

# Un desafío para los Sistemas de Alerta Alerta Temprana de Maremotos: La Simulación en Tiempo Real es Posible

**Jorge Macías**

Departamento de Análisis Matemático  
Universidad de Málaga

**Grupo de Investigación EDANYA**

(Ecuaciones Diferenciales, Análisis Numérico y Aplicaciones)



Jornada Técnica sobre el Riesgo de Maremotos. Madrid, 29-30 Septiembre 2014

# Tiempo 0

12:07    lunes 29 de septiembre de 2014

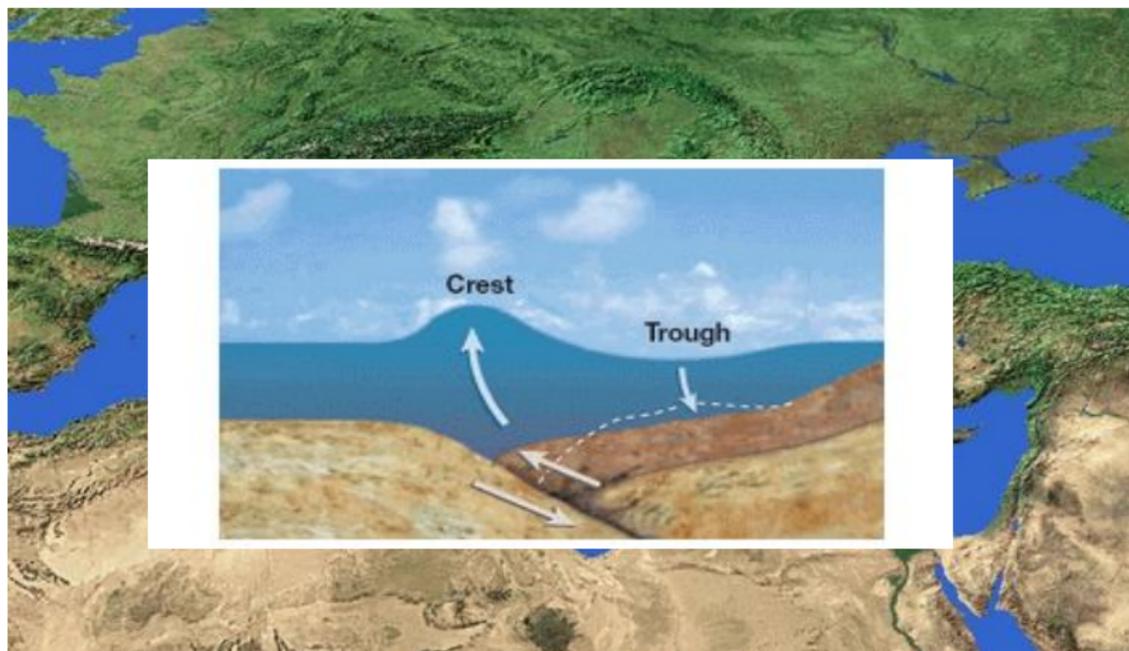
Un terremoto submarino tsunamigénico tiene lugar en algún lugar del Mediterráneo



# Tiempo 0

12:07    lunes 29 de septiembre de 2014

Un terremoto submarino tsunamigénico tiene lugar en algún lugar del Mediterráneo



### Tenemos 20 minutos

- para esta presentación
- para que nuestro SAT para el Mediterráneo emita un mensaje de alerta

### Tenemos 20 minutos

- para esta presentación
- para que nuestro SAT para el Mediterráneo emita un mensaje de alerta

### Durante los 3 primeros minutos

- Presentación  $\implies$  Introducción
- SAT  $\implies$  A la espera...

### Tenemos 20 minutos

- para esta presentación
- para que nuestro SAT para el Mediterráneo emita un mensaje de alerta

### Durante los 3 primeros minutos

- Presentación  $\implies$  Introducción
- SAT  $\implies$  A la espera...

### La pregunta es ...

**¿Es posible en 20 min?**

### Tenemos 20 minutos

- para esta presentación
- para que nuestro SAT para el Mediterráneo emita un mensaje de alerta

### Durante los 3 primeros minutos

- Presentación  $\implies$  Introducción
- SAT  $\implies$  A la espera...

### La pregunta es ...

**¿Es posible en 20 min?**

### La respuesta es afirmativa si...

- 1 Usamos una Matriz de Decisión (MD)
- 2 Hacemos uso de bases de datos escenarios precalculados

¿Es posible en 20 min?

Pero lo que proponemos

- Hacer cálculos en tiempo real (FTRT, Faster Than Real Time)
- Cambiar metodología: **Calculadas** vs **Precalculadas**

¿Es posible en 20 min?

Pero lo que proponemos

- Hacer cálculos en tiempo real (FTRT, Faster Than Real Time)
- Cambiar metodología: **Calculadas** vs **Precalculadas**

Por tanto, nos planteamos si ...

¿La Simulación en Tiempo Real es Posible?

¿Es posible en 20 min?

Pero lo que proponemos

- Hacer cálculos en tiempo real (FTRT, Faster Than Real Time)
- Cambiar metodología: **Calculadas** vs **Precalculadas**

Por tanto, nos planteamos si ...

¿La Simulación en Tiempo Real es Posible?

Para responder a esta pregunta...

¿Cuánto de rápido podemos calcular?

¿Es posible en 20 min?

Pero lo que proponemos

- Hacer cálculos en tiempo real (FTRT, Faster Than Real Time)
- Cambiar metodología: **Calculadas** vs **Precalculadas**

Por tanto, nos planteamos si ...

¿La Simulación en Tiempo Real es Posible?

Para responder a esta pregunta...

¿Cuánto de rápido podemos calcular?

Nuestro **Desafío** Inicial

¿Por debajo de los 5 min para todo el Mediterráneo?

