fuente}} + c_{\text{sitio}} + \sigma_{\ln A}$$

Dependencia en la magnitud



2. Modelos de atenuación (GMPEs)

Término de trayectoria: cálculo de la ley de atenuación

Método empírico: se ajustan observaciones disponibles (valores registrados de aceleración) a una determinada forma funcional, y determinando los coeficientes de la misma por análisis de regresión.

$$\ln A = c_1 + c_2 M + c_3 M^{c4} + c_5 \ln(R + c_6 e^{c7 M}) + c_8 R + c_{\text{fuente}} + c_{\text{sitio}} + \sigma_{\ln A}$$

Para tener en cuenta la dependencia entre magnitud y área de ruptura de un terremoto



2. Modelos de atenuación (GMPEs)

Término de trayectoria: cálculo de la ley de atenuación

Método empírico: se ajustan observaciones disponibles (valores registrados de aceleración) a una determinada forma funcional, y determinando los coeficientes de la misma por análisis de regresión.

$$\ln A = c_1 + c_2 M + c_3 M^{c_4} + c_5 \ln(R + c_6 e^{c_7 M}) + c_8 R + c_{\text{fuente}} + c_{\text{sitio}} + \sigma_{\ln A}$$

Atenuación geométrica, por
expansión del frente de ondas

2. Modelos de atenuación (GMPEs)

Término de trayectoria: cálculo de la ley de atenuación

Método empírico: se ajustan observaciones disponibles (valores registrados de aceleración) a una determinada forma funcional, y determinando los coeficientes de la misma por análisis de regresión.

$$\ln A = c_1 + c_2 M + c_3 M^{c_4} + c_5 \ln(R + c_6 e^{c_7 M}) + c_8 R + c_{\text{fuente}} + c_{\text{sitio}} + \sigma_{\ln A}$$

Atenuación anelástica en el medio por el que se propagan las ondas sísmicas



2. Modelos de atenuación (GMPEs)

Término de trayectoria: cálculo de la ley de atenuación

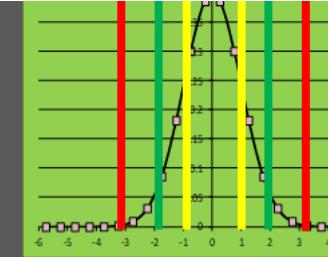
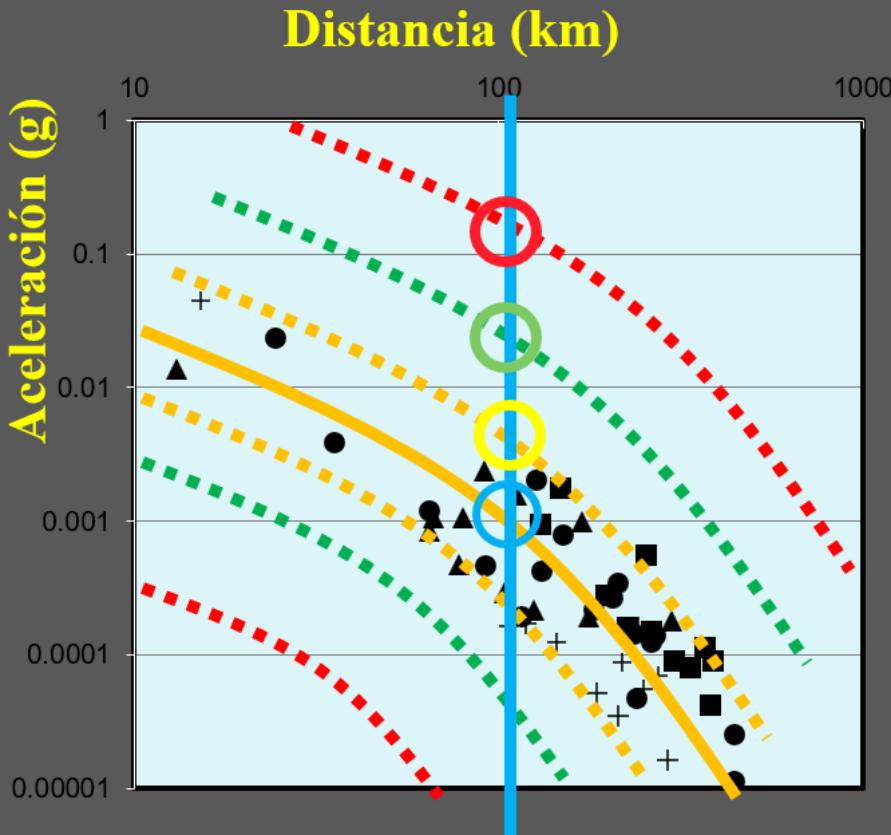
Método empírico: se ajustan observaciones disponibles (valores registrados de aceleración) a una determinada forma funcional, y determinando los coeficientes de la misma por análisis de regresión.

$$\ln A = c_1 + c_2 M + c_3 M^{c4} + c_5 \ln(R + c_6 e^{c7 M}) + c_8 R + c_{\text{fuente}} + c_{\text{sitio}} + \sigma_{\ln A}$$

