

# Modelación de Efectos de Sitio en Simulaciones del Movimiento Sísmico del Terreno: Aprendiendo de Pequeños Terremotos en Nueva Zelanda

Felipe Kuncar<sup>1</sup>

Brendon Bradley<sup>1</sup>, Chris de la Torre<sup>1</sup>, Adrian Rodriguez-Marek<sup>2</sup>,  
Chuanbin Zhu<sup>1</sup>, Robin Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup>University of Canterbury, Nueva Zelanda

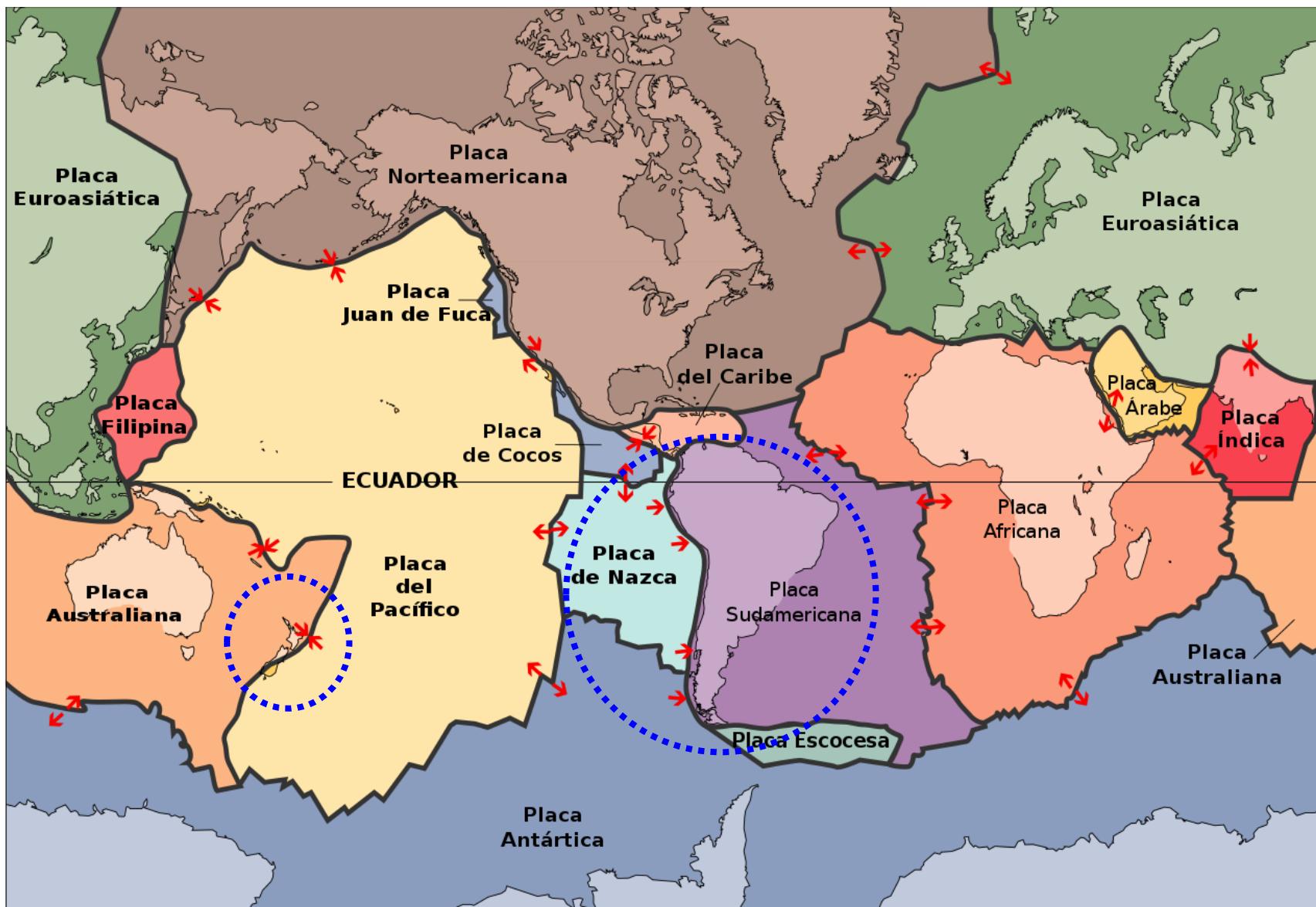
<sup>2</sup>Virginia Tech, Estados Unidos

# Índice

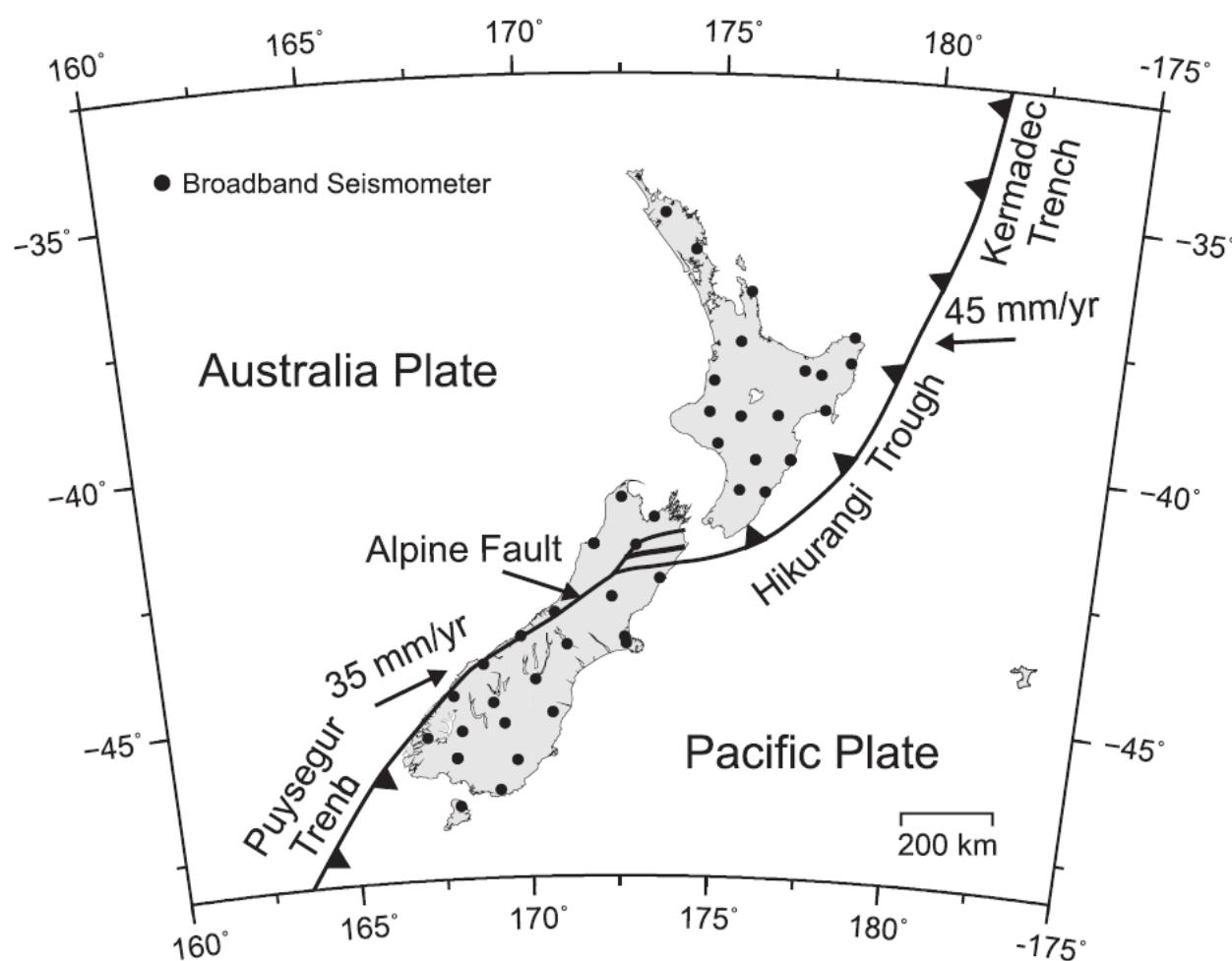
1. Nueva Zelanda y Grupo de Investigación
2. Motivación para Explorar el uso de Simulaciones
3. Modelación de Efectos de Sitio en Simulaciones
4. Estudio de Validación en Curso

# 1. Nueva Zelanda y Grupo de Investigación

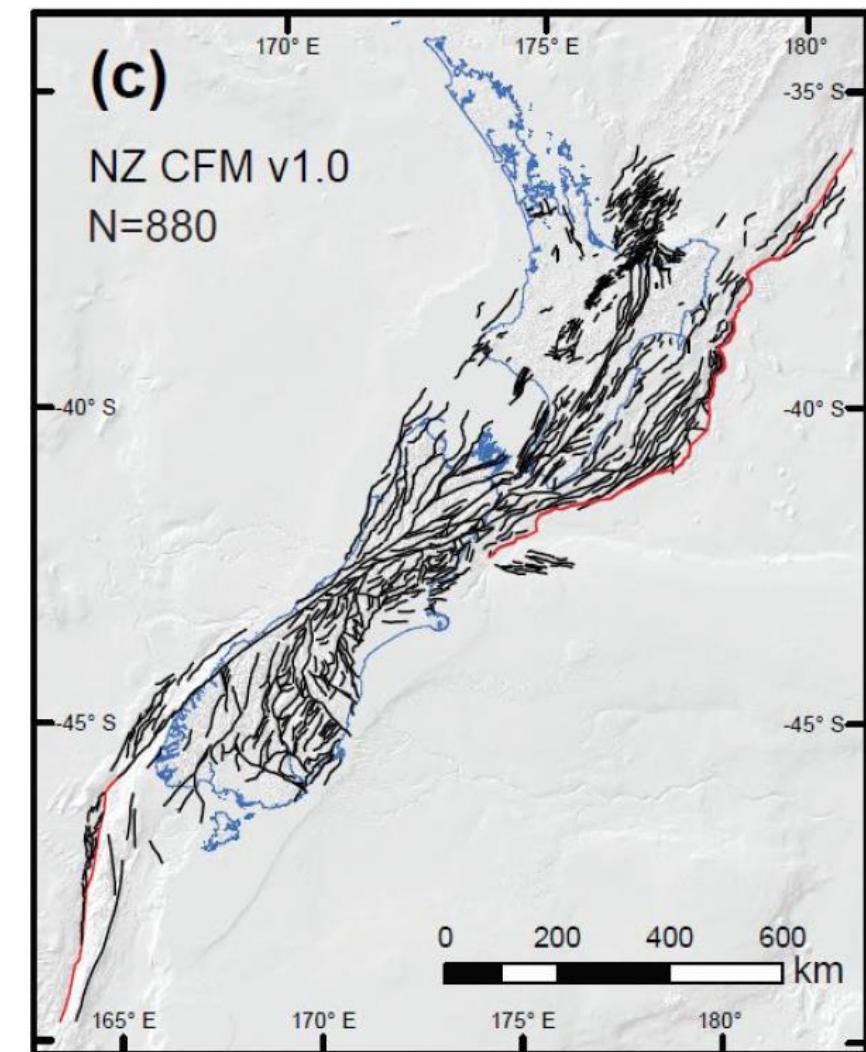
# Configuración Tectónica de Nueva Zelanda



# Configuración Tectónica de Nueva Zelanda



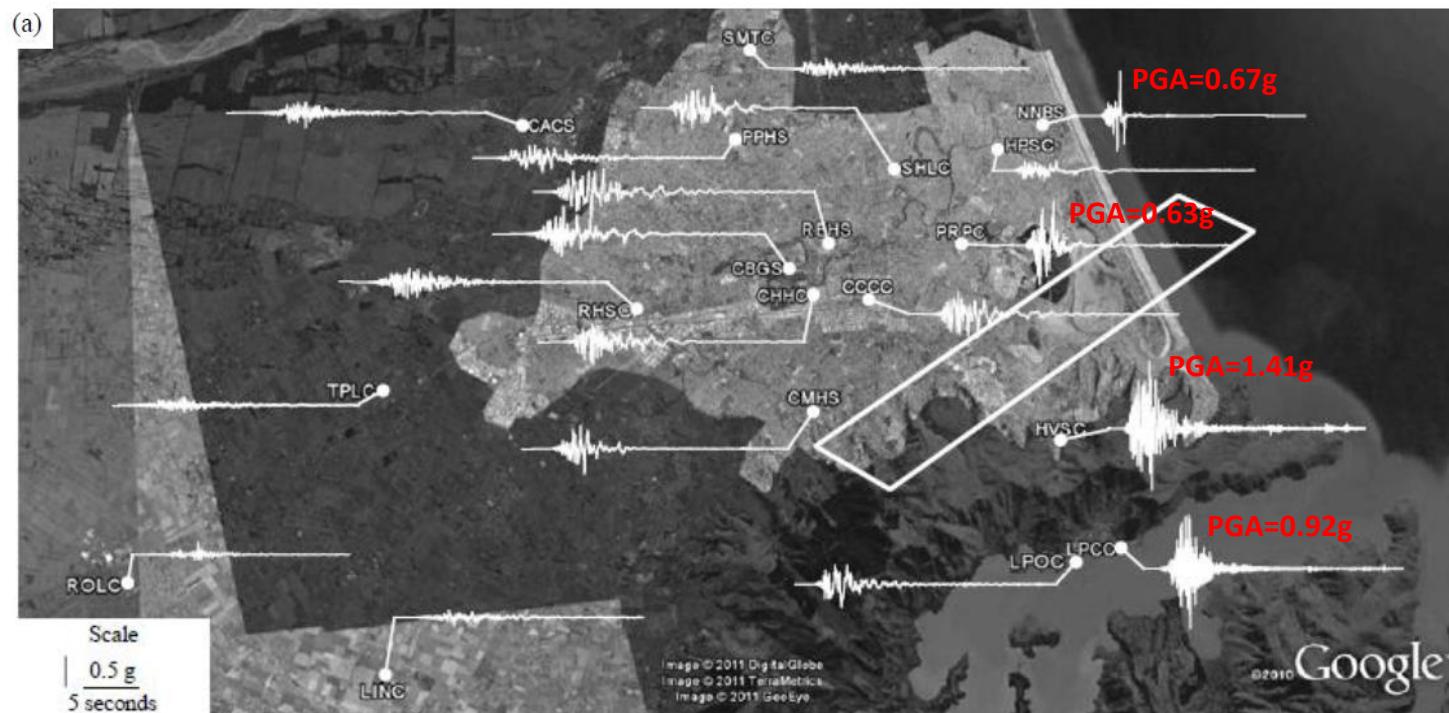
Ristau (2008)



Seebeck et al. (2022)

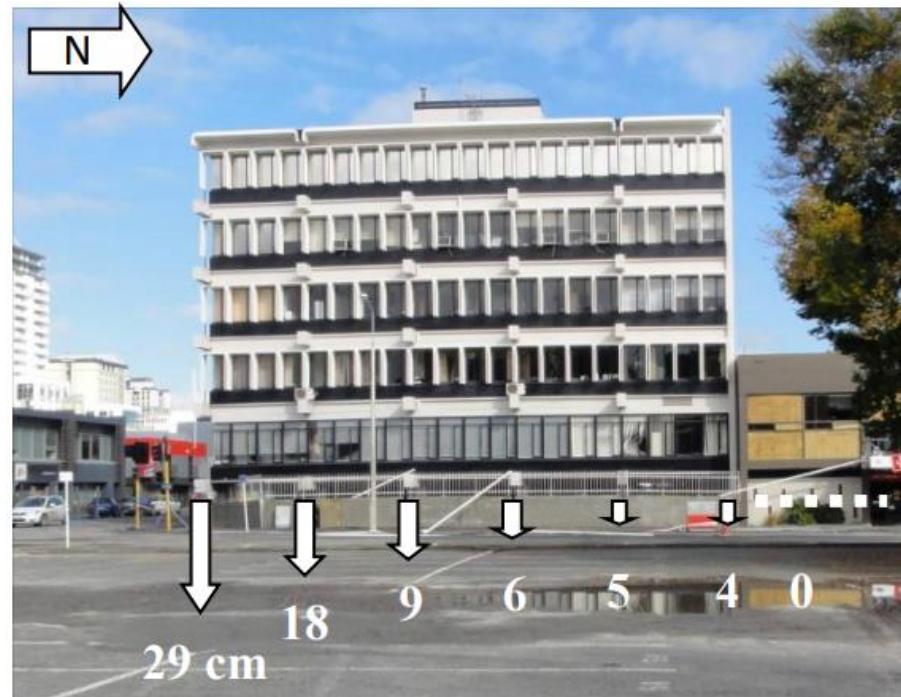
# Secuencia de Terremotos de Canterbury de 2010-2011

- Serie de terremotos entre Septiembre de 2010 y Diciembre de 2011, incluyendo el terremoto de Darfield (Mw 7.1) y otros de magnitud 6.2, 6.0, 5.9, y 5.8
- Daño material: ~US\$ 40 B (Quigley et al., 2016)
- Terremoto de Christchurch de 2011 (Mw 6.2): 185 muertes y ~US\$ 15 B (Quigley et al., 2016)



Bradley & Cubrinovski (2011)

# Secuencia de Terremotos de Canterbury de 2010-2011



GEER Report (2011)



# QuakeCoRE: Centro de Resiliencia Sísmica de Nueva Zelanda



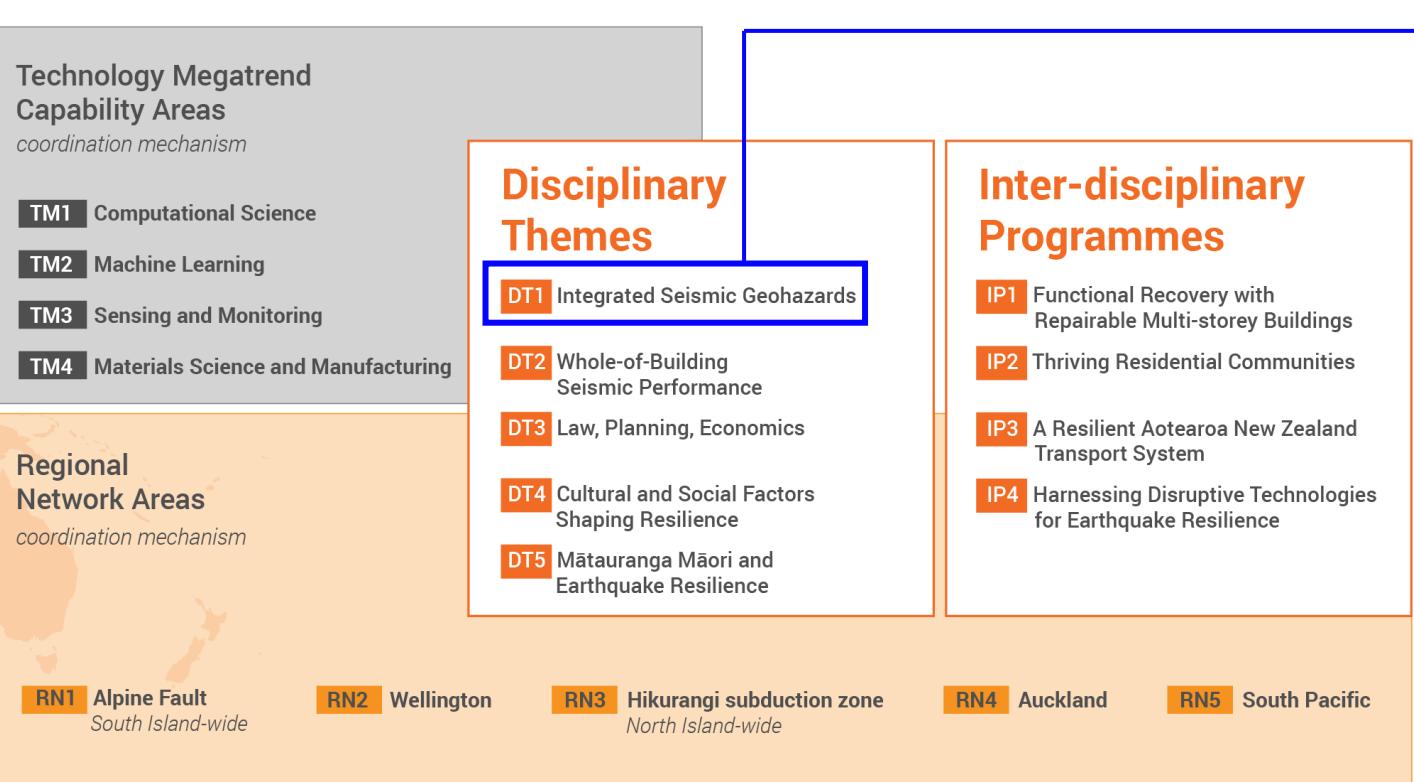
QuakeCoRE

NZ Centre for Earthquake Resilience

*Te Hiranga Rū*

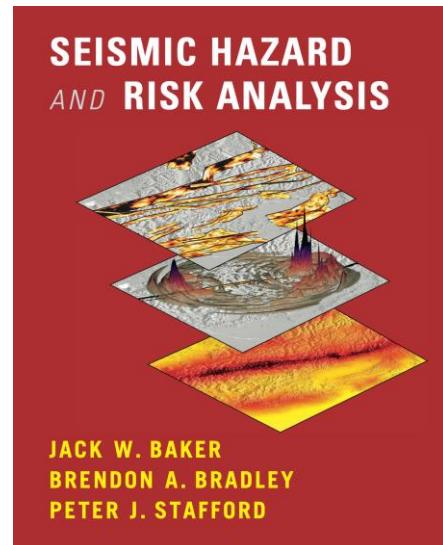
QuakeCoRE is a Centre of Research Excellence (CoRE) funded by the New Zealand Tertiary Education Commission (TEC)

<http://www.quakecore.nz/>



1. Ground-motion modeling
2. Liquefaction impacts on land and infrastructure
3. Surface rupture and slope stability
4. Geohazard integration

# Grupo de Investigación



**Prof. Brendon Bradley**  
Director de QuakeCoRE

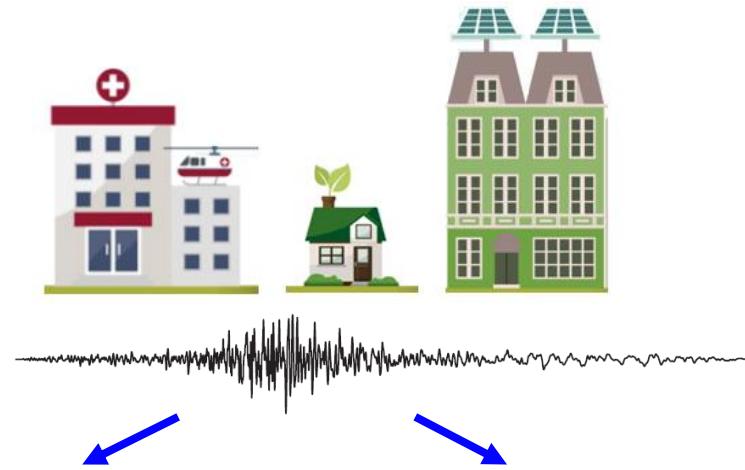


Castle Hill, Nueva Zelanda, Enero 2023

Papers y Oportunidades de Investigación: <https://sites.google.com/site/brendonabradley/>

## 2. Motivación para Explorar el Uso de Simulaciones

# Motivación

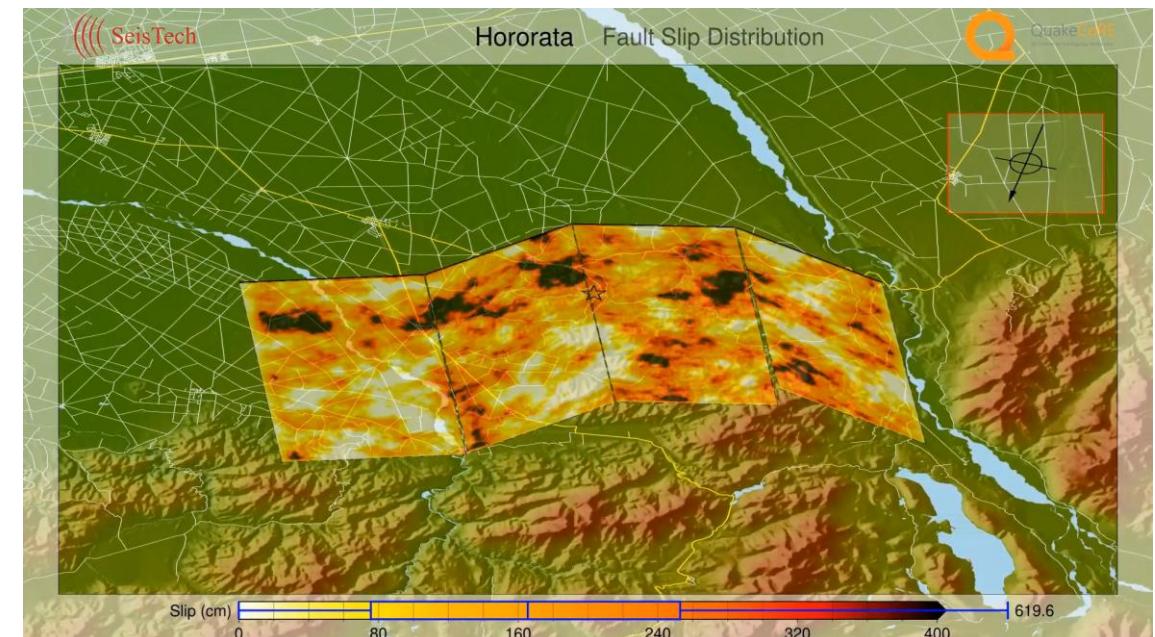
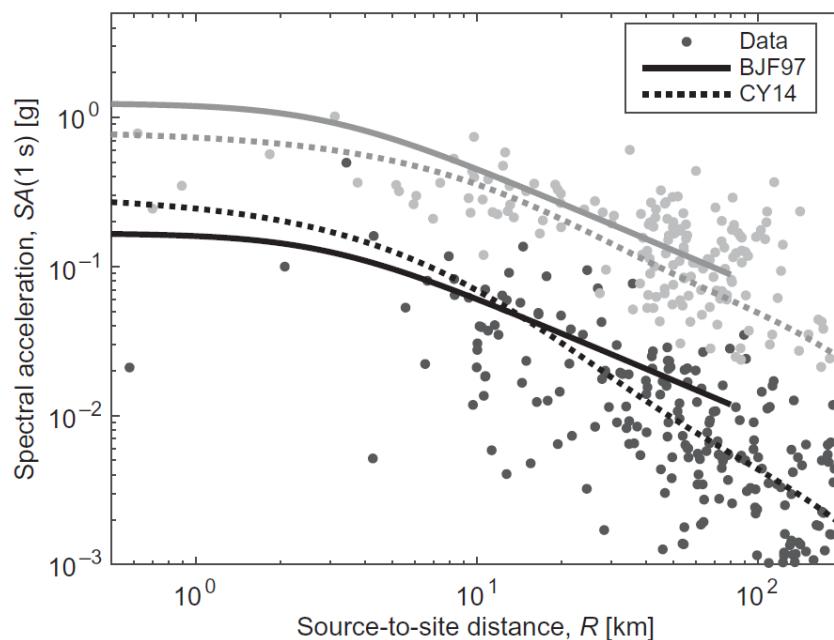