**Proyecto conjunto****Grupo EDANYA** (Univ of Málaga) / **INGV** (Italia)

**Proyecto conjunto**

**Grupo EDANYA** (Univ of Málaga) / **INGV** (Italia)

**Objetivo Final**

**Implementar el SAT de Maremos de Italia**

### Proyecto conjunto

**Grupo EDANYA** (Univ of Málaga) / **INGV** (Italia)

### Objetivo Final

**Implementar el SAT de Maremos de Italia**

### Una realidad

**Fase preoperacional:** a partir del 1 de Octubre 2014

**SAT<sup>2</sup>-TEWS**

Tres fases:

- 1 **Detección**  $\implies$  **Localización y Magnitud de la Fuente**
- 2 Mensaje de Alerta (Matriz de Decisión / BD Precalculadas o ... )
- 3 Protección Civil / Medidas de Mitigación

**SAT<sup>2</sup>-TEWS**

Tres fases:

- 1 **Detección**  $\implies$  **Localización y Magnitud de la Fuente**
- 2 Mensaje de Alerta (Matriz de Decisión / BD Precalculadas o ... )
- 3 Protección Civil / Medidas de Mitigación

**Centro di Allerta Tsunami (CAT)**

**SAT<sup>2</sup>-TEWS**

Tres fases:

- 1 **Detección**  $\implies$  **Localización y Magnitud de la Fuente**
- 2 Mensaje de Alerta (Matriz de Decisión / BD Precalculadas o ... )
- 3 Protección Civil / Medidas de Mitigación

**Centro di Allerta Tsunami (CAT)**

**Italian National Tsunami Warning Center (It-NTWC)**

**SAT<sup>2</sup>-TEWS**

Tres fases:

- 1 **Detección**  $\implies$  **Localización y Magnitud de la Fuente**
- 2 Mensaje de Alerta (Matriz de Decisión / BD Precalculadas o ... )
- 3 Protección Civil / Medidas de Mitigación

**Centro di Allerta Tsunami (CAT)**

**Italian National Tsunami Warning Center (It-NTWC)**

**Candidate Tsunami Watch Provider (cTWP) for the NEAMTWS**

## Minuto 3

## CAT

## Detección

12:10      lunes 29 de septiembre de 2014

CAT (24/7 sala de monitorización sísmica del INGV en Roma). **Detección.**



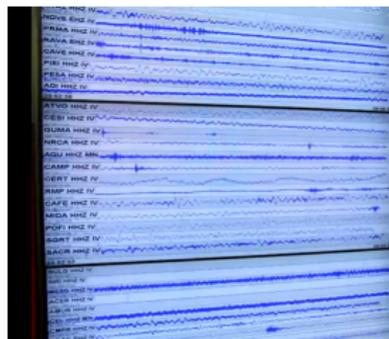
## Minuto 3

## CAT

## Detección

12:10      lunes 29 de septiembre de 2014

CAT (24/7 sala de monitorización sísmica del INGV en Roma). **Detección.**



Determinación de:  
**1. Localización**  
**2. Magnitud**



## SAT<sup>2</sup> - TEWS

Tres fases:

- 1 **Detección**  $\implies$  **Localización y Magnitud de la fuente**
- 2 Mensaje de Alerta (Matriz de Decisión / BD Precalculadas o ... )
- 3 Protección Civil / Medidas de Mitigación

12:12      lunes 29 de septiembre de 2014

- **Localización:** (22.2, 35.8)  $\pm$  0.5
- **Magnitud:** Mw 7.4  $\pm$  1

## Minuto 5

## CAT

## 1ª Estimación

12:12      lunes 29 de septiembre de 2014

- **Localización:**  $(22.2, 35.8) \pm 0.5$
- **Magnitude:**  $M_w 7.4 \pm 1$



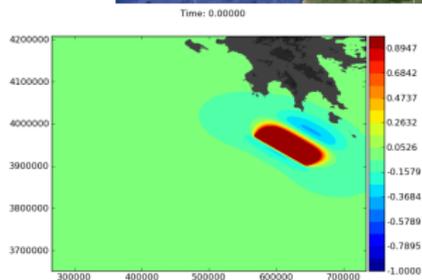
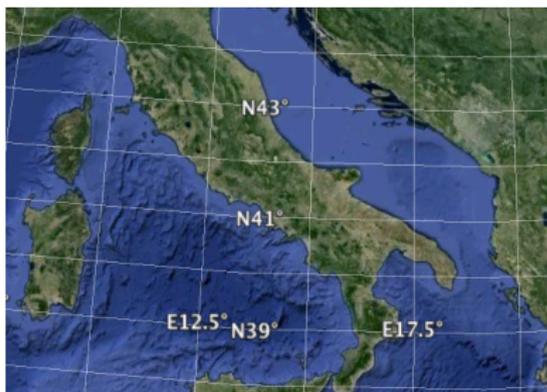
## Minuto 5

## CAT

## 1ª Estimación

12:12      lunes 29 de septiembre de 2014

- **Localización:**  $(22.2, 35.8) \pm 0.5$
- **Magnitude:**  $M_w 7.4 \pm 1$



12:17      lunes 29 de septiembre de 2014

Primera estimación **fiable** de la localización y magnitud del maremoto

12:17      lunes 29 de septiembre de 2014

Primera estimación **fiable** de la localización y magnitud del maremoto

- **Localización:** (22.3, 35.7)    -    **Profundidad:** 16.33 km
- **Magnitud:** Mw 8

12:17      lunes 29 de septiembre de 2014

Primera estimación **fiable** de la localización y magnitud del maremoto

- **Localización:** (22.3, 35.7)    -    **Profundidad:** 16.33 km
- **Magnitud:** Mw 8

**Acaba la Fase de Detección**

12:17      lunes 29 de septiembre de 2014

Primera estimación **fiable** de la localización y magnitud del maremoto

- **Localización:** (22.3, 35.7)    -    **Profundidad:** 16.33 km
- **Magnitud:** Mw 8

