

Parametrización de fuentes tsunamigénicas sísmicas: práctica e incertidumbres.

José A. Álvarez Gómez

Dep. Geodinámica – Fac. Geología
Universidad Complutense de Madrid



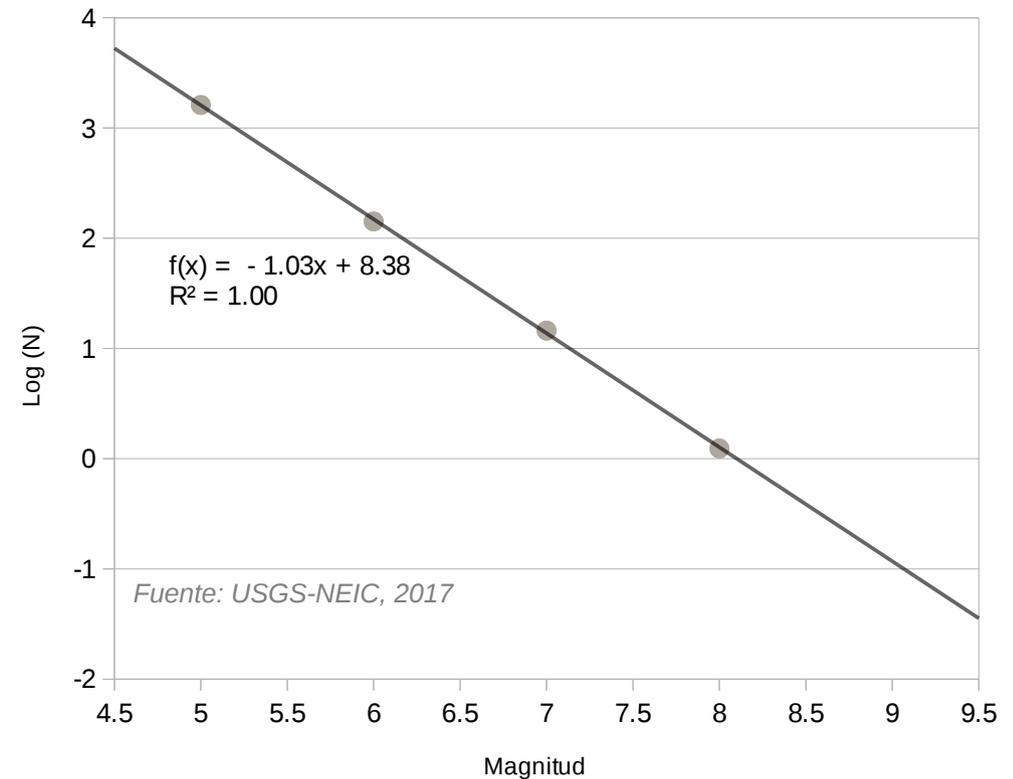
Planetary Geodynamics,
Active Tectonics and
Related Risks

Research group UCM-910368

Fuentes sísmicas

- Pronosticables
- Tratables de manera estadística
- Parametrizables
- Intervalos de recurrencia calculables
- Principal factor en la peligrosidad

Se pueden tratar de manera determinista y probabilista, sobre eventos pasados y, más importante, sobre eventos futuros.



- Se producen unos 16 eventos al año de magnitudes por encima de 7.
- Se produce un evento mayor de 8 cada 10 meses de media.

Escenarios deterministas

Son útiles para la planificación de infraestructuras sensibles así como para sistemas de alerta y evacuación.

- Peor caso (worst-case scenario)

Normalmente sería el peor escenario posible basado en datos geológicos.

- Peor caso “creíble”

Cuando el peor caso es “muy malo”, los gestores y “otros agentes” prefieren utilizar el peor caso histórico o simplemente “restarle decimales” a la magnitud del máximo terremoto geológico.

- Evento mayor para un intervalo de recurrencia dado

En peligrosidad sísmica es frecuente recurrir a escenarios deterministas basados en eventos con intervalos de recurrencia fijados (475 años, 5000, 10000 años).

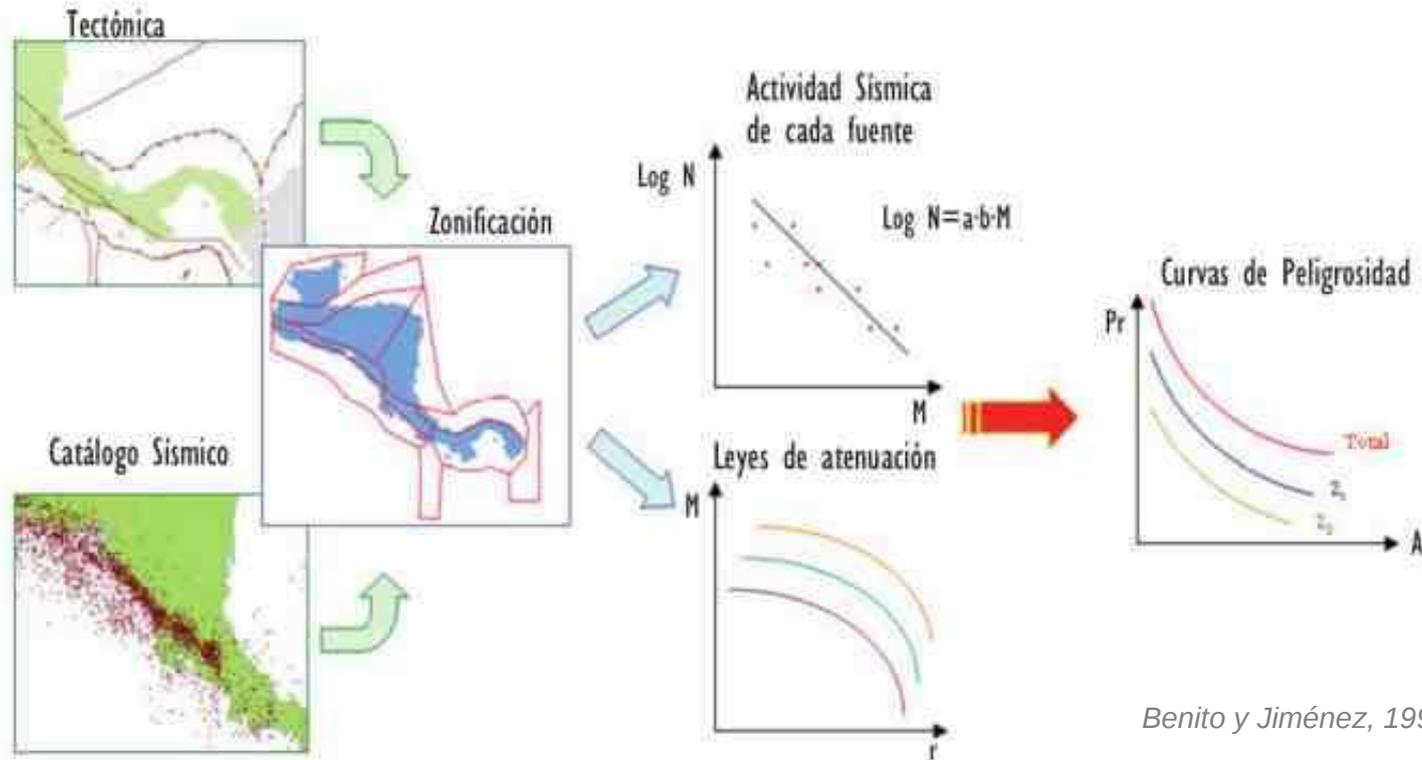
Escenarios deterministas

El tsunami de Japón es buen ejemplo de “peor caso” INCREIBLE subestimado.



Photograph from Miyako City Office via Reuters

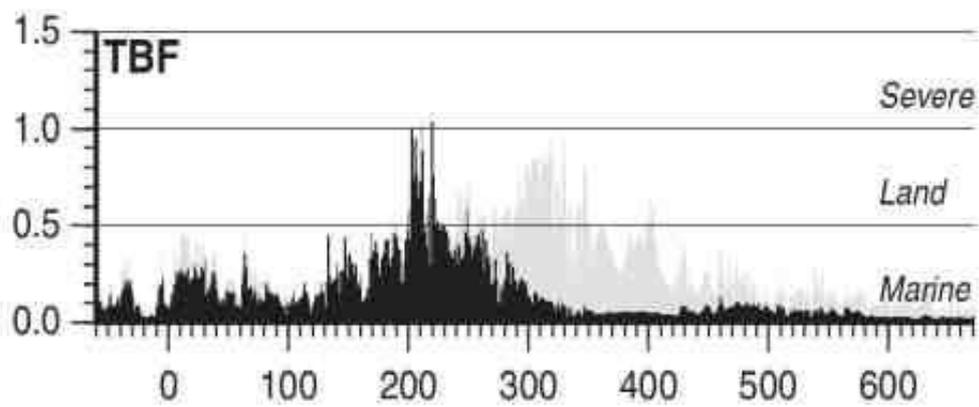
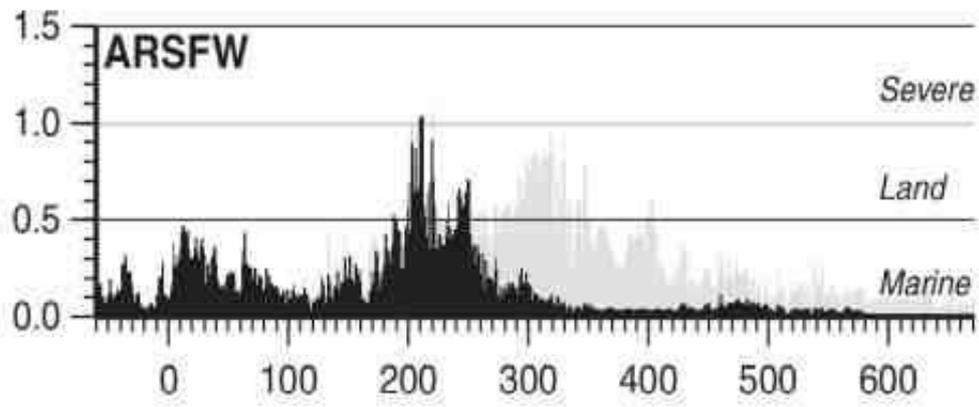
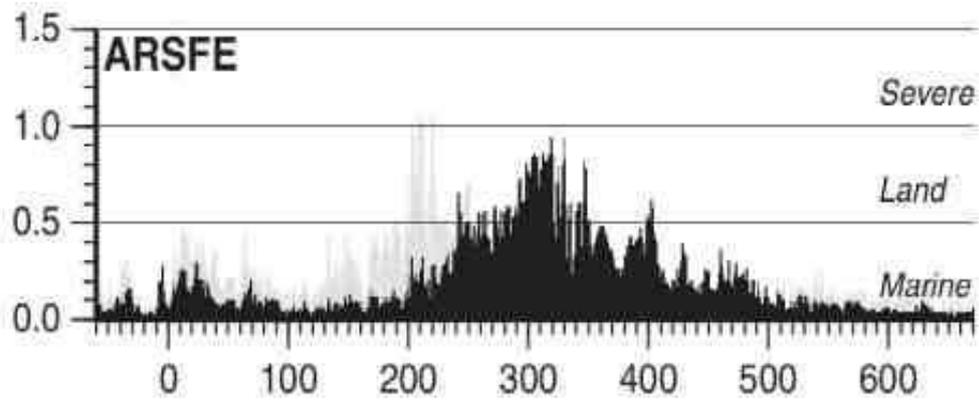
PSHA vs. PTHA



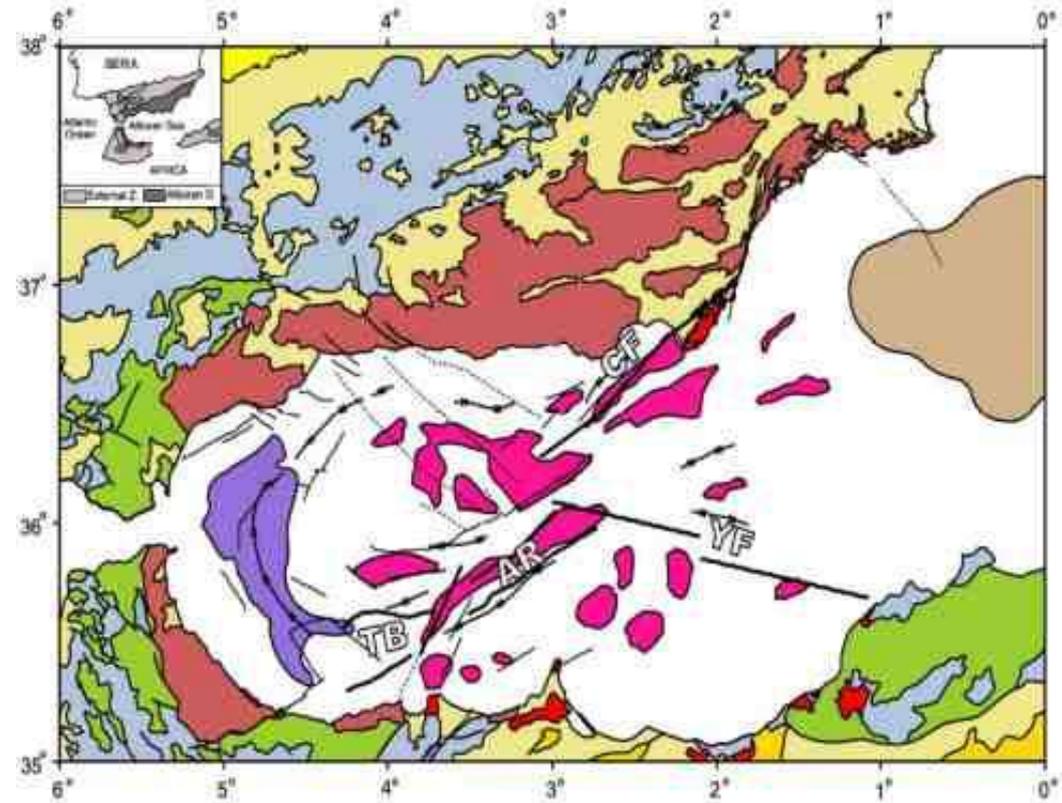
El PTHA basado en fuentes sísmicas se desarrolla sobre el PSHA pero con importantes diferencias:

- Parámetros de las fuentes determinantes en el resultado → generación de elevación del fondo oceánico
- Modelos de propagación – Inundación (en lugar de atenuación)
- Batimetría somera en estimación de inundación (resonancias y efectos locales)
- Incorporación de mareas y variaciones del nivel del mar a largo plazo

PSHA vs. PTHA



El terremoto más grande no implica el mayor tsunami localmente.

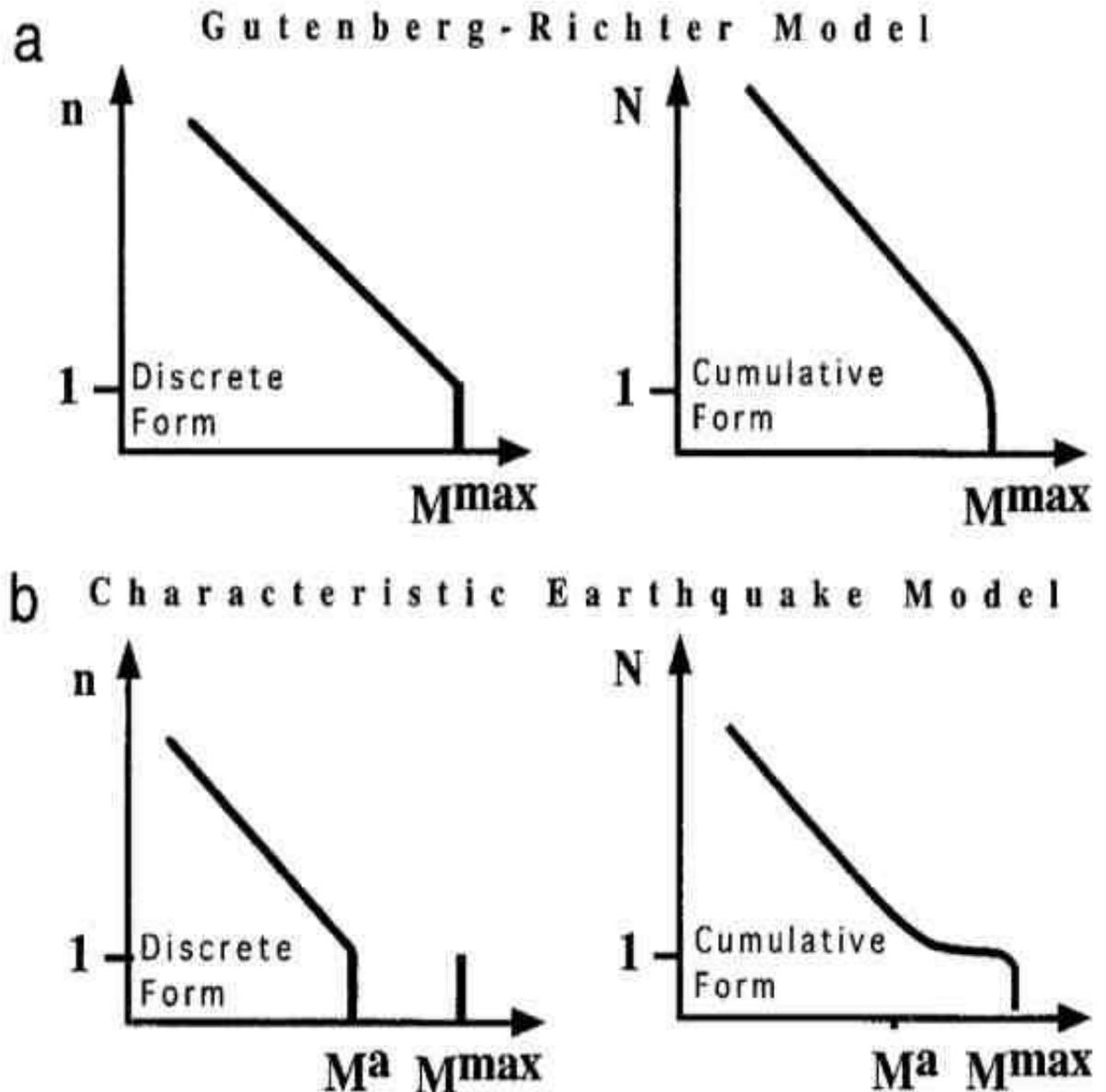


Actividad sísmica de la fuente

Modelo de Gutenberg-Richter vs. terremoto característico.