Efecto de fuente
y efecto de sitio

2. Modelos de atenuación (GMPEs)

El valor de ε (o número de σ) condiciona el valor de Y que predecimos para cierto par (M,R)



$$\log Y = f(M, R) + \varepsilon \sigma_{\log}$$

$\pm 1\sigma$

$\pm 2\sigma$

$\pm 3\sigma$

M,D FIJA

$$\varepsilon = 0 \quad Y = 0.001g$$

$$\varepsilon = 1 \quad Y = 0.007g$$

$$\varepsilon = 2 \quad Y = 0.020g$$

$$\varepsilon = 3 \quad Y = 0.150g$$



2. Modelos de atenuación (GMPEs)

Ejemplo de modelo de atenuación o GMPE

FINAL MODEL FORMULATION

The final model formulation is given by the relationships:

$$\begin{aligned} \ln(SA_{1130ij}) = & c_1 + c_{1a} F_{RVi} + c_{1b} F_{NMI} + c_7 (Z_{TOQi} - \text{---}) \\ & + c_2 (\mathbf{M}_i - 6) + \frac{c_2 - c_3}{c_n} \ln(1 + e^{c_n(c_M - \mathbf{M}_i)}) \\ & + c_4 \ln(R_{RUPij} + c_5 \cosh(c_6(\mathbf{M}_i - c_{HM}, 0)_{\max})) \\ & + (c_{4a} - c_4) \ln\left(\sqrt{R_{RUPij}^2 + c_{RB}^2}\right) \\ & + \left\{ c_{\gamma 1} + \frac{c_{\gamma 2}}{\cosh((\mathbf{M}_i - c_{\gamma 3}, 0)_{\max})} \right\} \cdot R_{RUPij} \\ & + c_9 \cdot \cos^2 \delta_i \cdot \tanh\left(\frac{R_{RUPij}}{2}\right) \tan^{-1}\left(\frac{W_i \cos \delta_i}{2(Z_{TOQi} + 1)}\right) \frac{1}{\pi/2} \left\{ 1 - \frac{R_{JBij}}{R_{RUPij} + 0.001} \right\} \\ & + \tau \cdot z_i \end{aligned} \quad (21a)$$

Profundidad del plano de ruptura

$$\begin{aligned} \ln(SA_{ij}) = & \ln(SA_{1130ij}) \\ & + \phi_1 \cdot \left(\ln\left(\frac{V_{S30ij}}{1130}\right), 0 \right)_{\min} \\ & + \phi_2 \cdot \left\{ e^{\phi_3 ((V_{S30ij}, 1130)_{\min} - 360)} - e^{\phi_3 (1130 - 360)} \right\} \cdot \ln\left(\frac{SA_{1130ij} + \phi_4}{\phi_4}\right) \\ & + \sigma \cdot z_{ij} \end{aligned} \quad (21b)$$



2. Modelos de atenuación (GMPEs)

Ejemplo de modelo de atenuación o GMPE

FINAL MODEL FORMULATION

The final model formulation is given by the relationships:

$$\begin{aligned}
 \ln(SA_{1130ij}) = & c_1 + c_{1a} F_{RVi} + c_{1b} F_{NMI} + c_7 (Z_{TORi} - 4) \\
 & + c_2 (\mathbf{M}_i - 6) + \frac{c_2 - c_3}{c_n} \ln(1 + e^{c_n(c_M - \mathbf{M}_i)}) \\
 & + c_4 \ln(R_{RUPij} + c_5 \cosh(c_6(\mathbf{M}_i - c_{HM}, 0)_{\max})) \\
 & + (c_{4a} - c_4) \ln\left(\sqrt{R_{RUPij}^2 + c_{RB}^2}\right) \\
 & + \left\{ c_{\gamma 1} + \frac{c_{\gamma 2}}{\cosh((\mathbf{M}_i - c_{\gamma 3}, 0)_{\max})} \right\} \cdot R_{RUPij} \\
 & + c_9 \cdot \cos^2 \delta_i \cdot \tanh\left(\frac{R_{RUPij}}{2}\right) \tan^{-1}\left(\frac{W_i \cos \delta_i}{2(Z_{TORi} + 1)}\right) \frac{1}{\pi/2} \left\{ 1 - \frac{R_{JBij}}{R_{RUPij} + 0.001} \right\} \\
 & + \tau \cdot z_i
 \end{aligned} \tag{21a}$$

Diferentes distancias al plano de ruptura
dependientes de la posición relativa de la falla
y el emplazamiento

$$\begin{aligned}
 \ln(SA_{ij}) = & \ln(SA_{1130ij}) \\
 & + \phi_1 \cdot \left(\ln\left(\frac{V_{S30ij}}{1130}\right), 0 \right)_{\min} \\
 & + \phi_2 \cdot \left\{ e^{\phi_3 ((V_{S30ij}, 1130)_{\min} - 360)} - e^{\phi_3 (1130 - 360)} \right\} \cdot \ln\left(\frac{SA_{1130ij} + \phi_4}{\phi_4}\right) \\
 & + \sigma \cdot z_{ij}
 \end{aligned} \tag{21b}$$



2. Modelos de atenuación (GMPEs)

Ejemplo de modelo de atenuación o GMPE

FINAL MODEL FORMULATION

The final model formulation is given by the relationships:

$$\begin{aligned}
 \ln(SA_{1130ij}) = & c_1 + c_{1a}F_{RVi} + c_{1b}F_{NMI} + c_7(Z_{TORi} - 4) \\
 & + c_2(M_i - 6) + \frac{c_2 - c_3}{c_n} \ln(1 + e^{c_n(c_M - M_i)}) \\
 & + c_4 \ln(R_{RUPij} + c_5 \cosh(c_6(M_i - c_{HM}, 0)_{\max})) \\
 & + (c_{4a} - c_4) \ln(\sqrt{R_{RUPij}^2 + c_{RB}^2}) \\
 & + \left\{ c_{\gamma 1} + \frac{c_{\gamma 2}}{\cosh((M_i - c_{\gamma 3}, 0)_{\max})} \right\} \cdot R_{RUPij} \\
 & + c_9 \cdot \cos^2 \delta_i \cdot \tanh\left(\frac{R_{RUPij}}{2}\right) \tan^{-1}\left(\frac{W_i \cos \delta_i}{2(Z_{TORi} + 1)}\right) \frac{1}{\pi/2} \left[1 - \frac{R_{JBij}}{R_{RUPij} + 0.001} \right] \\
 & + \tau \cdot z_i
 \end{aligned} \tag{21a}$$