Modelos Empíricos

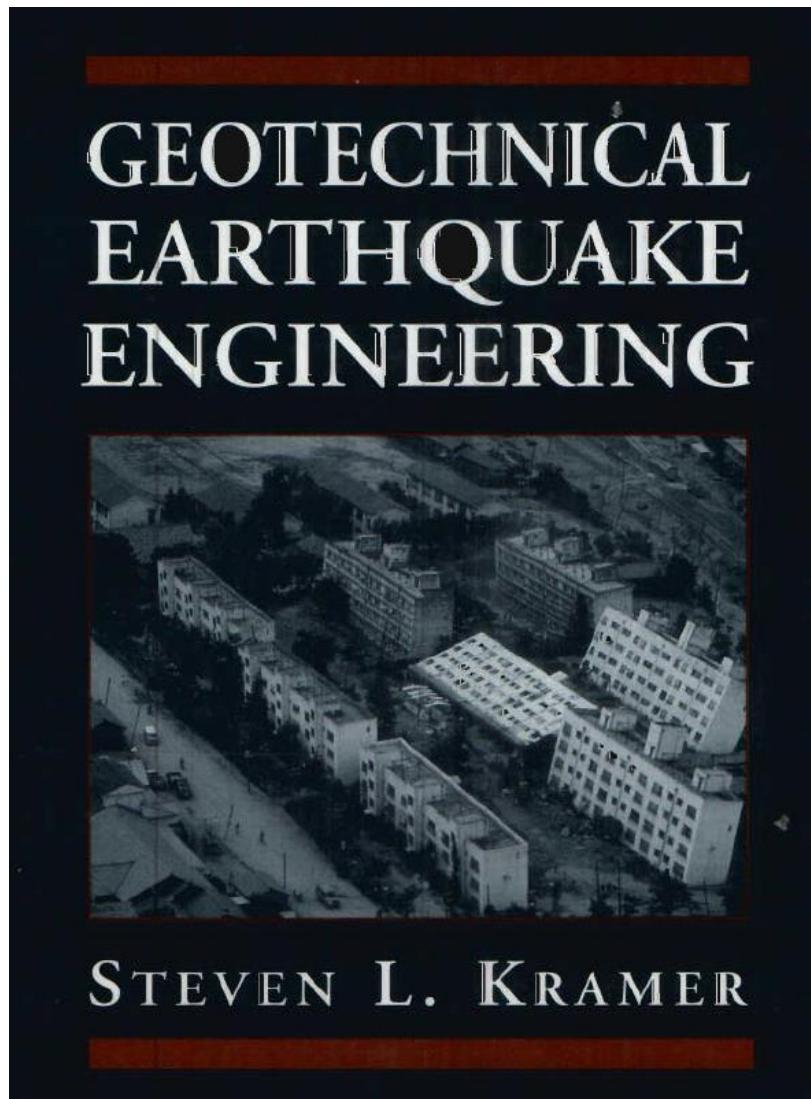
Empirical GMMs / GMPEs

Simulaciones

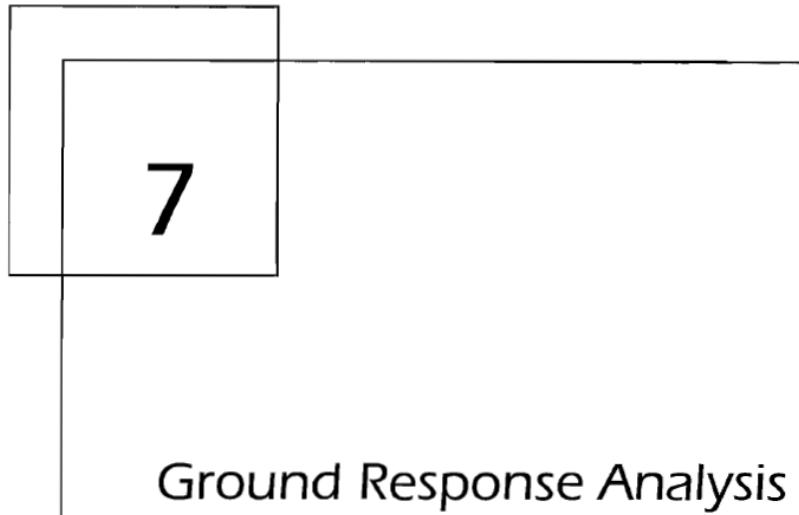
Physics-Based Ground-Motion Simulations



# Motivación



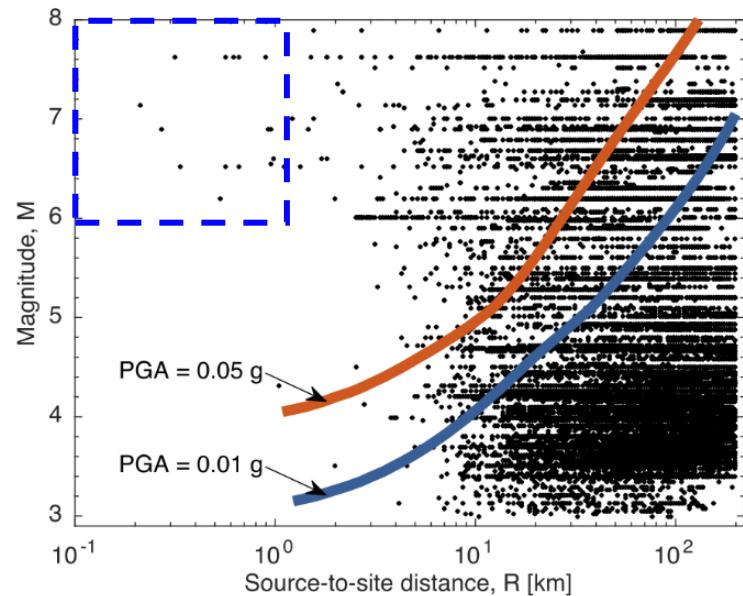
Kramer (1996)



“En condiciones ideales, **un análisis completo de la respuesta de sitio modelaría el mecanismo de ruptura de un terremoto, la propagación de las ondas a través de la tierra hasta la parte superior del lecho rocoso debajo de un sitio en particular, y luego determinaría cómo el movimiento de la superficie del terreno está influenciado por los suelos que se encuentran sobre el lecho rocoso.** En la realidad, el mecanismo de ruptura de fallas es tan complejo y la naturaleza de la transmisión de energía entre la fuente y el sitio es tan incierta que este enfoque no es práctico para aplicaciones de ingeniería comunes”

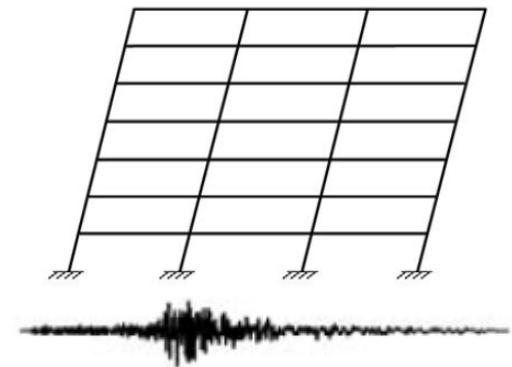
# ¿Por qué explorar el uso de Simulaciones?

## 1. Falta de Registros de Gran Amplitud



## 2. Creciente utilización de Series de Tiempo

Análisis  
Tiempo-Historia



## 3. Modelación Explícita de la Física del Problema

Potencial generación de  
predicciones más exactas y precisas

# ¿Por qué explorar el uso de Simulaciones?

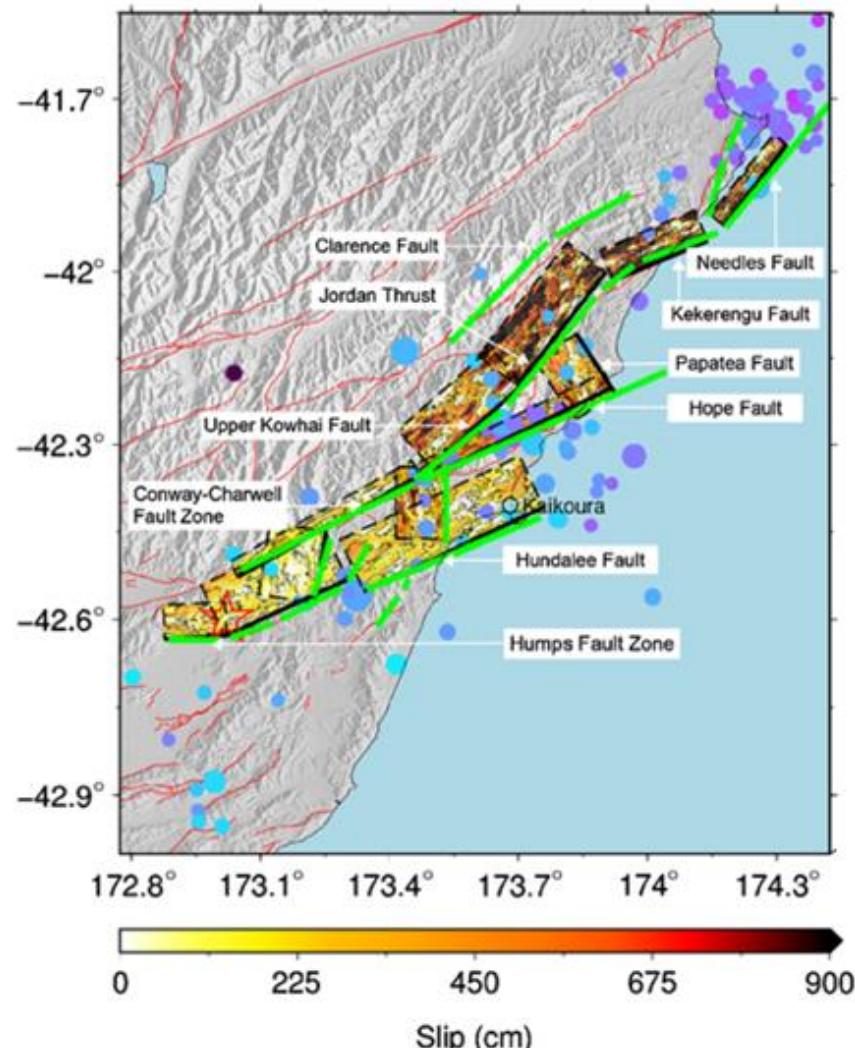
## Ejemplo 1:

Simulación del Terremoto de Kaikoura de 2016 (Mw 7.8)

Bradley et al. (2017a)

- Ruptura multi-falla
- Efectos de Directividad

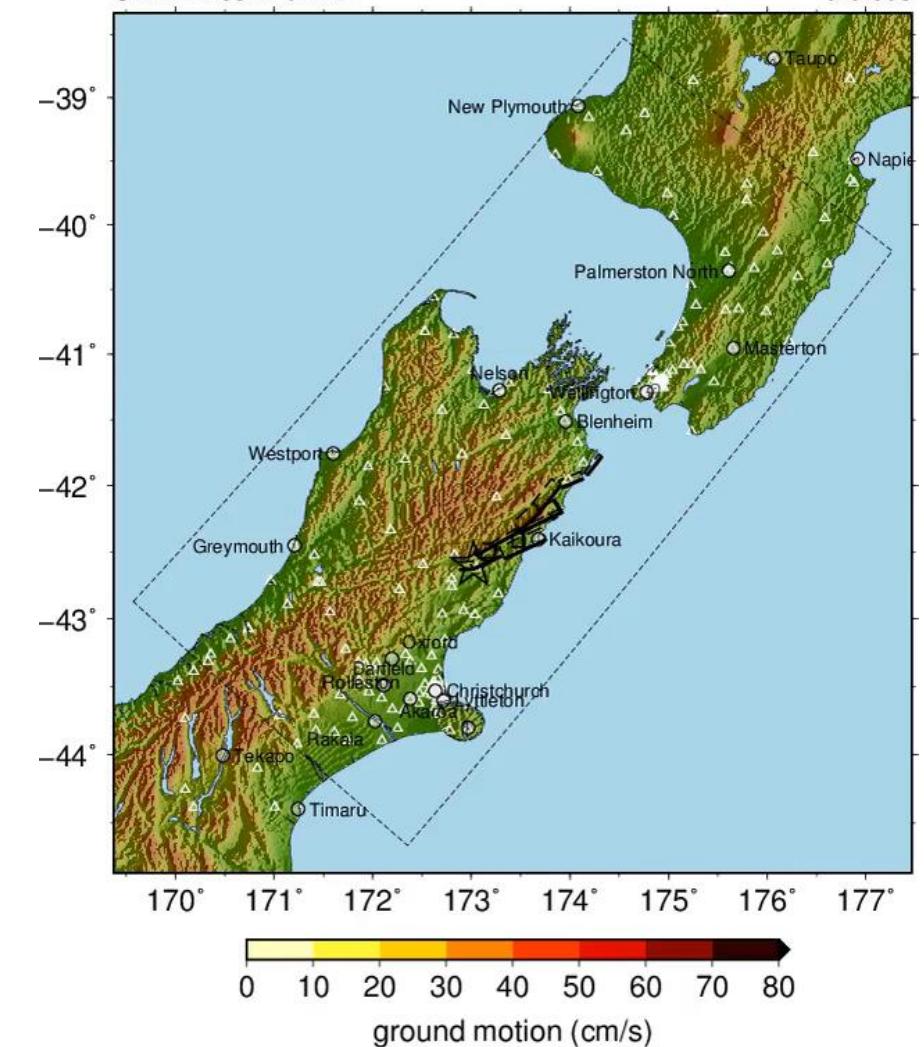
Modelos Empíricos no tienen la capacidad de capturar todas estas particularidades



Mw7.8 14 Nov 2016 Kaikoura Earthquake

Source model modified from Hamling  
SIVM v1.65 h=0.2km

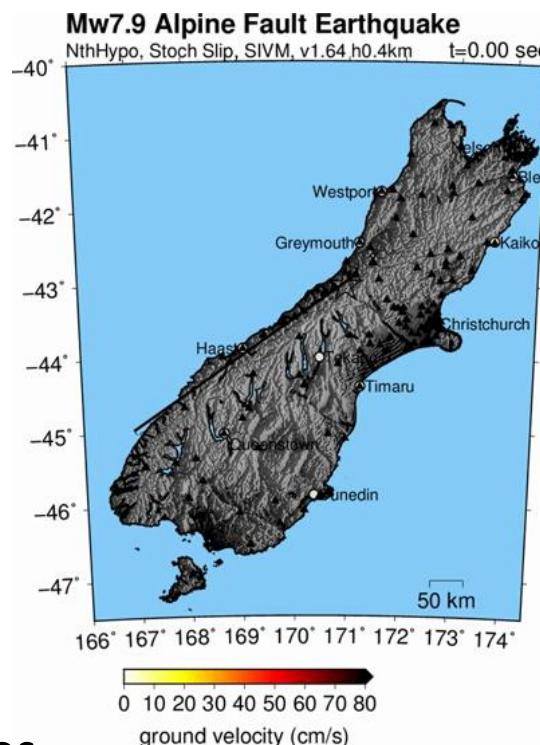
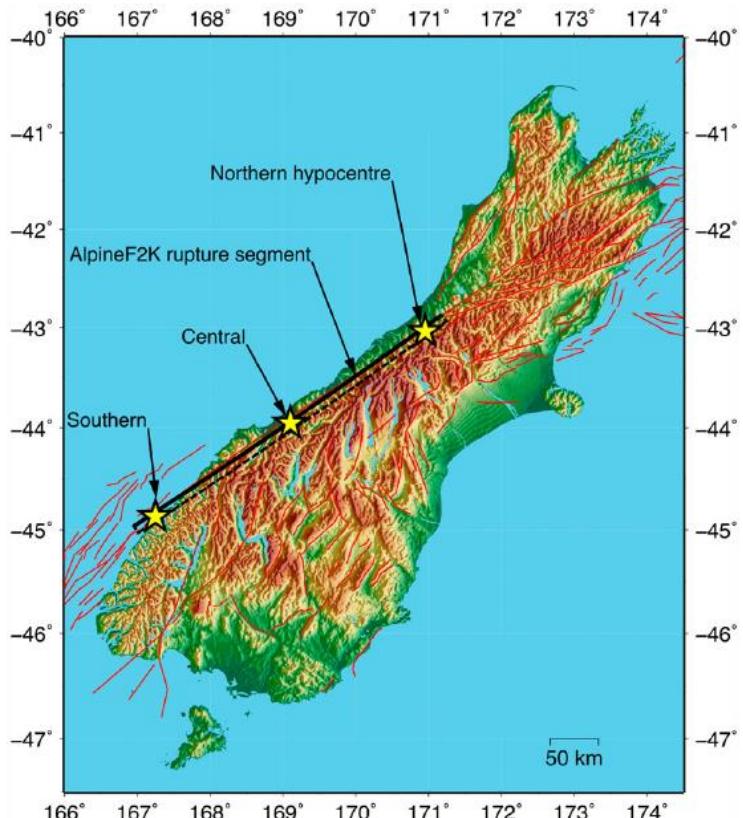
t=0.00s



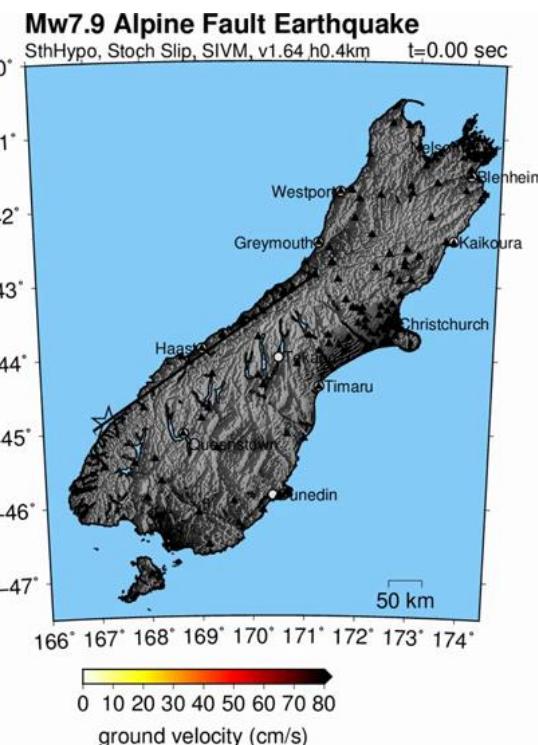
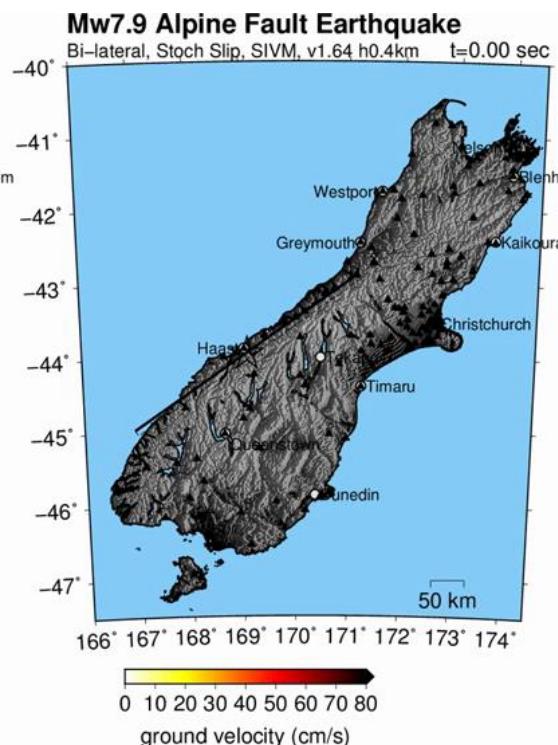
# ¿Por qué explorar el uso de Simulaciones?

## Ejemplo 2: Simulaciones de Escenarios de Terremotos en la Falla Alpina

Bradley et al. (2017b)



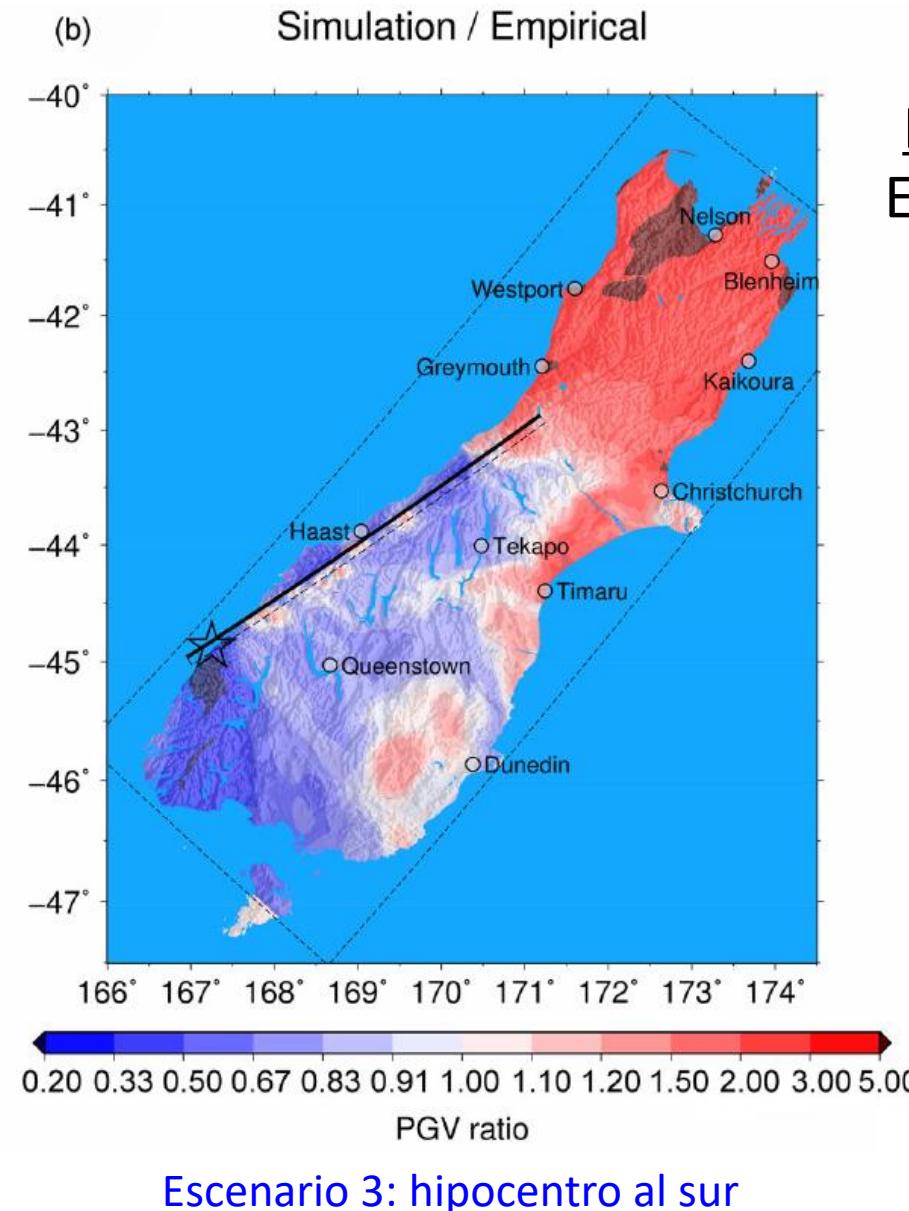
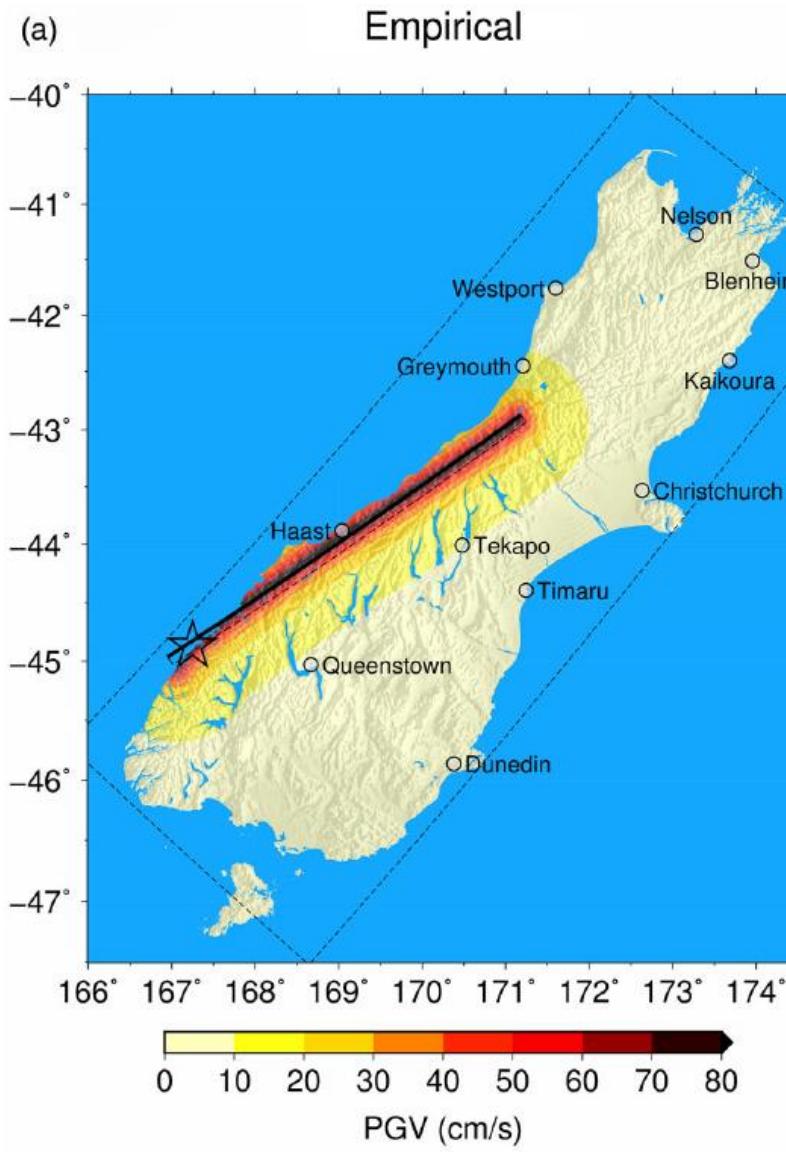
3 escenarios:



- Gran terremoto cada 300-500 años
- Último fue en 1717

[https://www.youtube.com/watch?v=FxiHB0FJF5k&ab\\_channel=](https://www.youtube.com/watch?v=FxiHB0FJF5k&ab_channel=)

# ¿Por qué explorar el uso de Simulaciones?



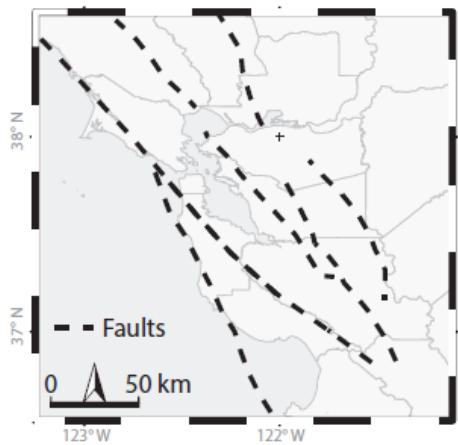
Ejemplo 2: Simulaciones de Escenarios de Terremotos en la Falla Alpina

Bradley et al. (2017b)

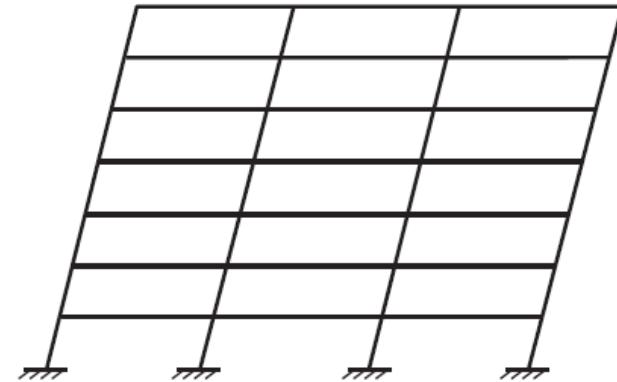
Efectos de directividad y de cuenca son explícitamente modelados en la simulación

# Uso de Simulaciones en Ingeniería

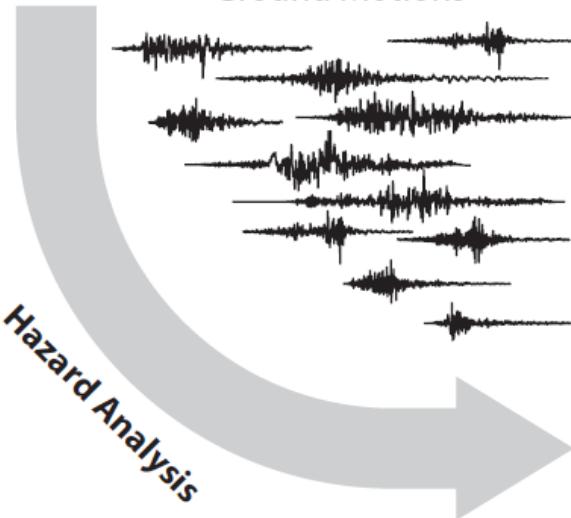
Seismic Sources



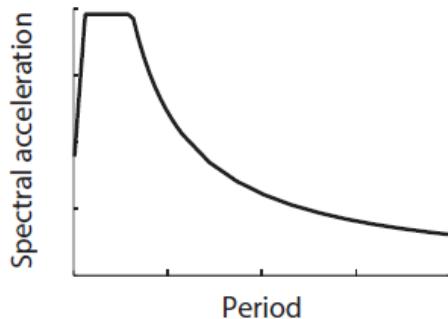
Structural Performance



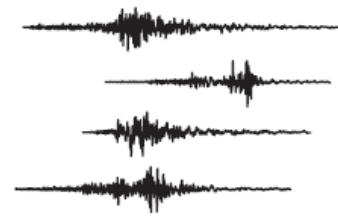
Ground Motions



Target Response Spectrum

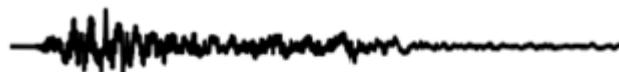


Ground Motions



# Validación

Observación



Simulación

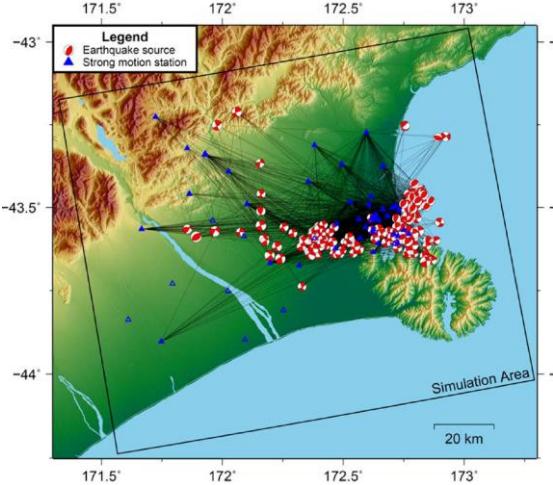


¿Cuáles son las causas que explican la diferencia entre la observación y la simulación?