**Acaba la Fase de Detección**

**Comienza la Fase de Predicción**

**12:17** Comienza la **Fase de Predicción**  $\implies$  Definición de Mensajes de Alerta

**Estado del Arte:**

- **Matriz de Decisión**
- **Bases de Datos de soluciones precalculadas**

## Minutos 10-14

## Matriz de Decisión

## Emisión de Alerta

12:17      lunes 29 de septiembre de 2014

- Determinación de los Mensajes de Alerta

Decision Matrix for the Mediterranean

Depth	Epicenter Location	Mw	Tsunami Potential	Type of Bulletin		
< 100 km	Offshore or close to the coast ( $\leq$ 40 km inland)	5.5 to 6.0	weak potential of local tsunami	Local Tsunami Advisory	Information Bulletin	Information Bulletin
		6.0 to 6.5	Potential of destructive local tsunami < 100 km	Local Tsunami Watch	Regional Tsunami Advisory	Information Bulletin
	Offshore or close to the coast ( $\leq$ 100 km inland)	6.5 to 7.0	Potential of destructive regional tsunami < 400 km	Local Tsunami Watch	Regional Tsunami Watch	Basin-wide Tsunami Advisory
		> 7.0	Potential of destructive tsunami in the whole basin > 400 km	Local Tsunami Watch	Regional Tsunami Watch	Basin-wide Tsunami Watch
> 100 km	Offshore or inland ( $\leq$ 100 km)	> 5.5	Nil	Information Bulletin	Information Bulletin	Information Bulletin
<i>No message if the earthquake is localized inland beyond 100 km distance</i>						

## Minutos 10-14

## Matriz de Decisión

## Emisión de Alerta

12:17 lunes 29 de septiembre de 2014

- Determinación de los Mensajes de Alerta

Decision Matrix for the Mediterranean

Depth	Epicenter Location	Mw	Tsunami Potential	Type of Bulletin		
< 100 km	Offshore or close to the coast ( $\leq 40$ km inland)	5.5 to 6.0	weak potential of local tsunami	Local Tsunami Advisory	Information Bulletin	Information Bulletin
		6.0 to 6.5	Potential of destructive local tsunami < 100 km	Local Tsunami Watch	Regional Tsunami Advisory	Information Bulletin
	Offshore or close to the coast ( $\leq 100$ km inland)	6.5 to 7.0	Potential of destructive regional tsunami < 400 km	Local Tsunami Watch	Regional Tsunami Watch	Basin-wide Tsunami Advisory
		> 7.0	Potential of destructive tsunami in the whole basin > 400 km	Local Tsunami Watch	Regional Tsunami Watch	Basin-wide Tsunami Watch
> 100 km	Offshore or inland ( $\leq 100$ km)	> 5.5	Nil	Information Bulletin	Information Bulletin	Information Bulletin
<i>No message if the earthquake is localized inland beyond 100 km distance</i>						

12:21 lunes 29 de septiembre de 2014

- Difusión de los Mensajes de Alerta

## Minuto 14

## Matriz de Decisión

## Emisión de Alerta

12:21      lunes 29 de septiembre de 2014

- Difusión de los Mensajes de Alerta

MD proporciona mensaje de alerta:

- Niveles de alerta
- Tiempos de llegada

## Minuto 14

## Matriz de Decisión

## Emisión de Alerta

12:21      lunes 29 de septiembre de 2014

- Difusión de los Mensajes de Alerta

MD proporciona mensaje de alerta:

- Niveles de alerta
- Tiempos de llegada

Por tanto a los **14 minutos** (estimación CAT)

El **SAT<sup>2</sup>** basado en **MD** ha dado su respuesta (grosera/conservadora)

## Minuto 14

## Matriz de Decisión

## Comentarios

En 14 minutos - El SAT<sup>2</sup> basado en MD ha dado su respuesta

La utilización de una MD permite una rápida implementación de un SAT pero no considera mecanismos de vital importancia para la adecuada descripción del riesgo tsunamigénico

## Minuto 14

## Matriz de Decisión

## Comentarios

En 14 minutos - El SAT<sup>2</sup> basado en MD ha dado su respuesta

La utilización de una MD permite una rápida implementación de un SAT pero no considera mecanismos de vital importancia para la adecuada descripción del riesgo tsunamigénico

Por ejemplo:

- El Mecanismo focal del terremoto
- Anisotropía en la propagación del tsunami y la morfología de la costa.
- Respuesta grosera y conservadora

## Minuto 14

## Matriz de Decisión

## Comentarios

En 14 minutos - El SAT<sup>2</sup> basado en MD ha dado su respuesta

La utilización de una MD permite una rápida implementación de un SAT pero no considera mecanismos de vital importancia para la adecuada descripción del riesgo tsunamigénico

Por ejemplo:

- El Mecanismo focal del terremoto
- Anisotropía en la propagación del tsunami y la morfología de la costa.
- Respuesta grosera y conservadora

Podemos...

1

2

## Minuto 14

## Matriz de Decisión

## Comentarios

**En 14 minutos - El SAT<sup>2</sup> basado en MD ha dado su respuesta**

La utilización de una MD permite una rápida implementación de un SAT pero no considera mecanismos de vital importancia para la adecuada descripción del riesgo tsunamigénico

Por ejemplo:

- El Mecanismo focal del terremoto
- Anisotropía en la propagación del tsunami y la morfología de la costa.
- Respuesta grosera y conservadora

Podemos...

- 1 Utilizar Bases de Datos de Escenarios Precalculados
- 2

## Minuto 14

## Matriz de Decisión

## Comentarios

**En 14 minutos - El SAT<sup>2</sup> basado en MD ha dado su respuesta**

La utilización de una MD permite una rápida implementación de un SAT pero no considera mecanismos de vital importancia para la adecuada descripción del riesgo tsunamigénico

Por ejemplo:

- El Mecanismo focal del terremoto
- Anisotropía en la propagación del tsunami y la morfología de la costa.
- Respuesta grosera y conservadora

Podemos...