Tamaño del plano de ruptura
dependiente de la magnitud

$$\begin{aligned}
 \ln(SA_{ij}) = & \ln(SA_{1130ij}) \\
 & + \phi_1 \cdot \left(\ln\left(\frac{V_{S30ij}}{1130}\right), 0 \right)_{\min} \\
 & + \phi_2 \cdot \left\{ e^{\phi_3((V_{S30ij}, 1130)_{\min} - 360)} - e^{\phi_3(1130 - 360)} \right\} \cdot \ln\left(\frac{SA_{1130ij} + \phi_4}{\phi_4}\right) \\
 & + \sigma \cdot z_{ij}
 \end{aligned} \tag{21b}$$



2. Modelos de atenuación (GMPEs)

Ejemplo de modelo de atenuación o GMPE

FINAL MODEL FORMULATION

The final model formulation is given by the relationships:

$$\begin{aligned}
 \ln(SA_{1130ij}) = & c_1 + c_{1a} F_{RVi} + c_{1b} F_{NMI} + c_7 (Z_{TORi} - 4) \\
 & + c_2 (\mathbf{M}_i - 6) + \frac{c_2 - c_3}{c_n} \ln(1 + e^{c_n(c_M - \mathbf{M}_i)}) \\
 & + c_4 \ln(R_{RUPij} + c_5 \cosh(c_6(\mathbf{M}_i - c_{HM}, 0)_{\max})) \\
 & + (c_{4a} - c_4) \ln\left(\sqrt{R_{RUPij}^2 + c_{RB}^2}\right) \\
 & + \left\{ c_{\gamma 1} + \frac{c_{\gamma 2}}{\cosh((\mathbf{M}_i - c_{\gamma 3}, 0)_{\max})} \right\} \cdot R_{RUPij} \\
 & + c_9 \cdot \cos^2 \delta_i \cdot \tanh\left(\frac{R_{RUPij}}{2}\right) \tan^{-1}\left(\frac{W_i \cos \delta_i}{2(Z_{TORi} + 1)}\right) \frac{1}{\pi/2} \left\{ 1 - \frac{R_{JBi}}{R_{RUPij} + 0.001} \right\} \\
 & + \tau \cdot z_i
 \end{aligned} \tag{21a}$$

$$\begin{aligned}
 \ln(SA_{ij}) = & \ln(SA_{1130ij}) \\
 & + \phi_1 \cdot \left(\ln\left(\frac{V_{S30ij}}{1130}\right), 0 \right)_{\min} \\
 & + \phi_2 \cdot \left\{ e^{\phi_3 ((V_{S30ij}, 1130)_{\min} - 360)} - e^{\phi_3 (1130 - 360)} \right\} \cdot \ln\left(\frac{SA_{1130ij} + \phi_4}{\phi_4}\right) \\
 & + \sigma \cdot z_{ij}
 \end{aligned} \tag{21b}$$

Tipo de mecanismo y ángulo de
buzamiento de la falla y dirección de la
ruptura



2. Modelos de atenuación (GMPEs)

Ejemplo de modelo de atenuación o GMPE

FINAL MODEL FORMULATION

The final model formulation is given by the relationships:

$$\begin{aligned} \ln(SA_{1130ij}) = & c_1 + c_{1a} F_{RVi} + c_{1b} F_{NMI} + c_7 (Z_{TORi} - 4) \\ & + c_2 (\mathbf{M}_i - 6) + \frac{c_2 - c_3}{c_n} \ln(1 + e^{c_n(\mathbf{c}_M - \mathbf{M}_i)}) \\ & + c_4 \ln(R_{RUPij} + c_5 \cosh(c_6(\mathbf{M}_i - c_{HM}, 0)_{\max})) \\ & + (c_{4a} - c_4) \ln\left(\sqrt{R_{RUPij}^2 + c_{RB}^2}\right) \\ & + \left\{ c_{\gamma 1} + \frac{c_{\gamma 2}}{\cosh((\mathbf{M}_i - c_{\gamma 3}, 0)_{\max})} \right\} \cdot R_{RUPij} \\ & + c_9 \cdot \cos^2 \delta_i \cdot \tanh\left(\frac{R_{RUPij}}{2}\right) \tan^{-1}\left(\frac{W_i \cos \delta_i}{2(Z_{TORi} + 1)}\right) \frac{1}{\pi/2} \left\{ 1 - \frac{R_{JBi}}{R_{RUPij} + 0.001} \right\} \\ & + \tau \cdot z_i \end{aligned} \quad (21a)$$

$$\begin{aligned} \ln(SA_{ij}) = & \ln(SA_{1130ij}) \\ & + \phi_1 \cdot \left(\ln\left(\frac{V_{S30ij}}{1130}\right), 0 \right)_{\min} \\ & + \phi_2 \cdot \left\{ e^{\phi_3 ((V_{S30ij}, 1130)_{\min} - 360)} - e^{\phi_3 (1130 - 360)} \right\} \cdot \ln\left(\frac{SA_{1130ij} + \phi_4}{\phi_4}\right) \\ & + \sigma \cdot z_{ij} \end{aligned} \quad (21b)$$


Efecto de sitio por medio de valores de Vs30, estimados mediante mediciones in-situ



3. Consideraciones sobre la atenuación

Término de trayectoria: variabilidad de la atenuación

La atenuación es característica de una cierta zona.