El modelo de terremoto característico suele ser utilizado para grandes fallas y basado en datos paleosismológicos.

El modelo de Gutenberg-Richter suele utilizarse para regiones (o zonas de falla) y se basa en el registro de la actividad sísmica.



Tratamiento de incertidumbres

$$[\Theta|Y] = \frac{[\Theta, Y]}{[Y]} = \frac{[\Theta][Y|\Theta]}{[Y]}$$

Nat Hazards (2010) 53:159–174
DOI 10.1007/s11069-009-9418-8

ORIGINAL PAPER

A Bayesian procedure for Probabilistic Tsunami Hazard Assessment

Anita Grezio · Warner Marzocchi · Laura Sandri · Paolo Gasparini

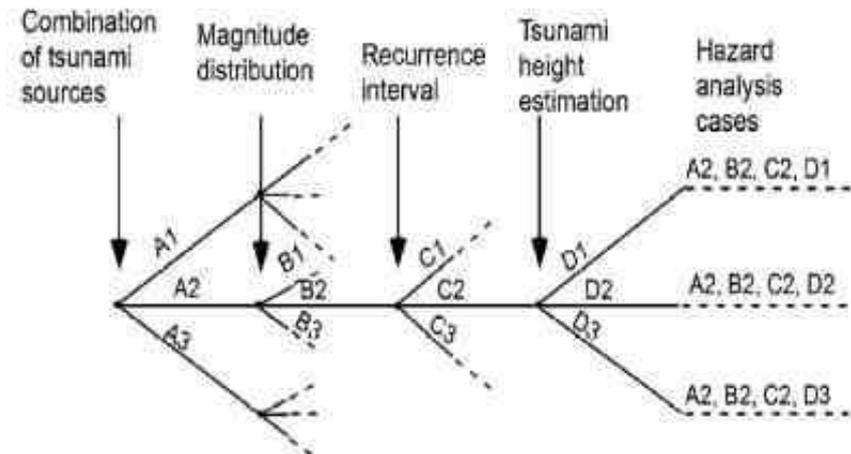
Pure appl. geophys. 164 (2007) 577–592
0033-4553/07/030577-16
DOI 10.1007/s00024-006-0174-3

© Birkhäuser Verlag, Basel, 2007

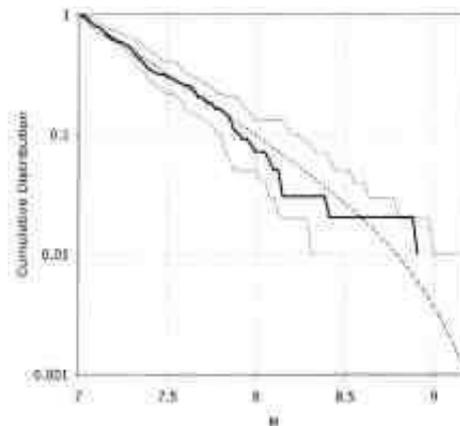
Pure and Applied Geophysics

Logic-tree Approach for Probabilistic Tsunami Hazard Analysis and its Applications to the Japanese Coasts

TADASHI ANNAKA,¹ KENJI SATAKE,² TSUTOMU SAKAKIYAMA,³
KEN YANAGISAWA,⁴ and NOBUO SHUTO⁵



$$F(M) = (M_t/M)^b \exp[-(M_t - M)/M_c]$$



Natural Hazards (2006) 37: 277–314
DOI 10.1007/s11069-005-4646-z

© Springer 2006

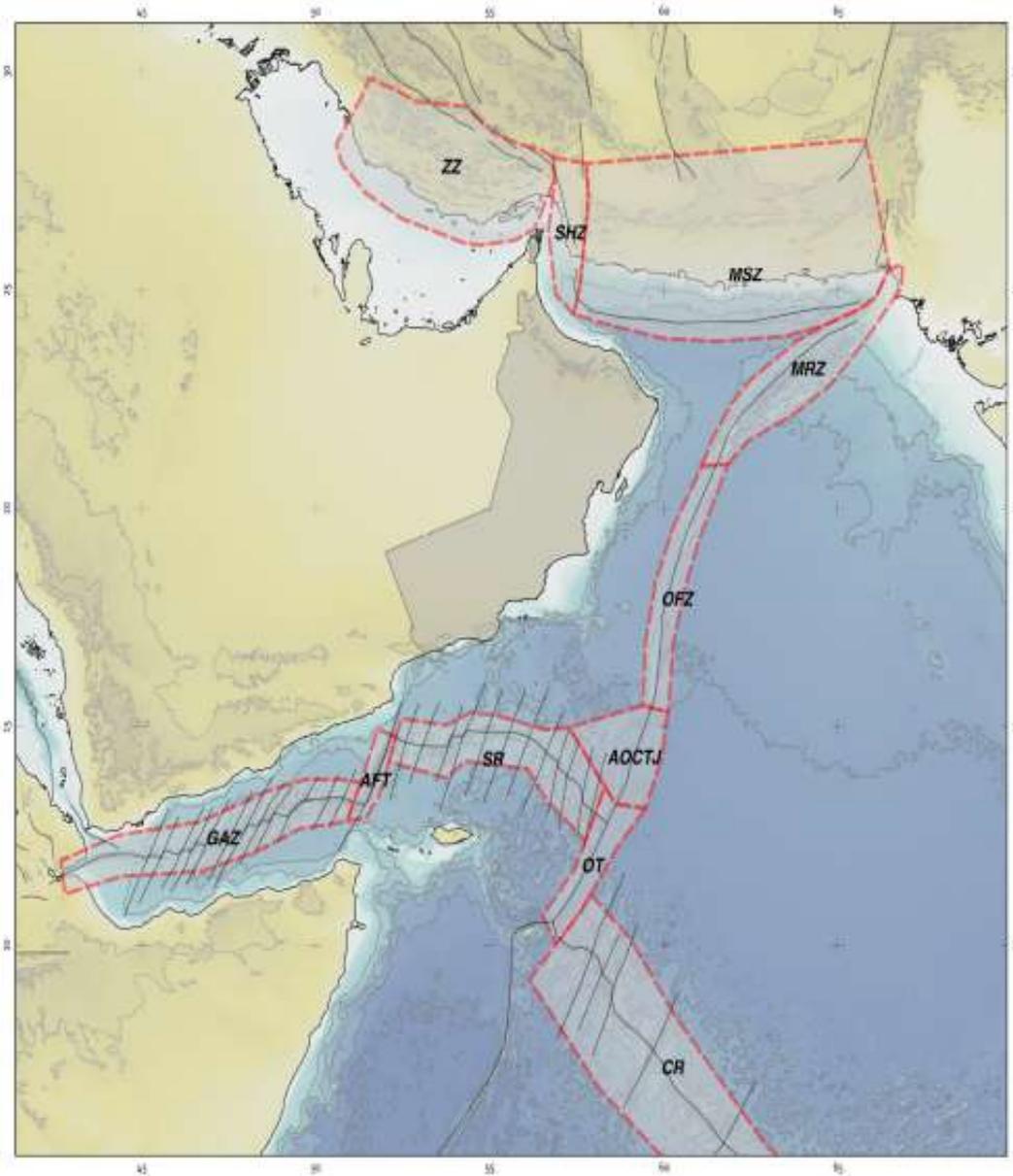
Probabilistic Analysis of Tsunami Hazards*

ERIC L. GEIST* and TOM PARSONS

U.S. Geological Survey, 345 Middlefield Rd., MS 999 Menlo Park, CA, 94025, USA

Catálogos de escenarios

- Generación de escenarios predefinidos con un rango de escenarios lo mayor posible.

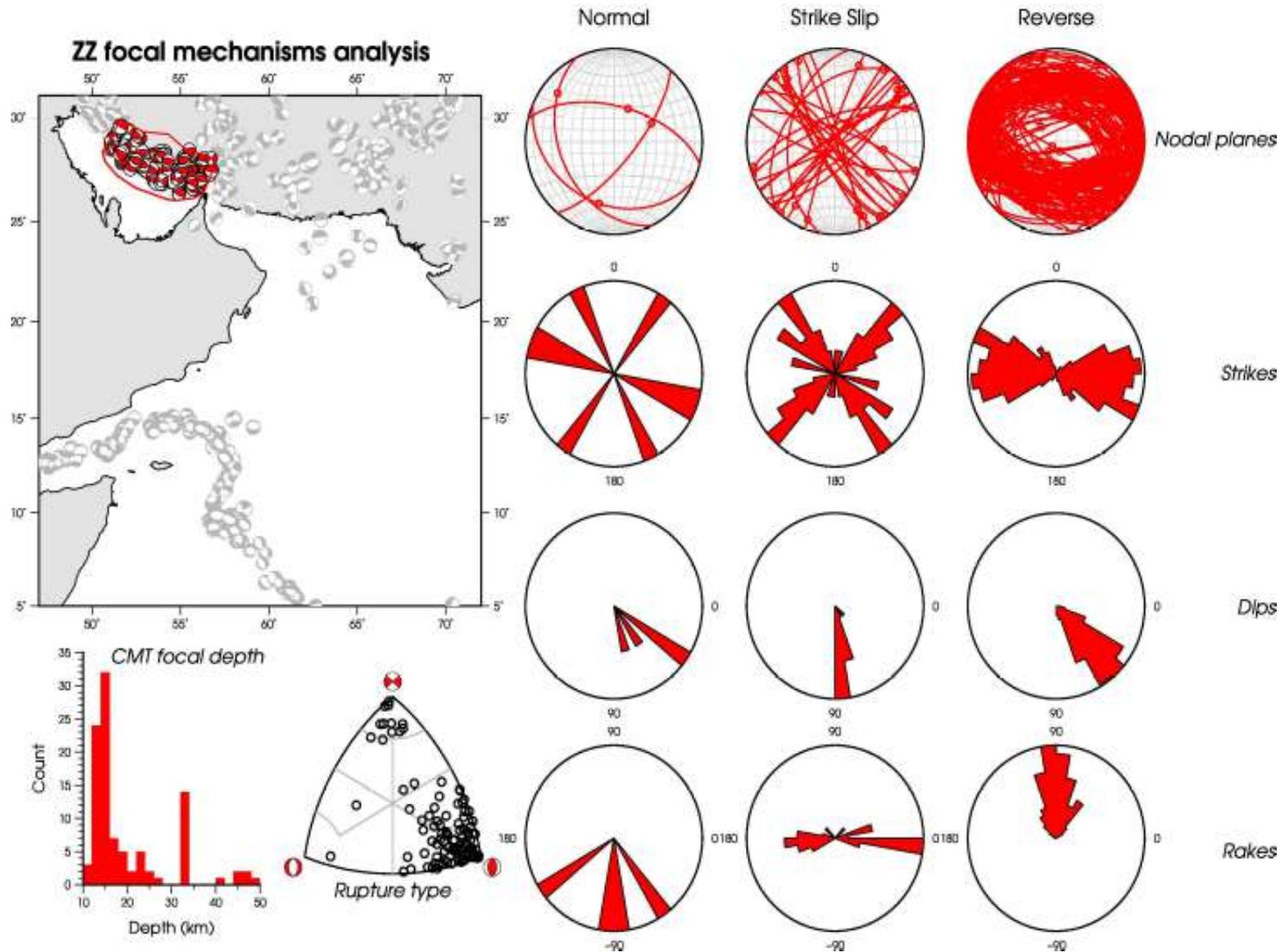


Zone	Number
Aden Gulf	44
Alula Fartak	1
AOCT	14
Sheba Ridge	65
Owen Transform	3
Carlsberg Ridge	74
Owen Fracture	16
Murray Ridge	33
Hormuz	48
Zagros	148
Makran	2735
TOTAL	3181

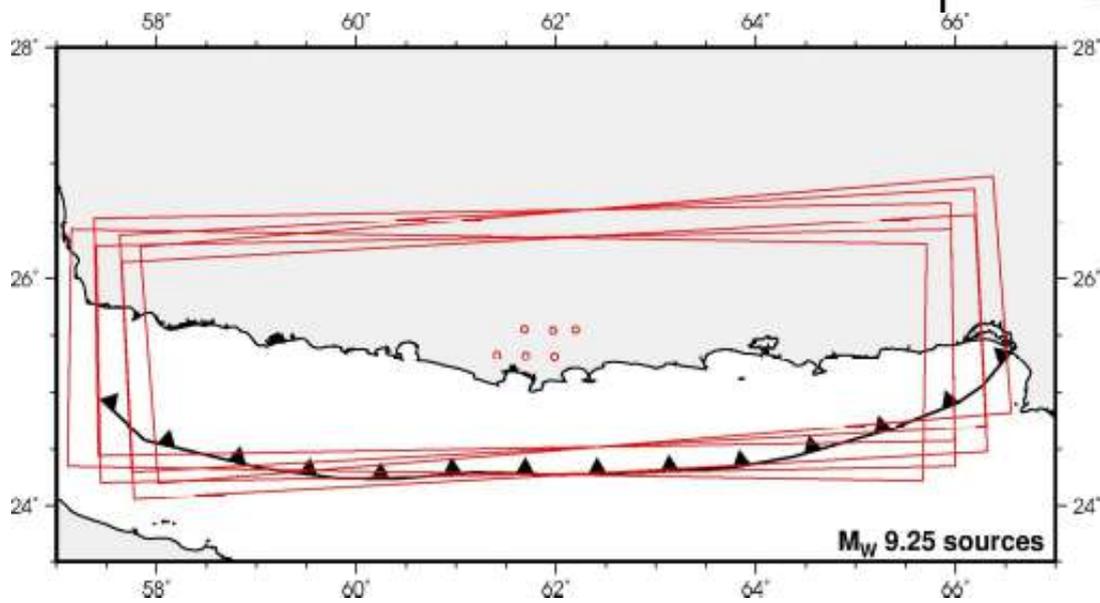
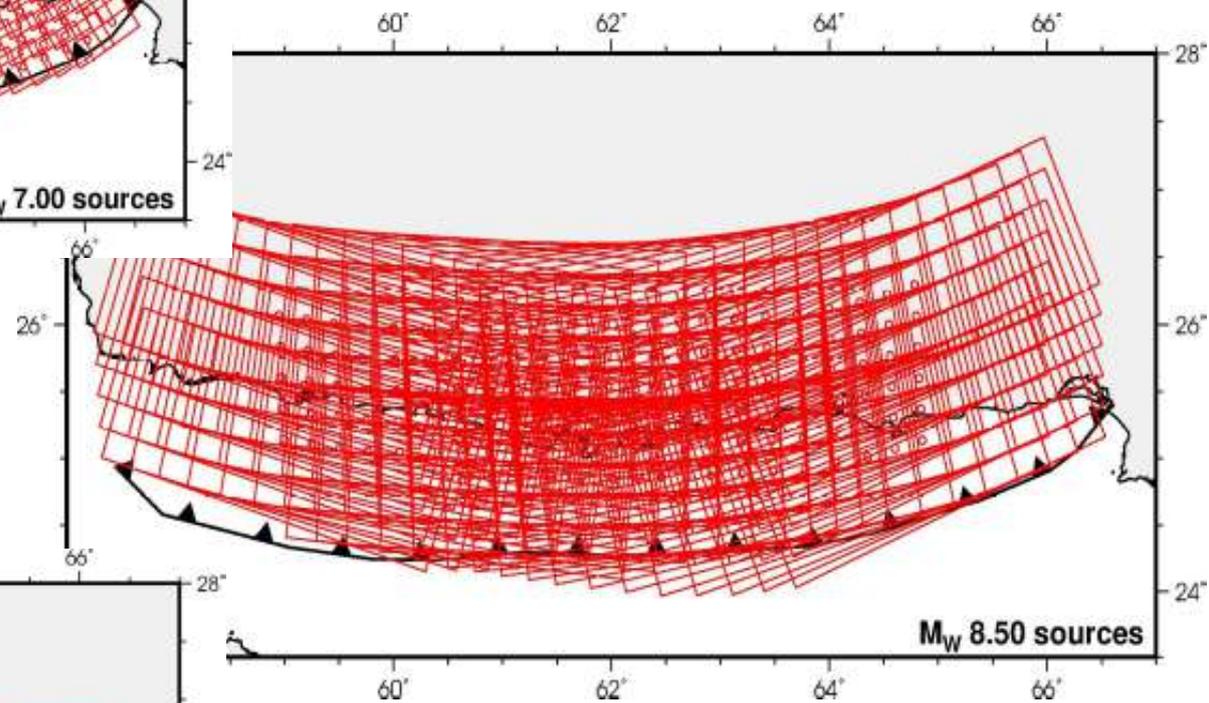
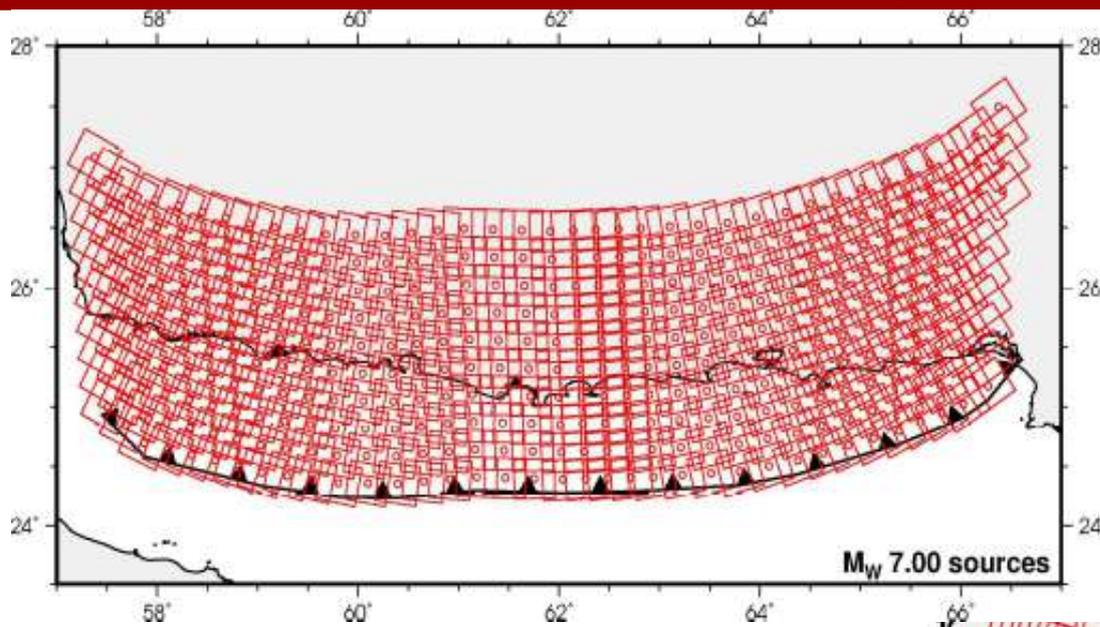
Número de escenarios generados para cada zona con $M_w > 6.5$

Catálogos de escenarios

El análisis sismotectónico nos permite definir los parámetros de las fuentes incorporando el análisis de incertidumbres aleatorias.