Múltiples terremotos y sitios

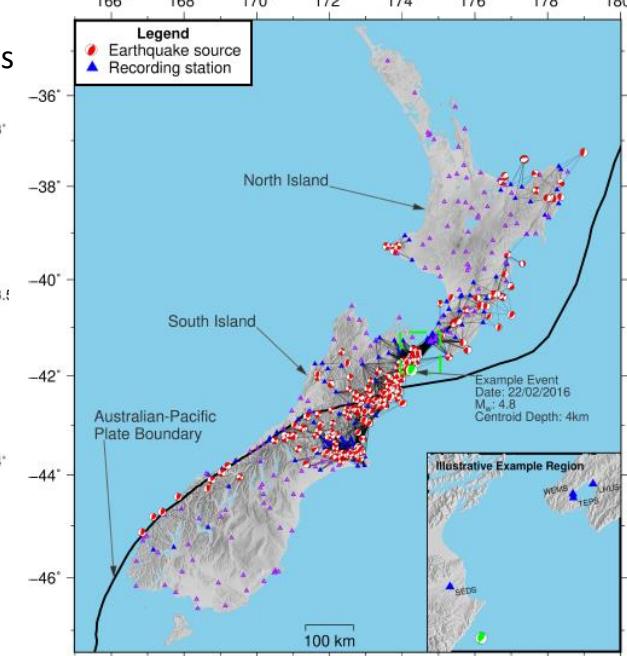
Lee et al. (2020)

148 Eventos de Baja Magnitud | 43 Sitios



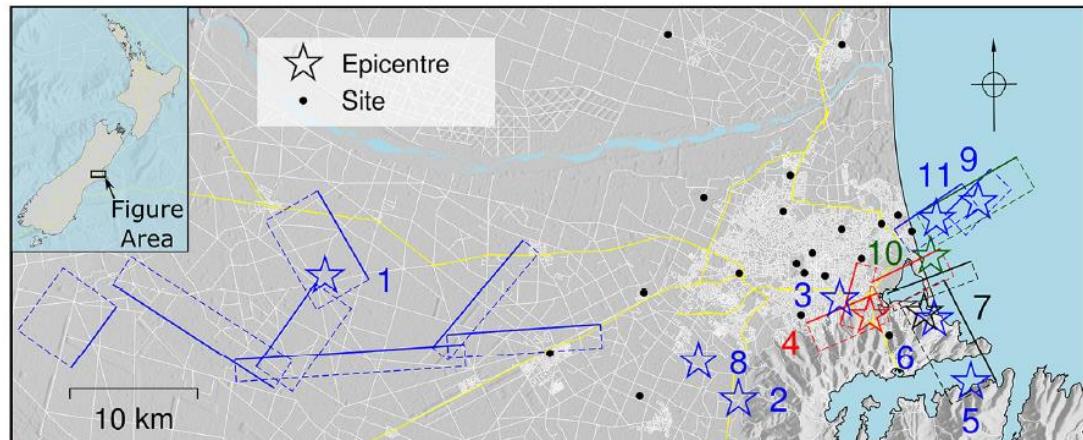
Lee et al. (2022)

479 Eventos de Baja Magnitud | 212 Sitios



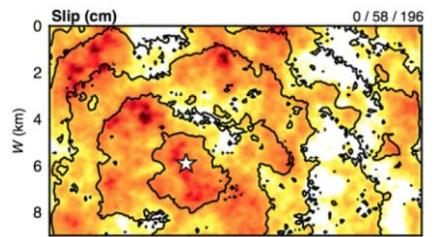
de la Torre et al. (2020)

11 Eventos Significativos | 20 Sitios

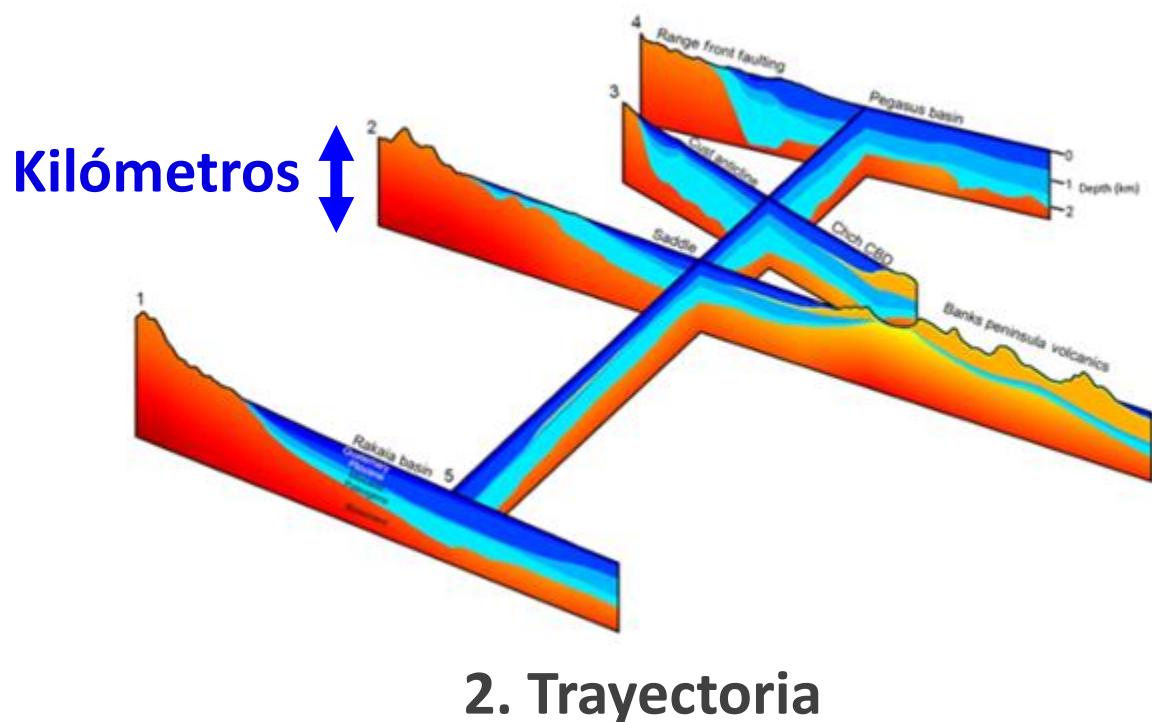


### 3. Modelación de Efectos de Sitio en Simulaciones

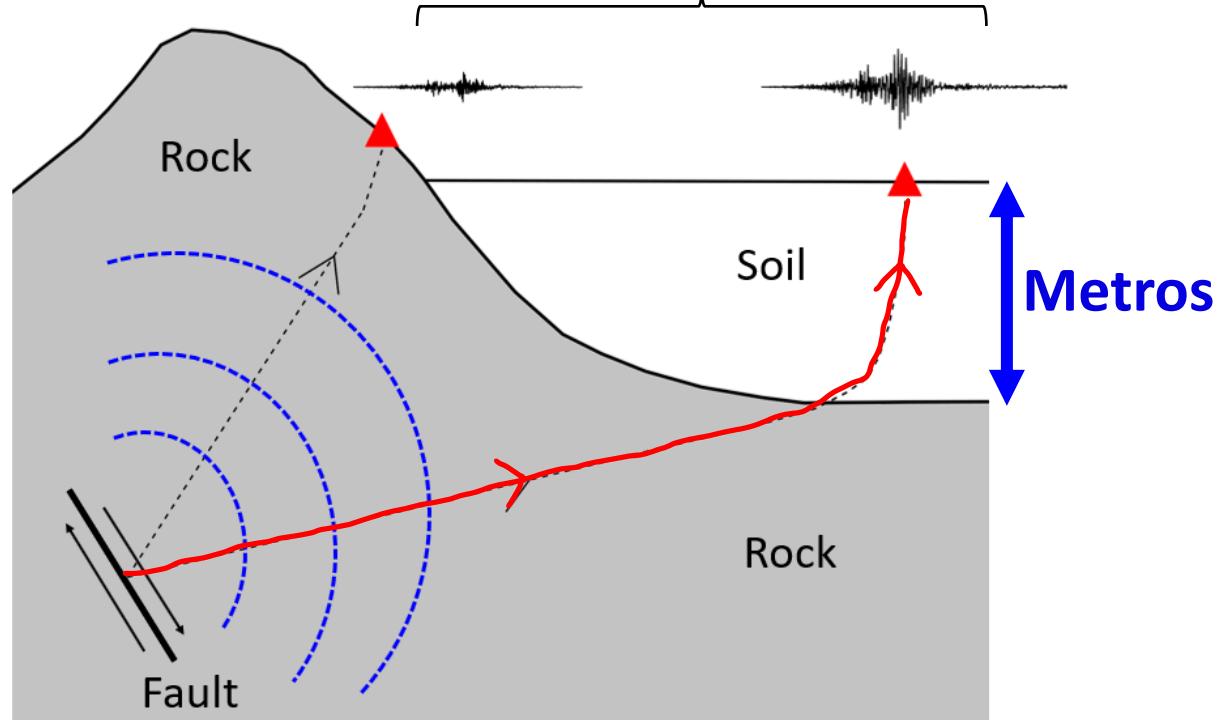
# Foco de Investigación



1. Fuente



## 3. Efectos Locales de Sitio



Desafío: Fenómeno Multi-Escala

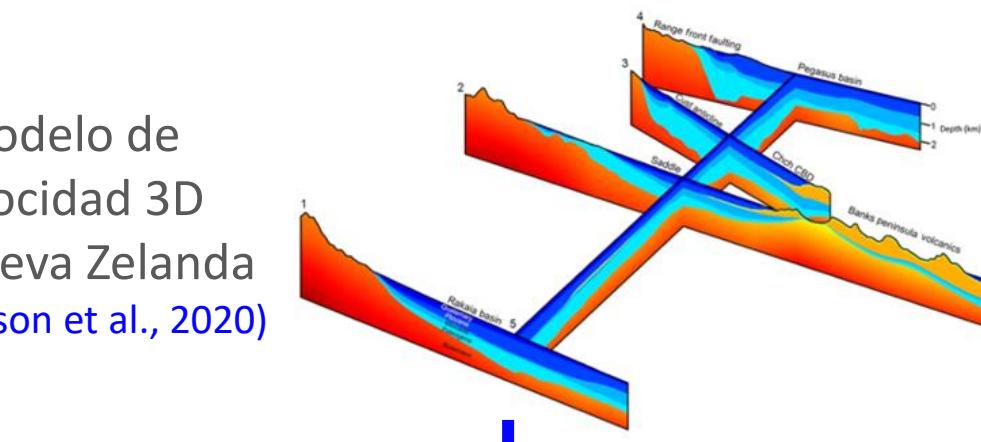
# Simulaciones Híbridas

Método de Graves & Pitarka (2010, 2015, 2016)

**Bajas Frecuencias (LF)**

Propagación Sísmica 3D

Modelo de Velocidad 3D de Nueva Zelanda (Thompson et al., 2020)



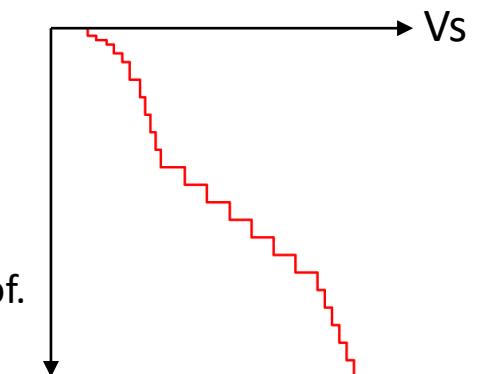
1 Hz

(este estudio)

**Altas Frecuencias (HF)**

Física Simplificada ~ 1D

Perfil de Vs Regional

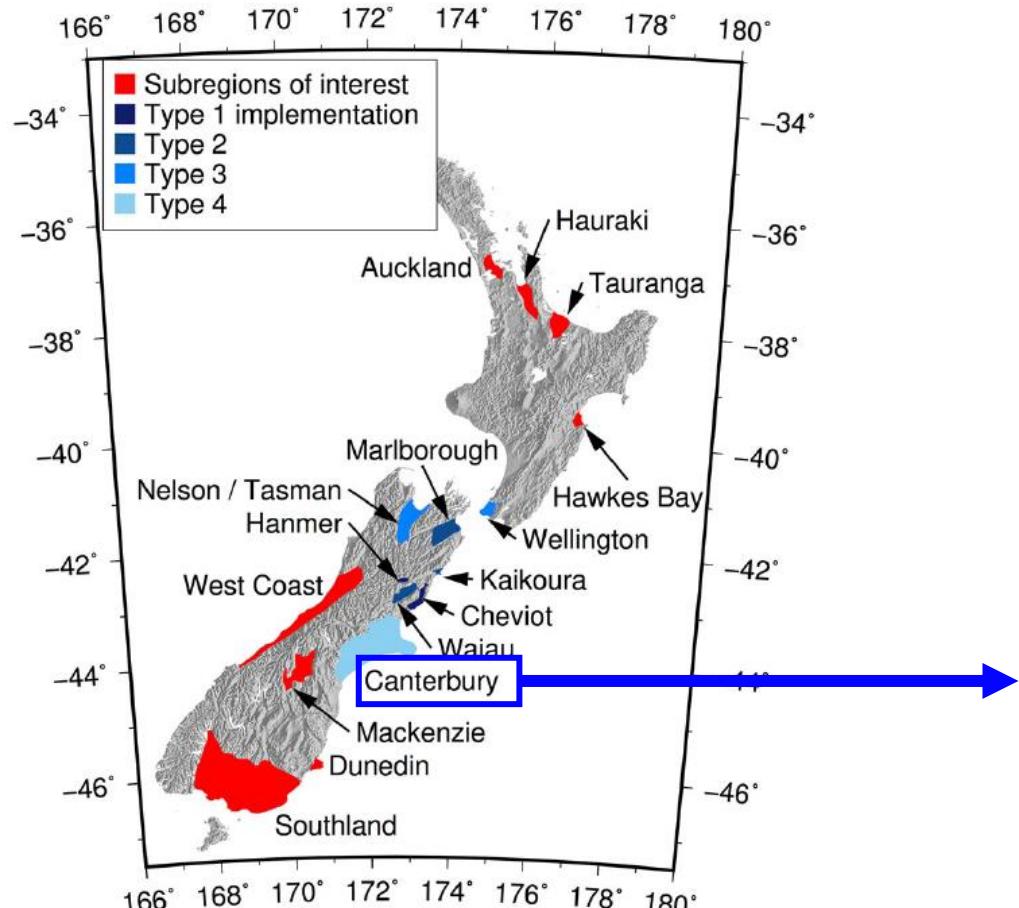


**Banda Ancha (BB)**



# Modelo de Velocidad de Nueva Zelanda 3D

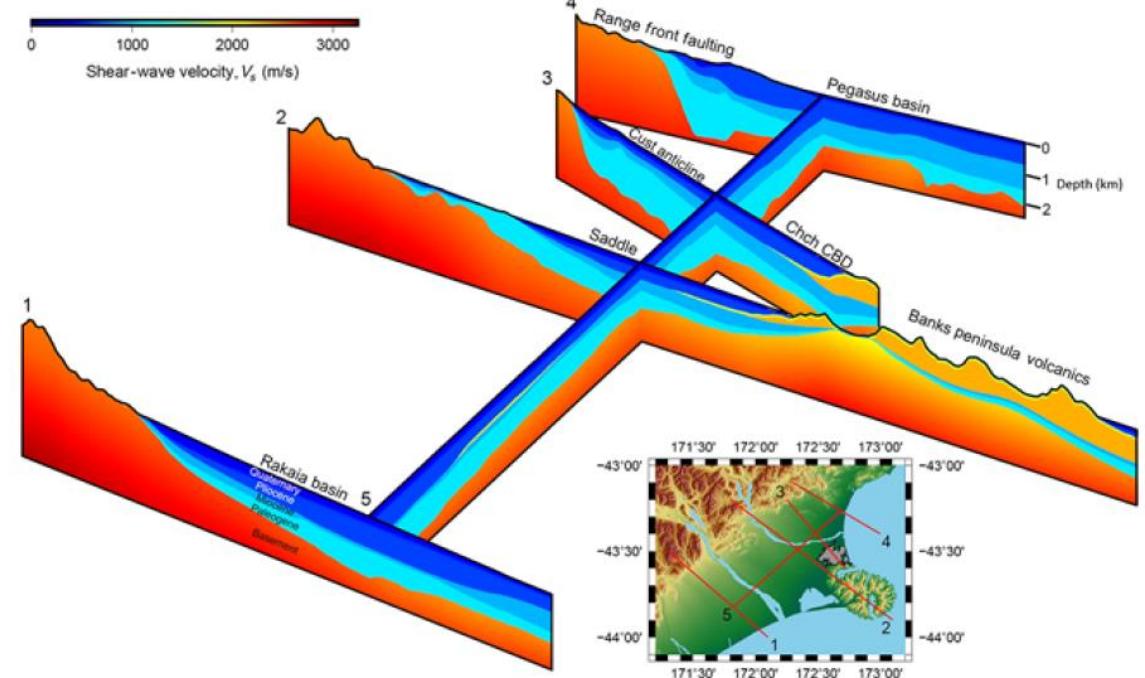
Modelo basado en tomografía de tiempo de viaje con varios sub-modelos de cuenca embebidos



Thomson et al. (2020)

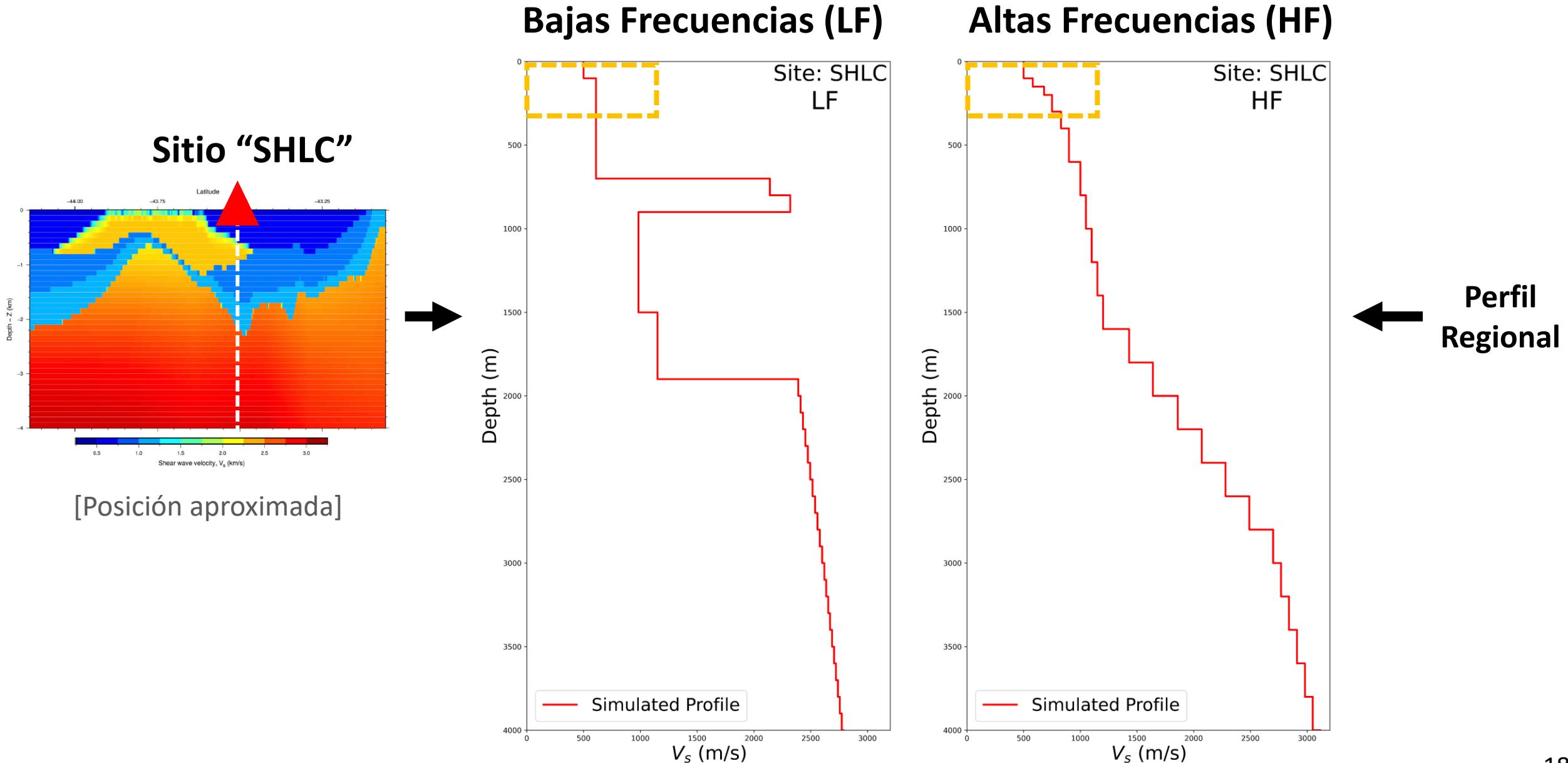
## Región de Canterbury - Tipo 4

Calibrado con una densa red de líneas de reflexión sísmica, registros de pozos de petróleo y agua, datos de CPT y mapas geológicos



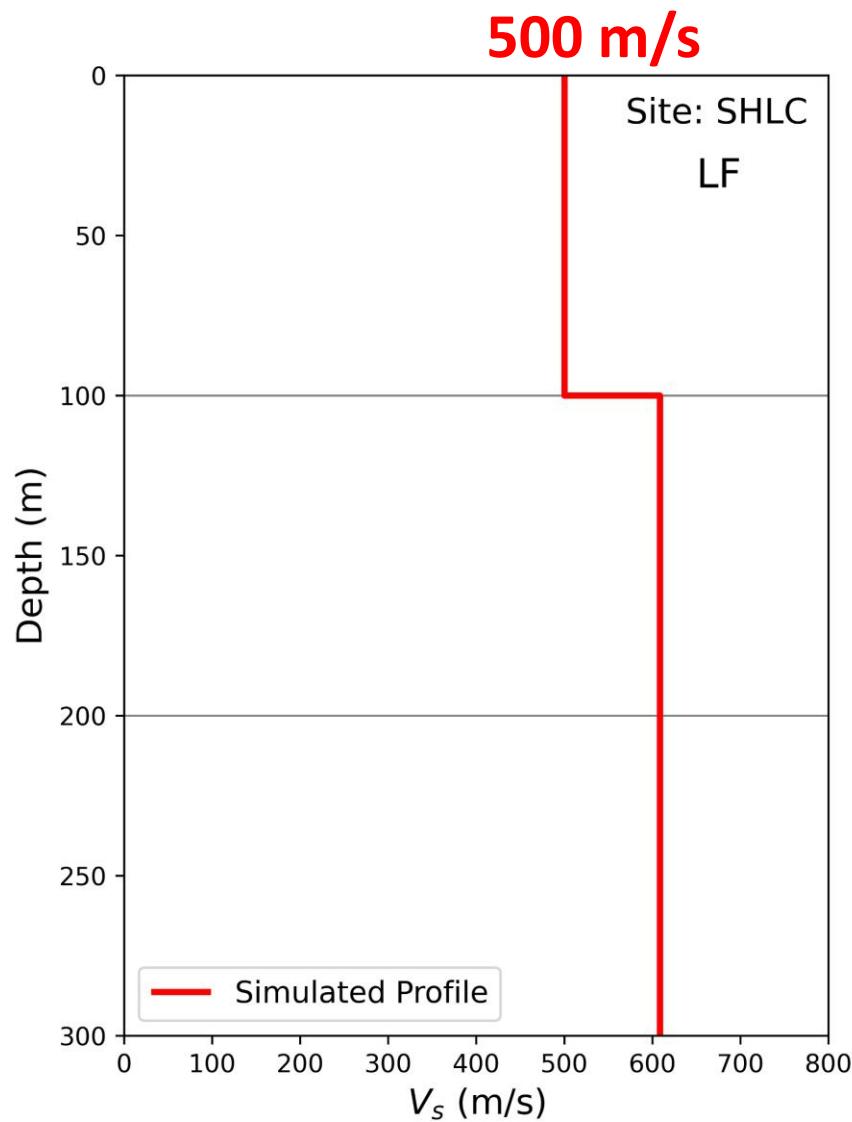
Lee et al. (2017)