Región intraplaca o interplaca

Régimen tectónico: corteza superior estable / activa, subducción (inslab o interface)

Región volcánica o no volcánica

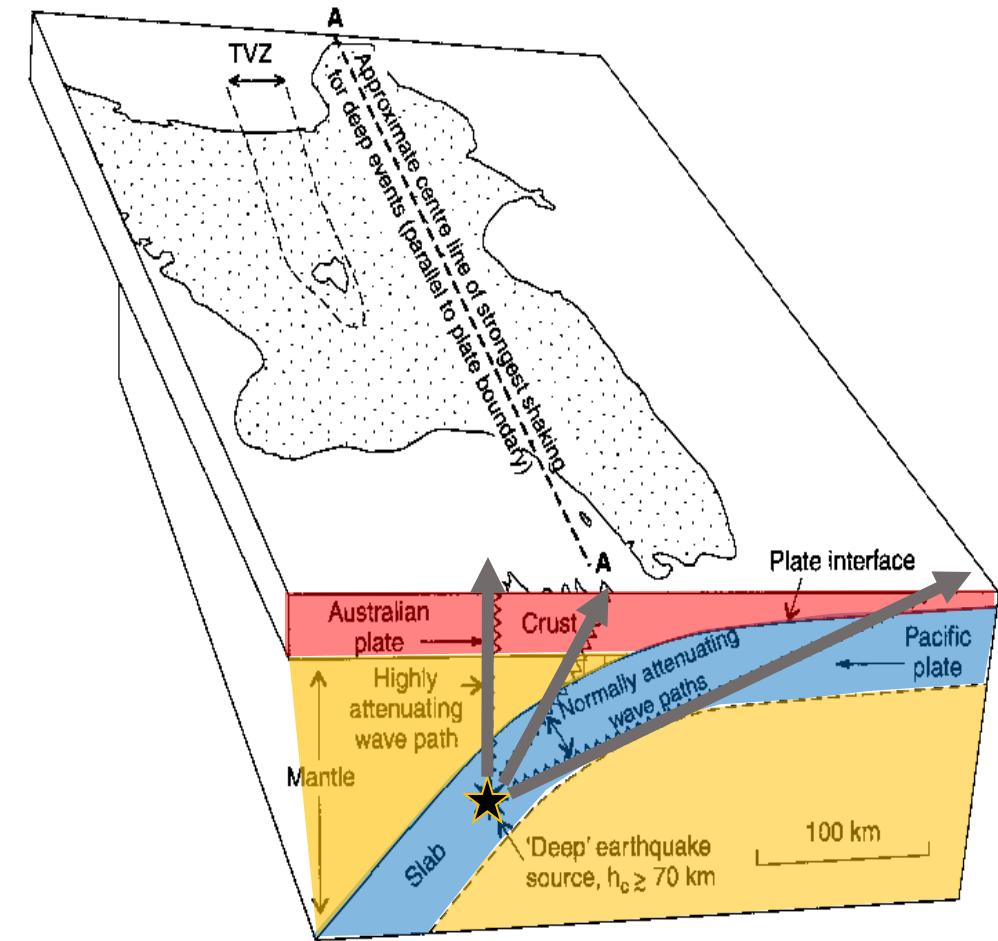
Otros factores que influyen :

Mecanismo focal

Profundidad de la fuente

Clase de suelo

Movimiento vertical u horizontal



3. Consideraciones sobre la atenuación

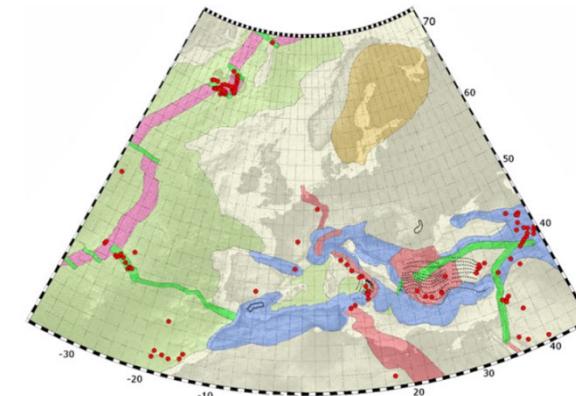
Elección de modelos de movimiento fuerte desarrollados en zonas diferentes a las de aplicación

Criterio fundamental: afinidad de régimen tectónico

Corteza superior estable

corteza superior activa

subducción (inslab o interface)



Delavaud et al, 2012

Table 2 Description of the ground-motion prediction equations for stable continental regions