Catálogos de escenarios



Catálogos de fuentes

Los catálogos de escenarios, así como los análisis deterministas pueden basarse en catálogos de fallas activas existentes.



Los datos de las fallas se basan en estudios geológicos/geofísicos

Las fallas marinas tienen incertidumbres altas y sus datos de actividad son muy limitados.

“No están todas las que son”

Parámetros de fuentes

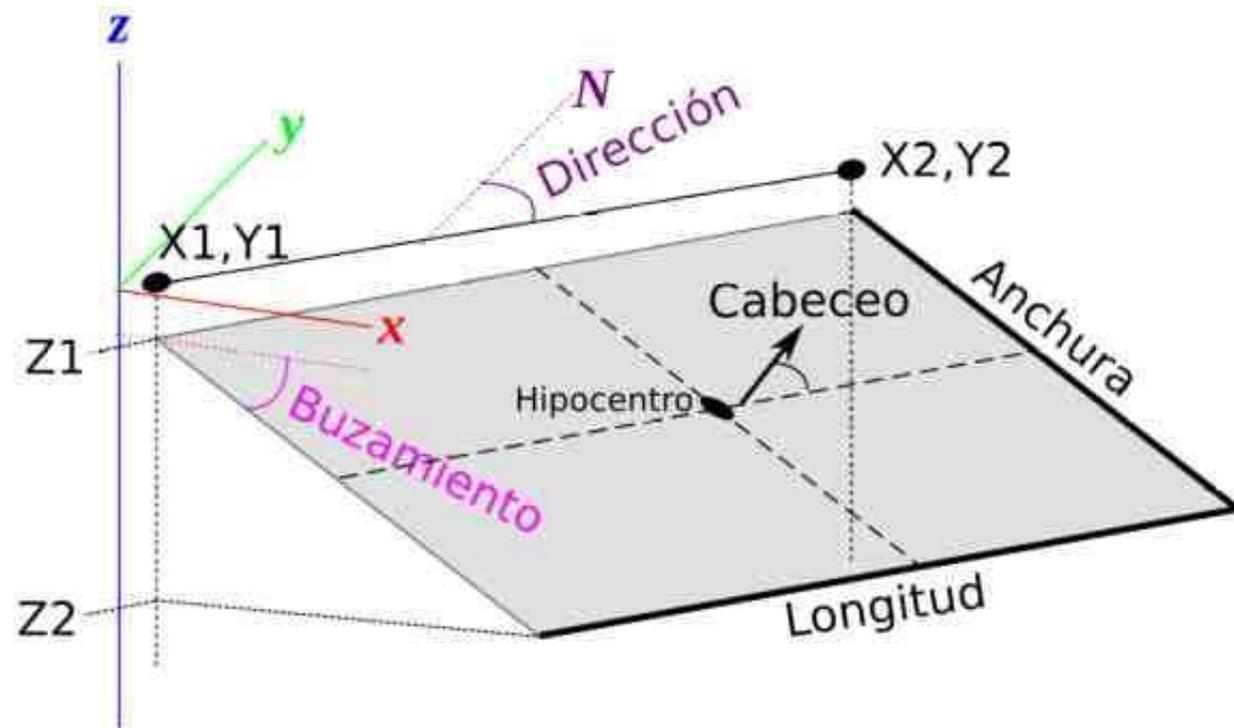
Parámetros a definir en un modelo de tsunami sísmico:

Localización (X, Y, Z)

Dimensiones (Mw, L, W, U)

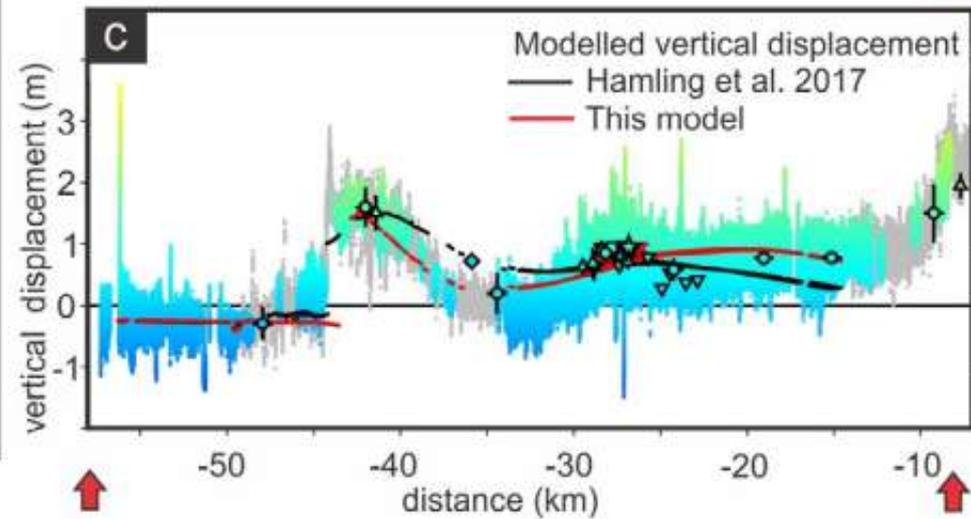
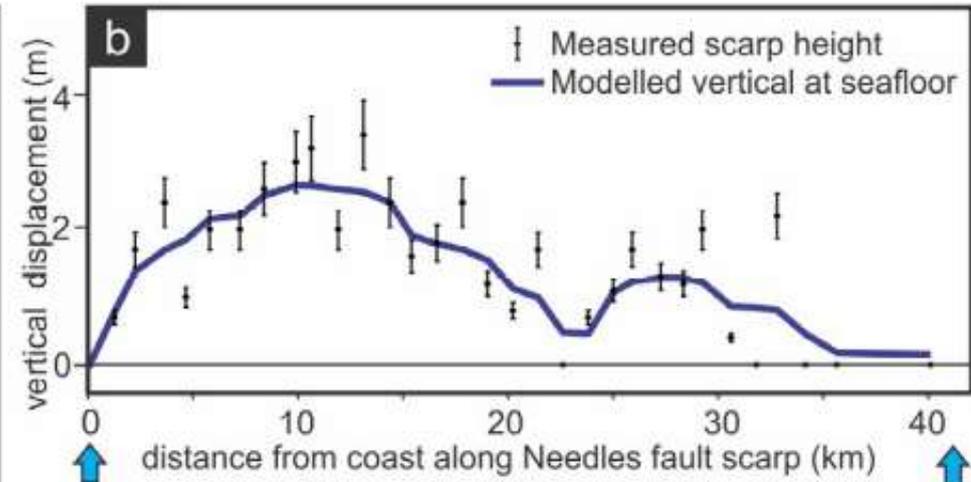
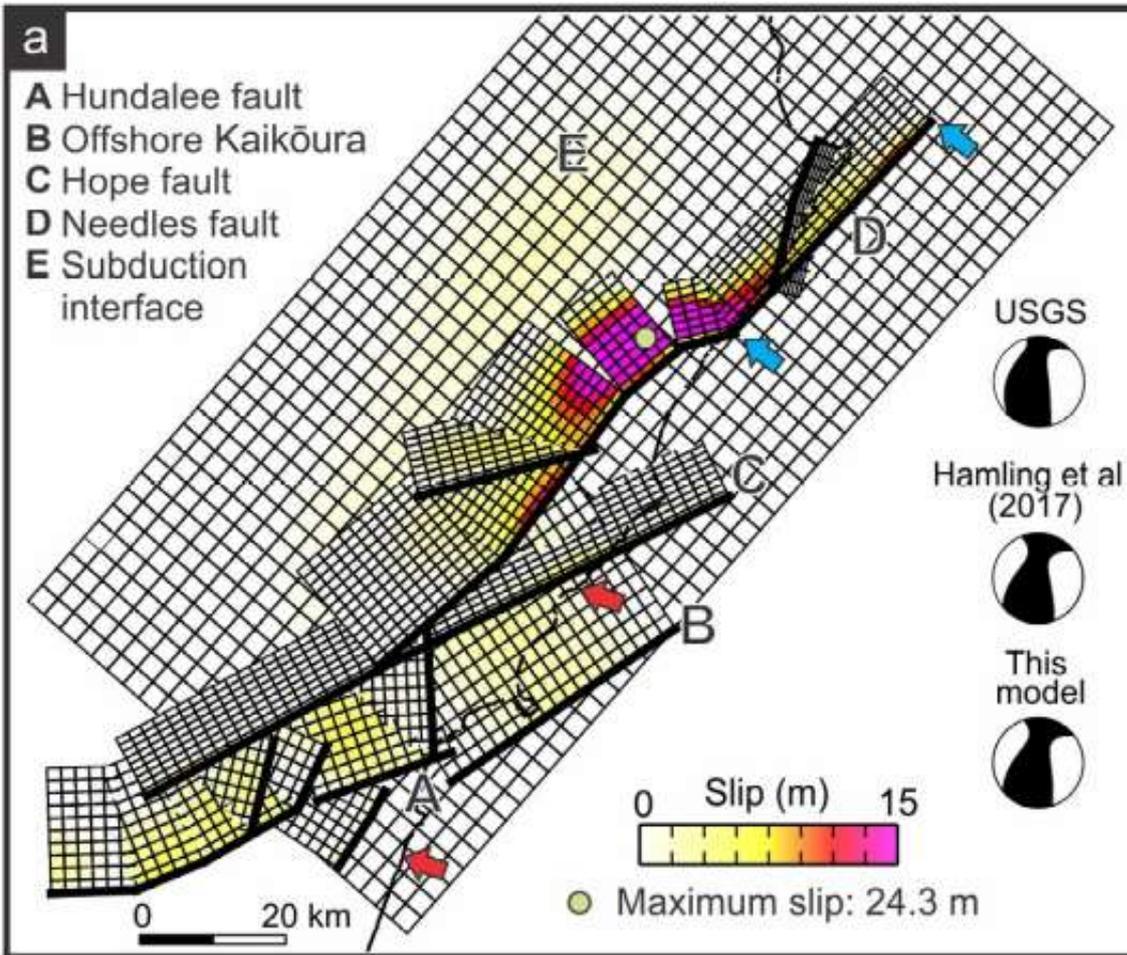
Orientación (D,B,C)

Normalmente los modelos de generación de tsunamis por terremotos se basan en las ecuaciones de Okada o Mansinha, que modelan dislocaciones rectangulares.



Parámetros de fuentes

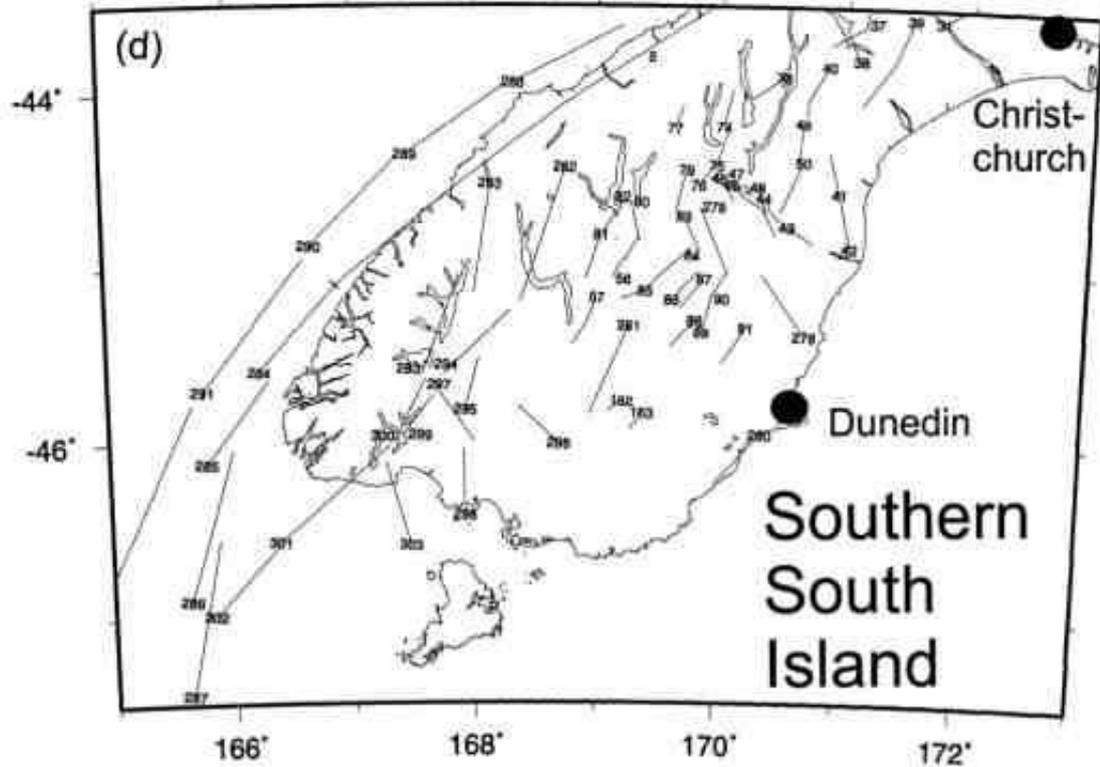
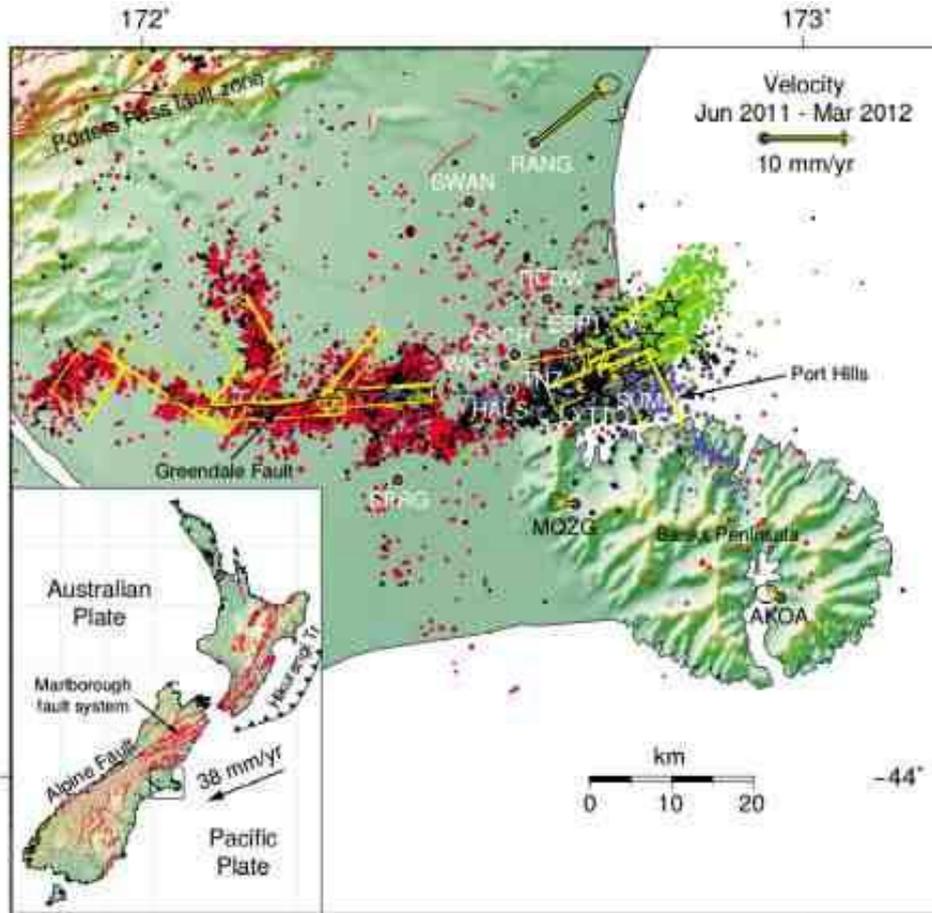
Terremoto de Kaikoura 2016, Mw 7.8