# Ejemplo de Perfiles Vs “Simulados”

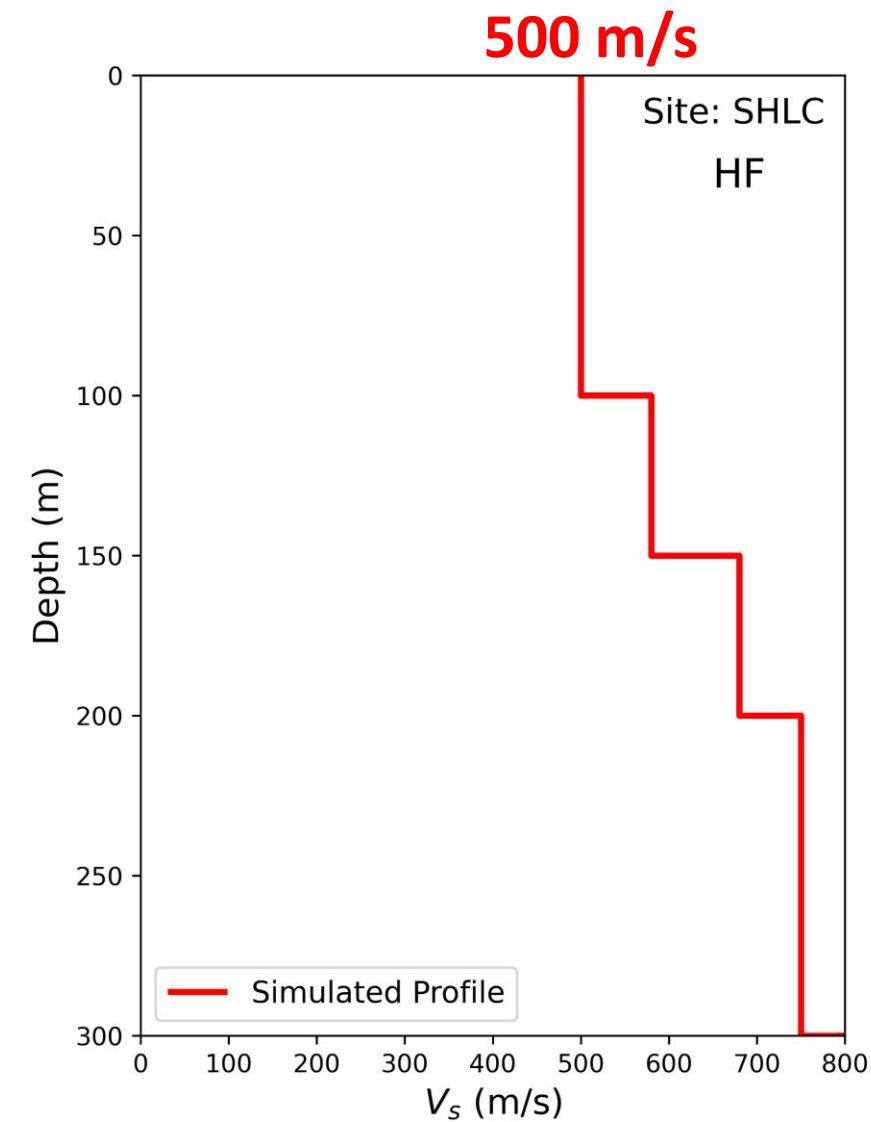


# Limitaciones de las Simulaciones

## Bajas Frecuencias (LF)

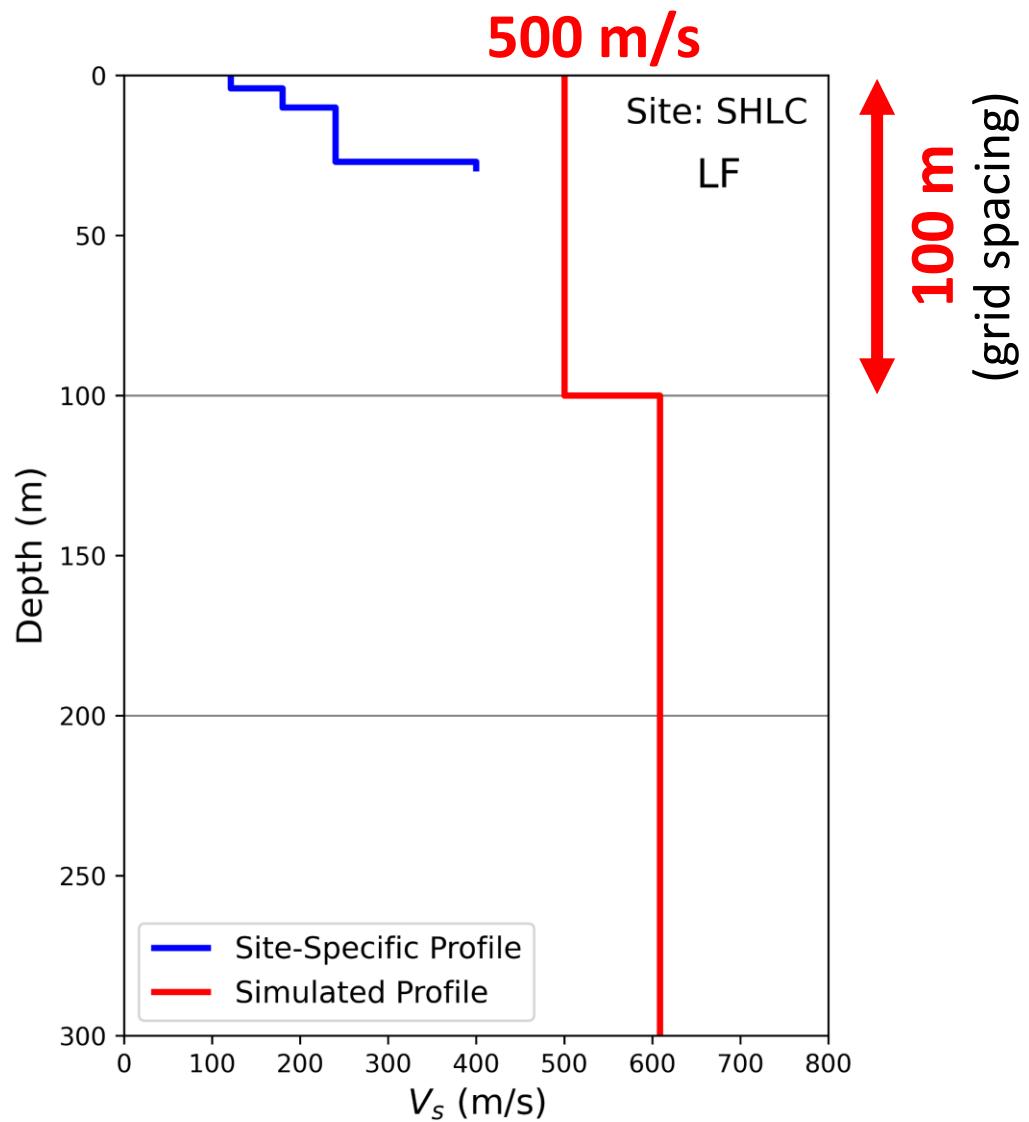


## Altas Frecuencias (HF)

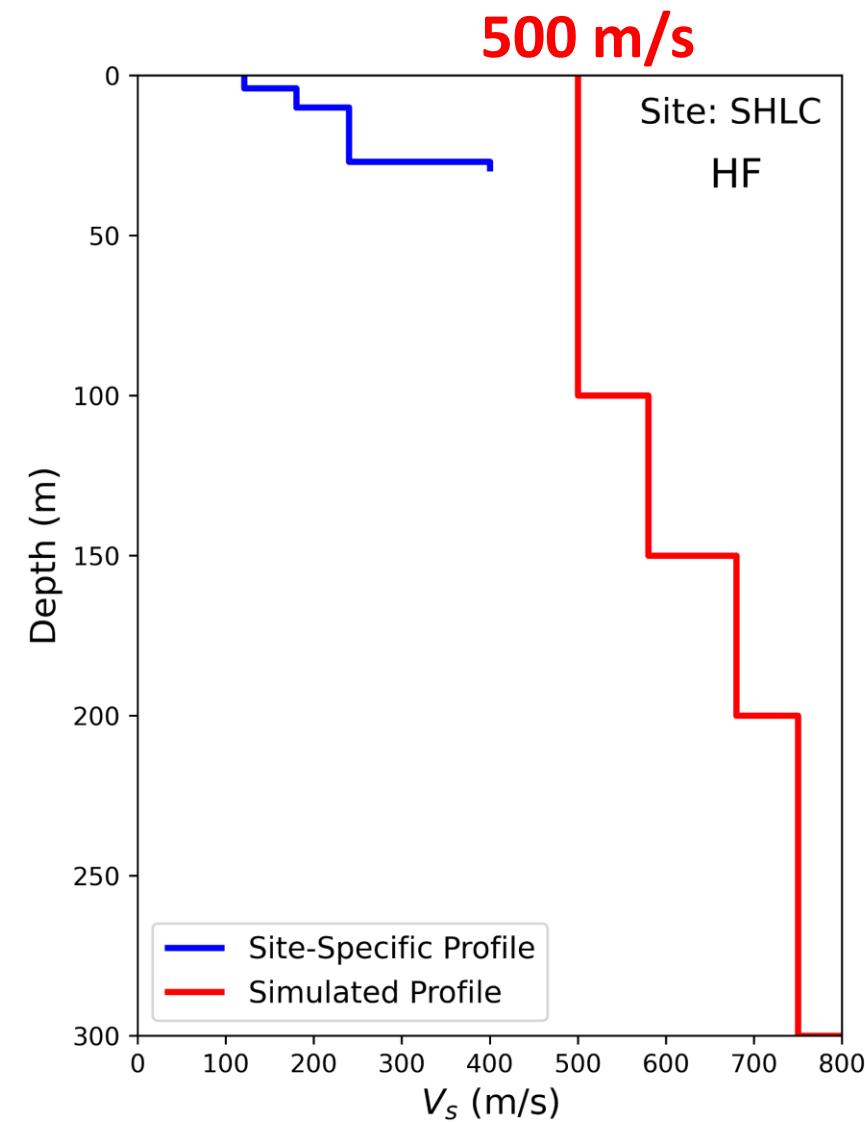


# Limitaciones de las Simulaciones

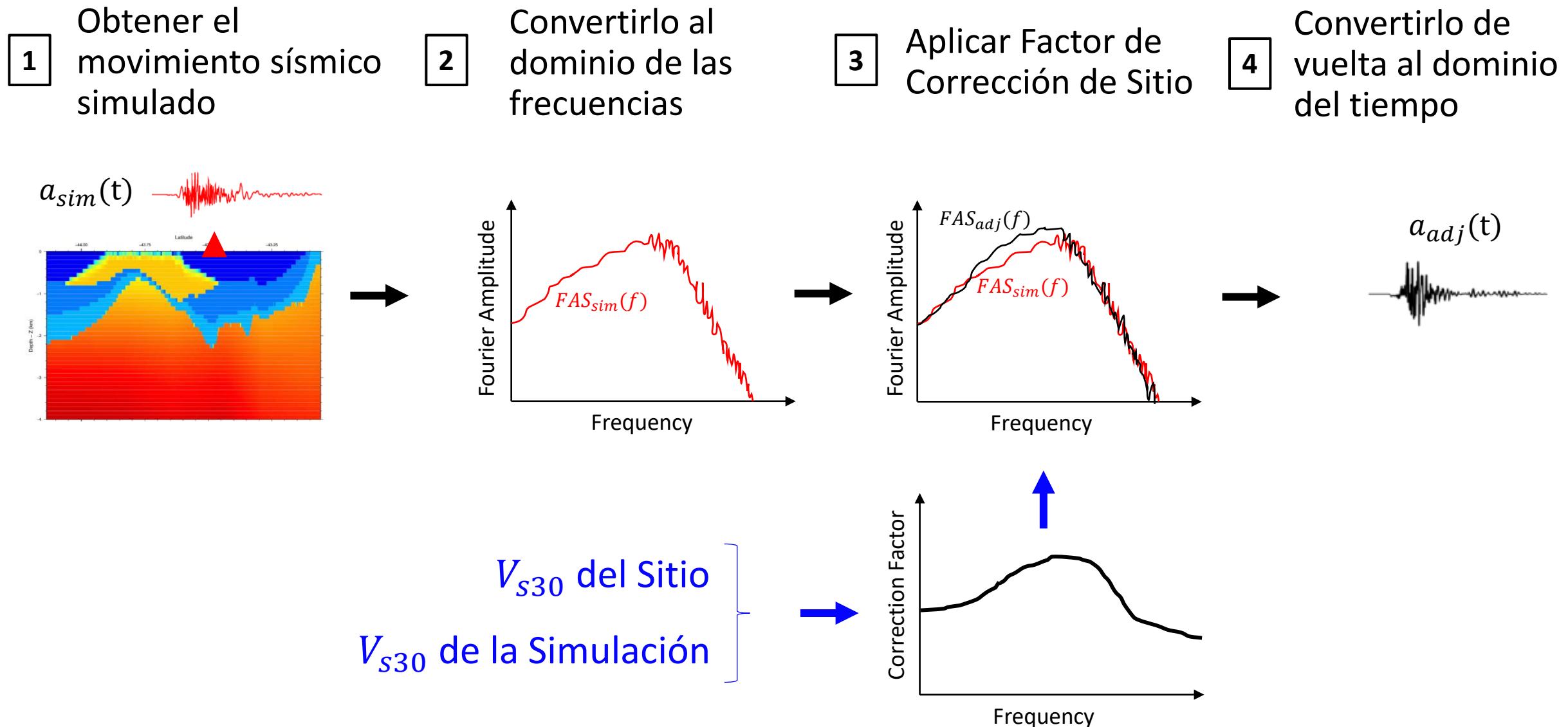
## Bajas Frecuencias (LF)



## Altas Frecuencias (HF)



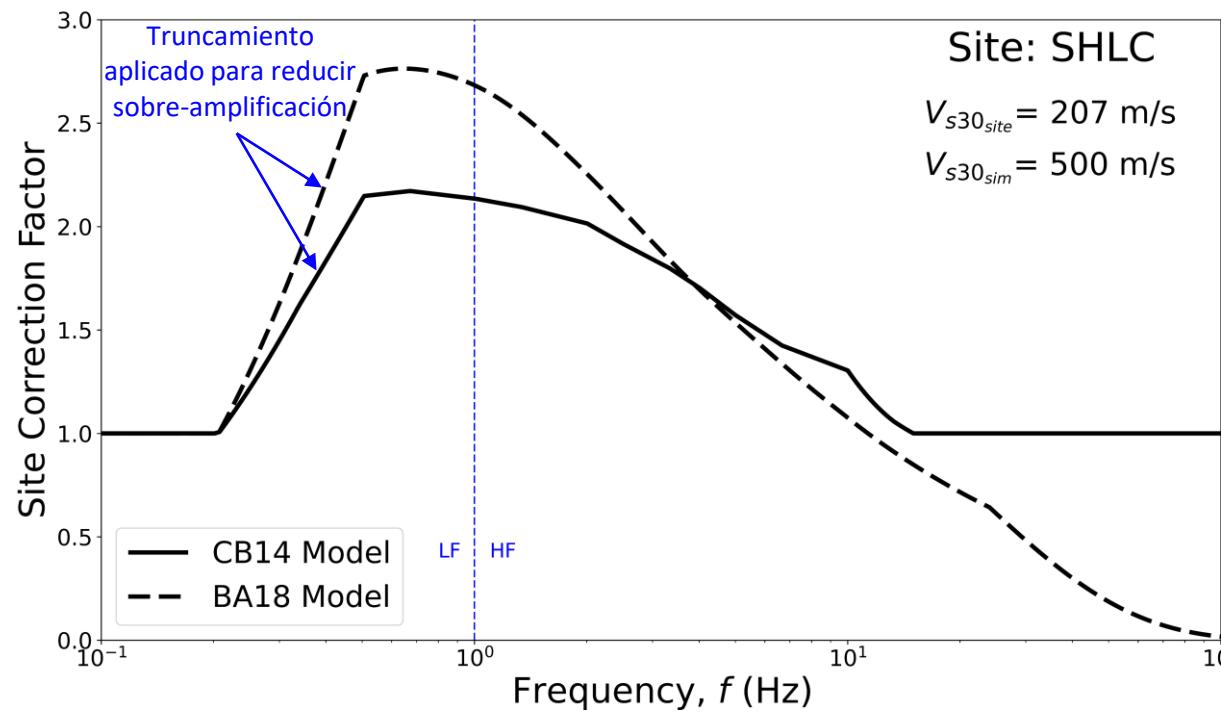
# Enfoque Estándar (basado en Vs30) para capturar Efectos de Sitio



# Enfoque Estándar (basado en Vs30) para capturar Efectos de Sitio

$$Factor = \frac{F(V_{s30_{site}})}{F(V_{s30_{sim}})}$$

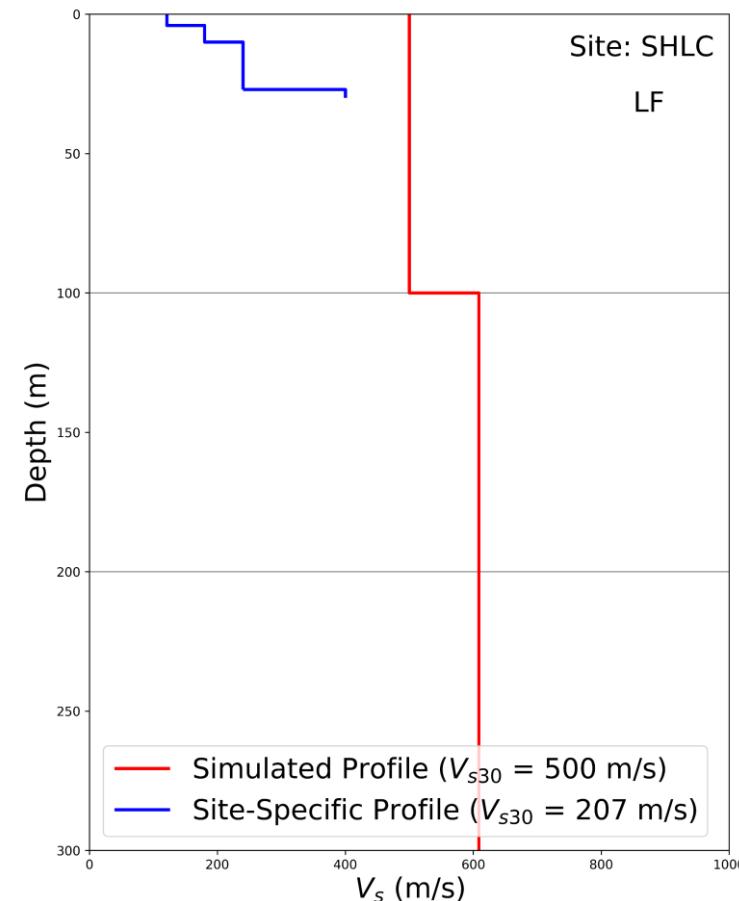
Término de Amplificación de Sitio obtenido de Modelo Empírico



## Limitaciones:

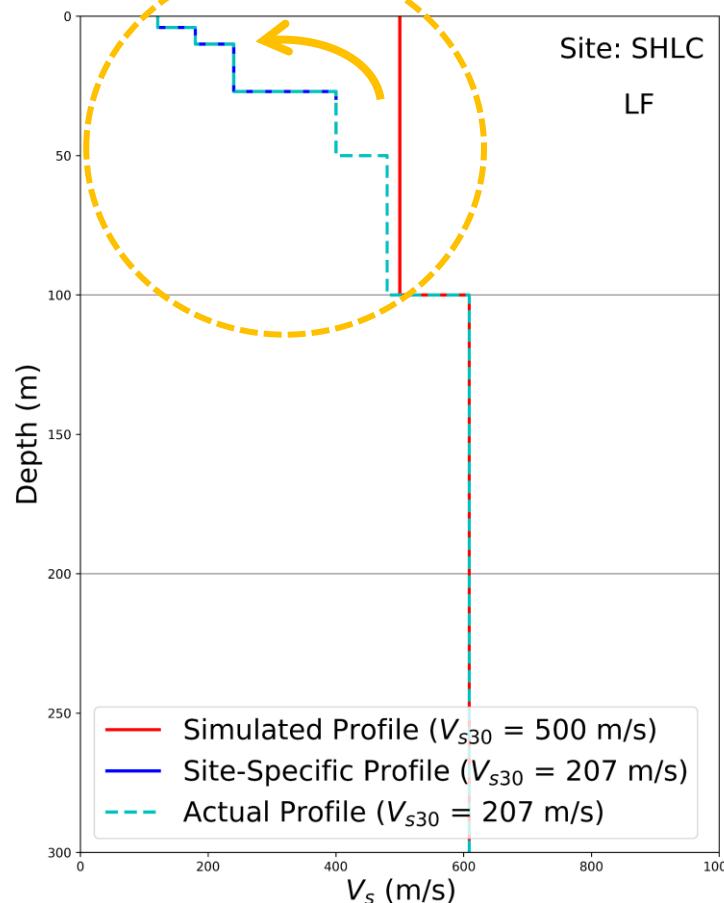
- Basado en  $V_{s30} \rightarrow$  Ergódico
- Sobre-amplificación a bajas frecuencias (de la Torre et al., 2020; Lee et al., 2020)

# Enfoque Estándar (basado en Vs30) para capturar Efectos de Sitio



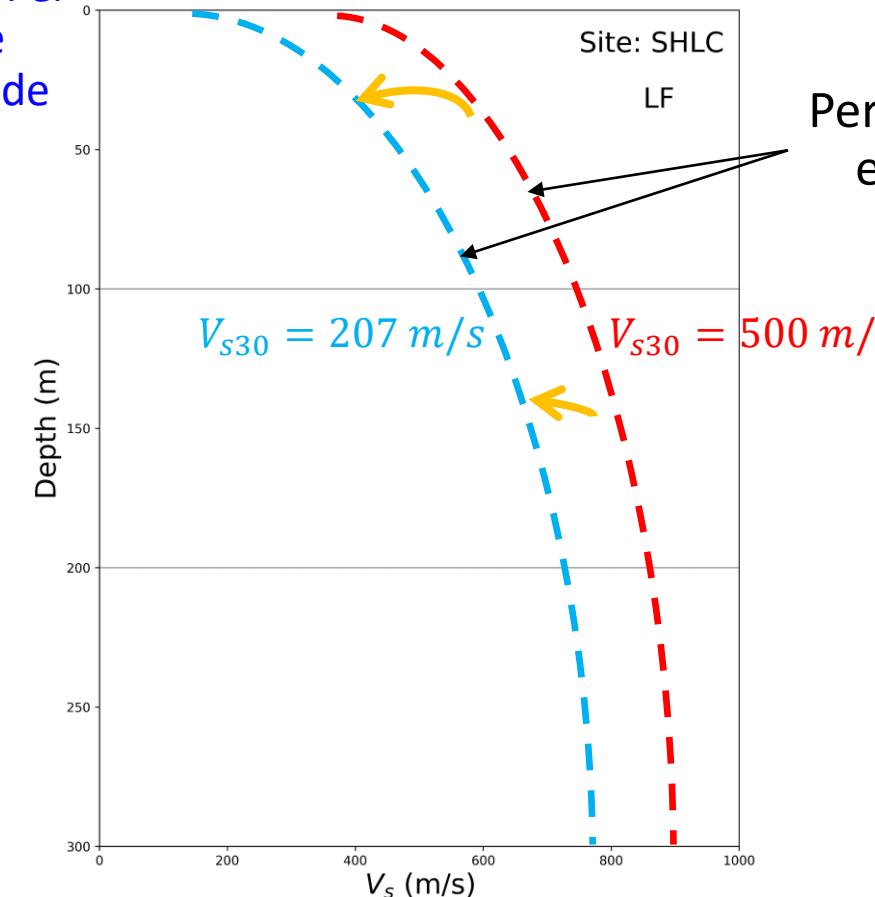
# Enfoque Estándar (basado en Vs30) para capturar Efectos de Sitio

Efectos de sitio superficial  
a ser capturados



## Inconsistencia

Mapeada en el  
factor de  
corrección de  
sitio



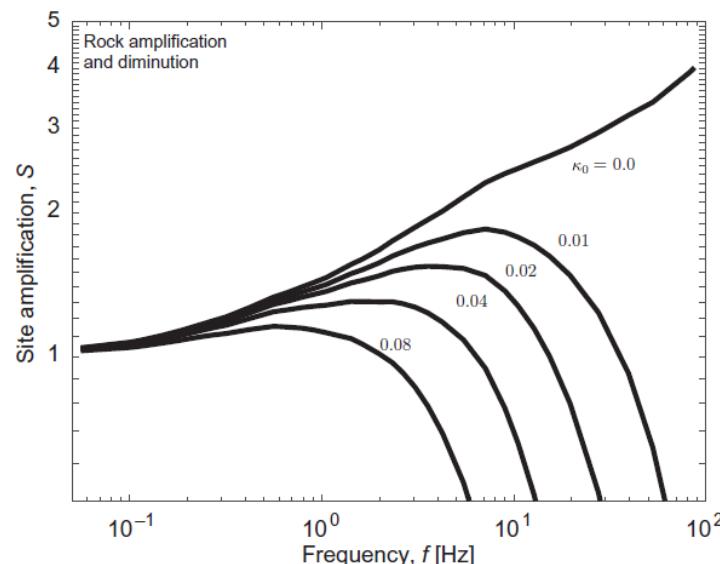
Perfiles implícitos  
en el Modelo  
Empírico

# Enfoque Alternativo 1: Método SRI (Square-Root Impedance)

$$\text{Respuesta de Sitio} = \sqrt{\frac{\rho_R V_R}{\bar{\rho} \bar{V}}} \times \exp(-\pi f \kappa_0)$$

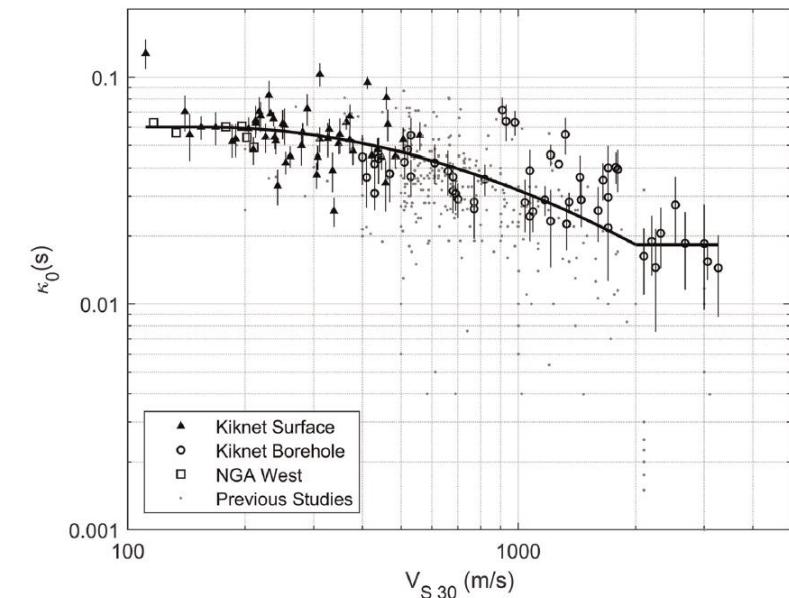
Efectos de  
Impedancia      Efectos de  
Atenuación

$\kappa_0$  es el parámetro de atenuación de sitio y domina comportamiento a altas frecuencias



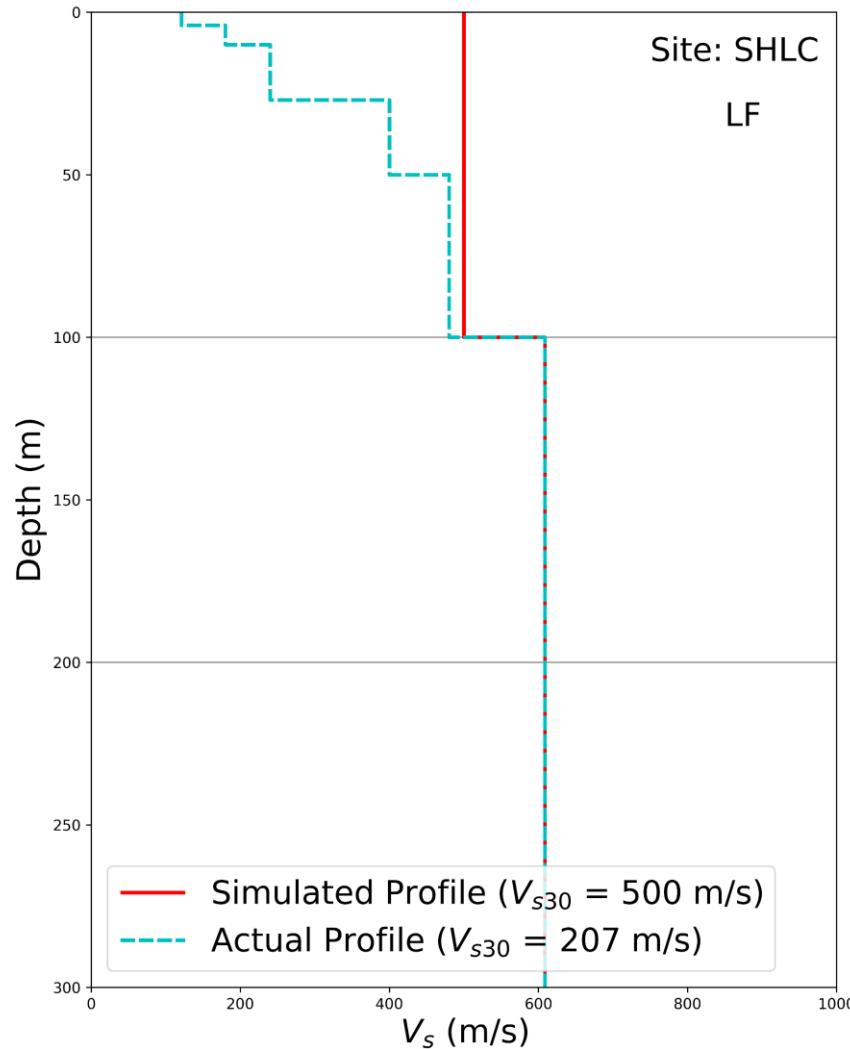
Baker et al. (2021)

$\bar{\rho}$  y  $\bar{V}$  se calculan para cada frecuencia, considerando una profundidad equivalente a un cuarto de la longitud de onda de la frecuencia en cuestión

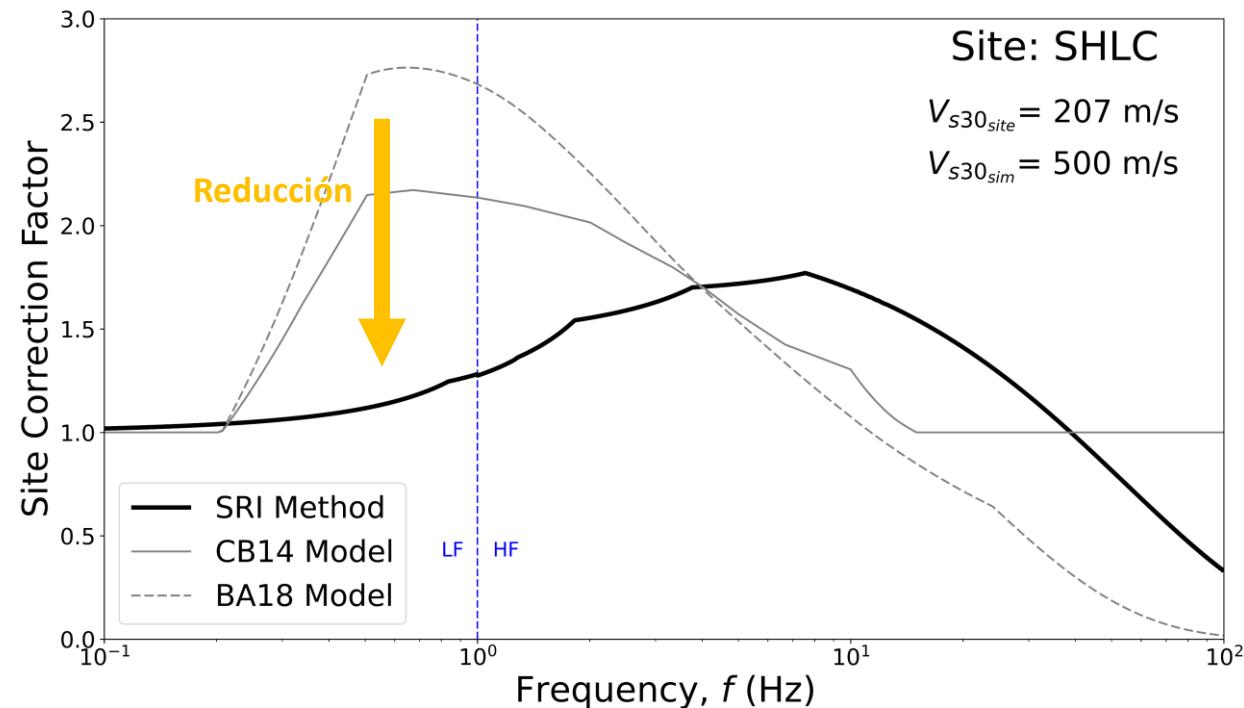


Xu et al. (2020)