- 1 Utilizar Bases de Datos de Escenarios Precalculados
- 2 **Posibilidad de simular el escenario real 'al vuelo' mediante modelos suficientemente rápidos (FTRT / GPU)**

12:17 Teníamos

Primera estimación **fiable** de la localización y magnitud del maremoto

BD Precalculada proporciona mensaje de alerta:

- Estimación inicial de riesgo (peor escenario posible)
- Más precisa, aún conservadora
- Tiempos de llegada, onda máxima, estimación inundación

12:17 Teníamos

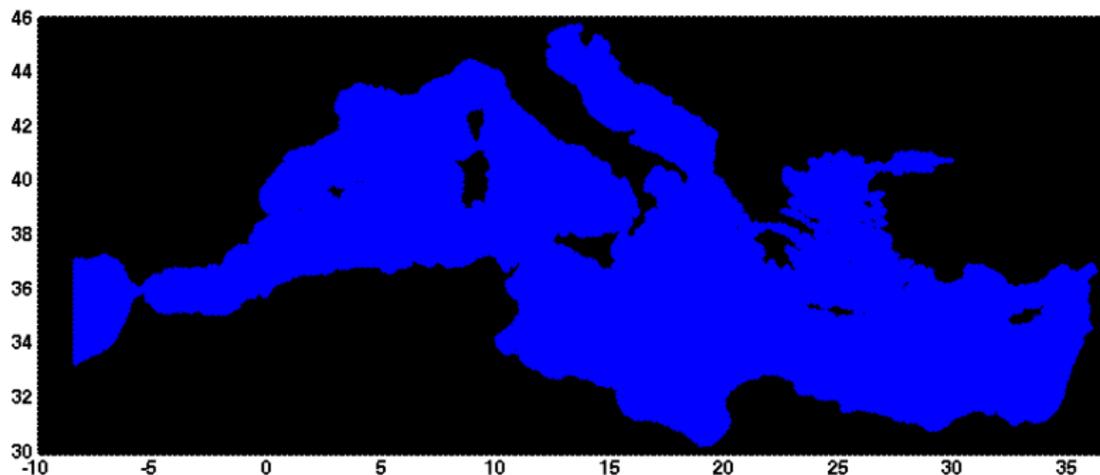
Primera estimación **fiable** de la localización y magnitud del maremoto

BD Precalculada proporciona mensaje de alerta:

- Estimación inicial de riesgo (peor escenario posible)
- Más precisa, aún conservadora
- Tiempos de llegada, onda máxima, estimación inundación

Pero ¿cómo se generan estas bases de datos?

- No es estándar (NOAA, INGV, ...)
- “Deformaciones elementales”  $\implies$  “Soluciones elementales”
- Simulación - Modelo Numérico (**HySEA**)
- Enorme número de simulaciones (52.599)

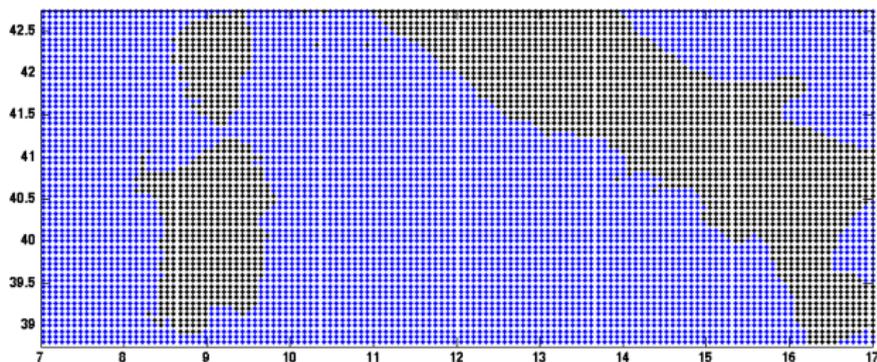
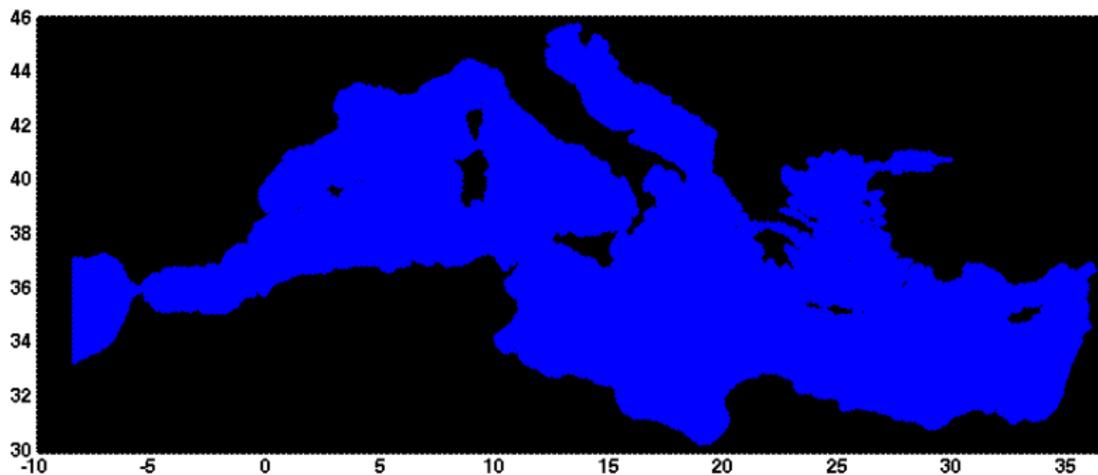


- 52.599 deformaciones elementales (para  $h$  y  $\sigma$  fijados)
- 3 meses de simulación (final de año)
- La base de datos se ampliará (variando  $h$  y  $\sigma$ )
- # Simulaciones =  $52.599 \cdot N$ , Tiempo necesario  $3 \cdot N$  meses