Name	Mag type	Mag	Dist type	Dist (km)	Period (s) + PGA and/or PGV	Site classification based on v_{S30} (m/s)	sof or pN, pR	H Comp type	Main region(s)
Atkinson (2008)	M_w	4.3–7.6	RJB	10–1,000	0.1–5.0 + PGA, PGV	760	N, R, S, U	GMRotI50	ENA
Atkinson and Boore (2006)	M_w	3.5–8.0	RUP	1–1,000	0.025–5.0 + PGA, PGV	2,000, 760	0.01, 0.81	GMEAN	ENA
Campbell (2003)	M_w	5.0–8.2	RUP	0–1,000	0.02–4.0 + PGA	2,800	0.01, 0.81	GMEAN	ENA
Douglas et al. (2006)	M_w	4.5–7.5	RJB	1–1,000	0.02–2.0	2,800	N, R, S	GMEAN	Southern Norway
Tavakoli and Pezeshk (2005)	M_w	5.0–8.2	RUP	0–1,000	0.05–4.0 + PGA	2,900	0.01, 0.81	GMEAN	ENA
Toro et al. (1997)	M_w	5.0–8.0	RJB	1–1,000	0.03–2.0 + PGA	2,800	0.01, 0.81	GMEAN	ENA

RUP rupture, *RJB* Joyner–Boore distance (Abrahamson and Shedlock 1997), *sof* style of faulting, *N* normal, *R* reverse, *T* thrust, *U* undefined, *pN* proportion of normal faulting, *pR* proportion of reverse faulting needed for the style of faulting adjustment method of Bommer et al. (2003), *H Comp* horizontal component, *GMEAN* geometric mean, *GMRotI50* new geometric mean used in the PEER NGA Project



3. Consideraciones sobre la atenuación

Término de trayectoria: observaciones

Sobre la distancia:

Para sismos pequeños, de $M < 5$, es aceptable la hipótesis de fuente puntual, y puede considerarse la distancia epicentral o hipocentral para explicar la atenuación.

Para sismos mayores, hay que considerar la longitud de la ruptura, y no es aceptable la hipótesis de fuente puntual. Se proponen distintos tipos de distancia para considerar la atenuación: Distancia más corta a la sup. de ruptura, distancia a la proyección horizontal de la ruptura, etc.

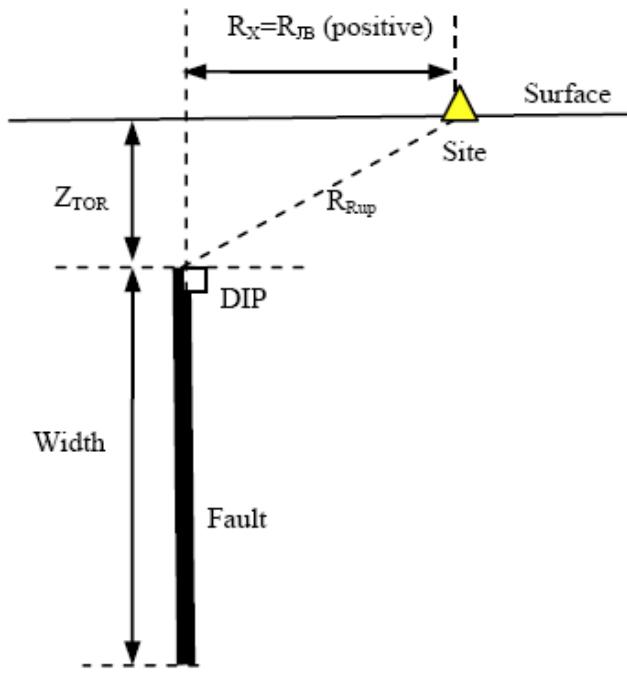
Muy importante: A la hora de aplicar una ley de atenuación, debe considerarse el tipo de distancia para la que ha sido deducida.



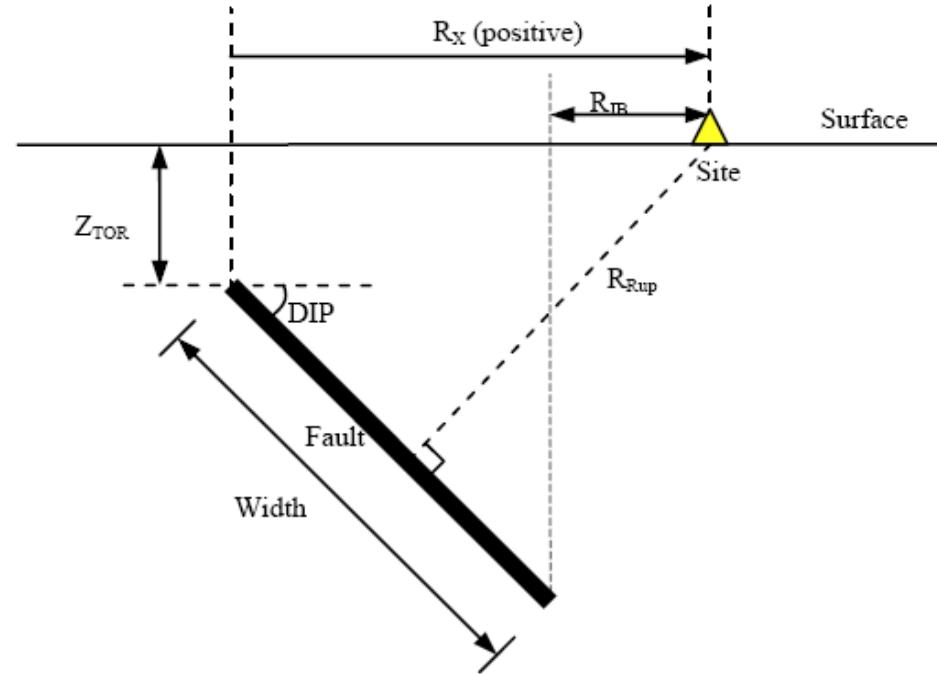
3. Consideraciones sobre la atenuación

Término de trayectoria:

Tipos de distancia: R_{rup} , R_{jb} , R_x



(a) Strike slip faulting



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

3. Consideraciones sobre la atenuación

Término de trayectoria: observaciones

Sobre la magnitud:

La magnitud debe ser homogénea para todas las observaciones que se ajustan en un determinado modelo.