Localización

Que no esté cartografiada la falla no significa que no pueda ocurrir un terremoto (fallas lentas)

Terremoto de Darfield, 2010, Mw 7.2



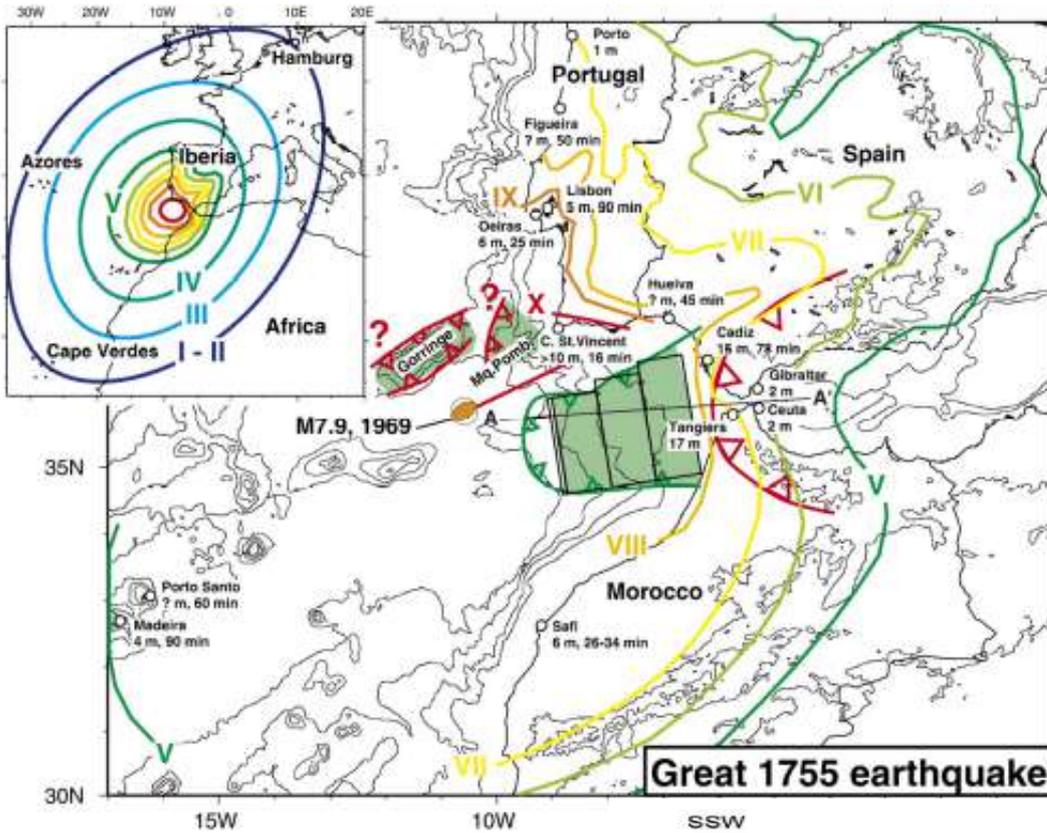
Stirling et al., 2002

Bevan et al., 2017

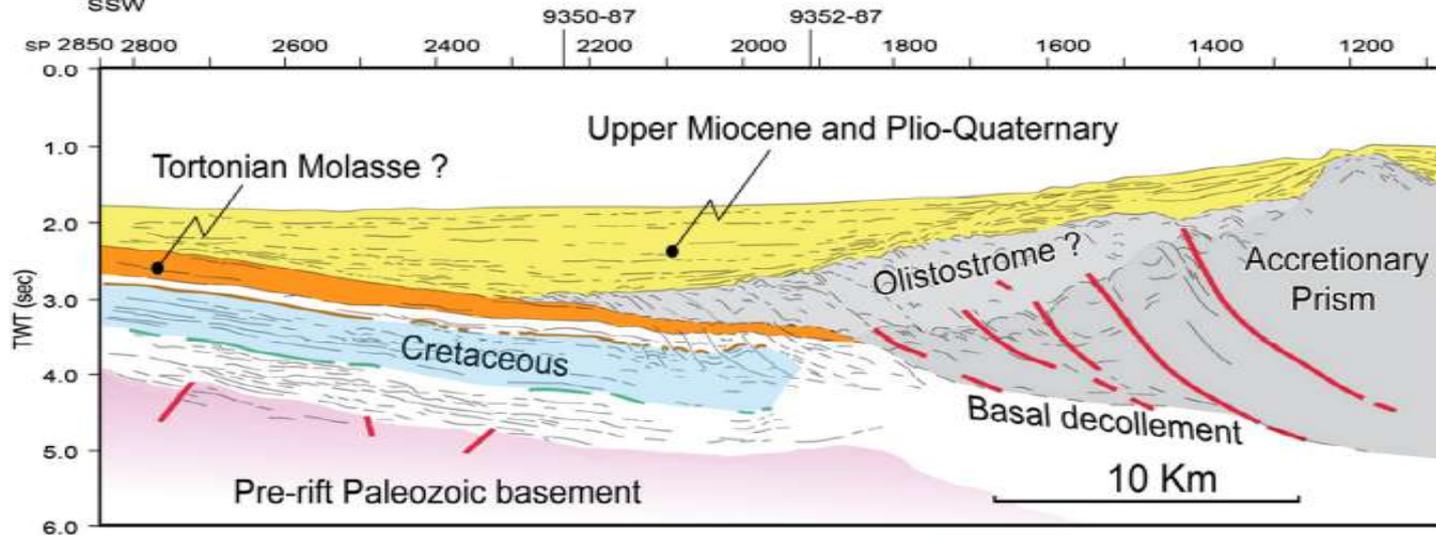
Localización

Que esté cartografiada no significa que pueda ocurrir (CWF)

Gulf of Cadiz subduction
Wedge Fault



Gutscher et al., 2006



Zitellini et al., 2009 modificando a Camurri, 2004

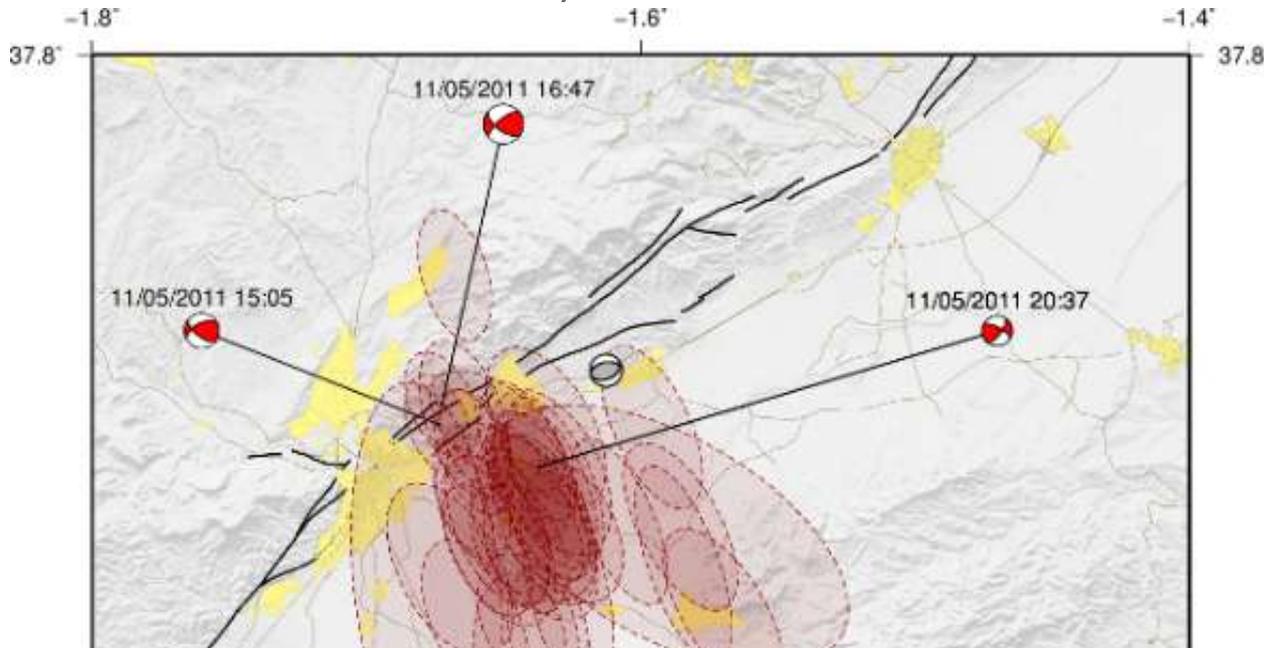
Localización

Terremoto de Lorca, 2011

Martínez-Díaz y Álvarez-Gómez, 2011

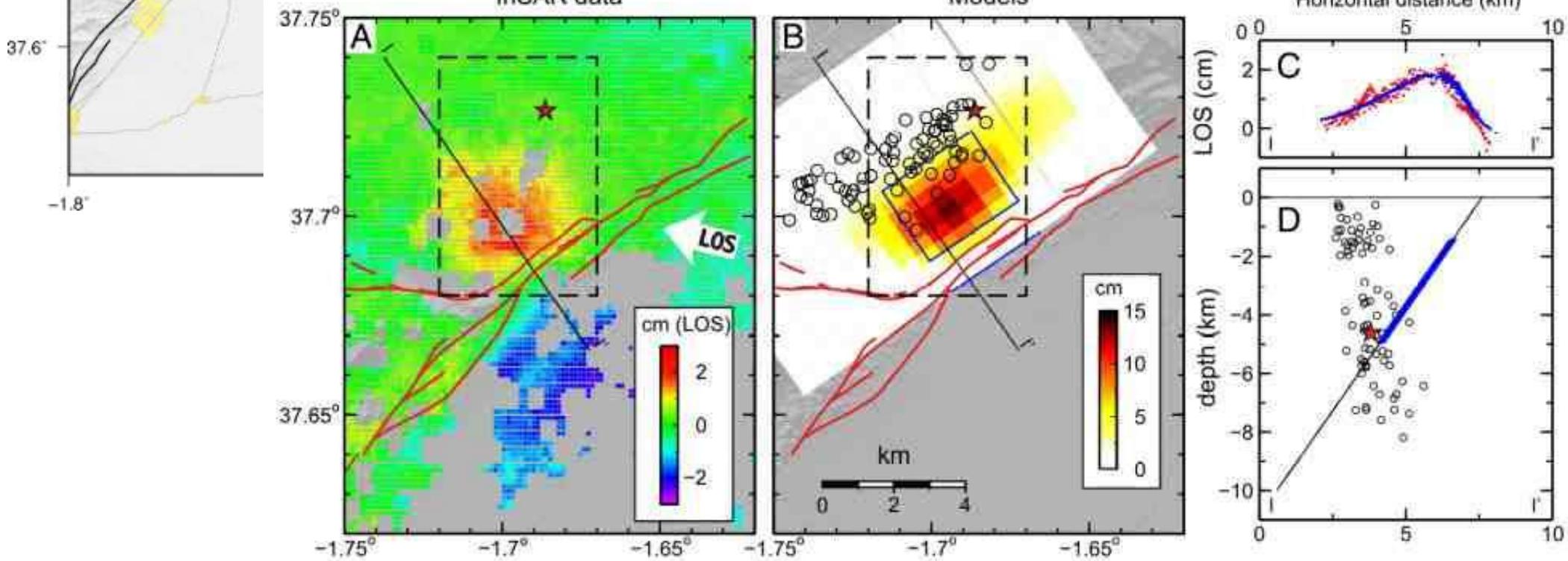
Datos: IGN

Incertidumbre localización del evento (epicentro, hipocentro) respecto a localización falla generadora. → Importante en sistemas de alerta.



InSAR data

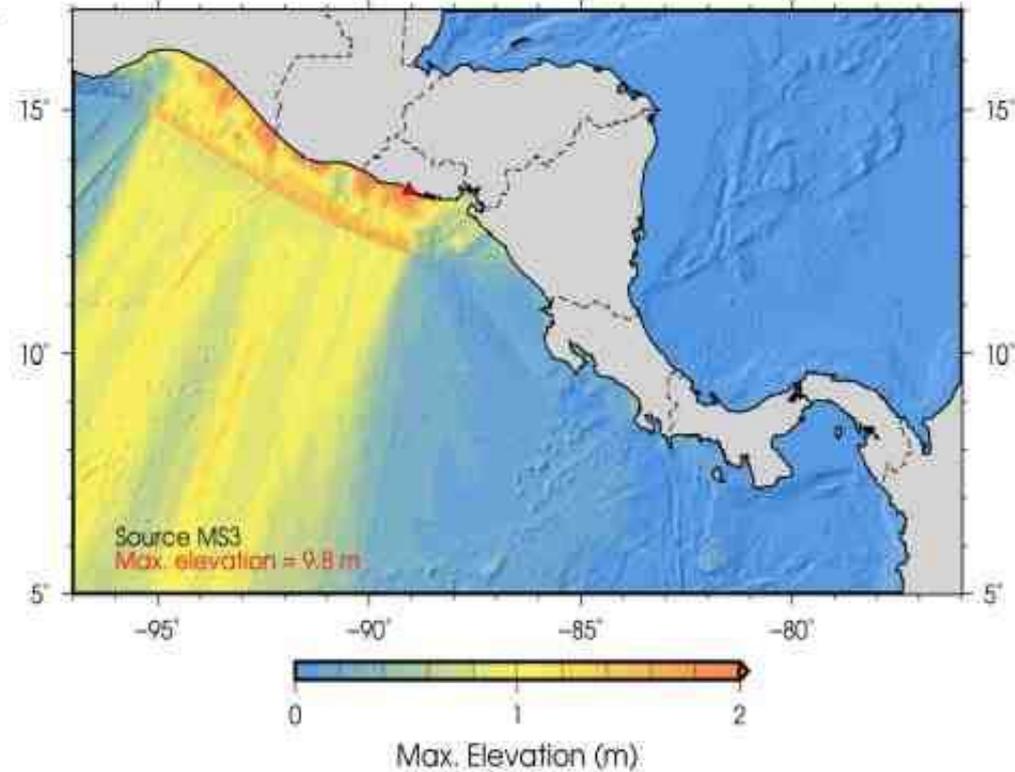
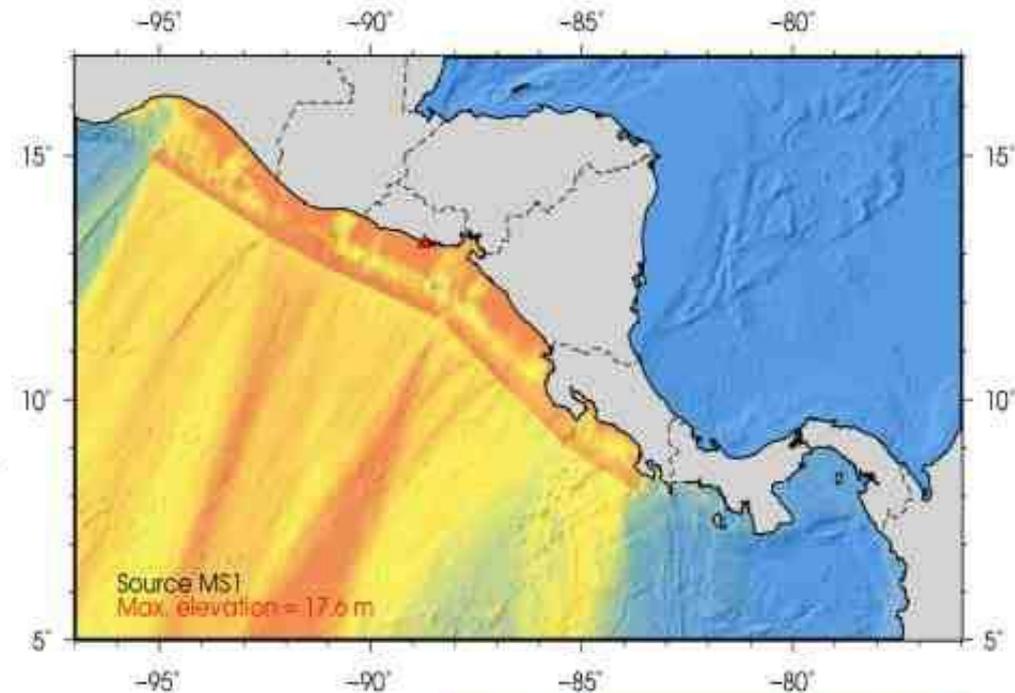
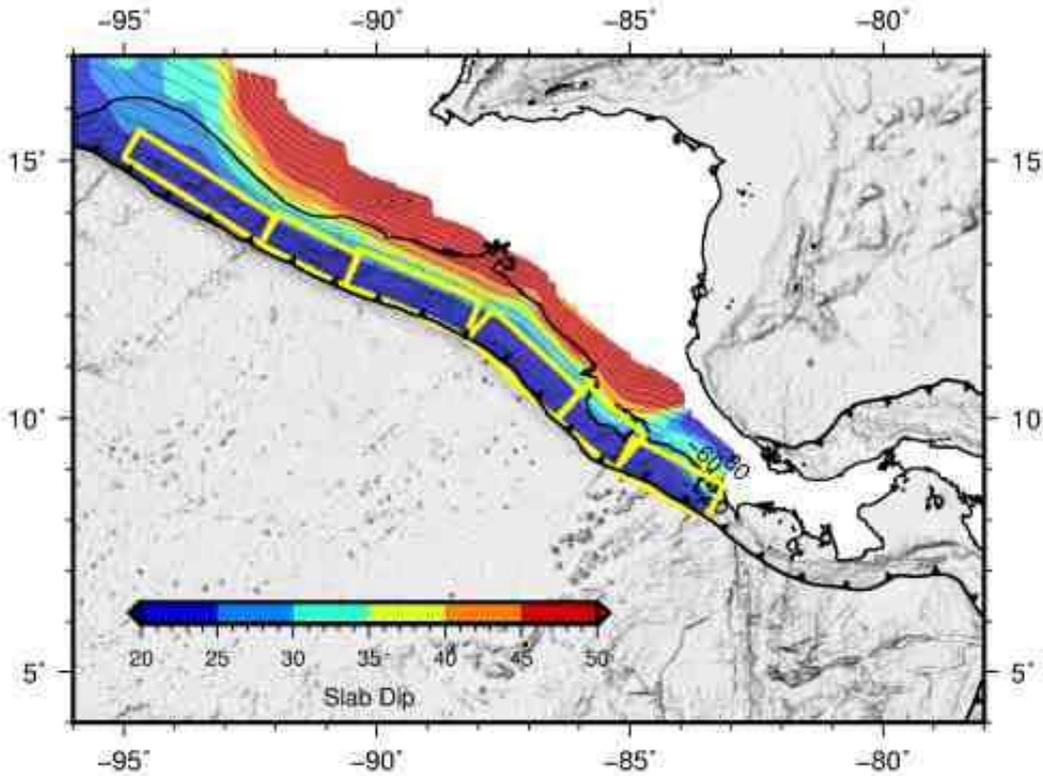
Models