## Minutos 10-14

## BD Precalculadas

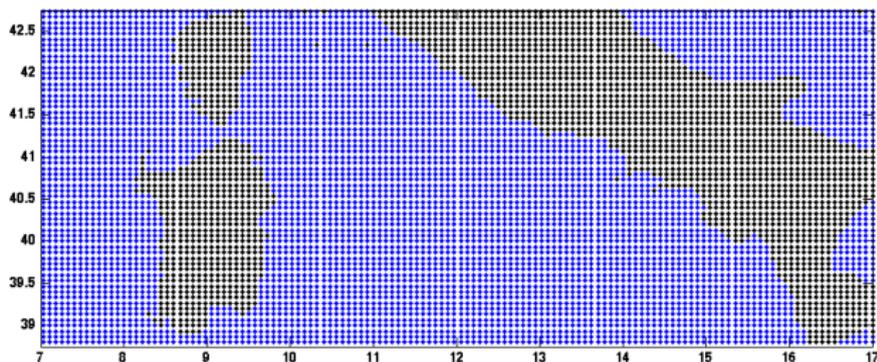
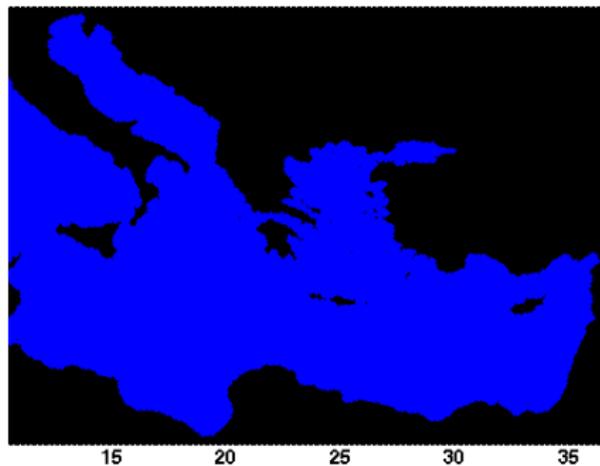
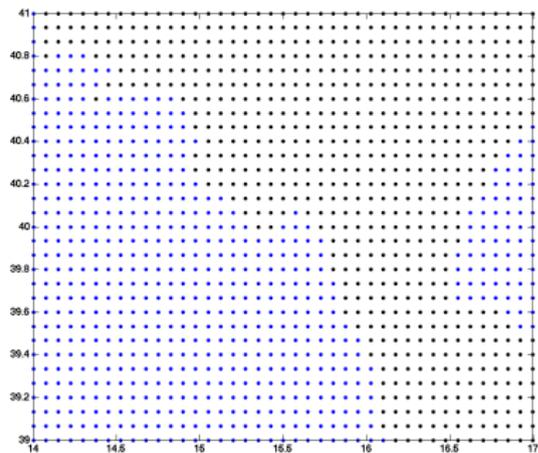
## Generación de la BD



## Minutos 10-14

## BD Precalculadas

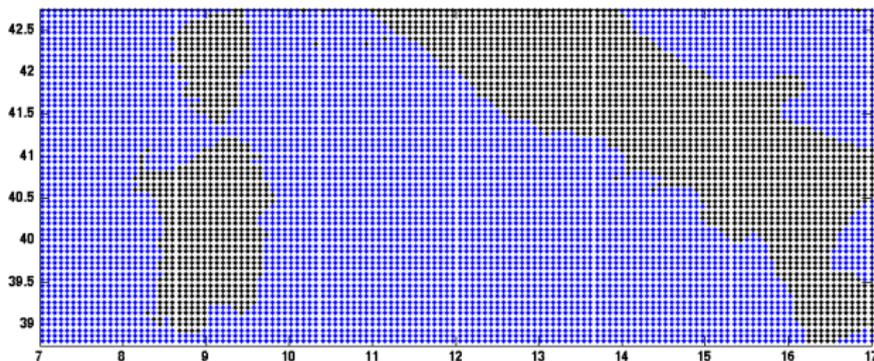
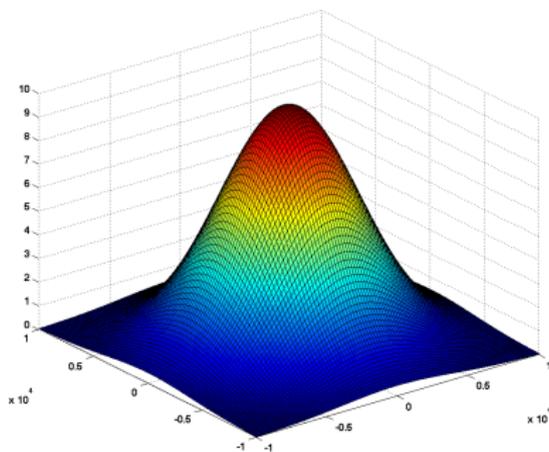
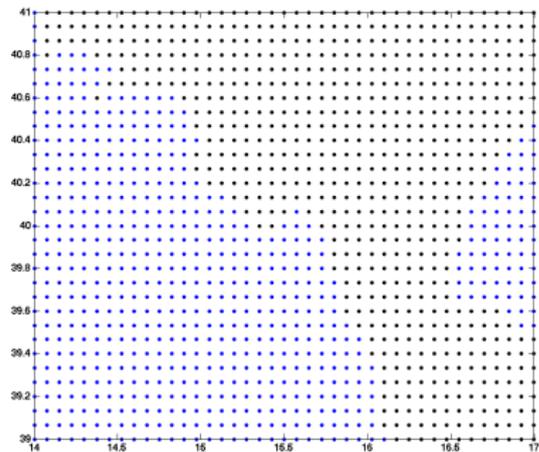
## Generación de la BD