Elección de una escala: M_w, M_s, M_L, etc

La aplicación del modelo debe “respetar” la escala de magnitud elegida

Sobre el rango de aplicabilidad:

Los modelos de atenuación son aplicables SOLO para los rangos de magnitud y distancia para los que han sido deducidos, a partir de los datos disponibles.

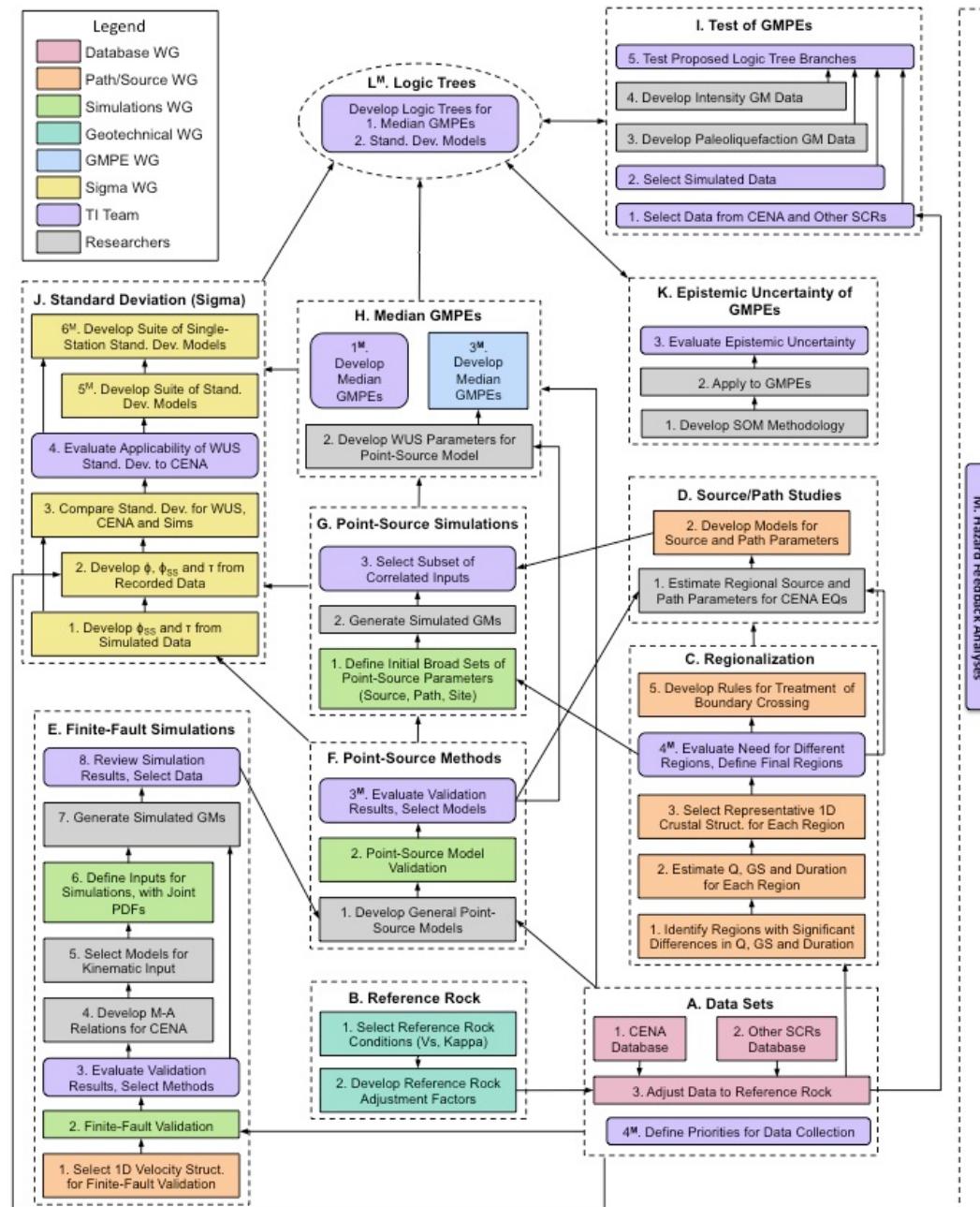
[M₁, M₂] [R₁, R₂]