# Enfoque Alternativo 1: Método SRI (Square-Root Impedance)

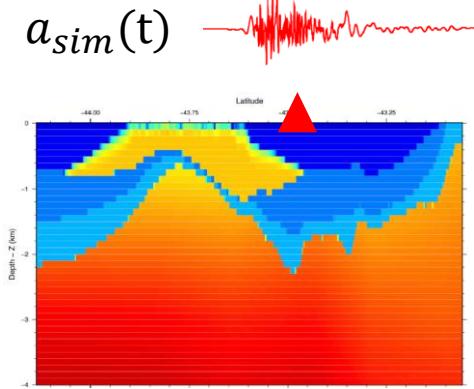


$$\text{Factor} = \frac{\sqrt{\frac{\rho_R V_R}{\bar{\rho}_{actual} \bar{V}_{actual}} \times \exp(-\pi f \kappa_0_{actual})}}{\sqrt{\frac{\rho_R V_R}{\bar{\rho}_{sim} \bar{V}_{sim}} \times \exp(-\pi f \kappa_0_{sim})}}$$

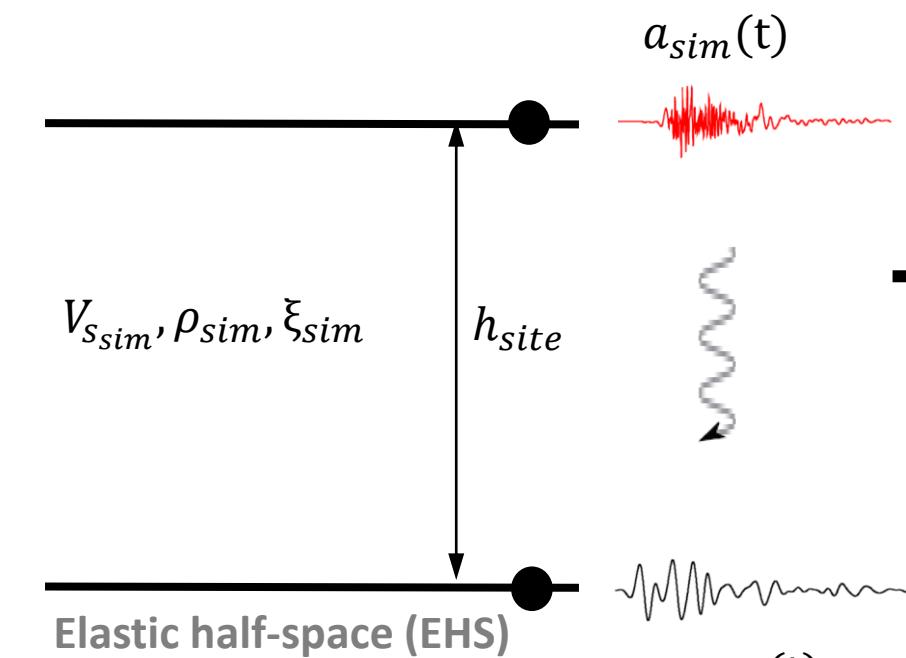


## Enfoque Alternativo 2: Análisis de Respuesta de Sitio 1D

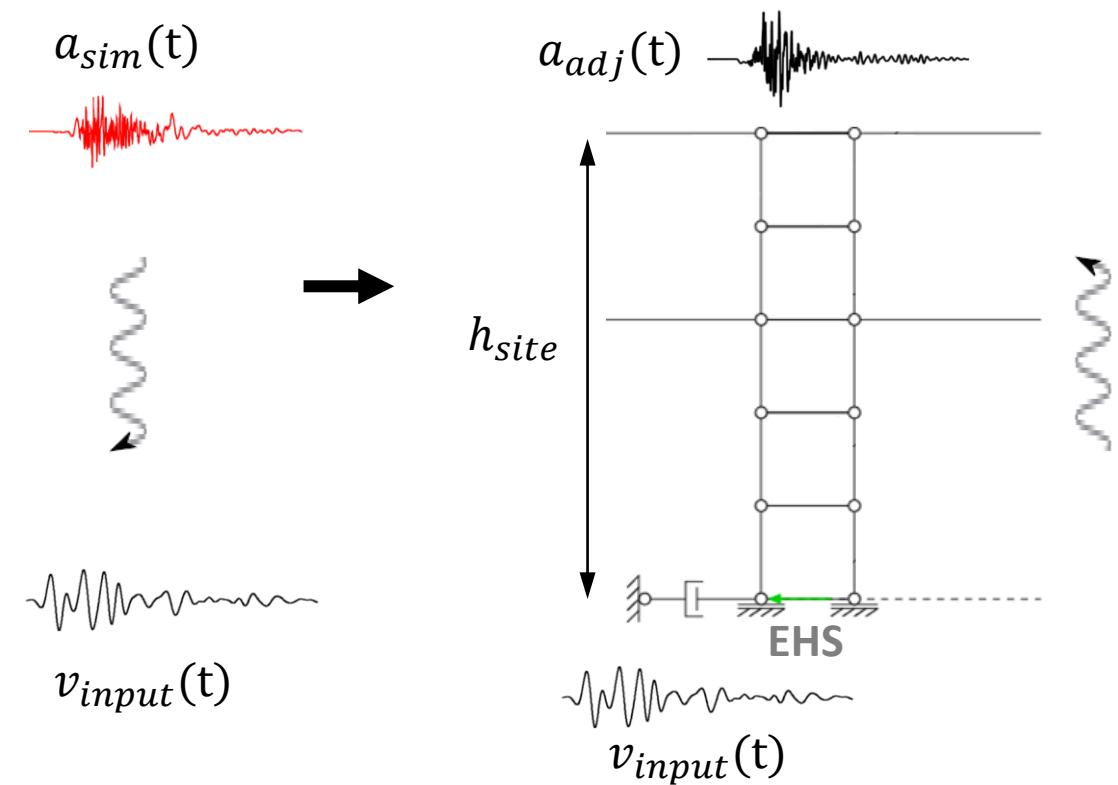
1 Obtener el movimiento sísmico simulado



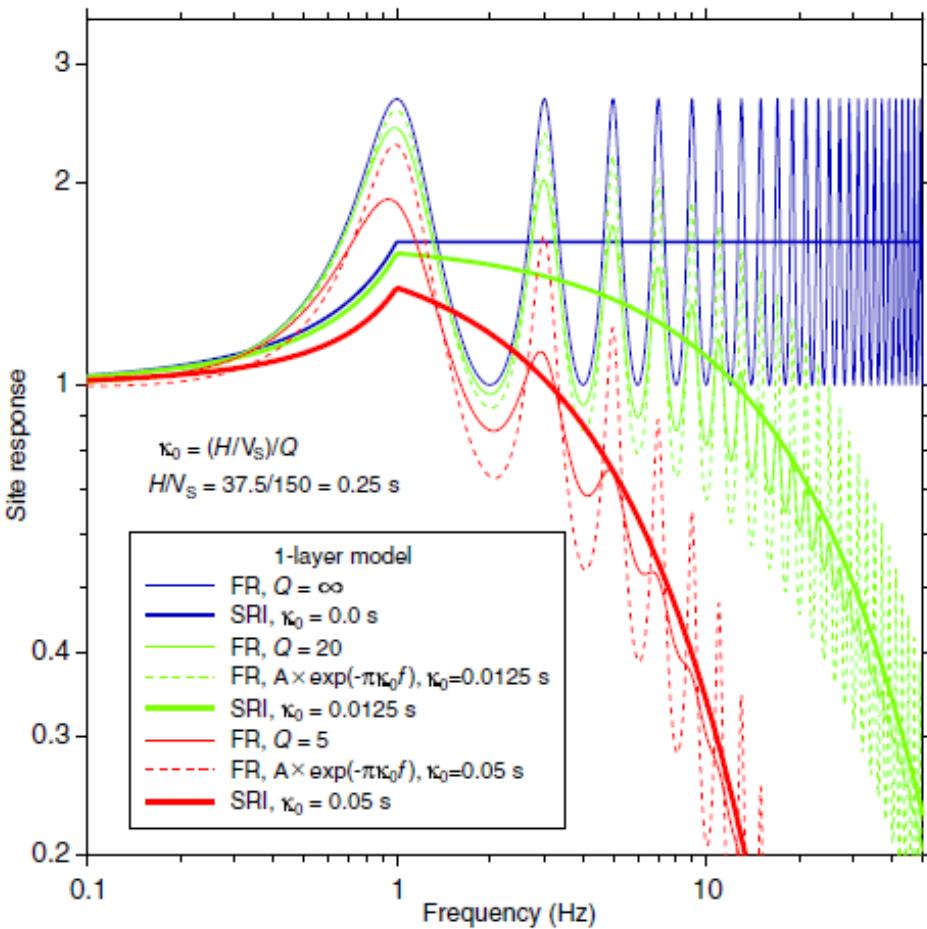
2 Realizar deconvolución



3 Realizar Análisis de Respuesta de Sitio 1D



# Método SRI vs Análisis de Respuesta de Sitio 1D

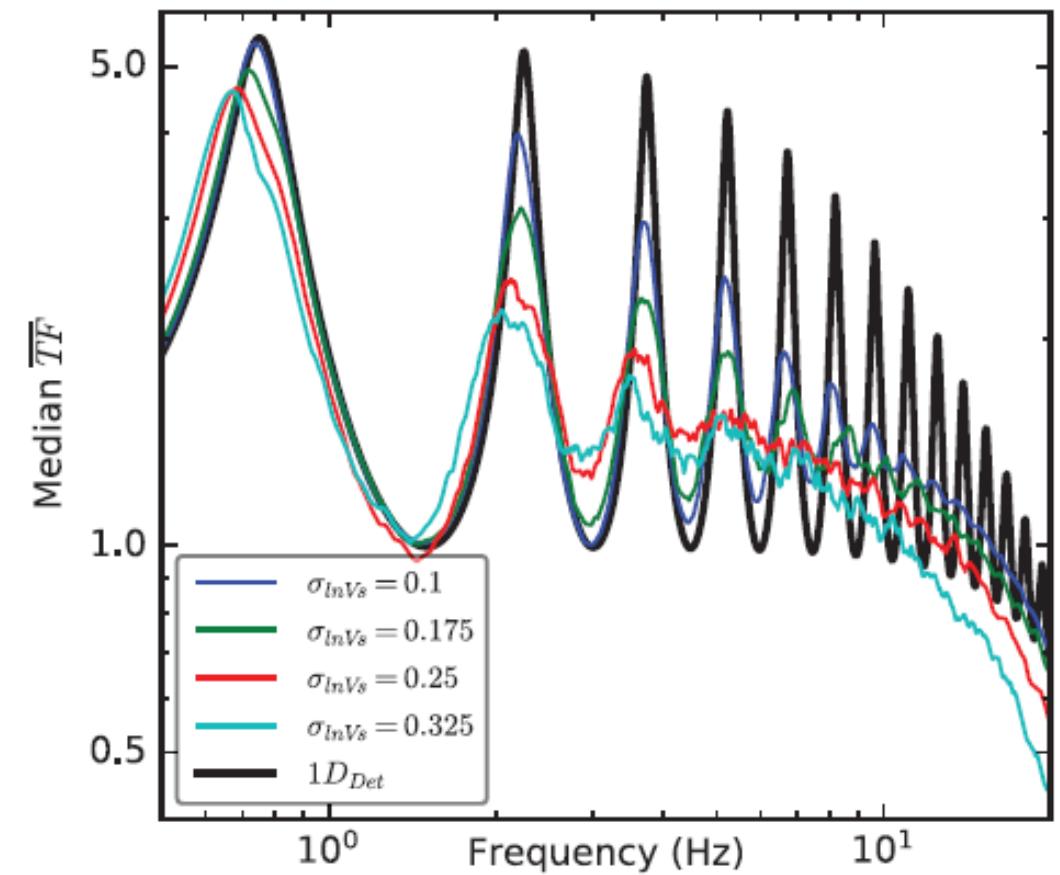
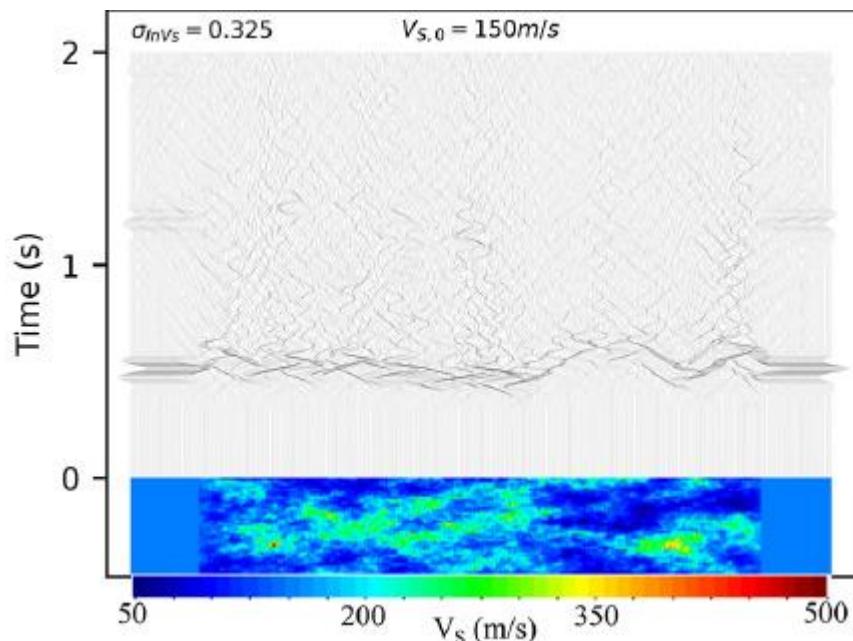
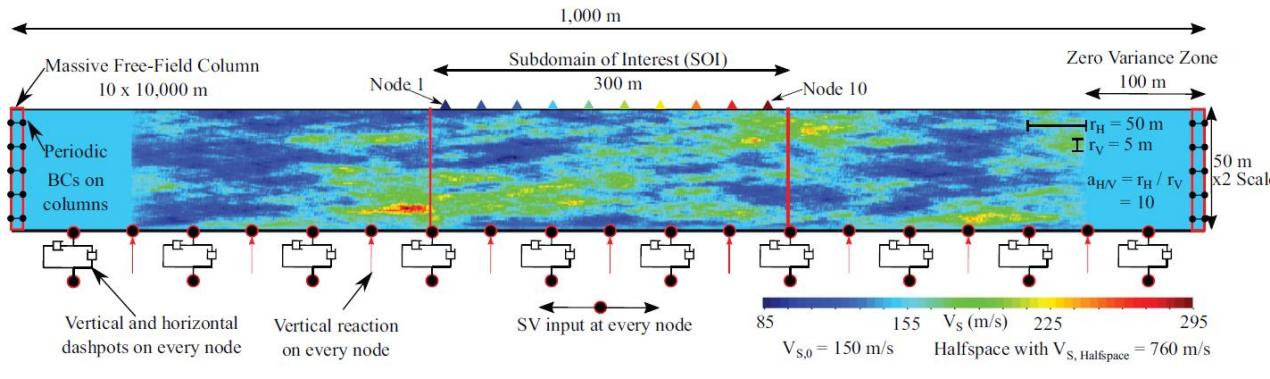


- Análisis de Respuesta de Sitio 1D captura efectos de impedancia, resonancia, y atenuación
- Método SRI solo captura efectos de impedancia y atenuación
- La existencia de los efectos de resonancia depende fuertemente de la idoneidad de del supuesto de propagación 1D

Boore (2013)

# Limitaciones del Análisis de Respuesta de Sitio 1D

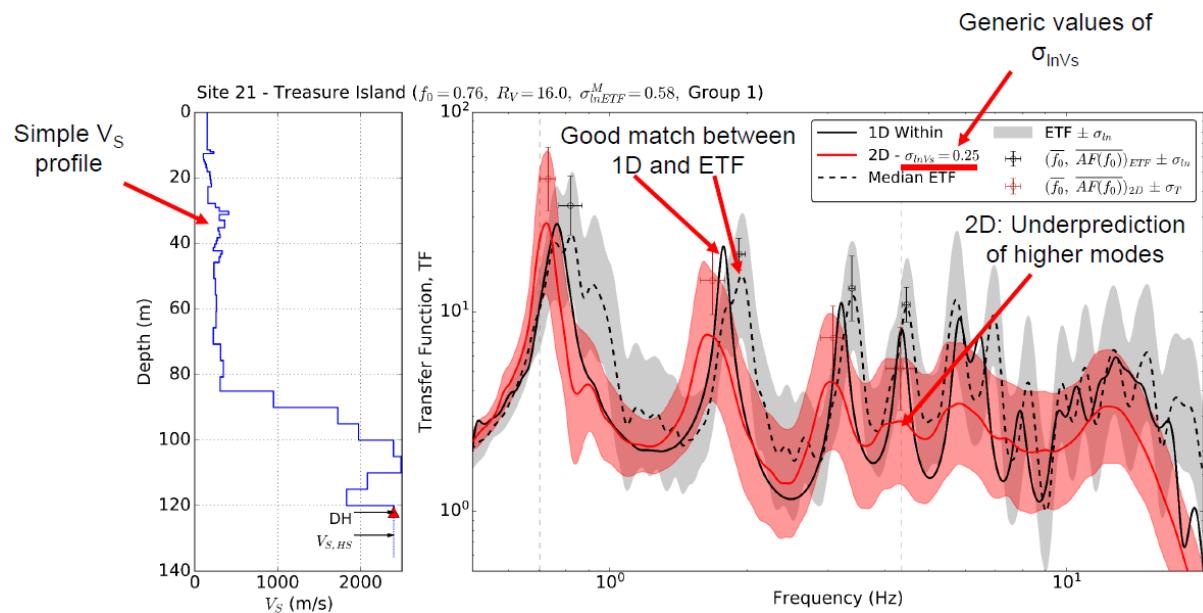
Heterogeneidad definida utilizando un modelo de campos aleatorios correlacionados espacialmente



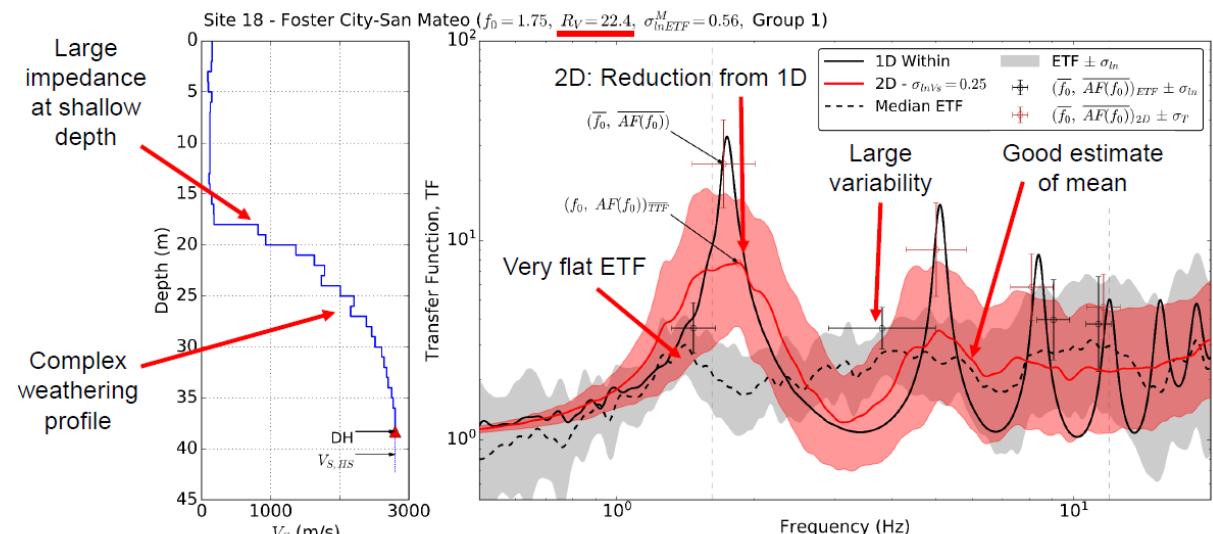
de la Torre et al. (2022a)

# Limitaciones del Análisis de Respuesta de Sitio 1D

Sitio 1D

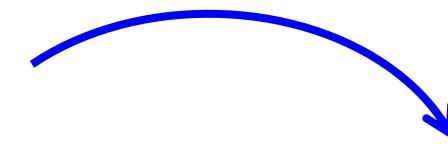


Sitio con fuertes efectos 2D/3D



# Pregunta de Investigación

¿Bajo qué condiciones podemos mejorar las predicciones al utilizar métodos que incorporen más información sitio-específica?



## Validación

Enfoque Estándar  
(basado en Vs30)

Modelo  
Empírico de  
Amplificación

Enfoque Alternativo 1

Método  
SRI

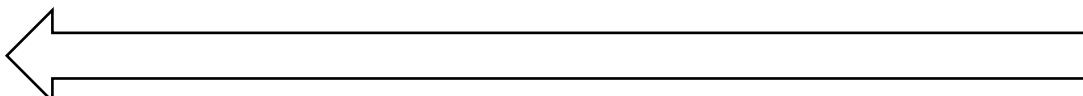
Enfoque Alternativo 2

Análisis de  
Respuesta de  
Sitio 1D

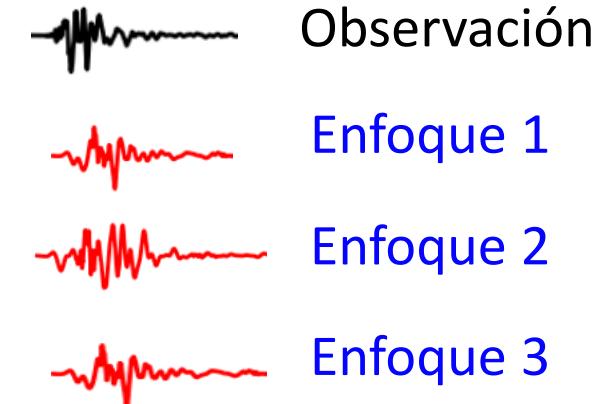
Ajuste en el dominio de la  
frecuencia

Ajuste en el  
dominio del tiempo

Menos sitio-  
específico



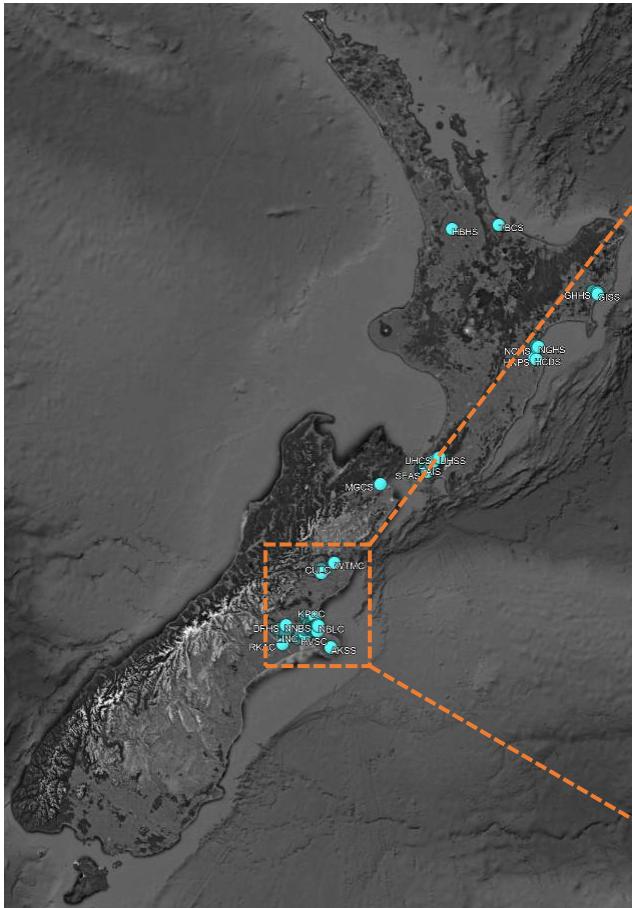
Descansa en un  
supuesto idealista



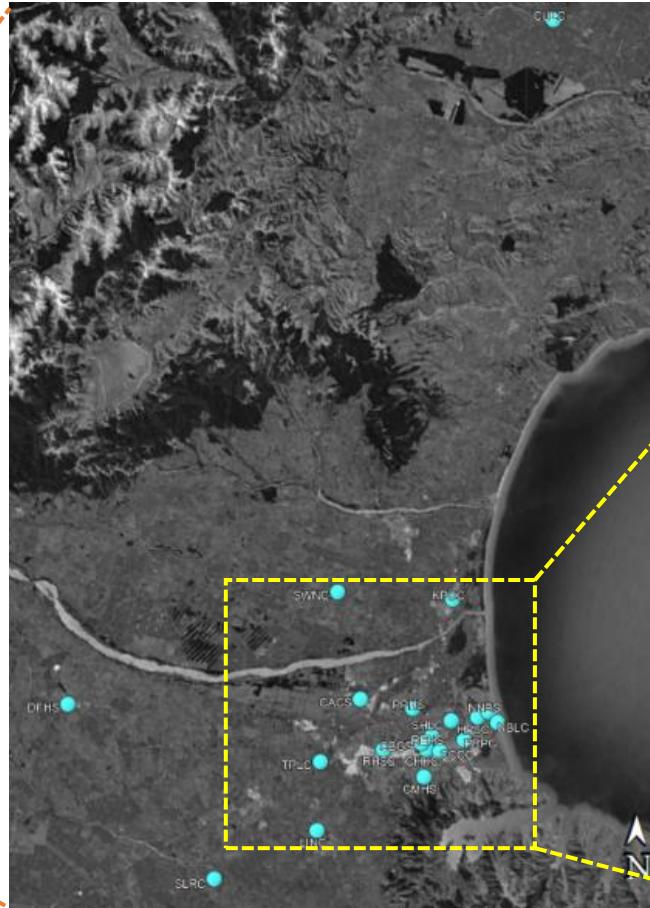
## 4. Estudio de Validación en Curso

# Sitios

Área Total de Estudio  
Nueva Zelanda

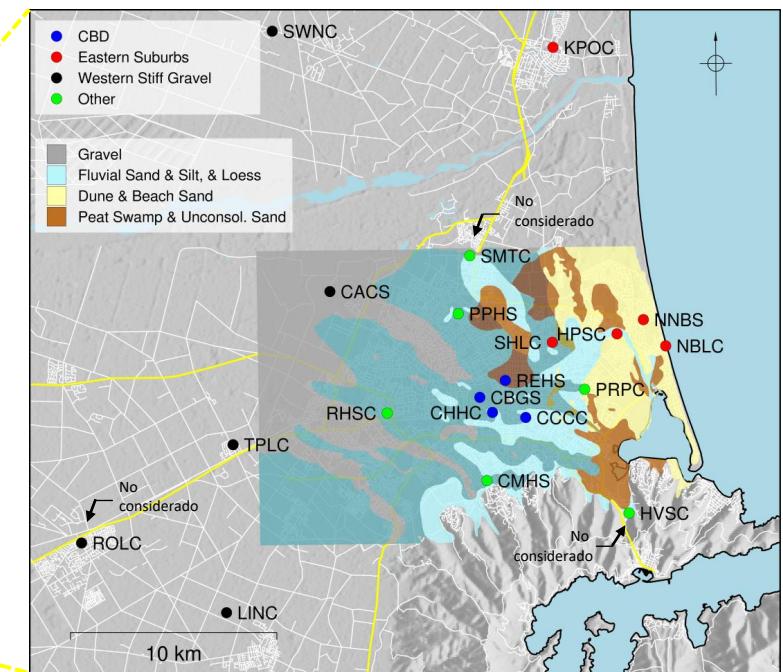
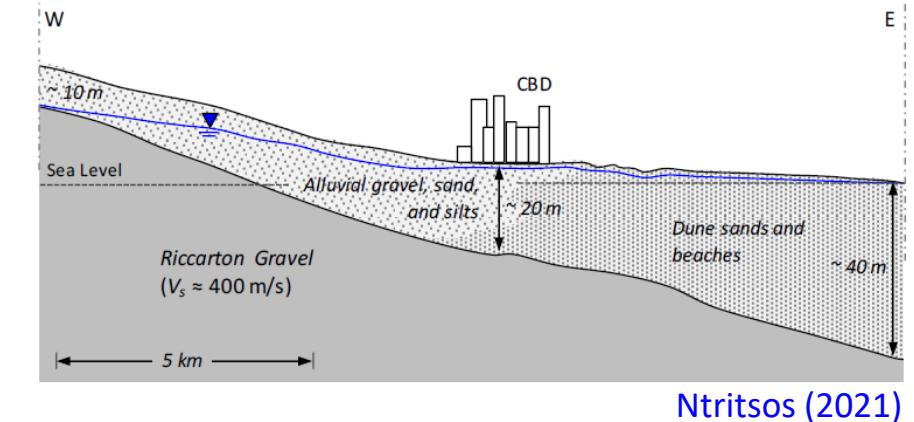