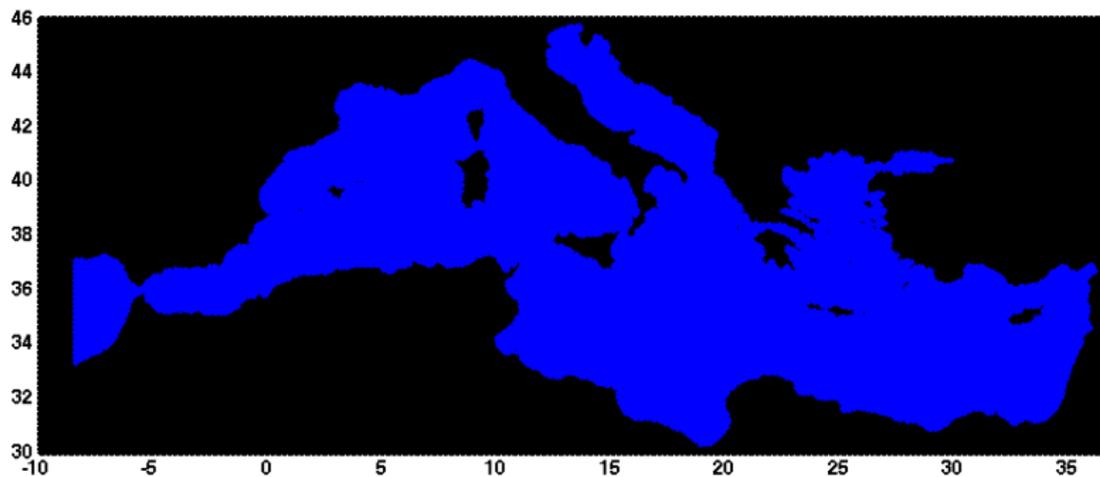


## Minutos 10-14

## BD Precalculadas

## Generación de la BD

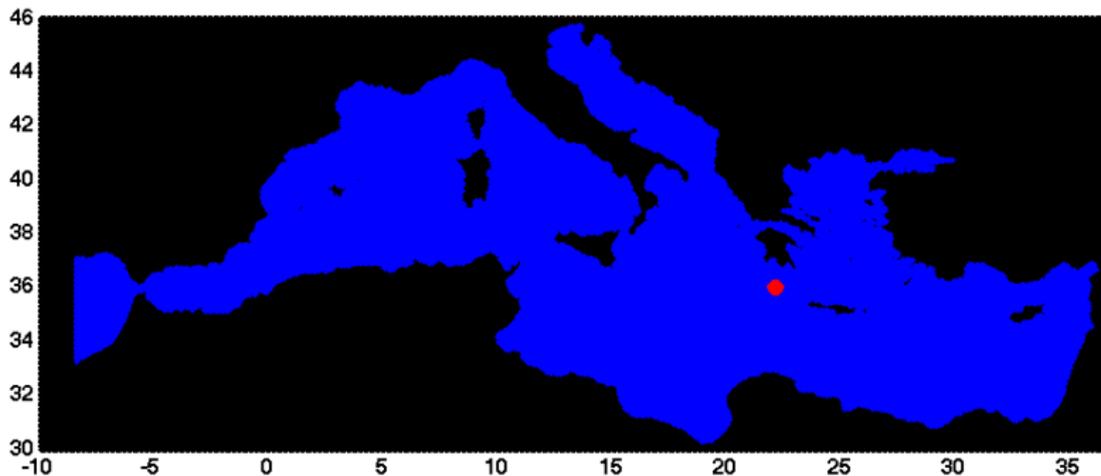




## Minutos 10-14

## BD Precalculadas

## Generación de la BD



12:17 (10 min) Teníamos

Primera estimación **fiable** de la localización y magnitud del maremoto

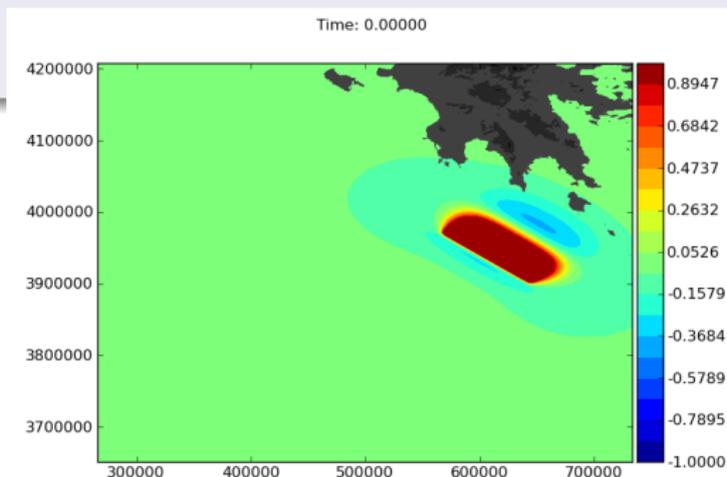
12:22 (15 min) Se determina el mecanismo focal (Descripción de Okada)

- Mw 8
- EPI (LON,LAT)=(22.3, 35.7) - DEPTH HYPO= 16.33 Km
- L=100 Km - W=50 Km
- DIP=35
- RAKE=90
- STRIKE=313
- SLIP=8.4 m

12:22 (15 min)

Se determina el mecanismo focal (Descripción de Okada)

- Mw 8
- EPI (LON,LAT)=(22.3, 35.7) - DEPTH HYPO= 16.33 Km
- L=100 Km - W=50 Km
- DIP=35
- RAKE=90
- STRIKE=313
- SLIP=8.4 m



**12:24-12:27** Nuevo escenario precalculado

- Evaluar el riesgo
- Más precisa, ¿suficiente?
- No podemos hacer mejor sin simulación en tiempo real
- Tiempos de llegada, onda máxima, estimación inundación

**12:27 a los 20 minutos** (estimación CAT)

El SAT<sup>2</sup> basado en **BD precalculadas** ha dado su respuesta

## Tiempo 17-20

## BD Precalculadas

## 2ª Estimación

## 12:24-12:27 Nuevo escenario precalculado

- Evaluar el riesgo
- Más precisa, ¿suficiente?
- No podemos hacer mejor sin simulación en tiempo real
- Tiempos de llegada, onda máxima, estimación inundación

## 12:27 a los 20 minutos (estimación CAT)

El SAT<sup>2</sup> basado en **BD precalculadas** ha dado su respuesta

¿Cuál sería el precio a pagar (en tiempo)?