No deben extrapolarse más allá de los límites de M y R



3. Consideraciones sobre la atenuación

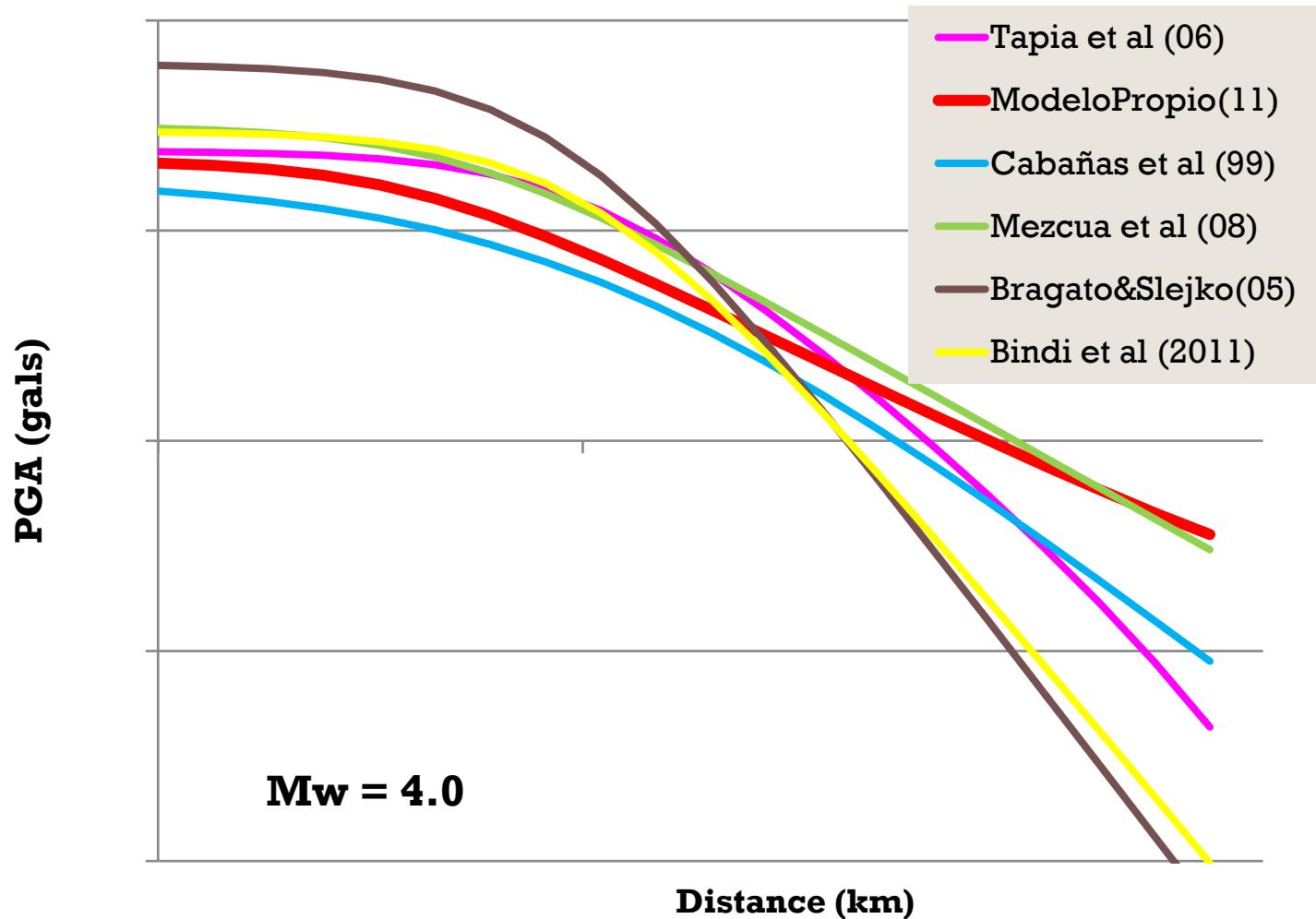
NGA Models



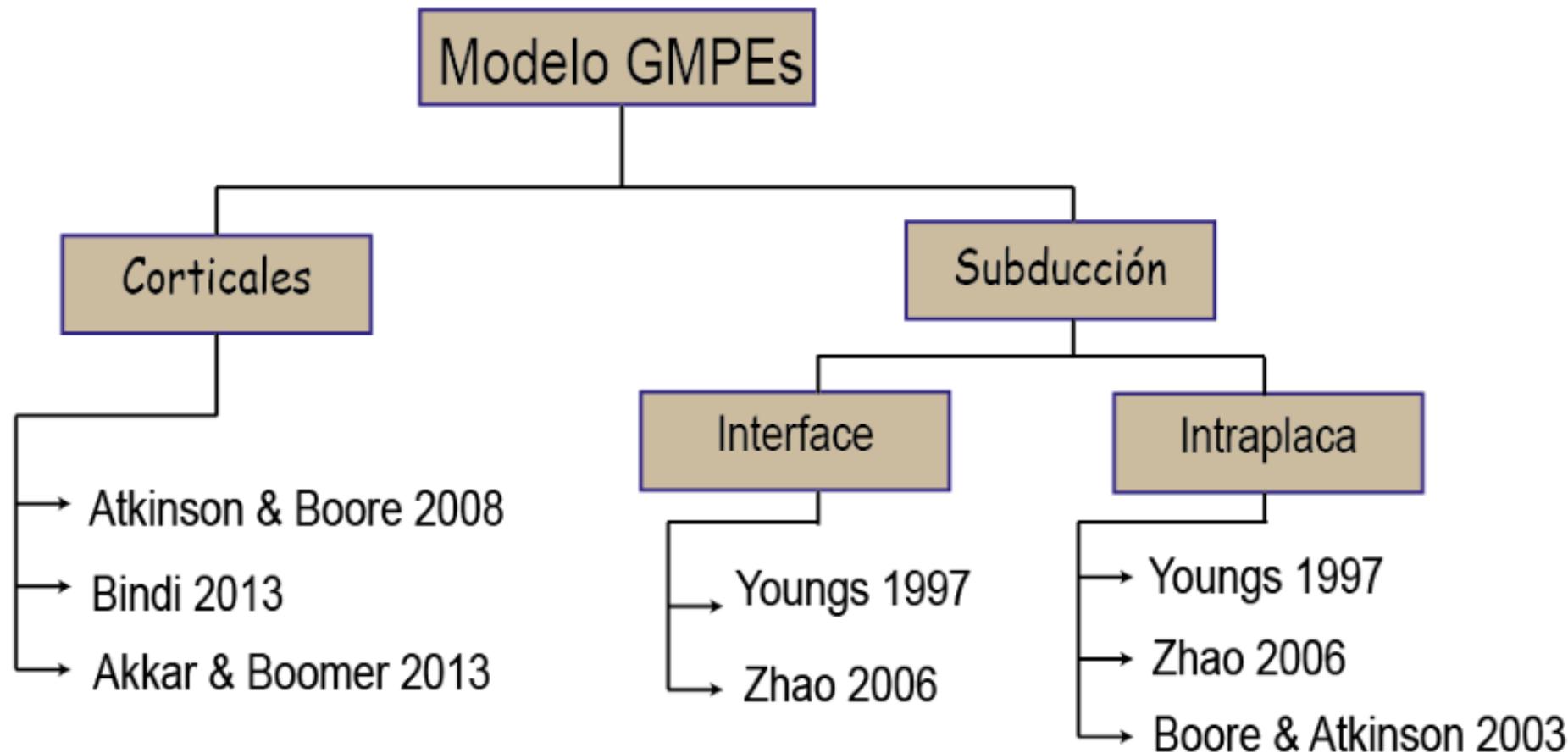
3. Consideraciones sobre la atenuación



Modelos para la cuenca del mediterráneo



Modelos de predicción de GMPE's, válida para la ciudad de Quito



Fuente: Cañizares y Singaúcho (2018) "EQUATIONS OF ATTENUATION COMPATIBLE WITH THE QUITO FAULT SYSTEM GMPEs"



CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE GMPEs:

MODELO ELEGIDO	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio 5
	¿Afinidad Tectónica?	¿Modelo publicado?	¿Modelo documentado?	¿Se descarta modelo obsoleto?	¿Modelo cubre los periodos de 0 a 2 s?
AbrahamsonGulerce2020SSlabSouthAmerica	SI	SI	SI	SI	SI
ZhaoEtAl2016SSlab	SI	SI	SI	SI	SI
ZhaoEtAl2006SSlab	SI	SI	SI	SI	SI
ParkerEtAl2020SSlab	SI	SI	SI	SI	SI

MODELO ELEGIDO PREGUNTAS	Criterio 6	Criterio 7	Criterio 8	Criterio 9
	¿La forma funcional contiene dependencia no lineal en la magnitud o caída de la aceleración con la distancia dependiente de la magnitud?	¿Los coeficientes del modelo se obtienen por métodos de máxima verosimilitud o por random forests?	¿Es preferible evitar modelos con estas variables: magnitud local, distancia epicentral? ¿Es preferible usar modelos que usen como parámetro de suelo el valor de Vs30.?	El modelo considerado en el estudio se desarrolló para unos rangos de magnitudes y distancias que incluyen los rangos de magnitudes y distancias del estudio