Martínez-Díaz et al., 2012

Dimensiones

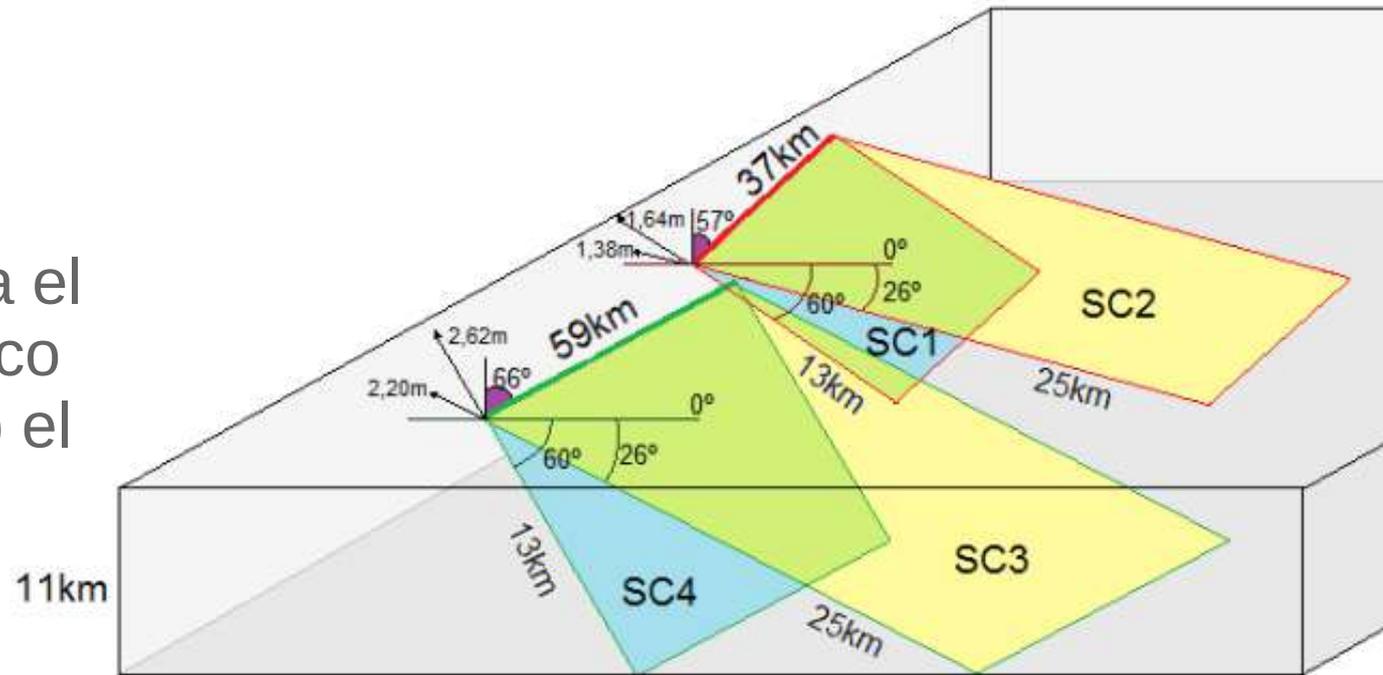
Longitud → concepto de segmento, máxima longitud de rotura



Dimensiones

Anchura → profundidad sismogénica + buzamiento

La anchura determina el área de fondo oceánico elevada y por lo tanto el tamaño del tsunami generado.

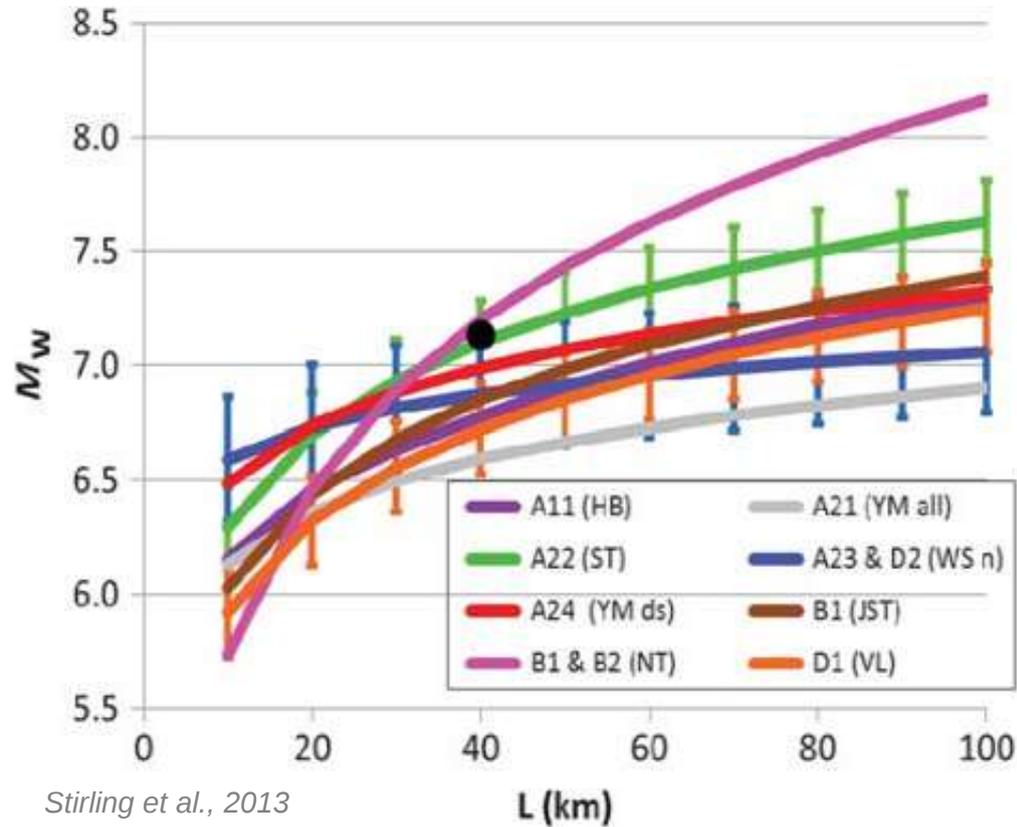


López Cano, 2017

	L	W	Strike	Dip	Rake	Mw	Desplazam
SC 0	37km	13km	57°	60°	45°	6,71	1,02m
SC 1	37km	13km	57°	60°	90°	6,85	1,64m
SC 2	37km	25,09km	57°	26°	90°	6,99	1,38m
SC 3	59km	25,09km	66°	26°	90°	7,26	2,20m
SC 4	59km	13km	66°	60°	90°	7,12	2,62m

Dimensiones

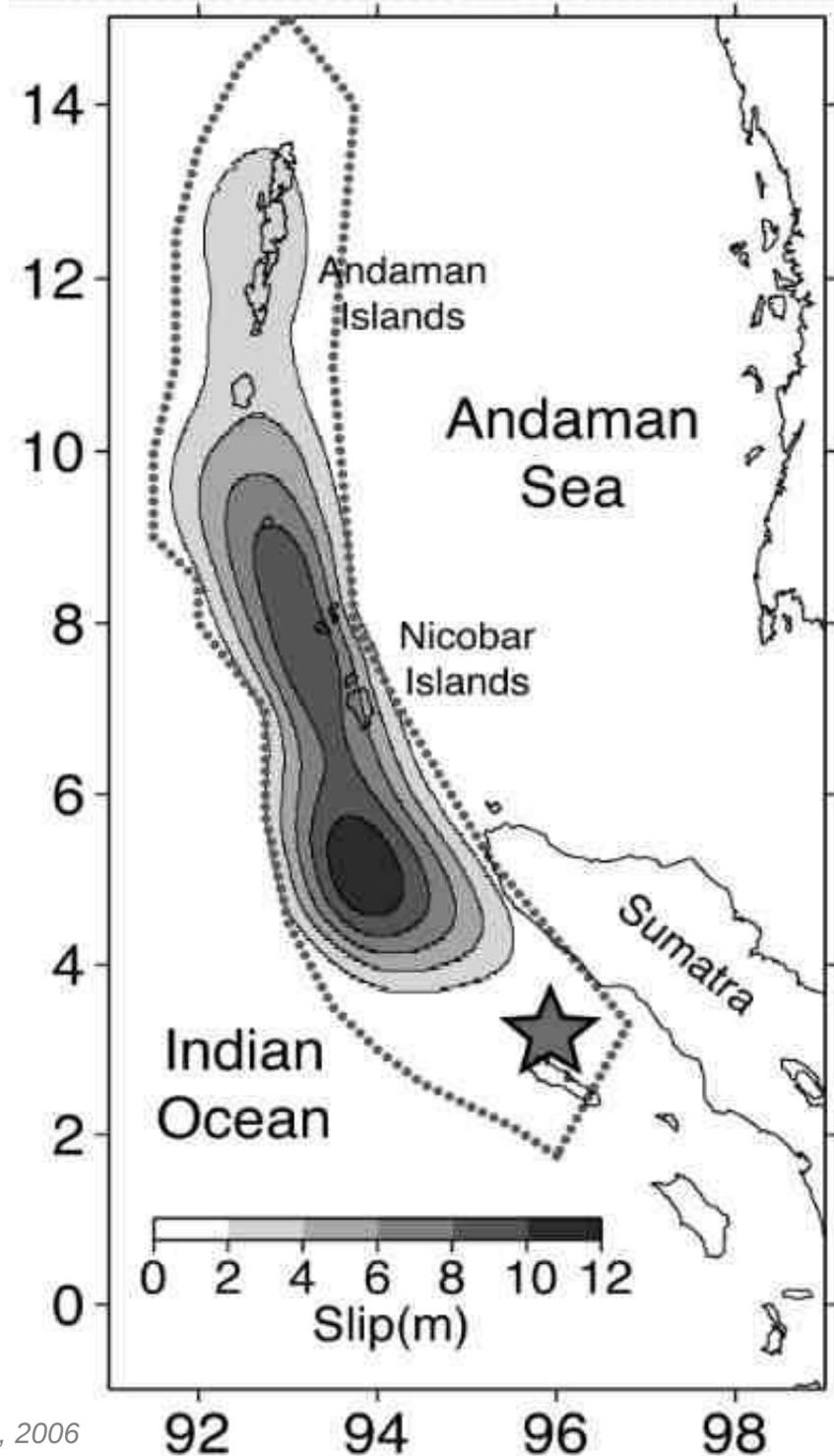
Relaciones de escala → Magnitud máxima → deslizamiento homogéneo vs. variable



$$\log M_0 = 1.5 M_S + (11.8 - \log(\sigma_a/\mu))$$

$$M_0 = \mu AD$$

μ = rigidez
 A = Área de rotura
 D = desplazamiento medio



Orientación

Dirección → determinante localización del daño

Buzamiento → determina la anchura de la falla y el área de fondo marino levantado

Cabeceo → determinante en la generación del tsunami

Influencia parámetros orientación en run-up para fuentes locales (Okal y Synolakis, 2004)

Dip: a menor buzamiento más área levantada

Cabeceo: muy influyente ya que cabeceos de desgarre apenas generan desplazamiento vertical.

Dirección: importante en la localización del impacto.

3. Dip: fault dip, δ

$\delta = 10^\circ$ 2.32

$\delta = 20^\circ$ 2.12

$\delta = 30^\circ$ 1.86

$\delta = 45^\circ$ 1.58

$\delta = 60^\circ$ 1.25

$\delta = 90^\circ$ 0.69

4. Slip: fault slip, λ

$\lambda = 30^\circ$ 1.26

$\lambda = 45^\circ$ 1.51

$\lambda = 60^\circ$ 1.72

$\lambda = 90^\circ$ 1.86

5. Strike: fault strike, ϕ

$\phi = 270^\circ$ 1.86

$\phi = 285^\circ$ 1.87

$\phi = 300^\circ$ 1.78

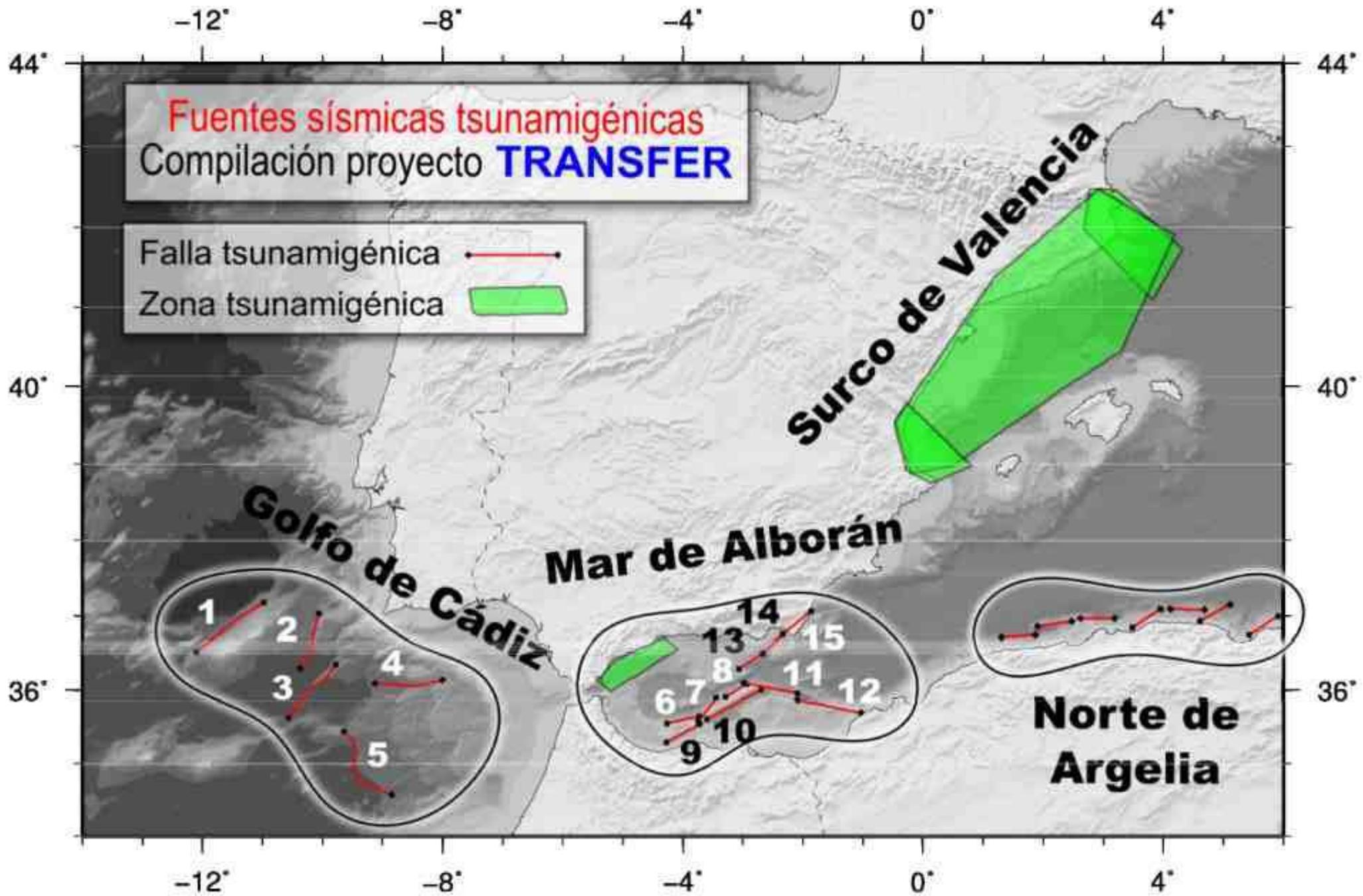
Orientación y dimensiones

Influencia parámetros en run-up para fuentes lejanas (Gica et al., 2007)

Table 10. Summary of Wave Height Change due to Fault Plane Parameter Variations under Same Earthquake Magnitude