Para tener simulaciones en **Tiempo Real**

## Minuto 15

## HySEA

## Simulación Numérica

12:22 (15 min)

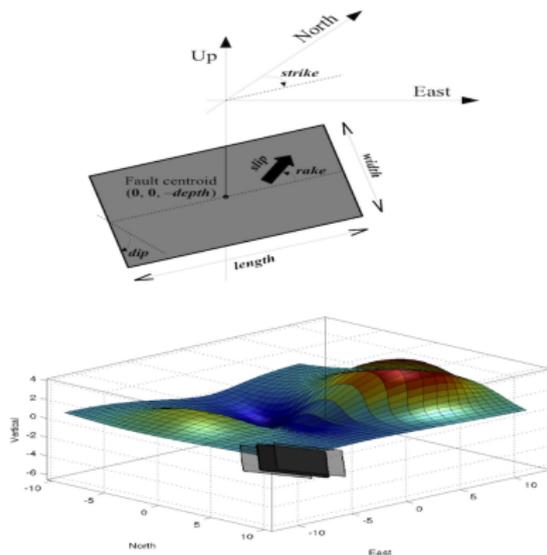
Se determina el mecanismo focal (Descripción de Okada)

Tenemos 5 min...

Para calcular y emitir mensajes de alerta

- Tiempo de simulación
- Extensión del dominio
- Resolución numérica
- Número de GPUs y escalabilidad
- Implementación (lectura, escritura, ...)

HySEA tsunami model



12:22 (15 min)

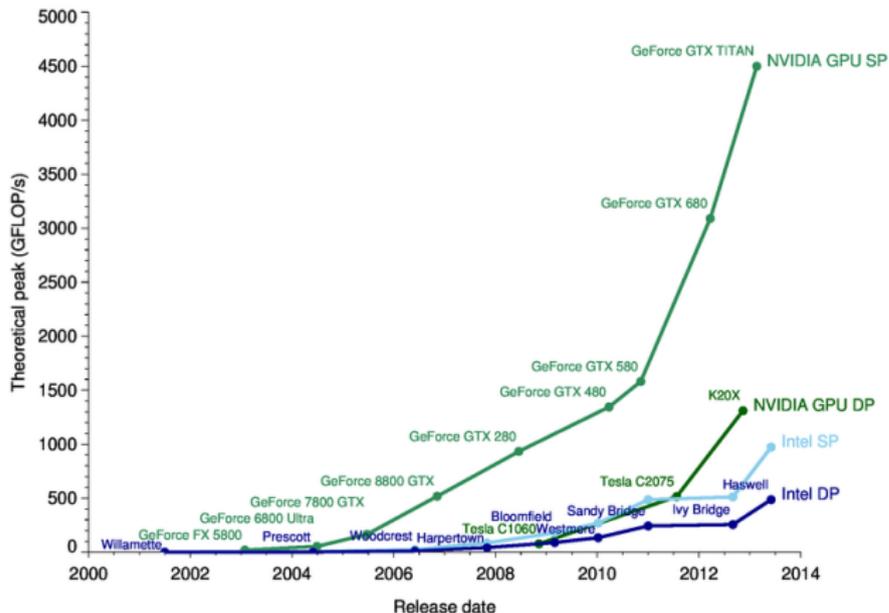
Se determina el mecanismo focal (Descripción de Okada)

## Ecuaciones Shallow Water no lineales

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x^2}{h} + \frac{g}{2} h^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_x q_y}{h} \right) = gh \frac{\partial H}{\partial x} - S_x, \\ \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_y^2}{h} + \frac{g}{2} h^2 \right) = gh \frac{\partial H}{\partial y} - S_y. \end{array} \right.$$

- $\rho$  densidad;  $g$  gravedad;
- $H(\mathbf{x})$  batimetría;  $h(\mathbf{x}, t)$ , espesor de la capa de agua;
- $(u_x(\mathbf{x}, t), u_y(\mathbf{x}, t))$  velocidad del fluido;
- $q_x(\mathbf{x}, t) = u_x(\mathbf{x}, t)h(\mathbf{x}, t)$ ,  $q_y(\mathbf{x}, t) = u_y(\mathbf{x}, t)h(\mathbf{x}, t)$  flujos;
- $S_f = (S_x, S_y)$  efectos de fricción con el fondo.

HySEA tsunami



## GPUs

- GeForce FX 5900: 450 MHz, 256 MB
- GeForce 8800 GTX: 128 Cores, 575 MHz, 728 MB
- GeForce GTX 580: 512 Cores, 1544 MHz, 1546 MB
- GeForce GTX 680: 1536 Cores, 2048 MB
- GeForce GTX TITAN: 2880 Cores, 6144 MB
- and GeForce GTX TITAN BLACK  
Band Width 336

Evolución de la capacidad de cálculo (hasta 2013)