AbrahamsonGulerce2020SSlabSouthAmerica	SI	SI	SI	SI
ZhaoEtAl2016SSlab	SI	SI	SI	SI
ZhaoEtAl2006SSlab	SI	SI	SI	SI
ParkerEtAl2020SSlab	SI	SI	SI	SI

MODELO	CRITERIOS						RÉGIMEN				NOTA	CANDIDATOS	MODELOS GMPE Y NGE ELEGIDOS	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C	IF	IB			
Zhao et al, 2006	●	○	○	●	●	○	✓	✓	●	●	●	Apto	NO	
Zhao et al, 2016	●	○	○	●	●	●	✓	✓	●	●	●	Apto	NO	
Montalva et al, 2017	●	●	●	●	●	●	✓	✓	○	●	●	Muy Apto	SI	
Campbell & Bozorgnia, 2014	●	●	○	●	●	○	✓	✓	●	○	○	Muy Apto	SI	
Parker et al, 2020	●	●	●	●	●	●	✓	✓	○	●	●	Muy Apto	SI	
Abrahamson et al, 2014	●	●	●	●	●	○	✓	✓	●	○	○	Muy Apto	SI	
Chio Young, 2014	●	●	○	●	●	○	✓	✓	●	○	○	Muy Apto	SI	
Abrahamson Gullerce, 2020	●	●	●	●	●	●	✓	✓	○	●	●	Muy Apto	SI	
Kuehn et al, 2020	●	●	●	●	●	●	✓	✗	○	●	●	No se tiene en OpenQuake	Apto	NO
Young et al, 1997	●	●	●	●	●	○	✓	✓	○	●	●	Es muy usado pero hay modelos más modernos	Apto	NO
Casaverde y Vargas (1980)	○	○	●	●	●	●	●	✓	✗	●	●	Sin acceso a documento y OpenQuake	Apto	NO

Fuente: Criterios de selección de GMPEs acorde a Trujillo y Rivas (2024)





A technical blueprint of a mechanical system, likely a gear assembly, serves as the background. A large, metallic gear is prominently featured in the center-right, partially overlapping the blueprint. The entire image is framed by a thick black border.

GRACIAS POR LA ATENCIÓN

□ 92 777 0169

✉ seismicx.proyectos@gmail.com

🌐 <https://seismicx.github.io/Intranet-DHSA/>