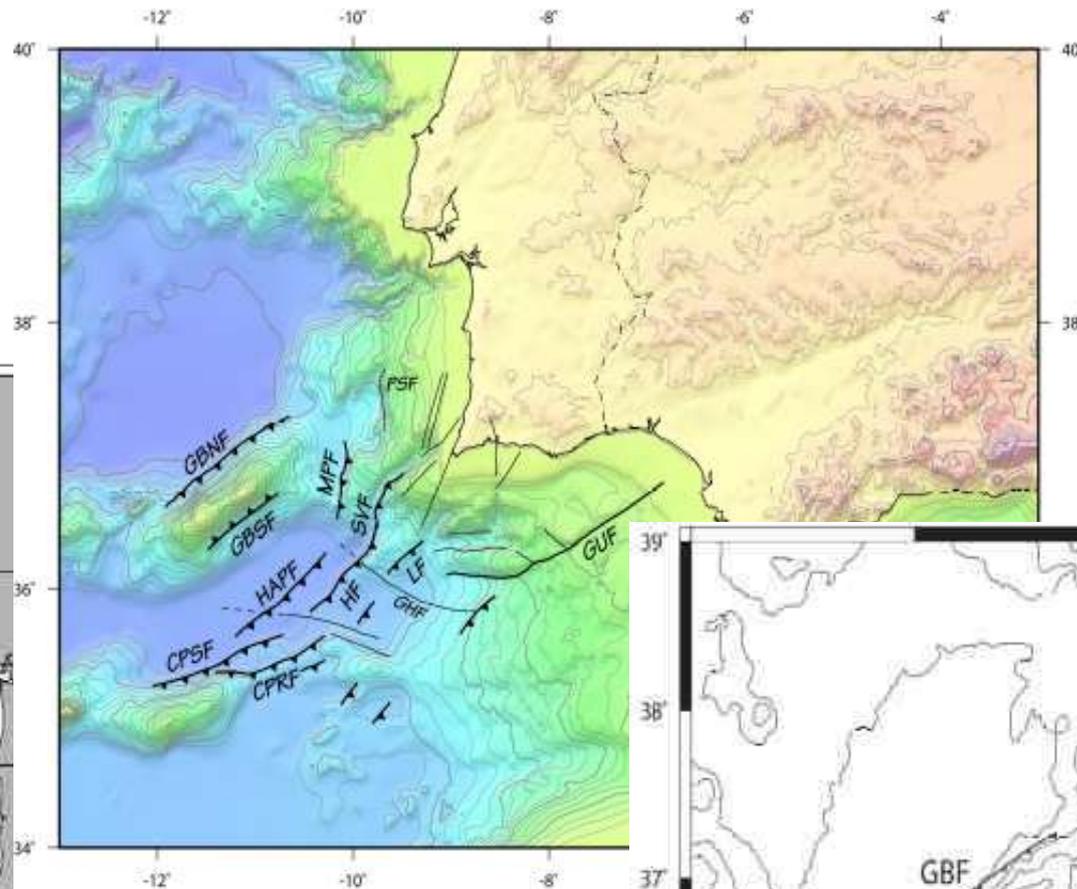
Parameter	Variation	Earthquake location	Maximum wave height ^a (%)
Strike angle	70–110°	Aleutian	8 ^b
		Japan	16 ^b
		Chile	12 ^b
Dip angle	10–20°	Aleutian	19
		Japan	21
		Chile	26
Epicenter location	200 km	Aleutian	24
		Japan	25
		Chile	15
Strike angle	10°	Aleutian	12
		Japan	19
		Chile	84
Focal depth	60 km (33–93 km)	Aleutian	34
		Japan	11
		Chile	10
Fault dimensions	100% increase in length (and 50% increase in width)	Aleutian	46 (22)
		Japan	35 (8)
		Chile	40 (11)
Slip dislocation	24–48 m	Aleutian	22
		Japan	39
		Chile	70

Fuentes sísmicas tsunamigénicas en España



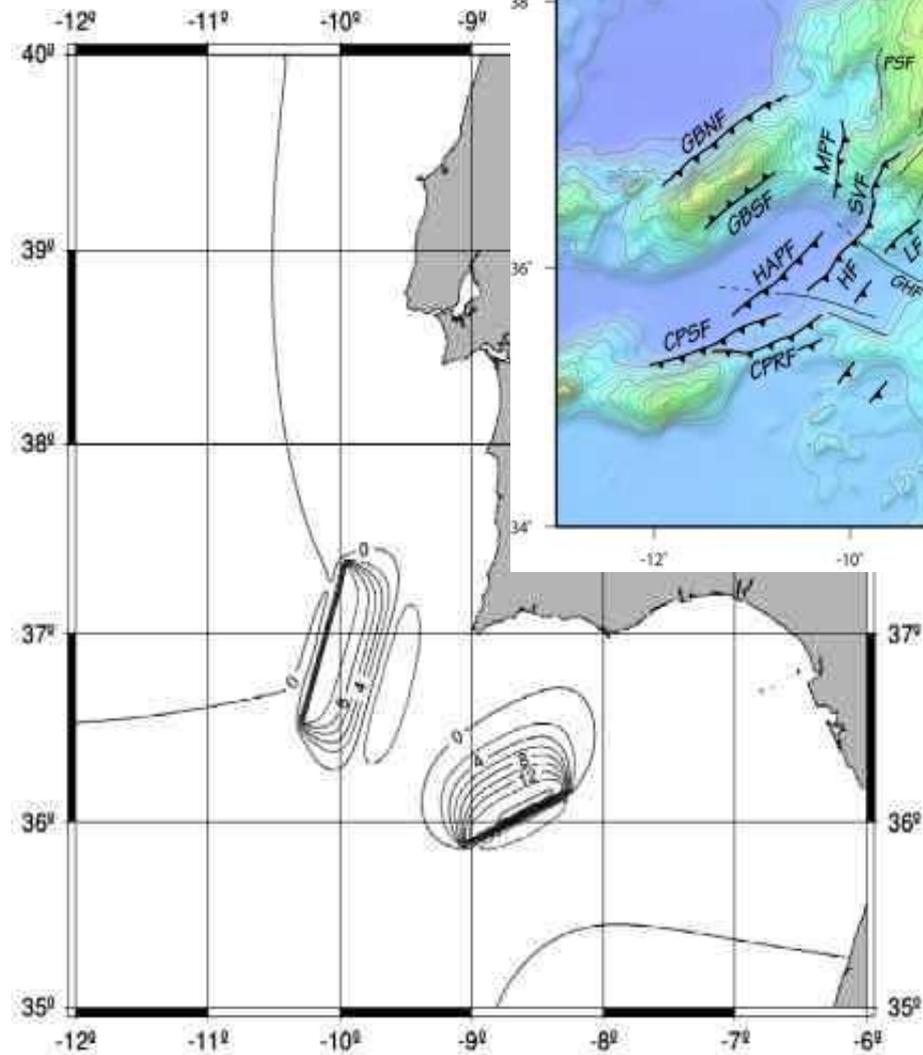
Fuentes sísmicas tsunamigénicas en España

Golfo de Cádiz

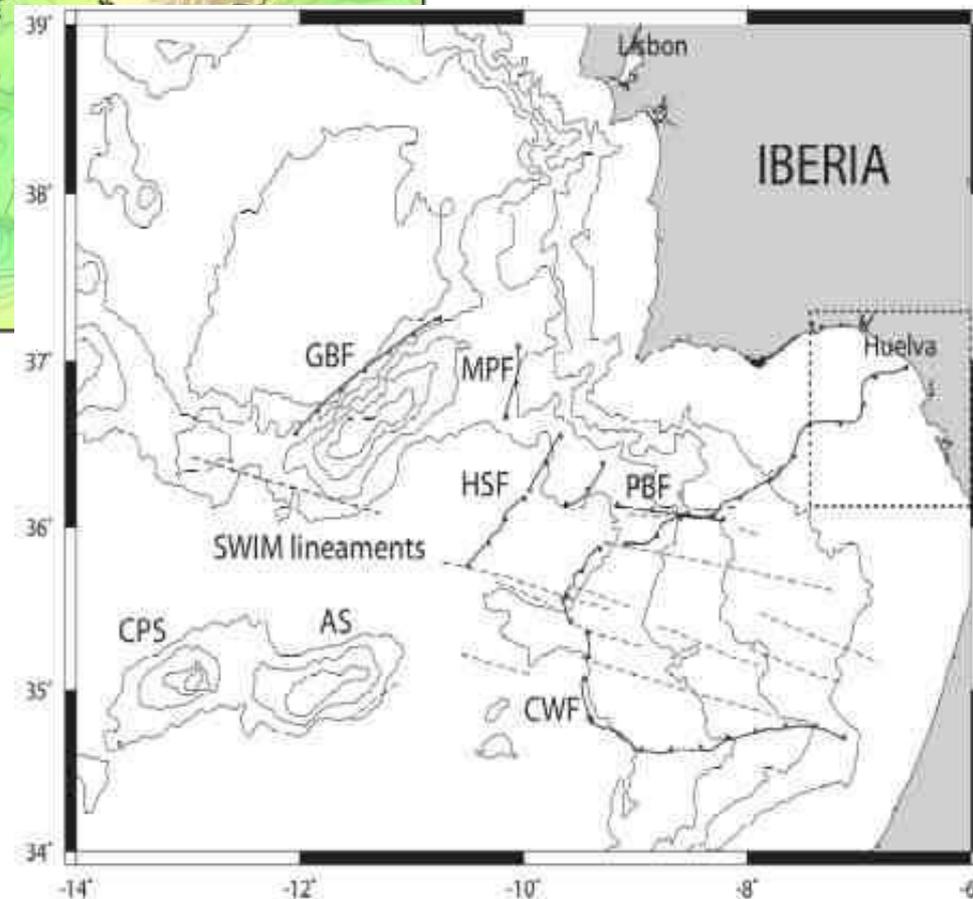


Álvarez-Gómez et al., 2008

Baptista et al., 2003



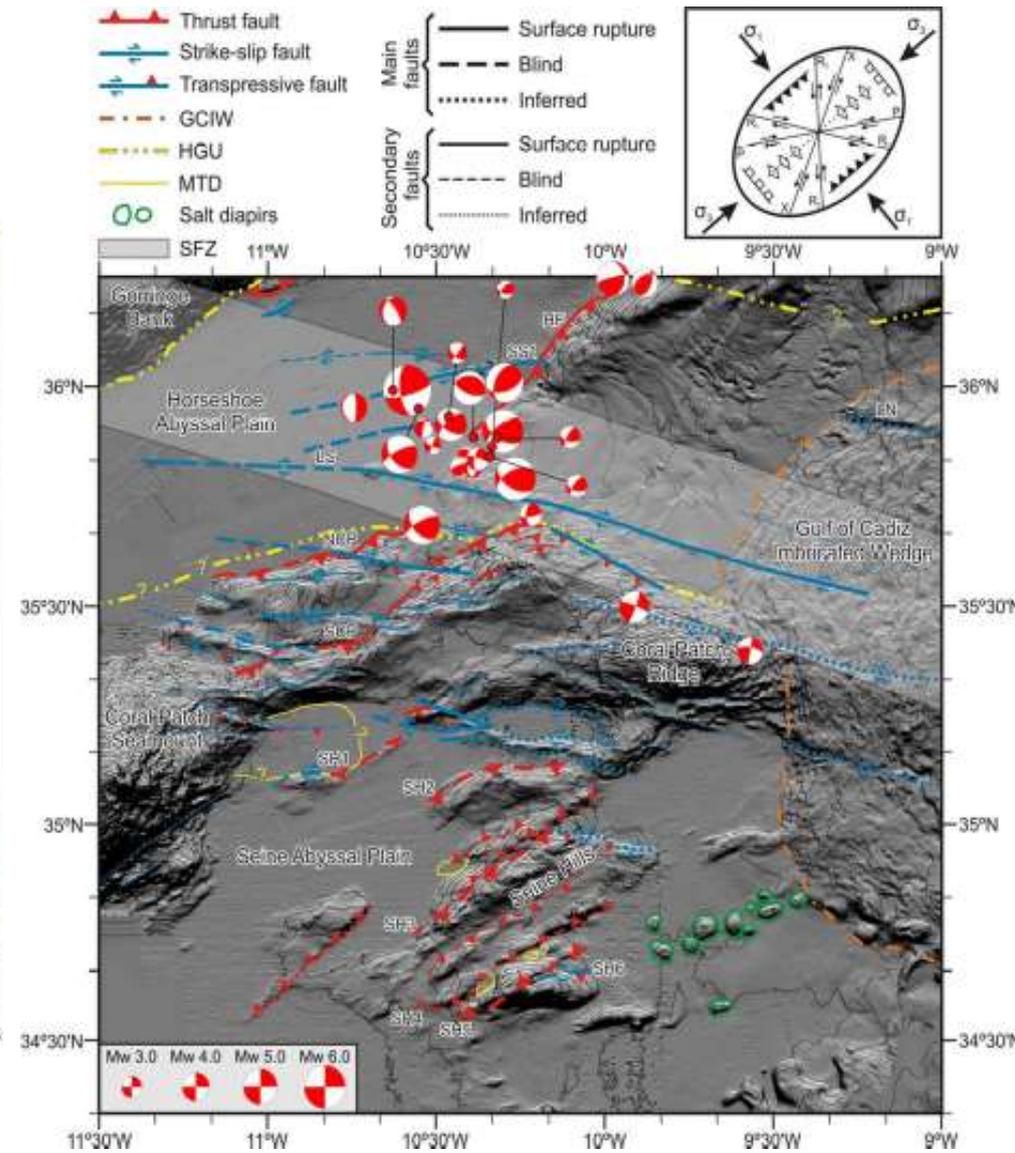
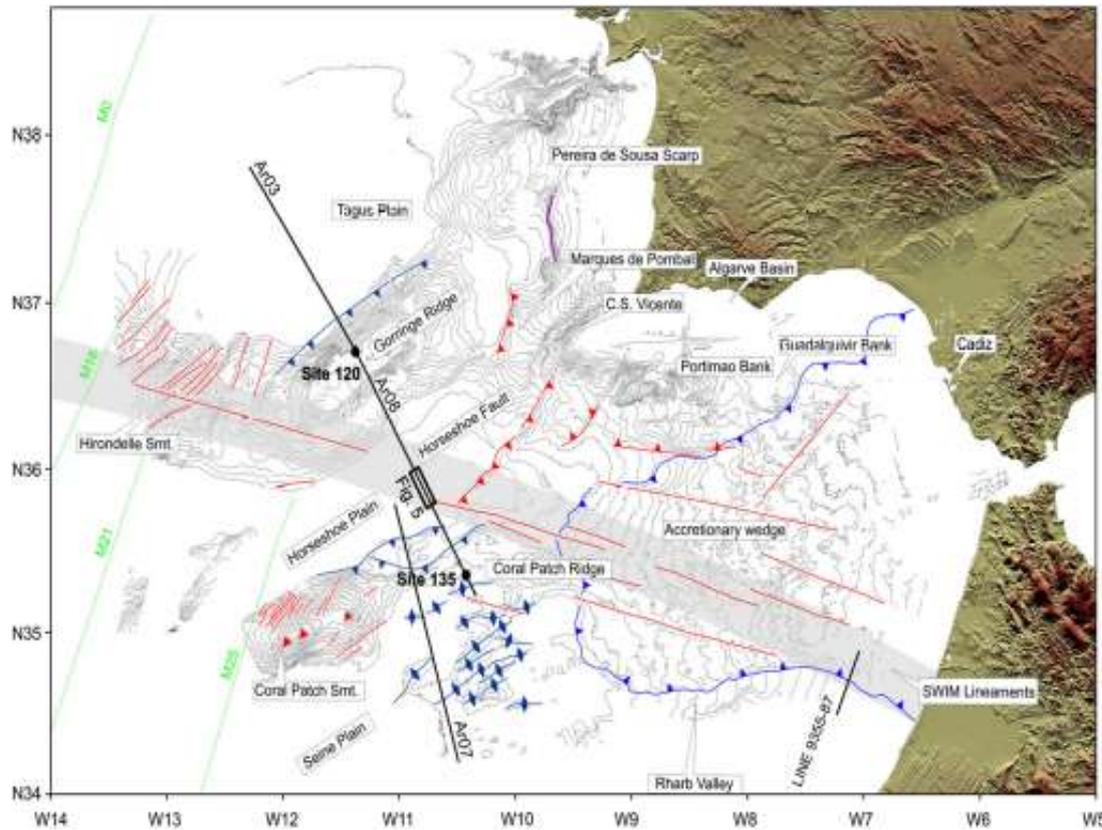
Lima et al., 2010