Fase actual del estudio  
Región de Canterbury | 20 sitios



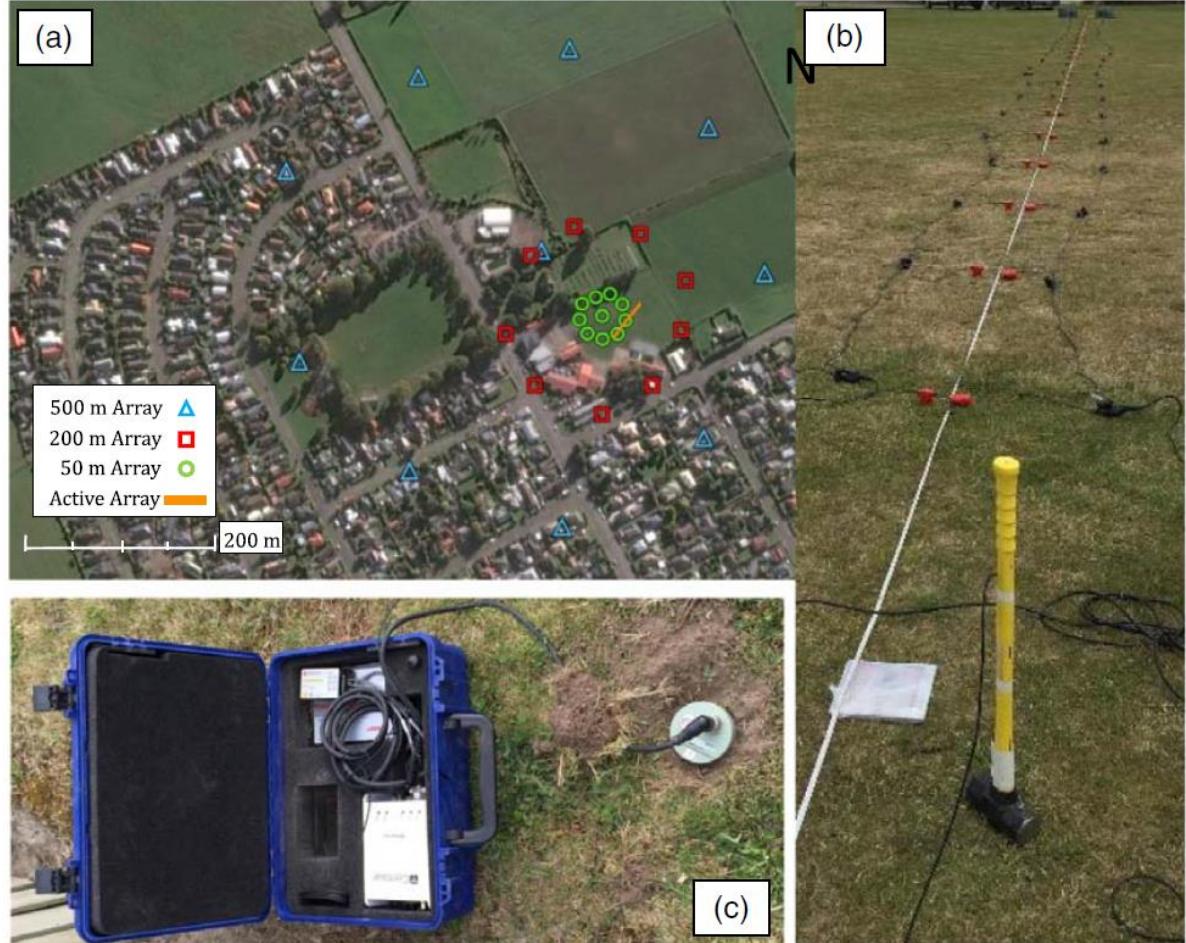
- Estación de Movimiento Fuerte
- Al menos un perfil de  $V_s$

- $\geq 3$  registros



$$154 \text{ m/s} \leq V_{s30} \leq 552 \text{ m/s}$$

# Caracterización Geotécnica

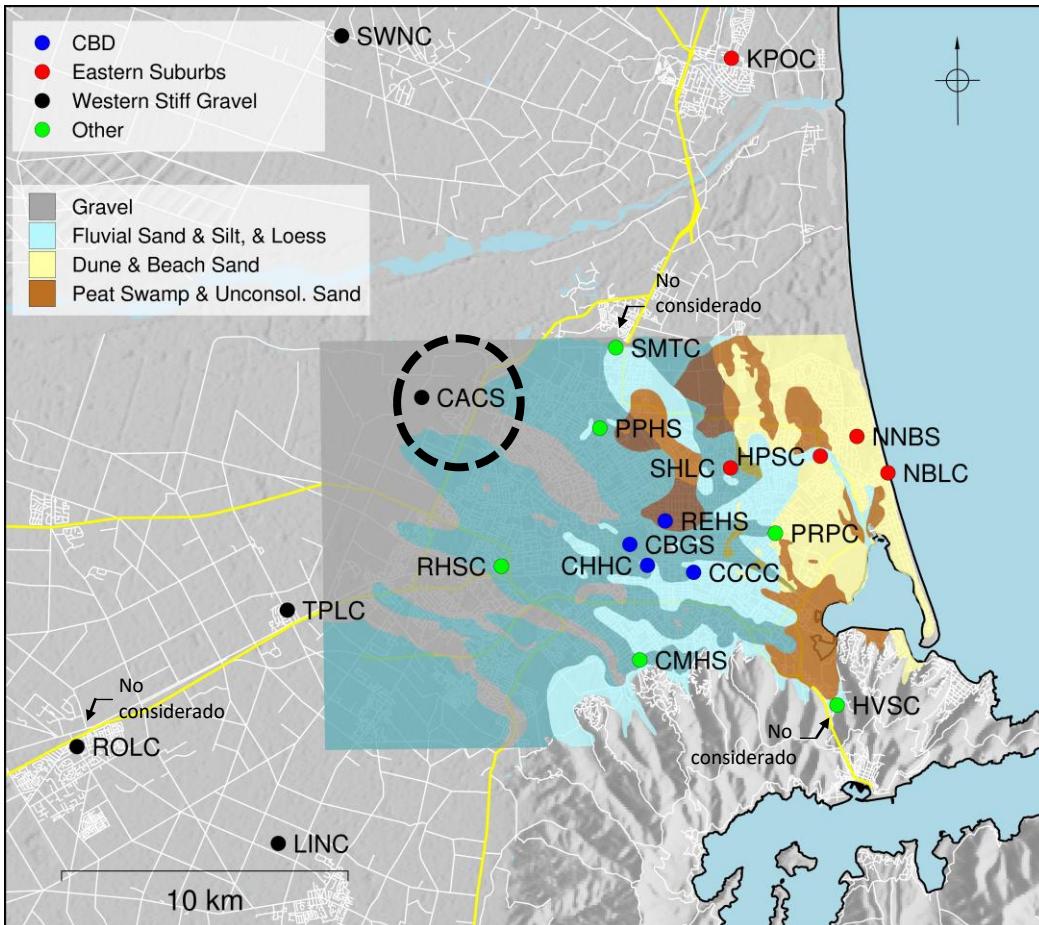


Deschenes et al. (2018)



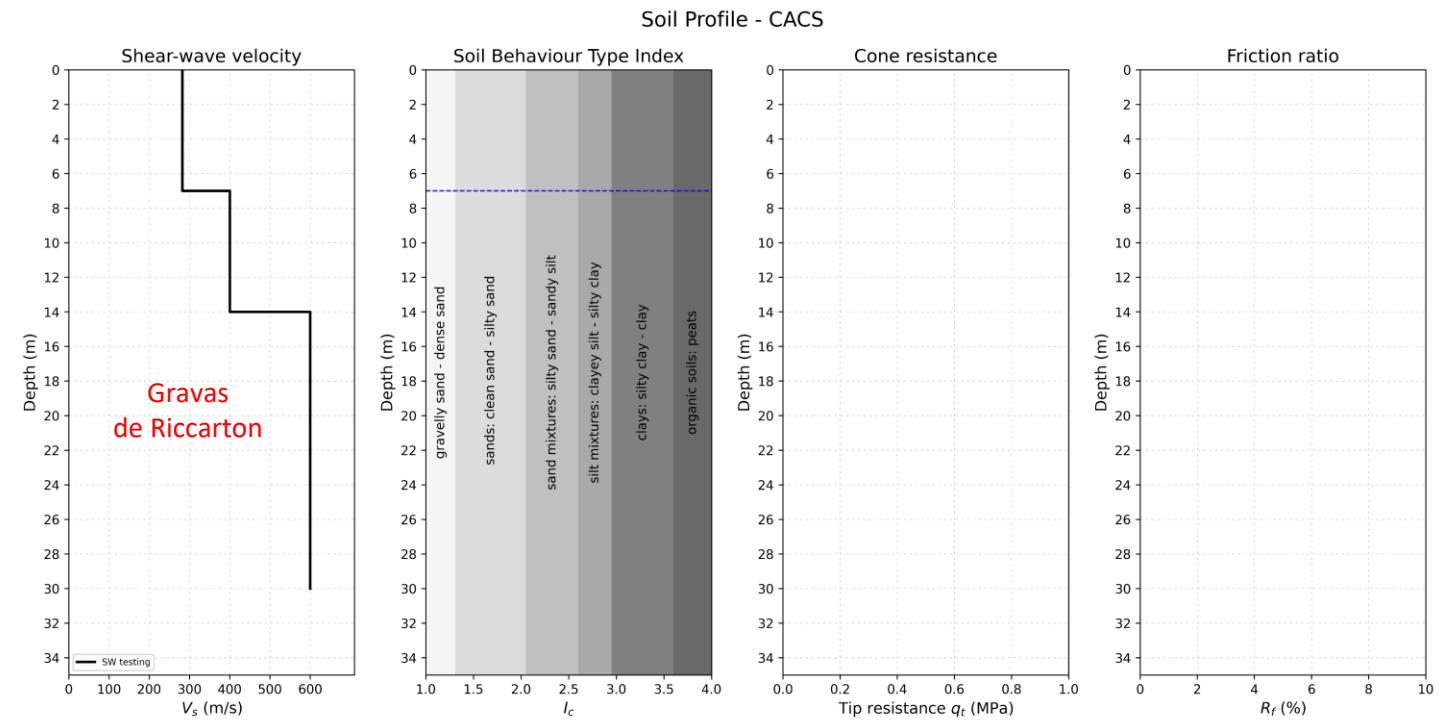
Wotherspoon et al. (2015)

# Sitios

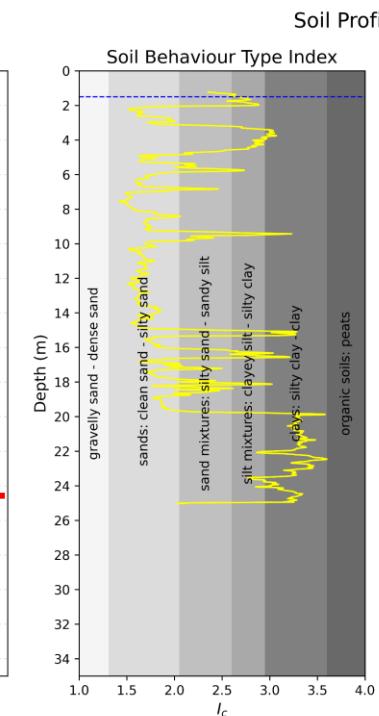
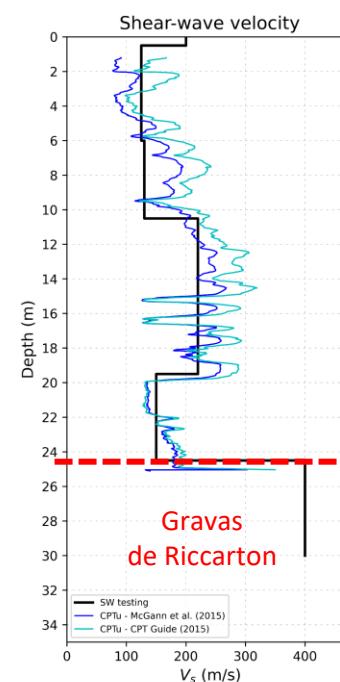
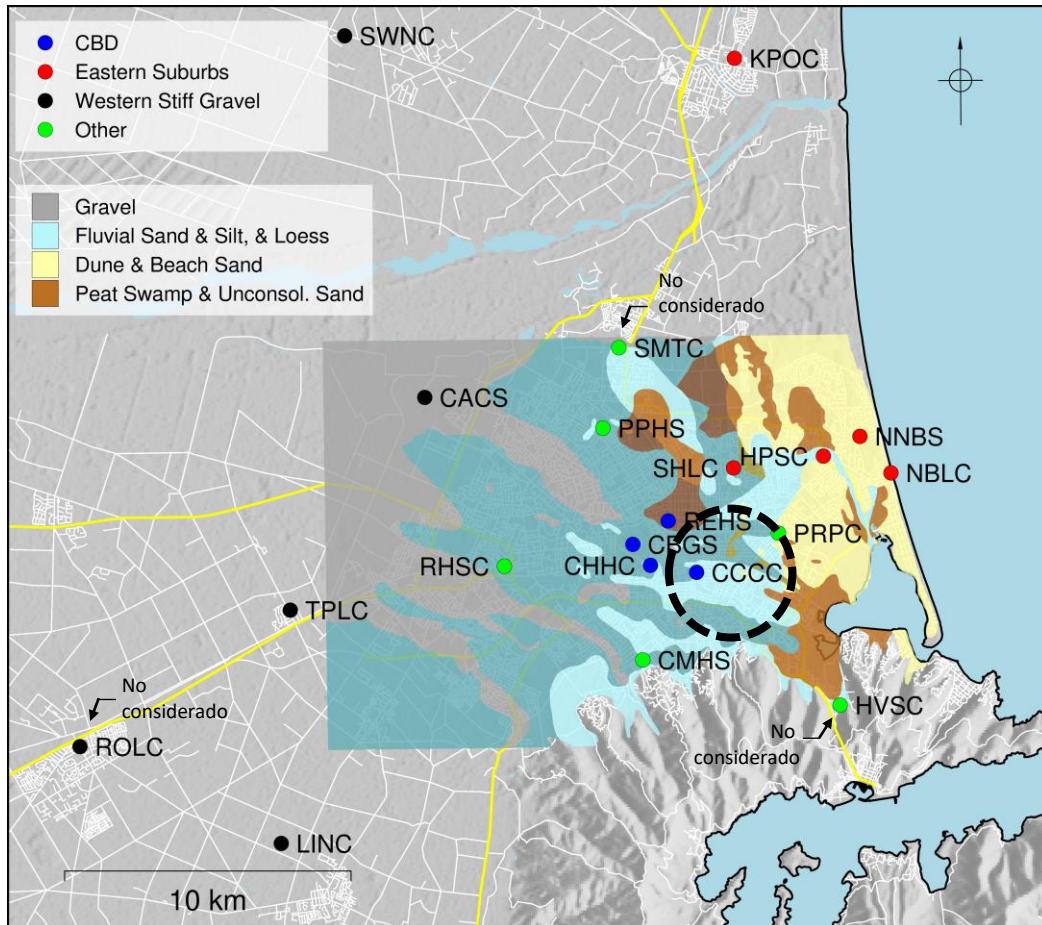


## CACS

$$V_{s30} = 435 \frac{m}{s}$$

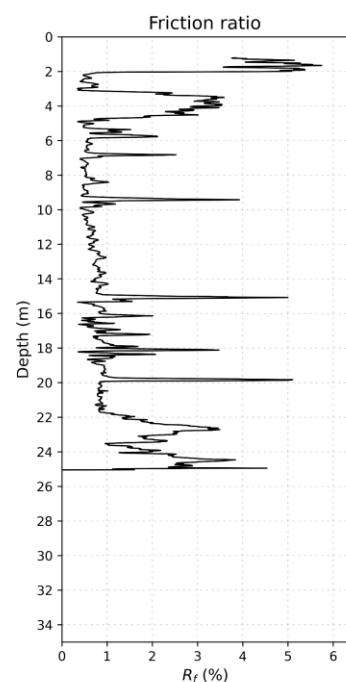
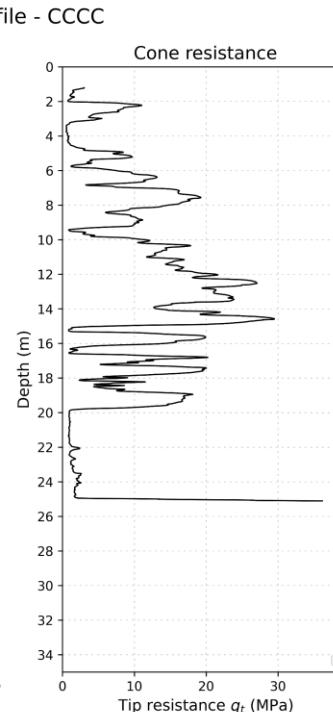


# Sitios

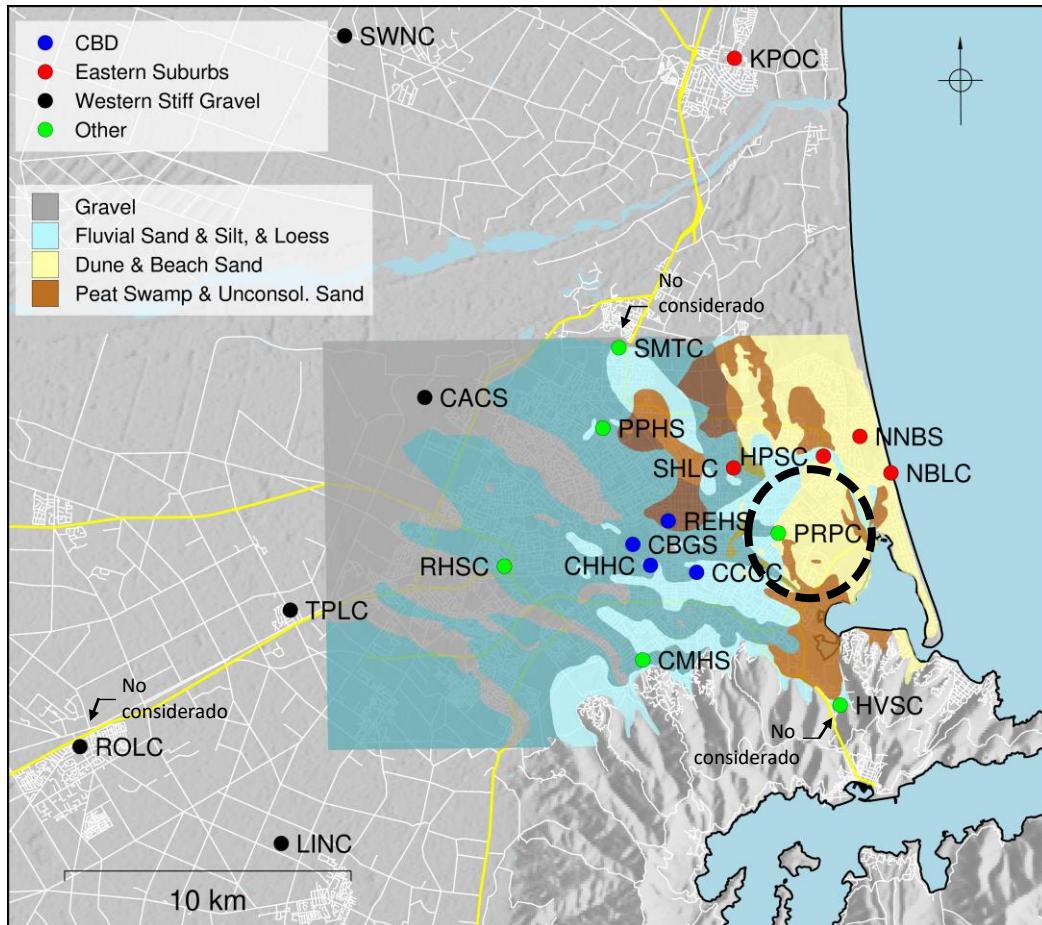


CCCC

$$V_{s30} = 176 \frac{m}{s}$$

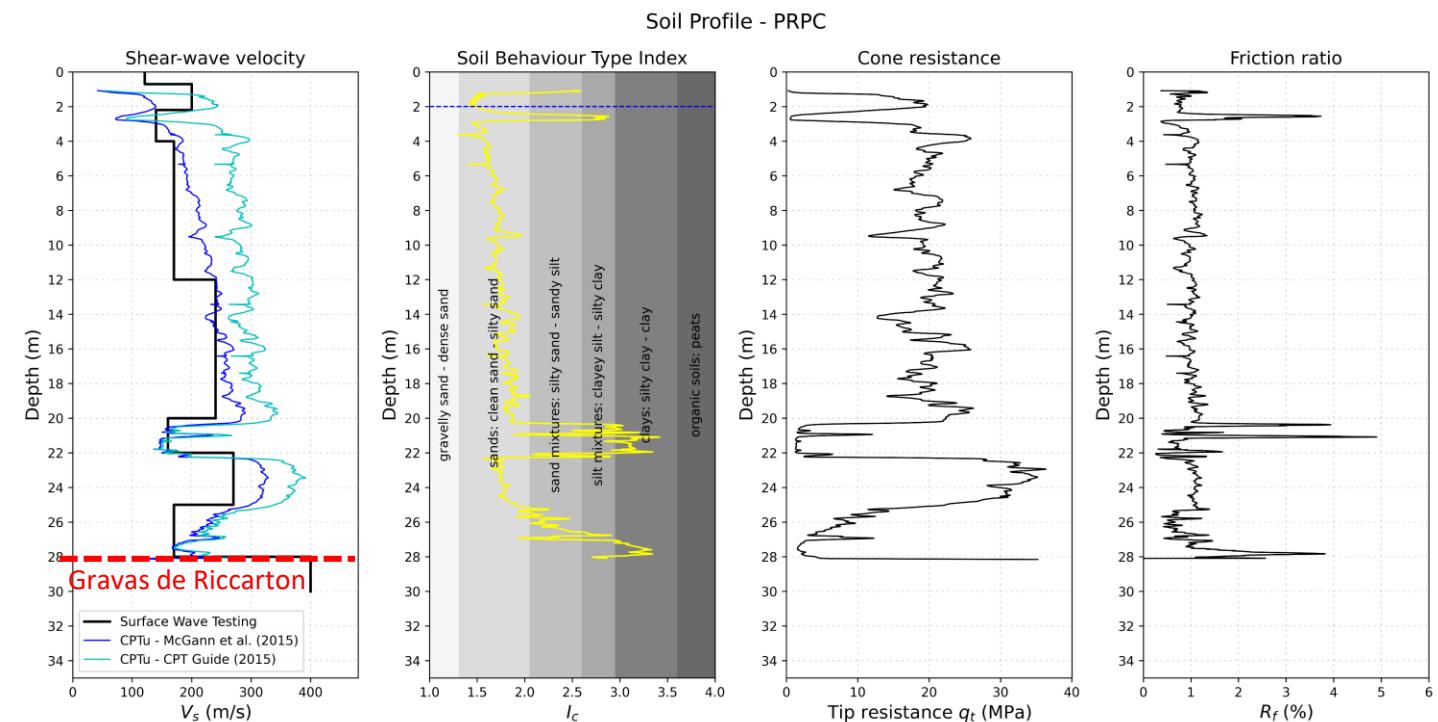


# Sitios



## PRPC

$$V_{s30} = 196 \frac{m}{s}$$



# Terremotos y Registros

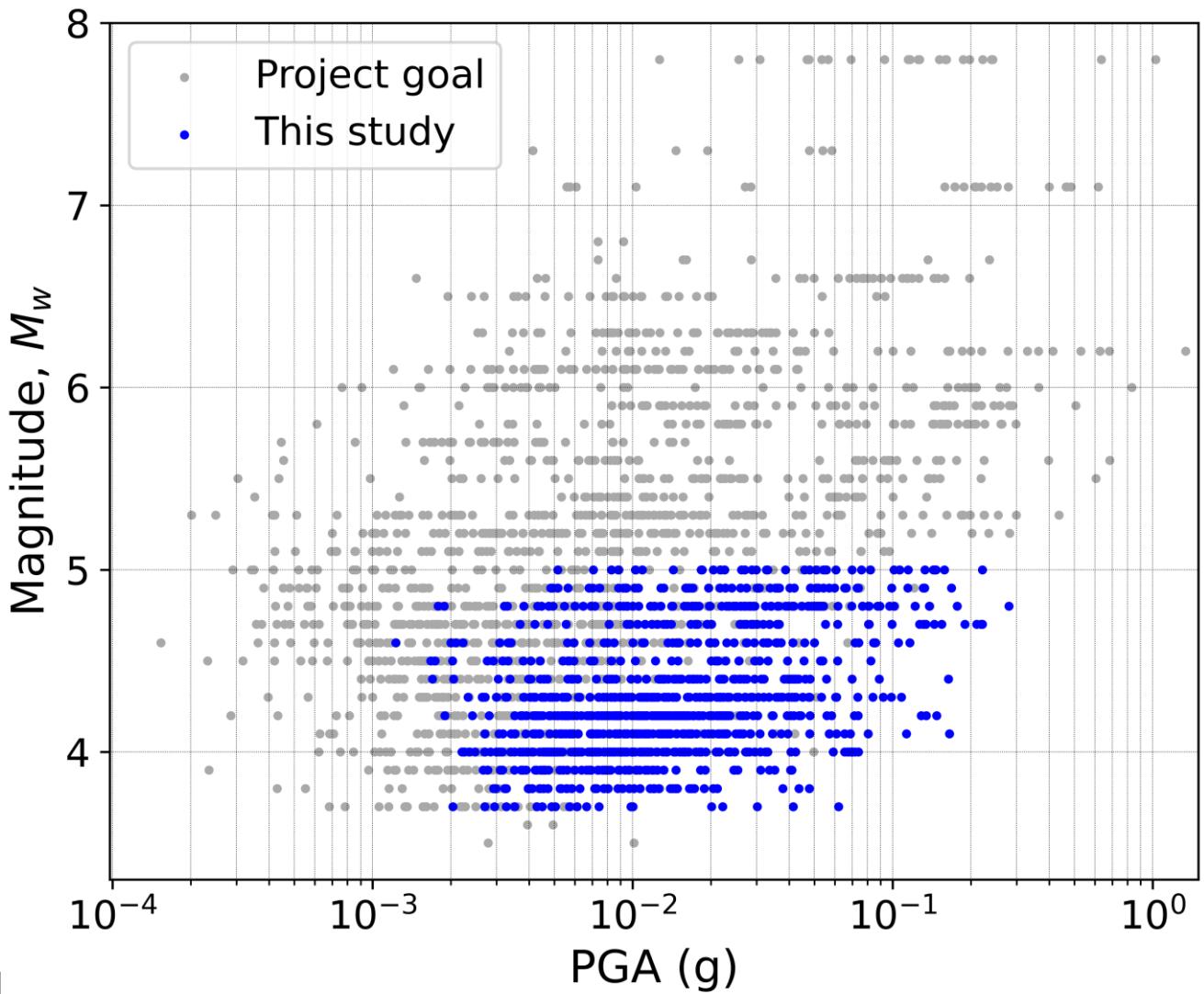
**Terremotos de Pequeña Magnitud**  
 $(3.5 \leq M_w \leq 5.0)$



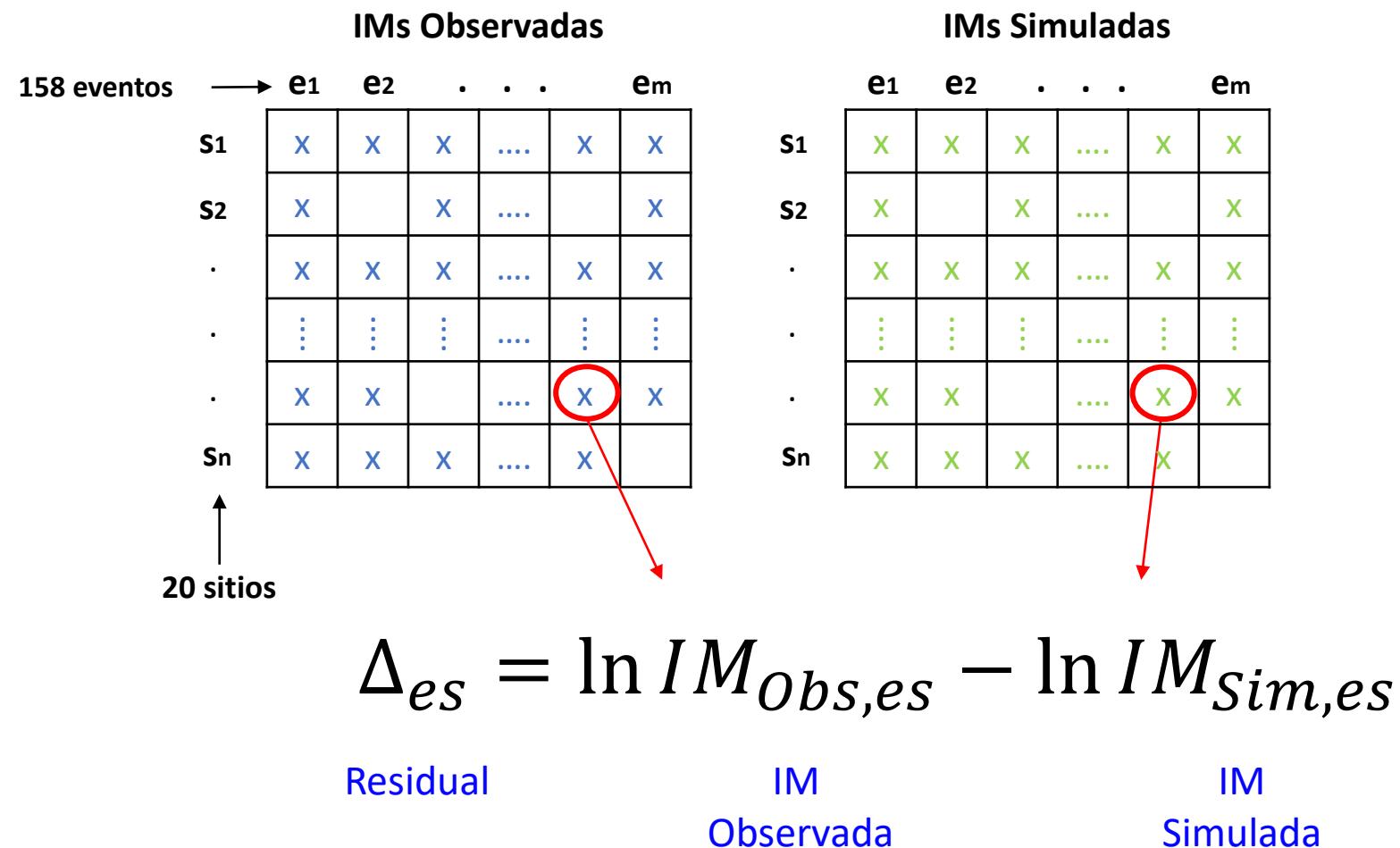
**158 Eventos Corticales**  
**1032 Registros**