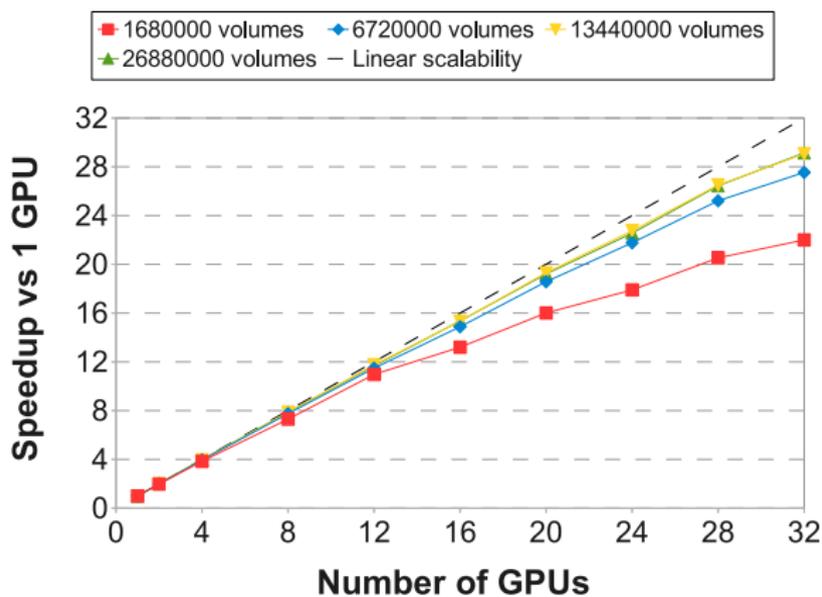


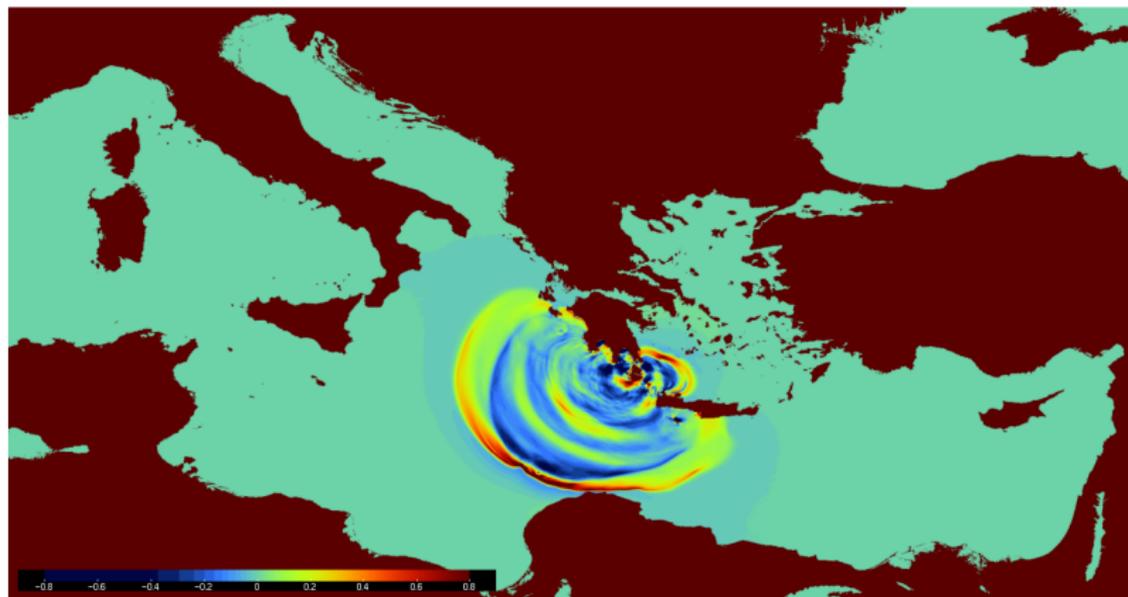
Figure: Escalabilidad débil para HySEA-WAF

### Primer intento - Hagámonos una idea

- **Malla uniforme de 30''** (por encima de los 7'5 millones de celdas).
- **4 horas** de tiempo real de simulación
- **8 GPUs** Titan Black GPUs
-

### Primer intento - Hagámonos una idea

- **Malla uniforme de 30''** (por encima de los 7'5 millones de celdas).
- **4 horas** de tiempo real de simulación
- **8 GPUs** Titan Black GPUs
- **Tiempo de cálculo 110 seg!!!**



## Minutos 17-20

## HySEA

## El problema real

## Sistema de Alerta Temprana de Tsunamis para todo el Mediterráneo

- Dominio: todo el Mediterráneo
- Resolución espacial: 30 arc-sec.
- Tamaño de la malla:  $5.221 \times 1.921 = 10.029.541$  cells.
- Tiempo de simulación: 8 horas.
- Paso de tiempo para guardar resultados: 15s.



## Salidas

- Series temporales de elevaciones en 12-17.000 localizaciones predeterminadas
- Amplitudes máximas en todos los puntos del dominio



# Minuto 21???

## Tiempo de cálculo necesario. Resultados de speed-up

n. GPUs	Tiempo Cálculo	Speed-up
1	2141.113	1.00
2	1139.477	1.88
4	601.279	3.56
8	378.074	5.66
10	351.969	6.08

Tiempo necesario: por debajo de los **6 min**  $\implies$  23 min para dar respuesta

\* Cálculos realizados con nVIDIA Titan Black. 1 Gb ethernet network.

# Minuto 21???

## Tiempo de cálculo necesario. Resultados de speed-up

n. GPUs	Tiempo Cálculo	Speed-up
1	2141.113	1.00
2	1139.477	1.88
4	601.279	3.56
8	378.074	5.66
10	351.969	6.08

Tiempo necesario: por debajo de los **6 min**  $\implies$  23 min para dar respuesta

\* Cálculos realizados con nVIDIA Titan Black. 1 Gb ethernet network.

## Continuas mejoras $\implies$ 12:28 (4 + 2 min)

- Balance de carga estática
- Ajuste del CFL
- Tiempo de cálculo entorno a los **4 min**  $\implies$  **21 min** para dar respuesta

## Comentarios finales

- La simulación directa de las ondas de tsunami podría resultar de enorme utilidad para los SAT
- Pero era, hasta ahora, una opción que no era posible
- El desarrollo de las GPUs nos acerca esta posibilidad
- La implementación en **multi-GPU** (buenos speed-ups) nos hace ser optimistas
- Las simulaciones mucho más rápido que el tiempo real (FTRT) son posibles...
- ¿¿¿Pero hasta el punto de plantearnos **cambiar el paradigma** de los SAT<sup>2</sup>???

## Comentarios finales

- La simulación directa de las ondas de tsunami podría resultar de enorme utilidad para los SAT
- Pero era, hasta ahora, una opción que no era posible
- El desarrollo de las GPUs nos acerca esta posibilidad
- La implementación en **multi-GPU** (buenos speed-ups) nos hace ser optimistas
- Las simulaciones mucho más rápido que el tiempo real (FTRT) son posibles...
- ¿¿¿Pero hasta el punto de plantearnos **cambiar el paradigma** de los SAT<sup>2</sup>???

## Parece que...

- El INGV, en colaboración con el grupo EDANYA de la Universidad de Málaga, quiere demostrar que esto es posible.
- Siendo el primer SAT<sup>2</sup> del mundo en implementar las simulaciones en “Tiempo Real” en su protocolo operacional.
- Como complemento a MD y BD de escenarios precalculados.