Fuentes sísmicas tsunamigénicas en España

Golfo de Cádiz

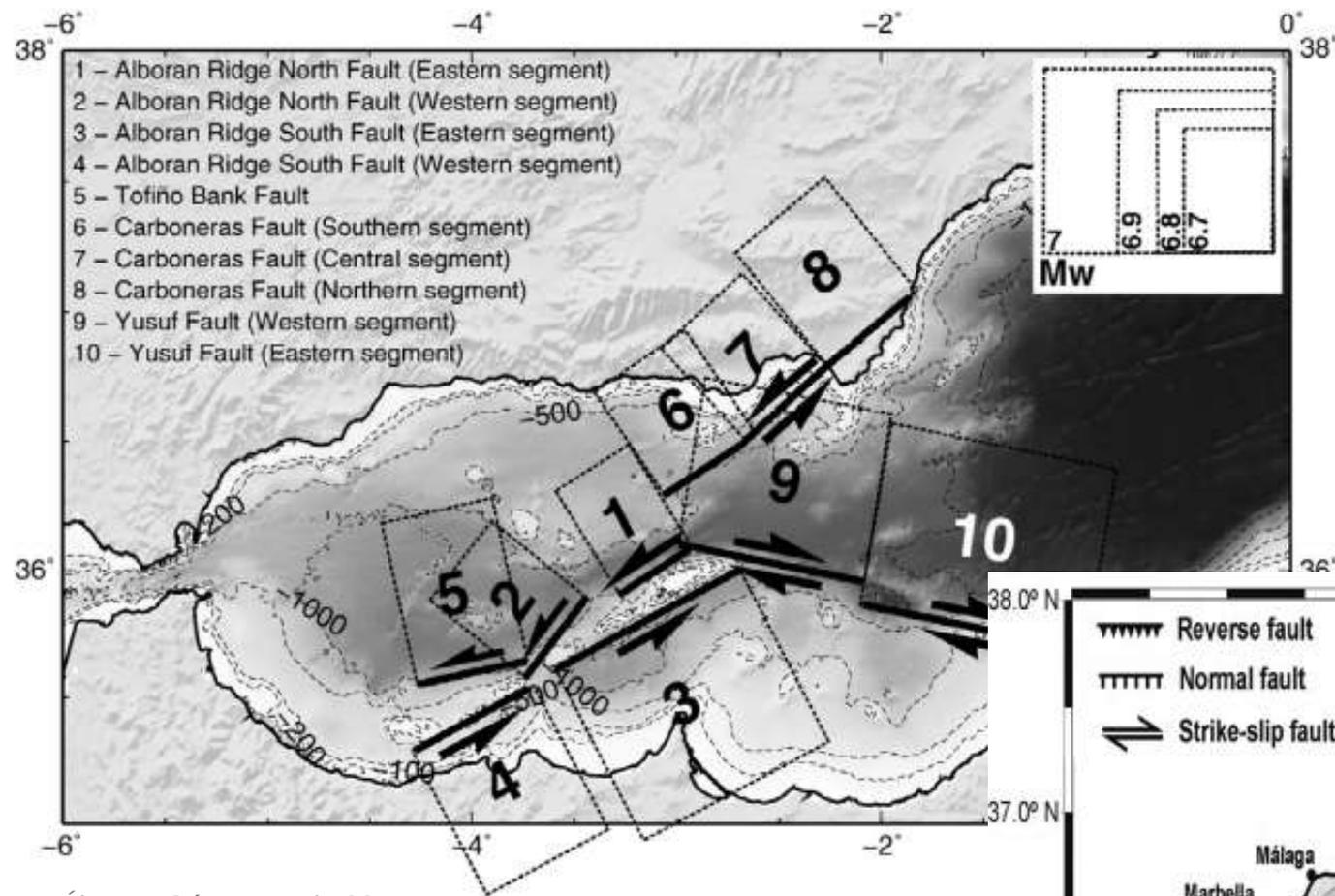
Zitellini et al., 2009



Martínez-Loriente et al., 2013

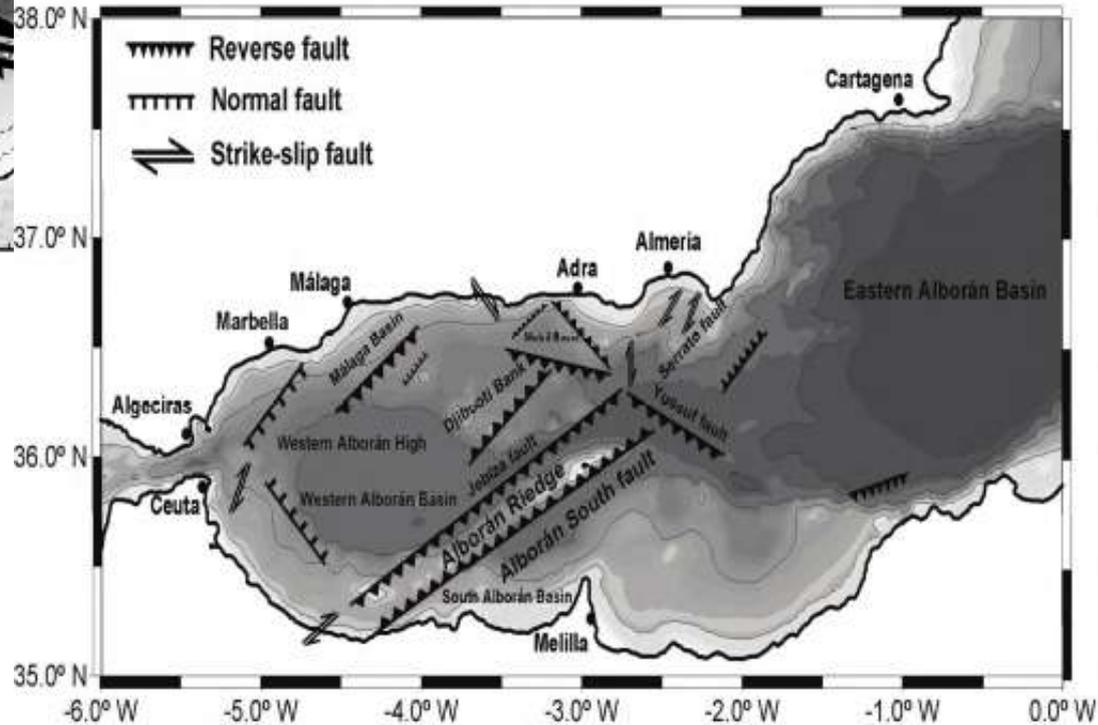
Fuentes sísmicas tsunamigénicas en España

Mediterráneo



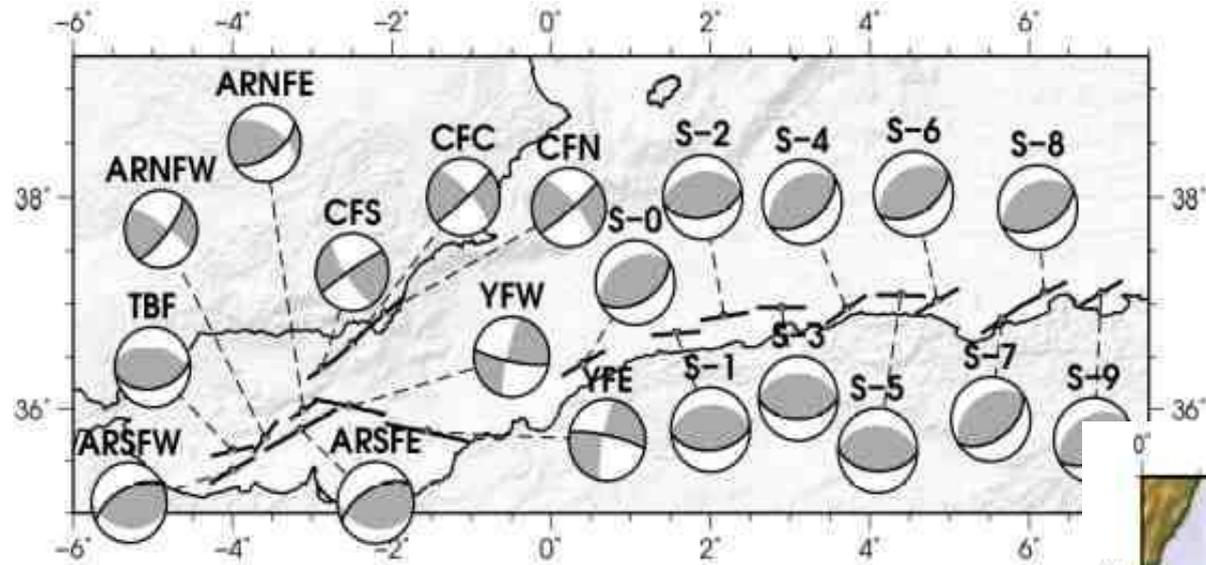
Álvarez-Gómez et al., 2011

González et al., 2010

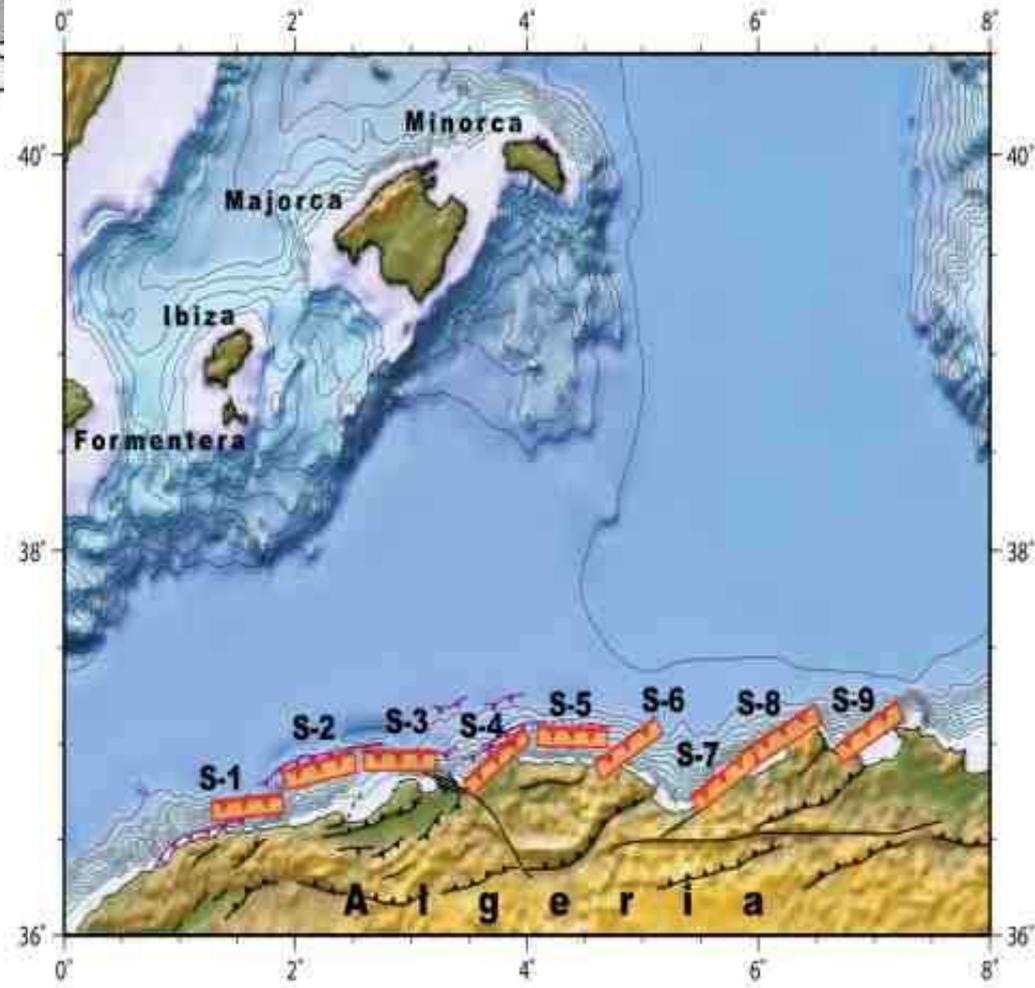


Fuentes sísmicas tsunamigénicas en España

Mediterráneo



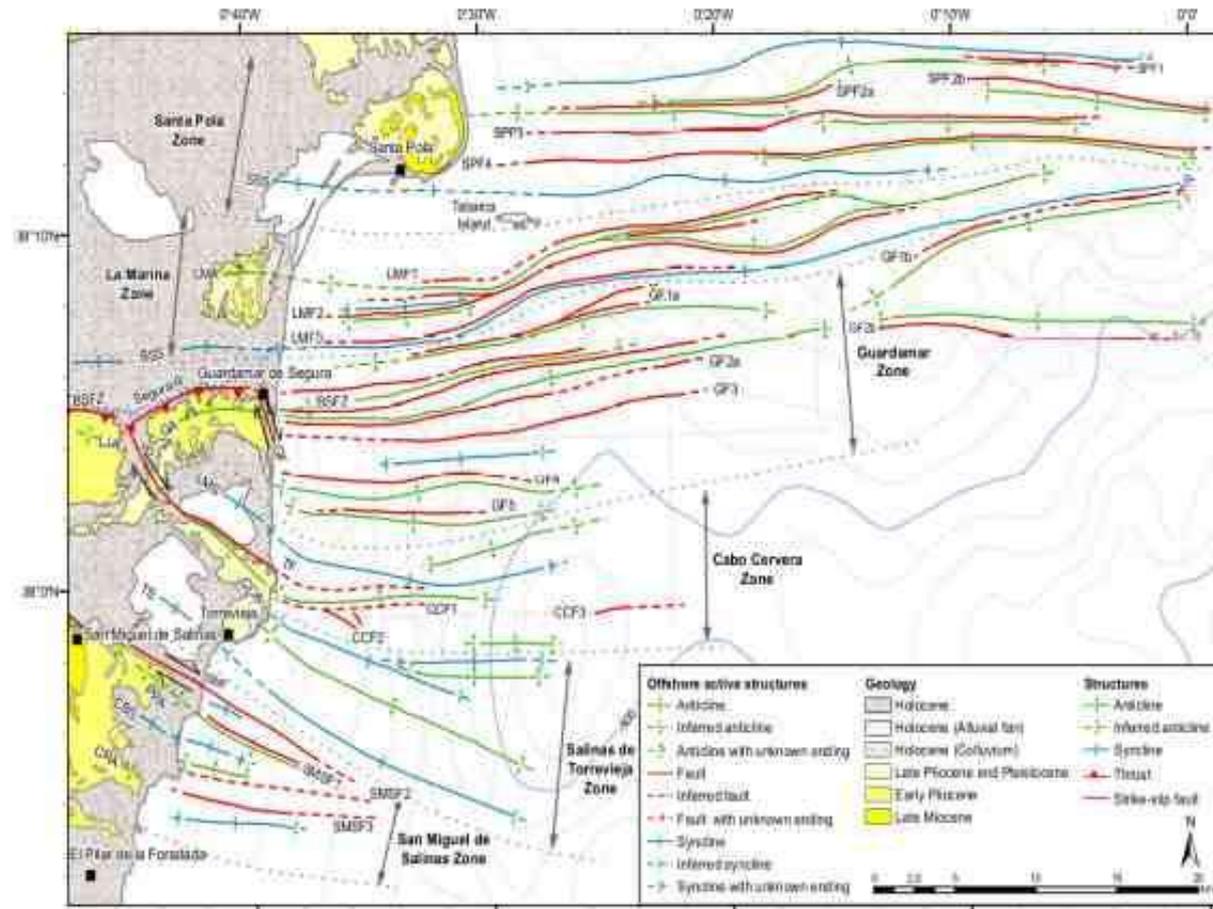
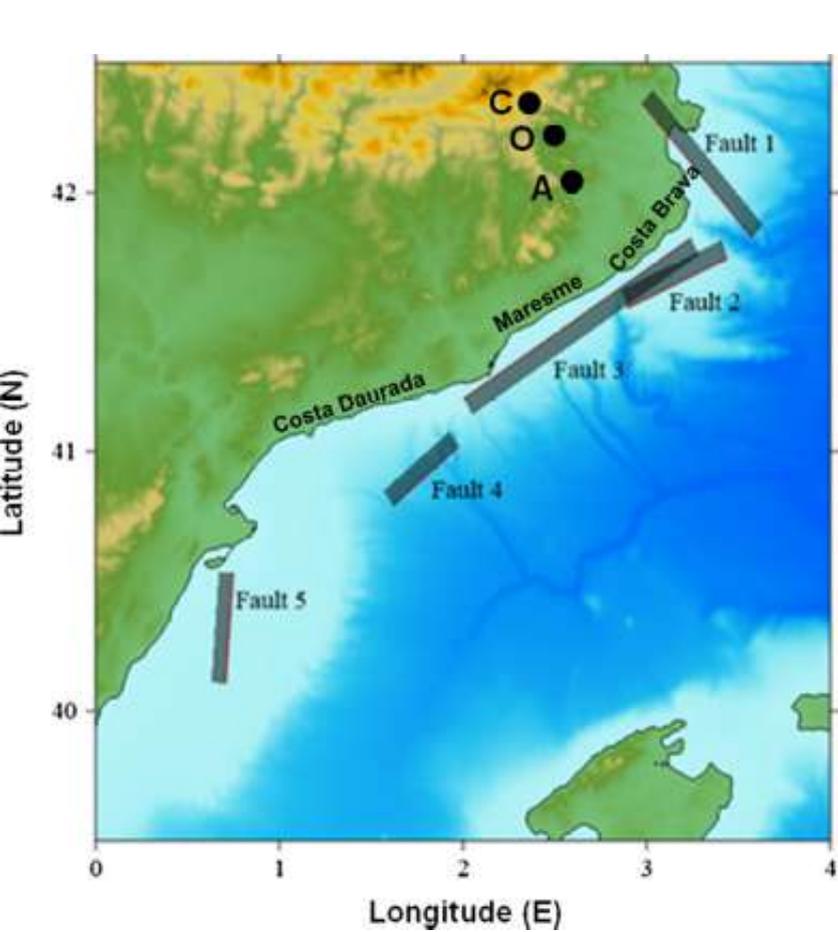
Álvarez-Gómez et al., 2011b