Supuesto: Comportamiento Lineal



# Análisis Residual



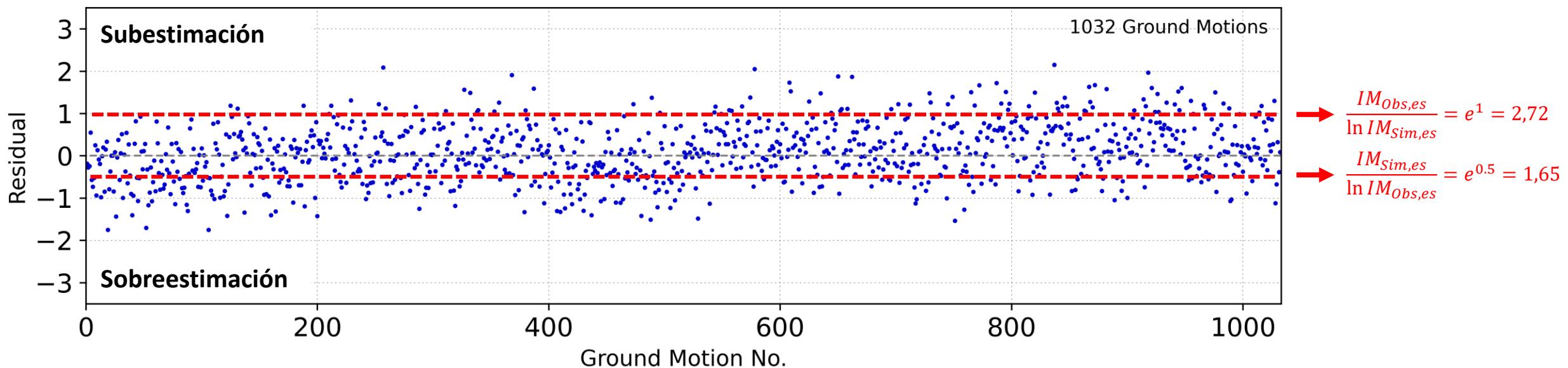
## Análisis Residual

$$\Delta_{es} = \ln IM_{Obs,es} - \ln IM_{Sim,es} \quad \rightarrow \quad e^{\Delta_{es}} = \frac{IM_{Obs,es}}{\ln IM_{Sim,es}}$$

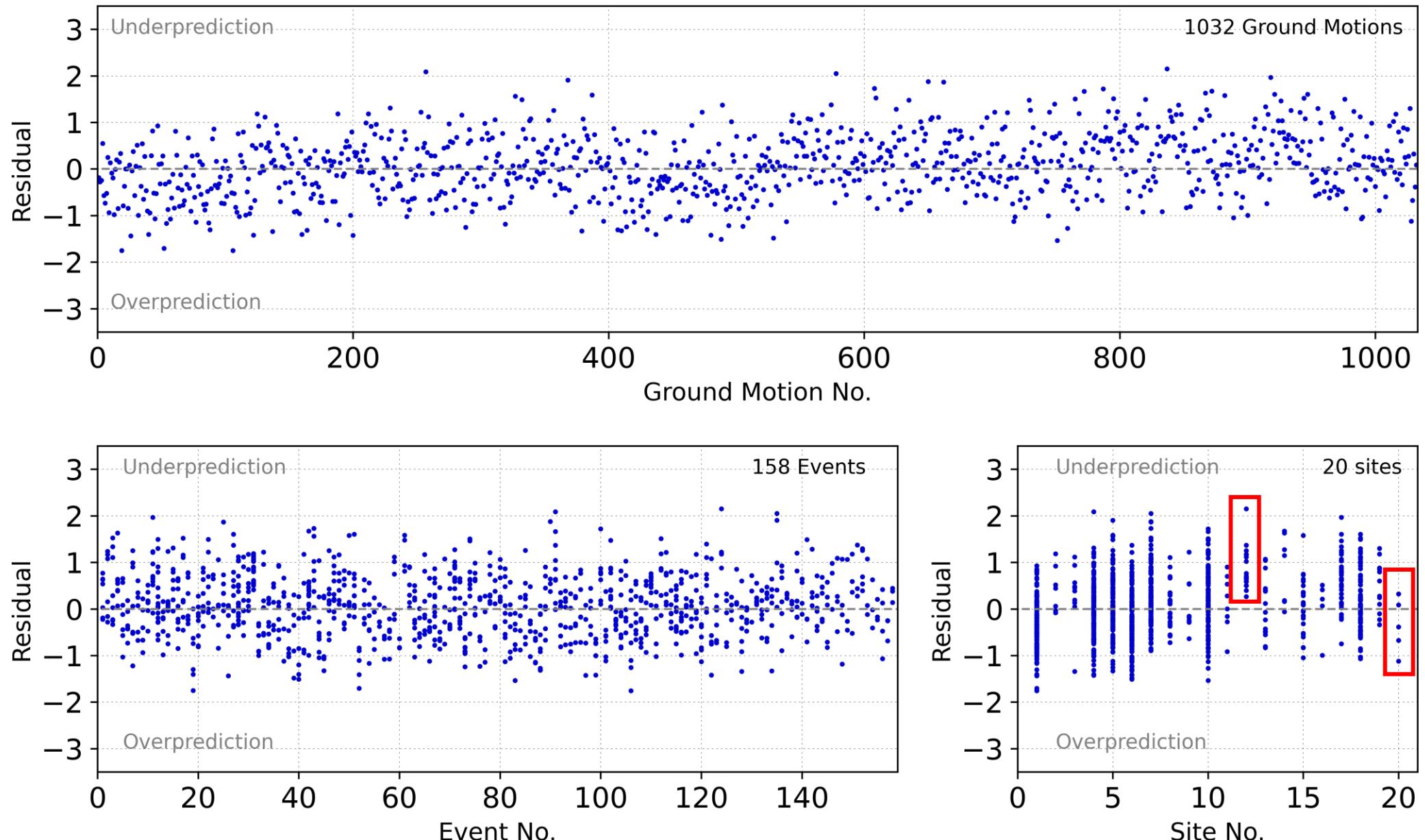
## Residual

# IM Observada

IM  
Simulada



# Análisis Residual



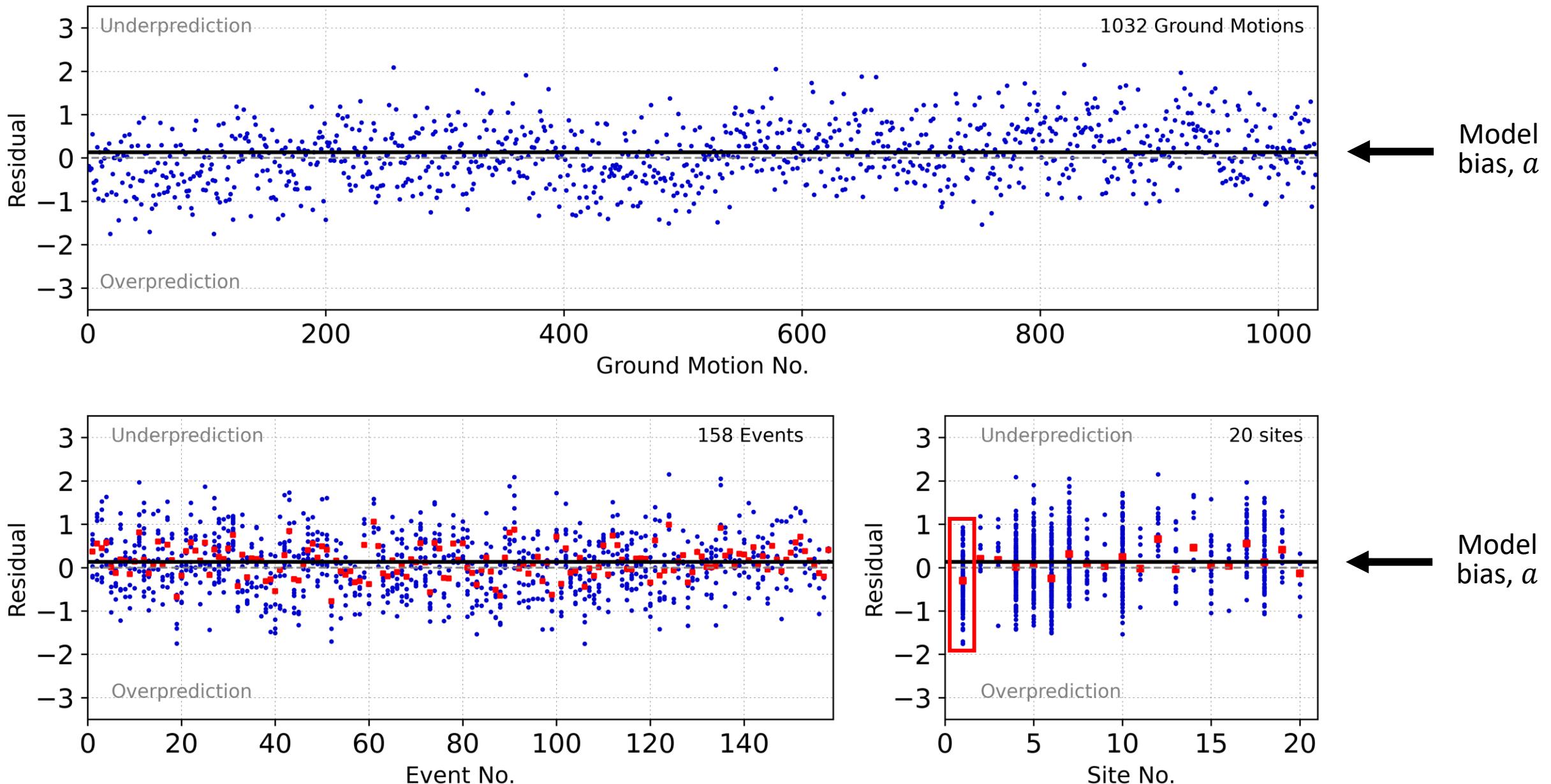
# Análisis Residual

## Partición del residual usando regresión de efectos mixtos

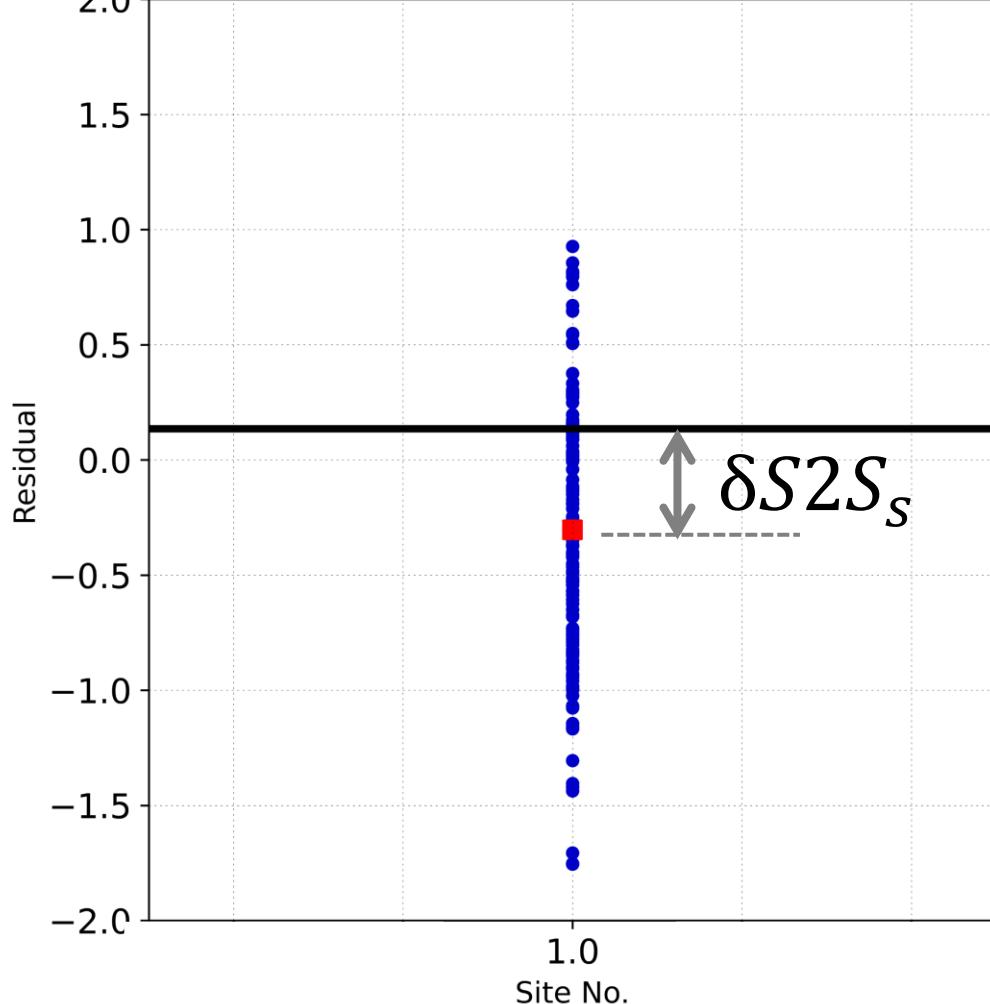
$$\Delta_{es} = \ln IM_{Obs,es} - \ln IM_{Sim,es} \rightarrow \Delta_{es} = \boxed{a} + \delta B_e + \delta S2S_s + \delta W_{es}^0$$

Residual Entre-Eventos  
 Residual Restante  
 Residual Sitio-a-Sitio  
 Sesgo del Modelo (Model Bias)  
 Diferencia sistemática entre las observaciones y las predicciones para un enfoque determinado

# Análisis Residual



# Análisis Residual



$$\Delta_{es} = a + \delta B_e + \boxed{\delta S2S_S} + \delta W_{es}^0$$

Residual Entre-Eventos

Sesgo del Modelo (Model Bias)

Residual Sitio-a-Sitio

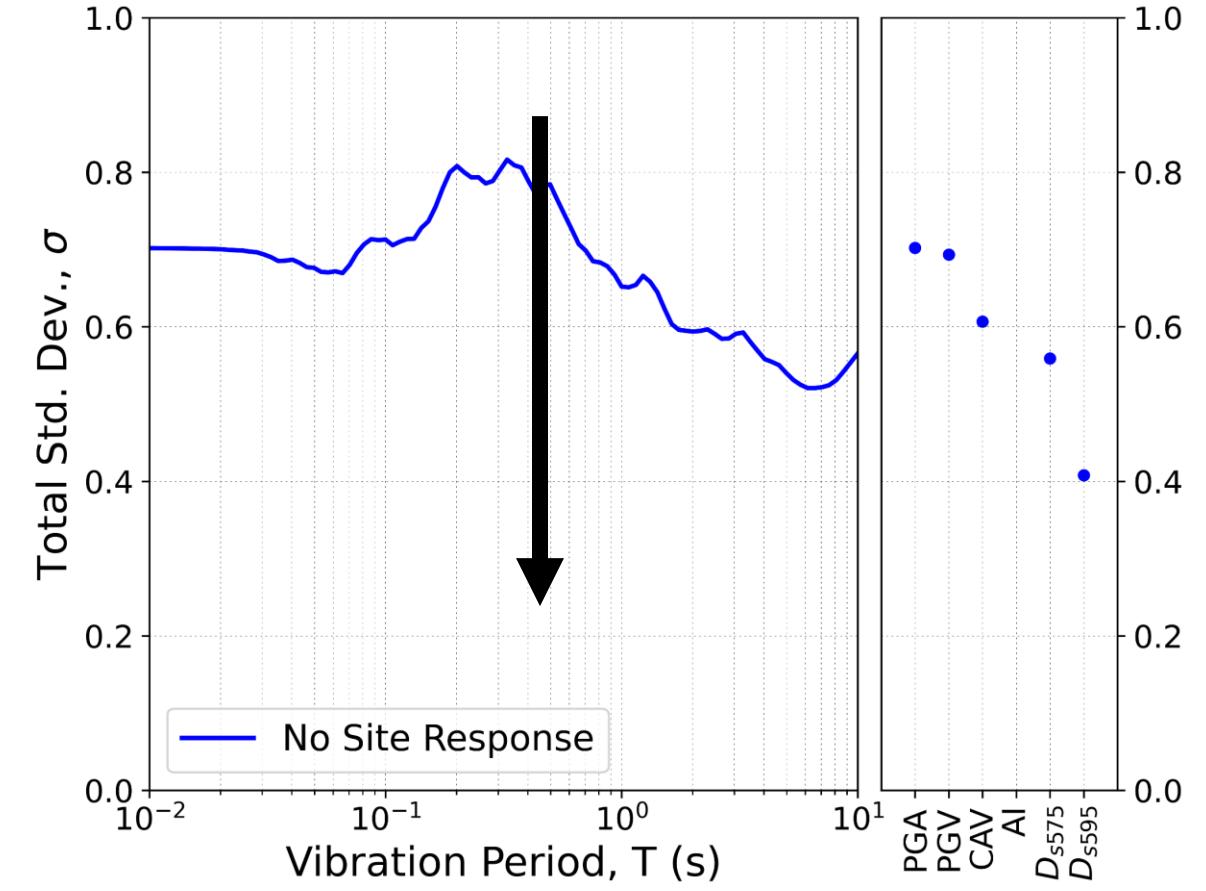
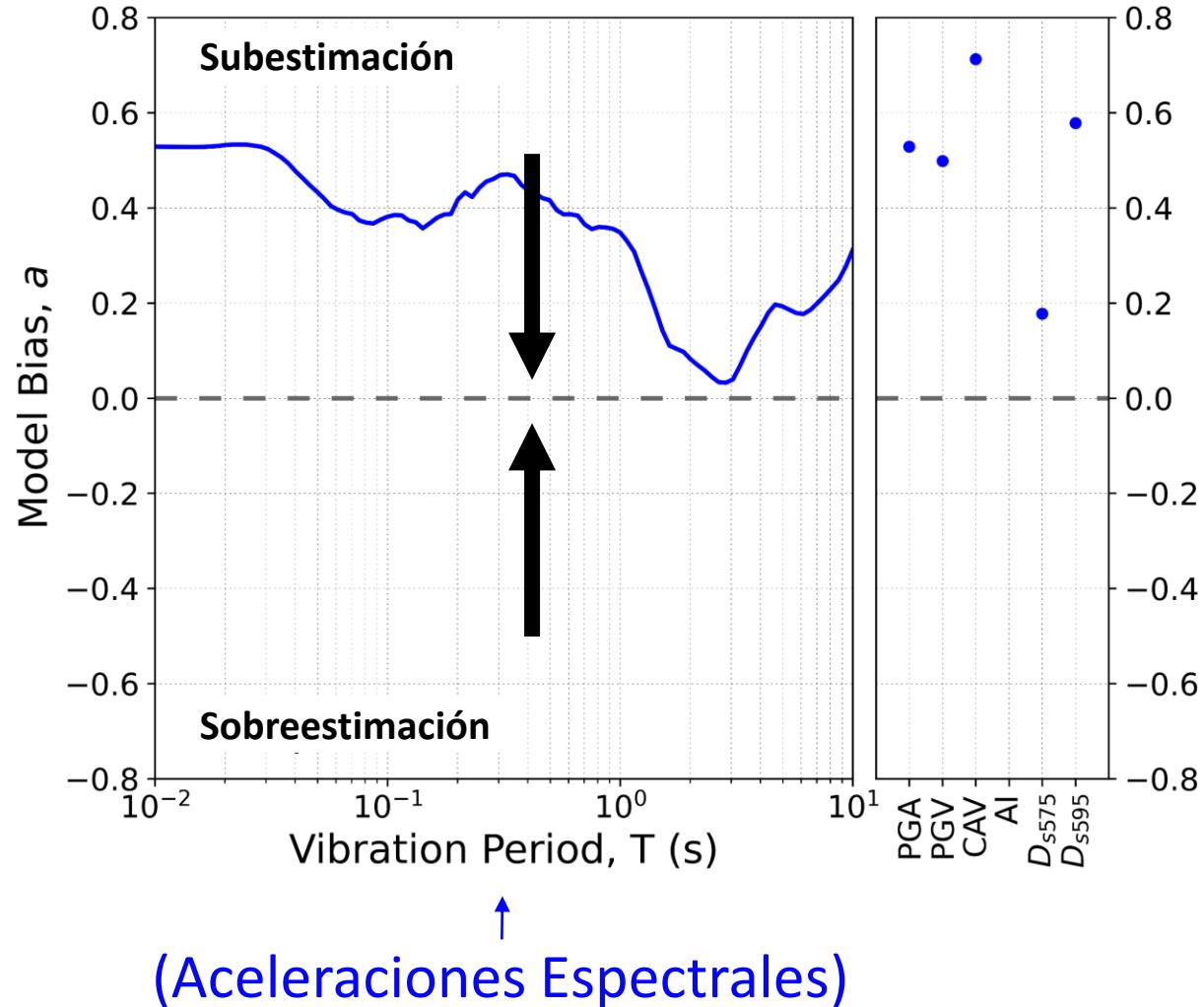
Desviación sistemática del residual de un sitio dado del sesgo del modelo

Residual Restante

$a$

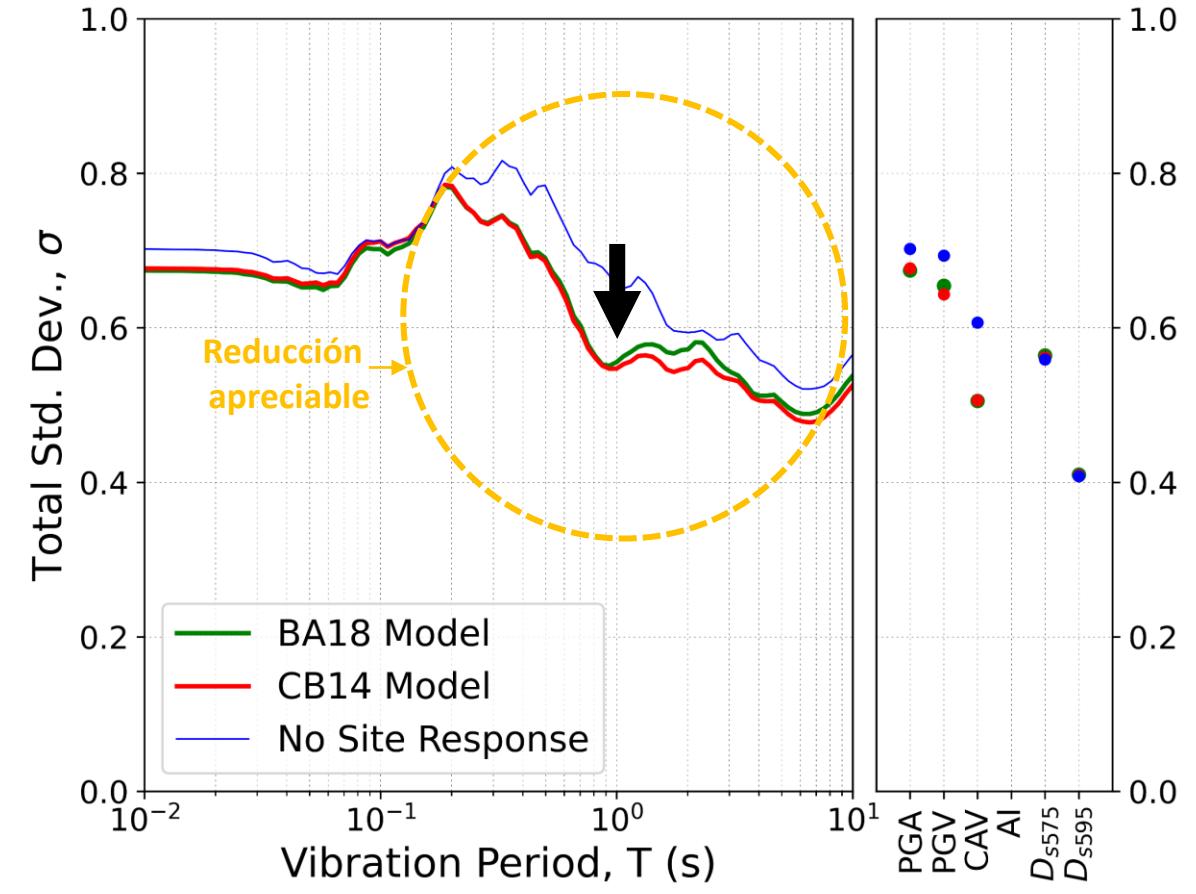
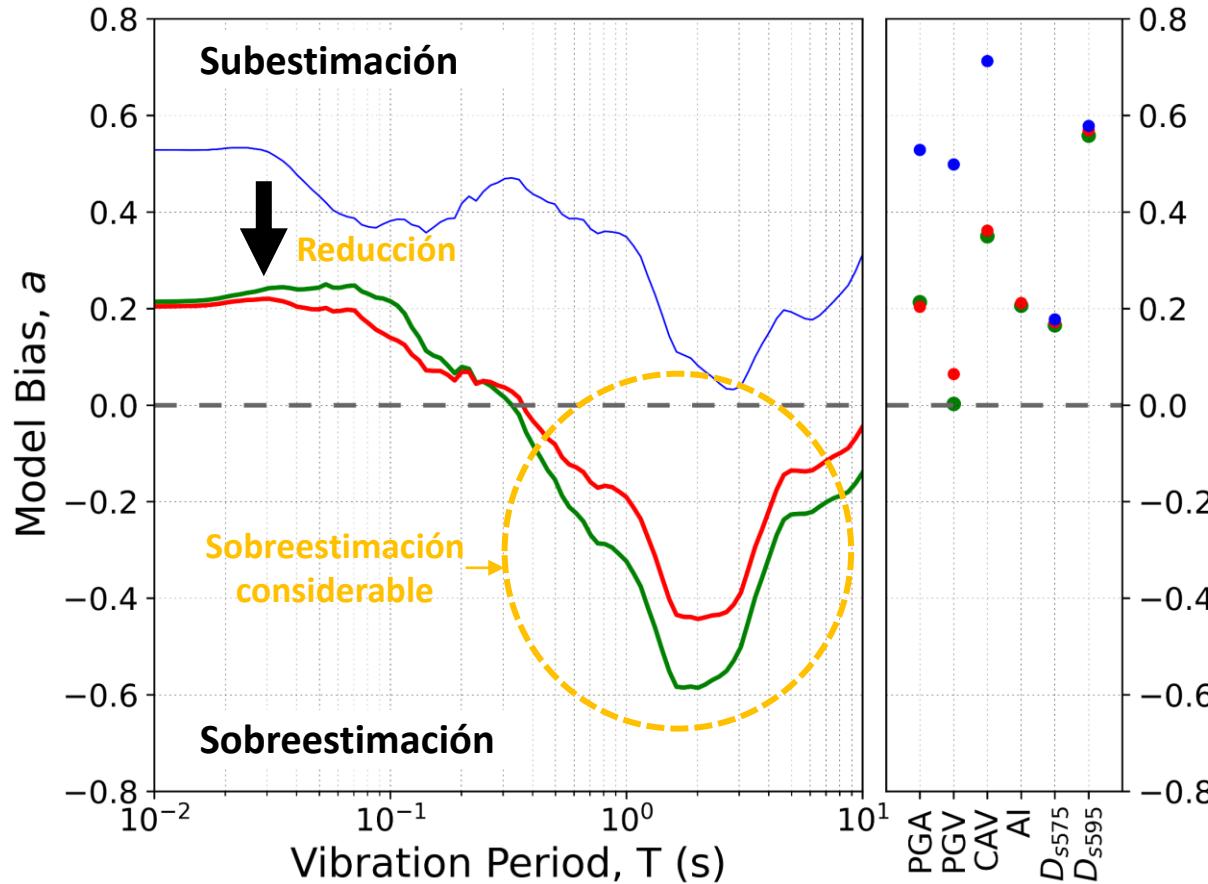
# Sesgo del Modelo y Variabilidad Total