Álvarez-Gómez et al., 2010

Fuentes sísmicas tsunamigénicas en España

Mediterráneo

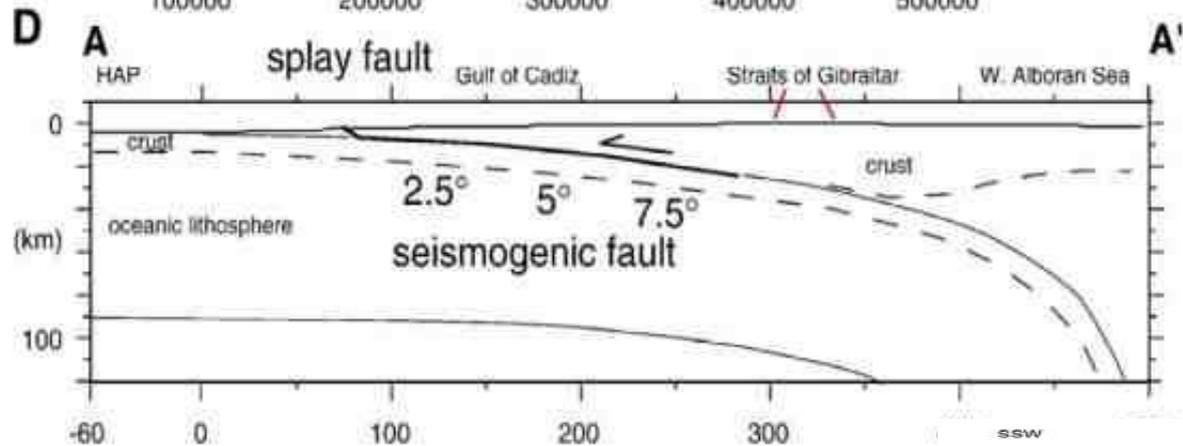
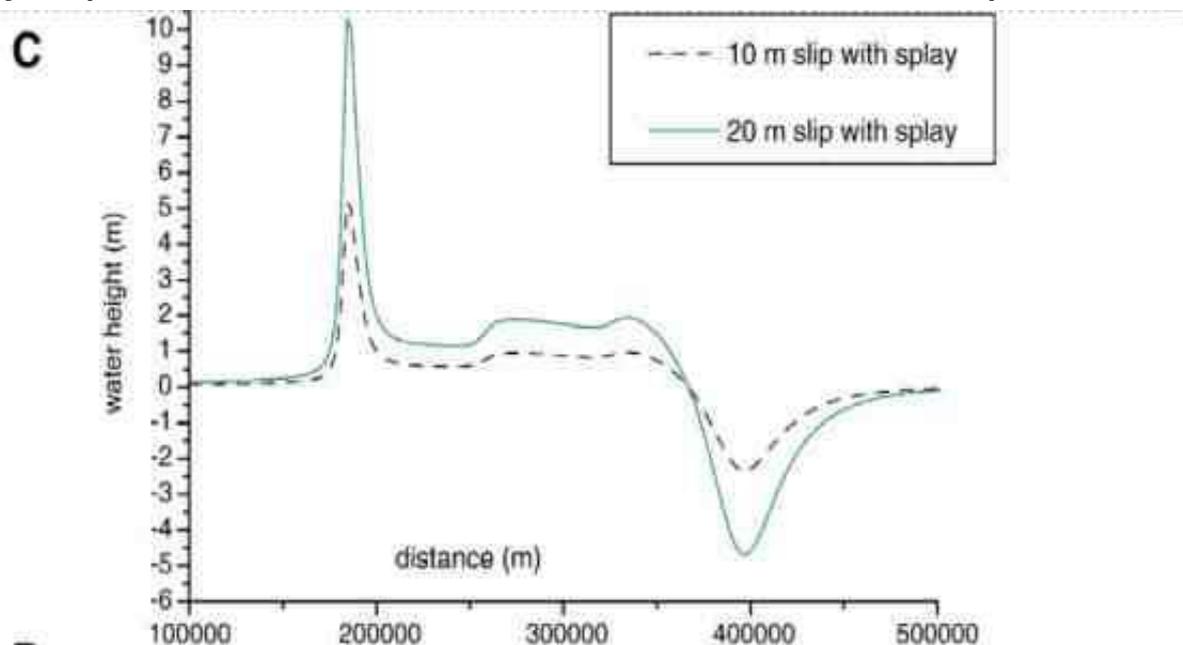


Barranco et al., 2017

Perea et al., 2012

Fuentes sísmicas tsunamigénicas en España

Ejemplo de fuente sobrestimada → La falla del prisma de acreción del Golfo de Cádiz



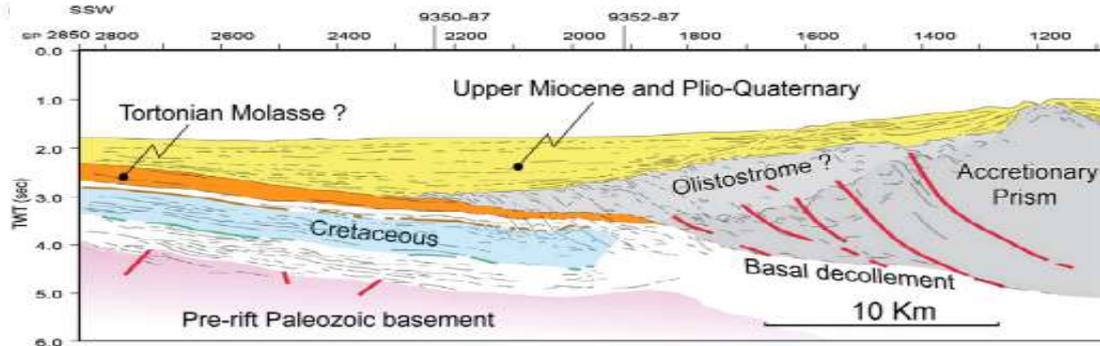
Gutscher et al., 2006

Se propone una fuente de subducción en el Golfo de Cádiz con magnitud máxima Mw 8.8

Ha sido incluida en la mayoría de estudios de amenaza desde entonces.

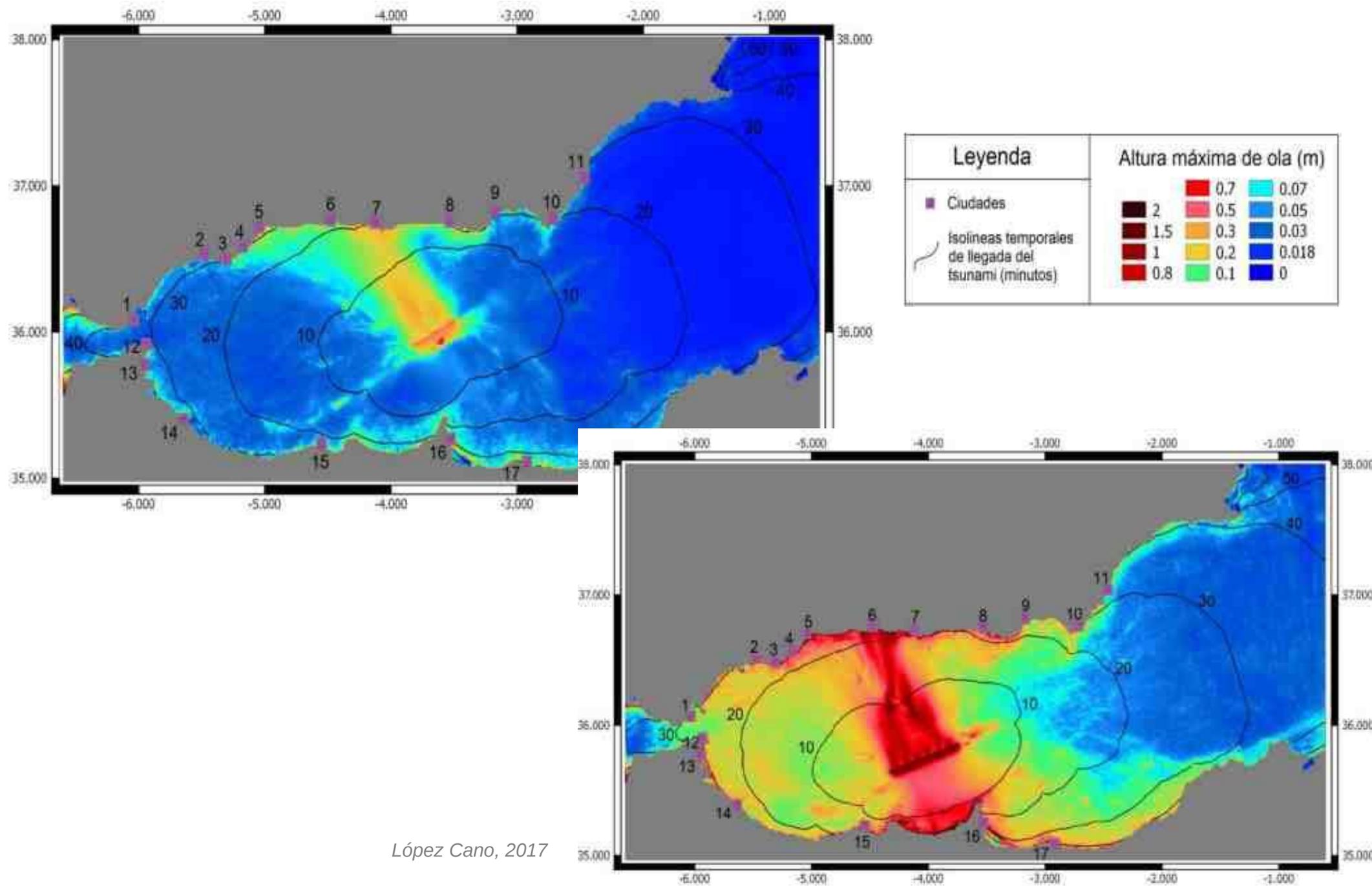
Se ha demostrado que no es activa desde el Plioceno.

Zitellini et al., 2009 modificando a Camurri, 2004



Fuentes sísmicas tsunamigénicas en España

Ejemplo de fuente subestimada → Falla norte de la Cresta de Alborán

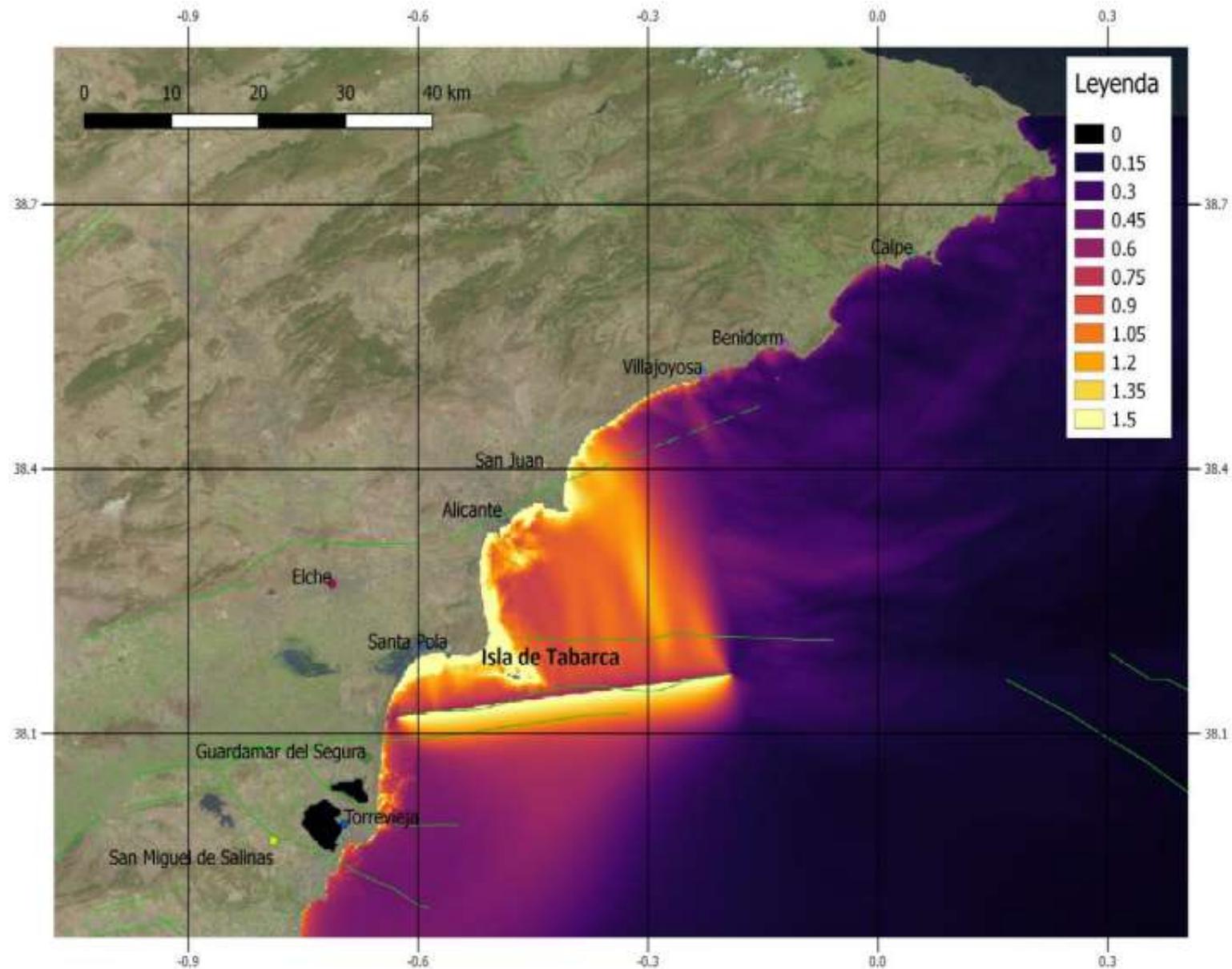


López Cano, 2017

Fuentes sísmicas tsunamigénicas en España

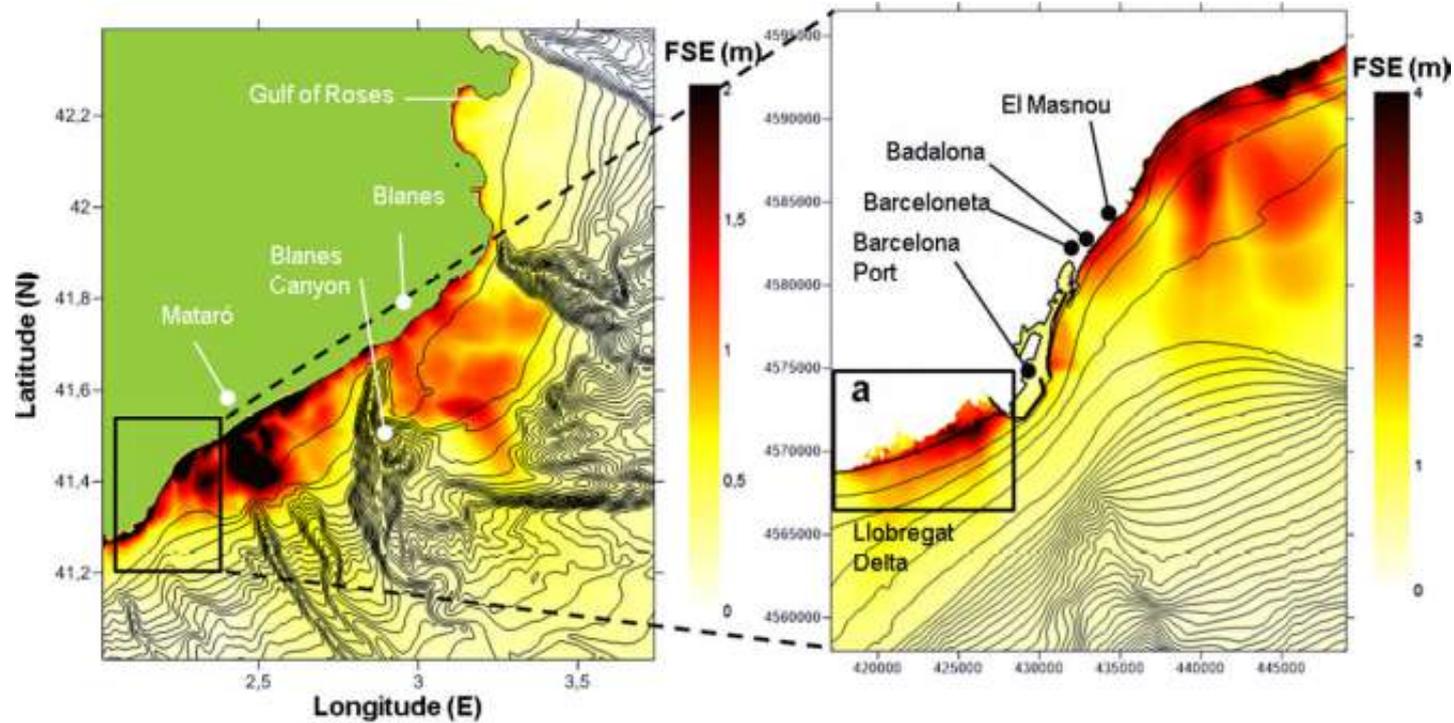
Ejemplo de fuente pequeña con alto impacto local → Fallas del Bajo Segura

Fallas con magnitudes inferiores a Mw 7 tienen alta capacidad para generar daños localmente pero poca influencia a escala regional.



Fuentes sísmicas tsunamigénicas en España

Peor caso vs peor caso creíble vs periodo de retorno
→ Falla Barcelona



Falla normal modelada con una magnitud Mw 7.6 (7.1 según QAFI).

Intervalo de recurrencia desconocido, > 100 000 años?



Fuentes lejanas:

- Los parámetros Dirección, buzamiento y cabeceo, junto con la magnitud del terremoto, son determinantes.
- Sería recomendable incorporar análisis de sensibilidad e incertidumbres incluso en los modelos deterministas.

Fuentes cercanas:

- Los parámetros buzamiento y cabeceo (dirección en menor grado), magnitud del terremoto, y distribución del deslizamiento son determinantes.
- Sería recomendable incorporar modelos estocásticos de distribuciones de deslizamiento variables (Geist, 2005).
- La mayor falla de la zona no tiene por qué ser la responsable del mayor tsunami localmente.
- Habría que incorporar el mayor número de fuentes posibles localmente y/o hacer análisis de desagregación sobre modelos regionales.