**Sin Modelación de Efectos de Sitio Superficiales ( $V_{s,min} = 500 \text{ m/s}$ )**



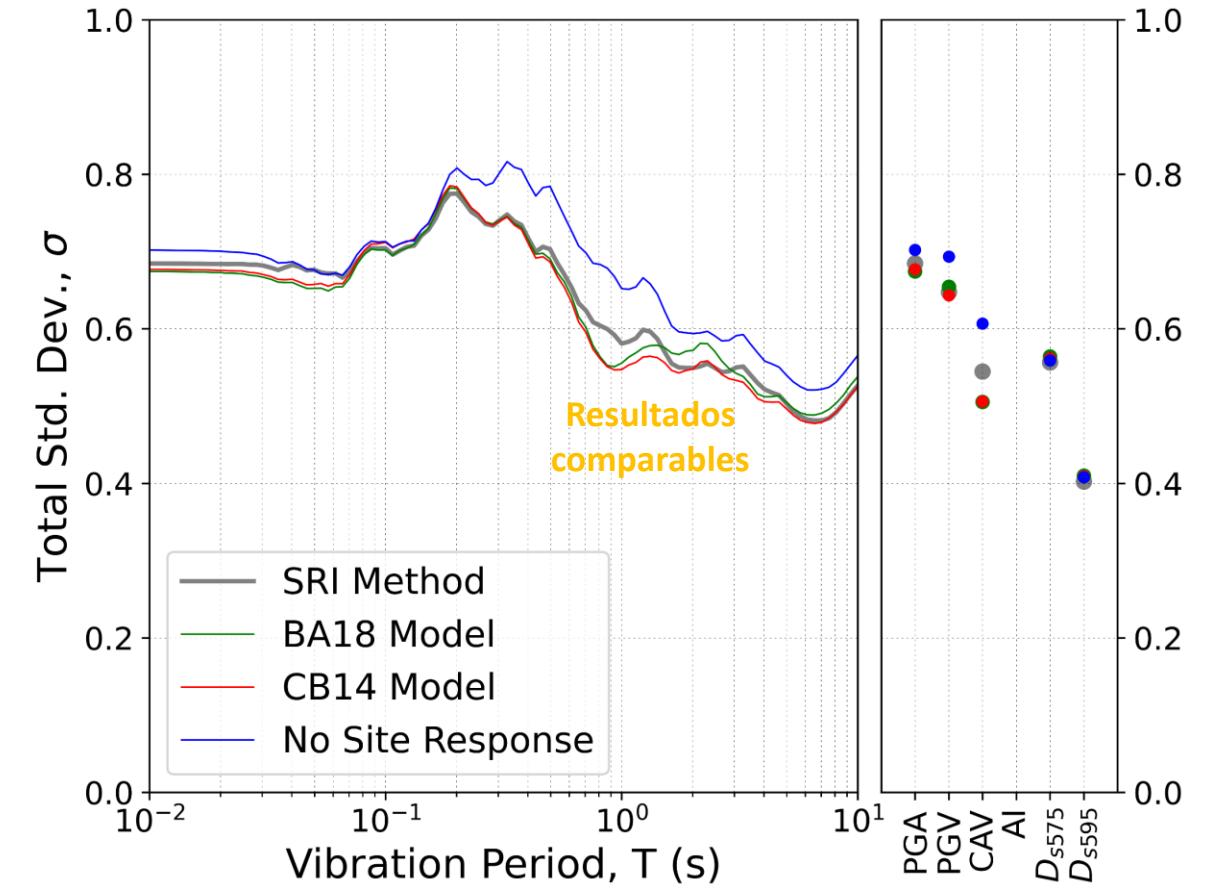
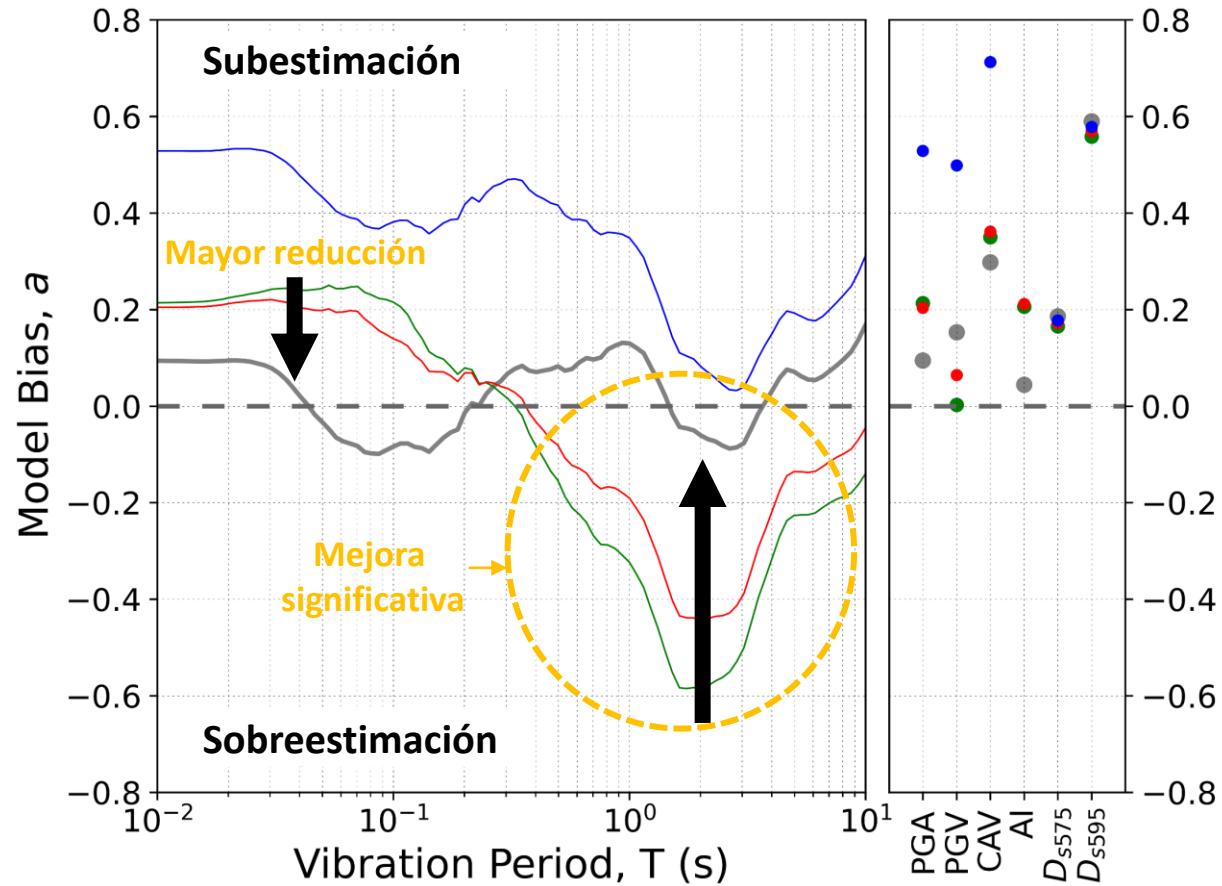
# Sesgo del Modelo y Variabilidad Total

## Enfoque Estándar (basado en $V_{s30}$ ): Factor de Sitio Empírico



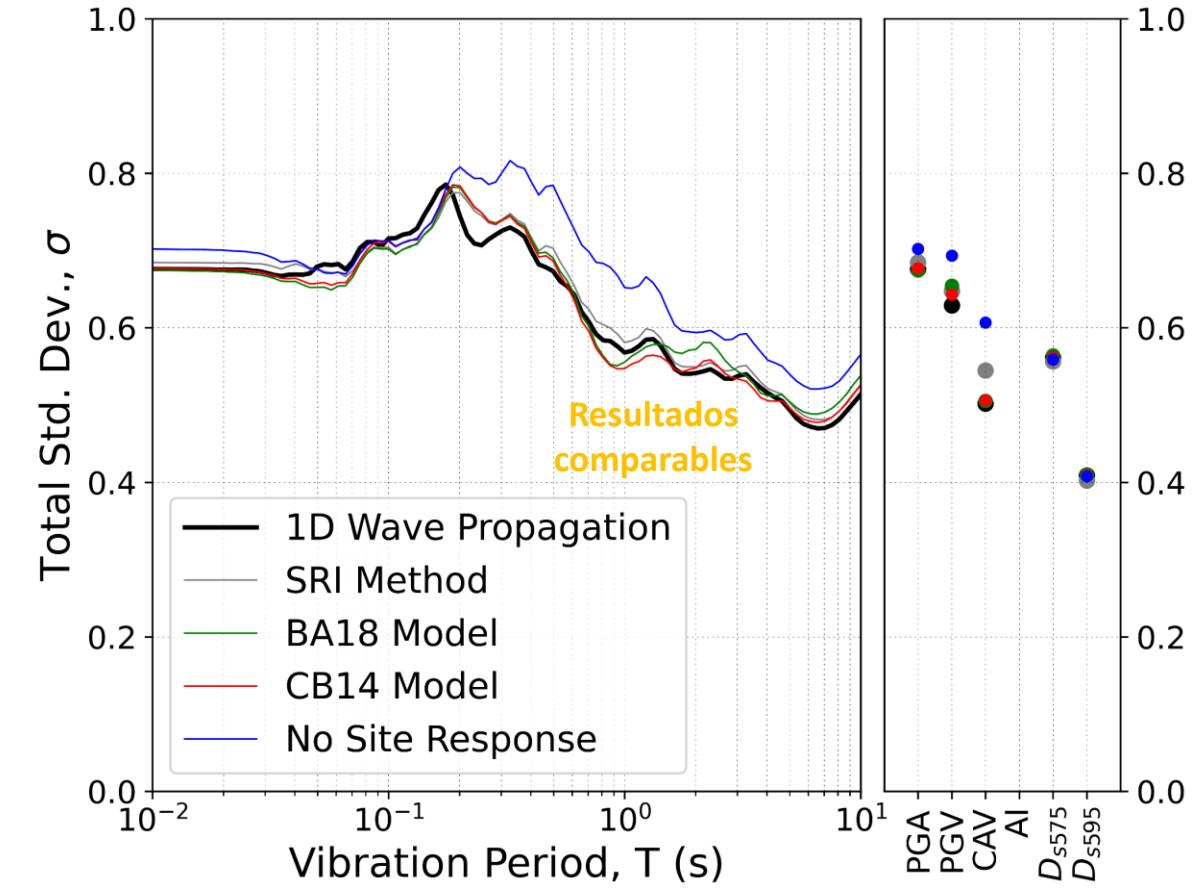
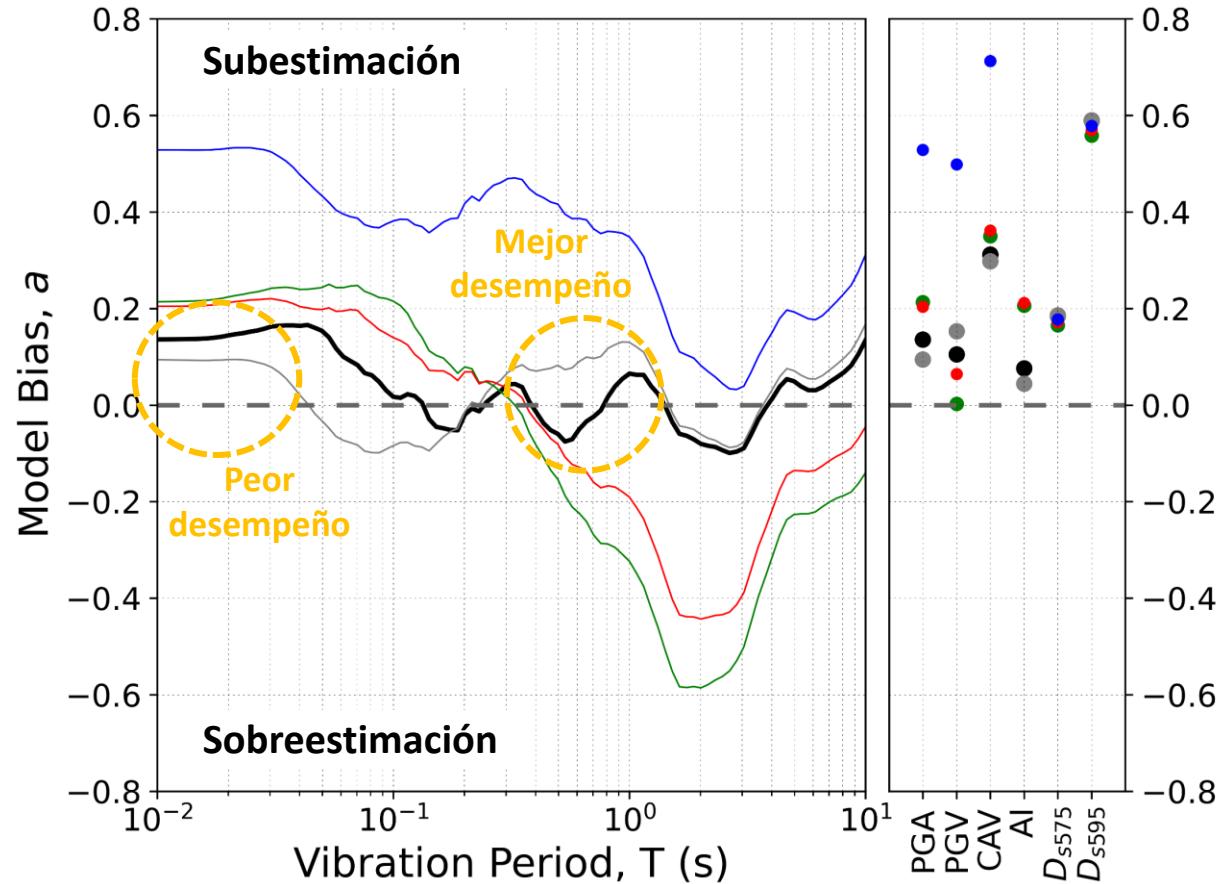
# Sesgo del Modelo y Variabilidad Total

## Enfoque Alternativo 1: Método SRI



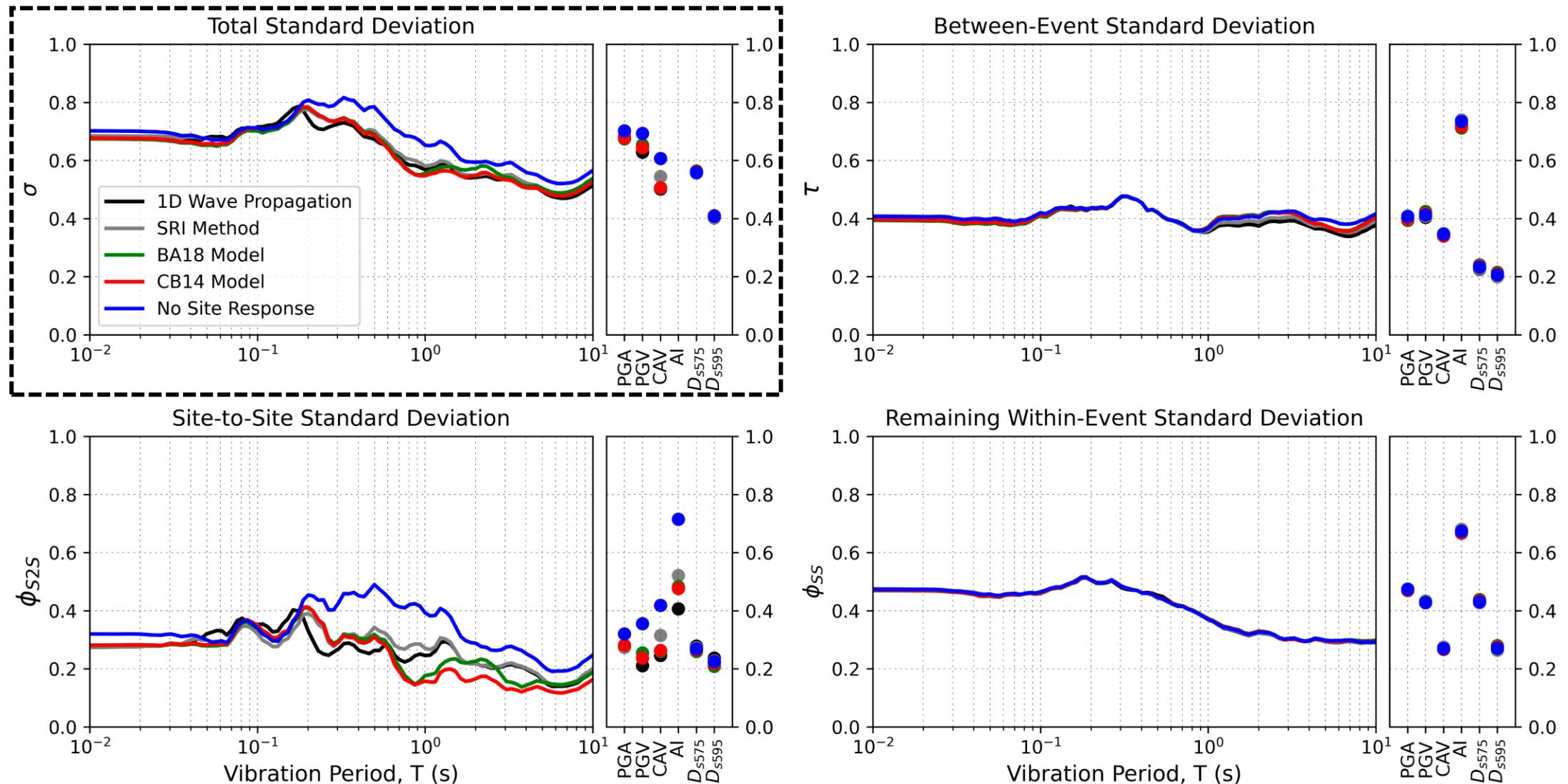
# Sesgo del Modelo y Variabilidad Total

## Enfoque Alternativo 2: Análisis de Respuesta de Sitio 1D



# Descomposición de la Variabilidad

$$\boxed{\sigma^2} = \tau^2 + \phi_{S2S}^2 + \phi_{SS}^2$$



# Resultados Desagregados por Sitio

Pregunta de Investigación: ¿Bajo qué condiciones podemos mejorar las predicciones al utilizar métodos que incorporen más información sitio-específica?

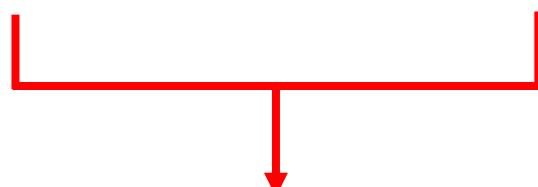
$$\Delta_{es} = \boxed{a} + \delta B_e + \boxed{\delta S2S_s} + \delta W_{es}^0$$

Residual entre-  
eventos

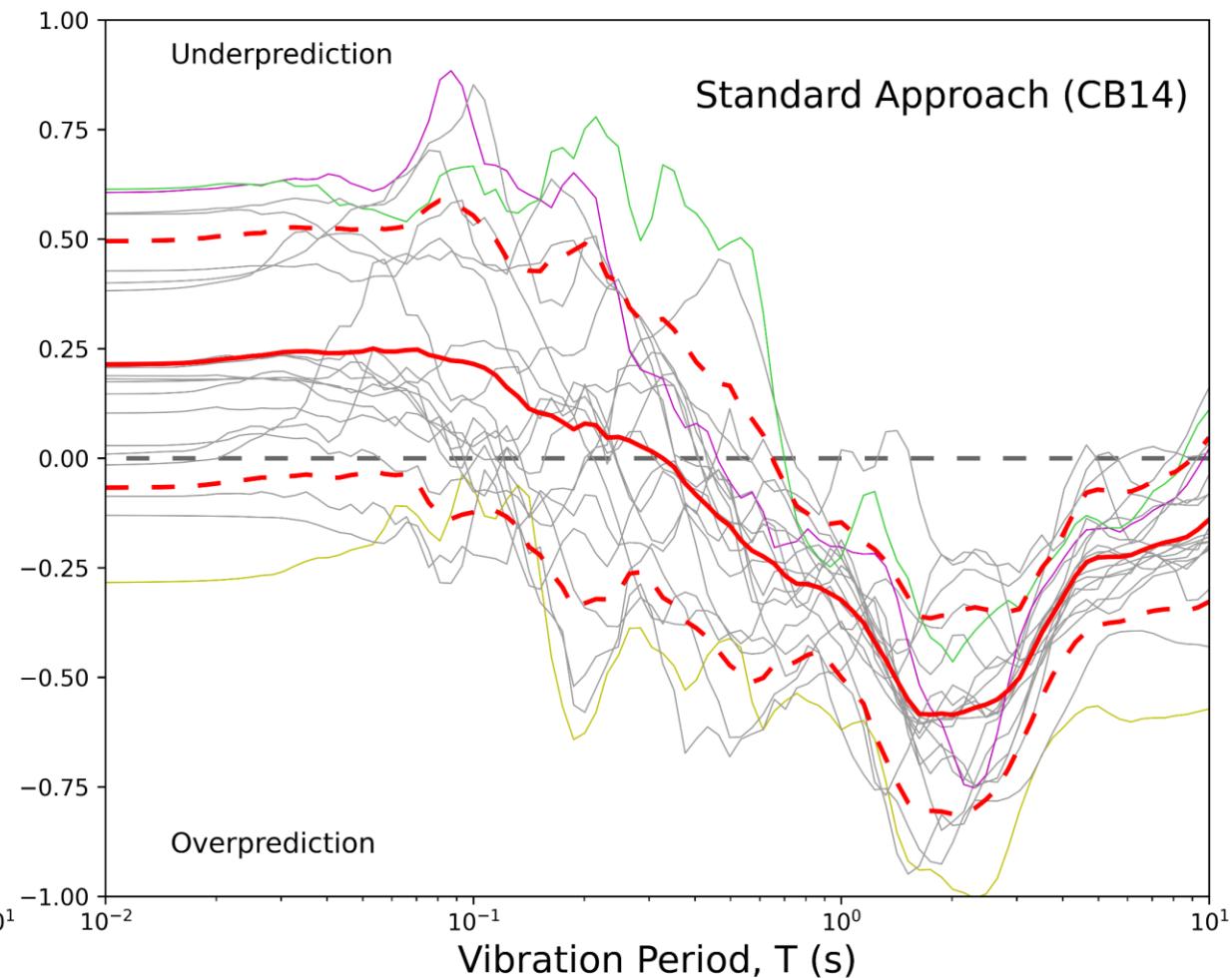
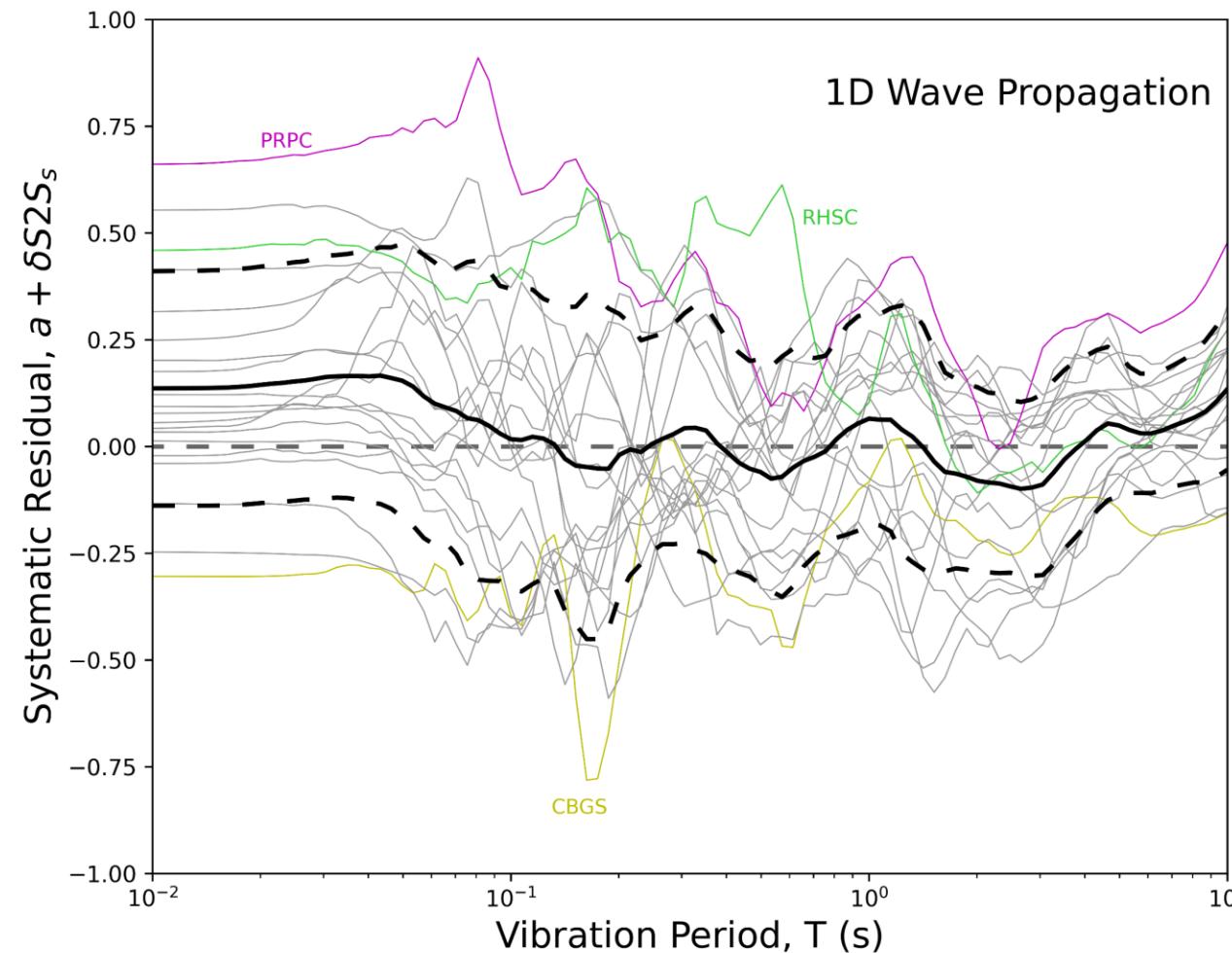
Residual  
restante

Sesgo del  
modelo  
(Model bias)

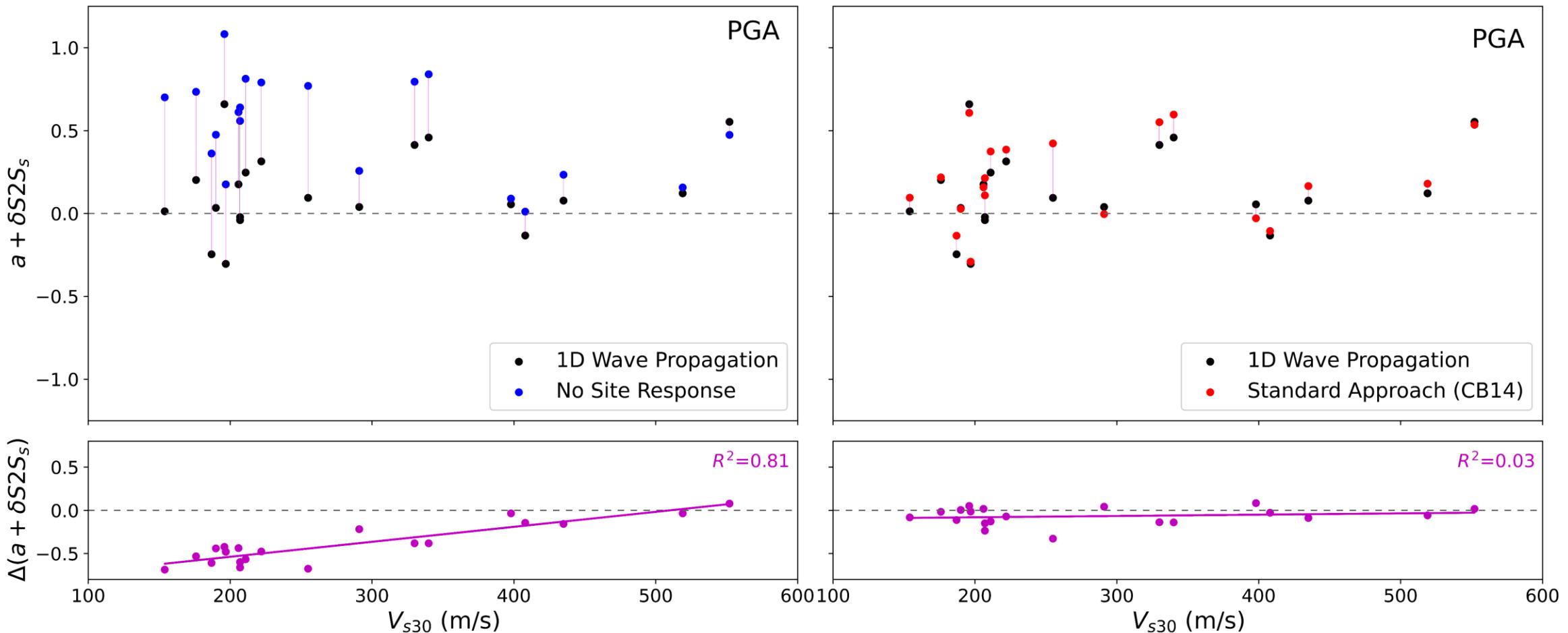
Residual  
sitio-a-sitio


$$a + \delta S2S_s$$

# Resultados Desagregados por Sitio



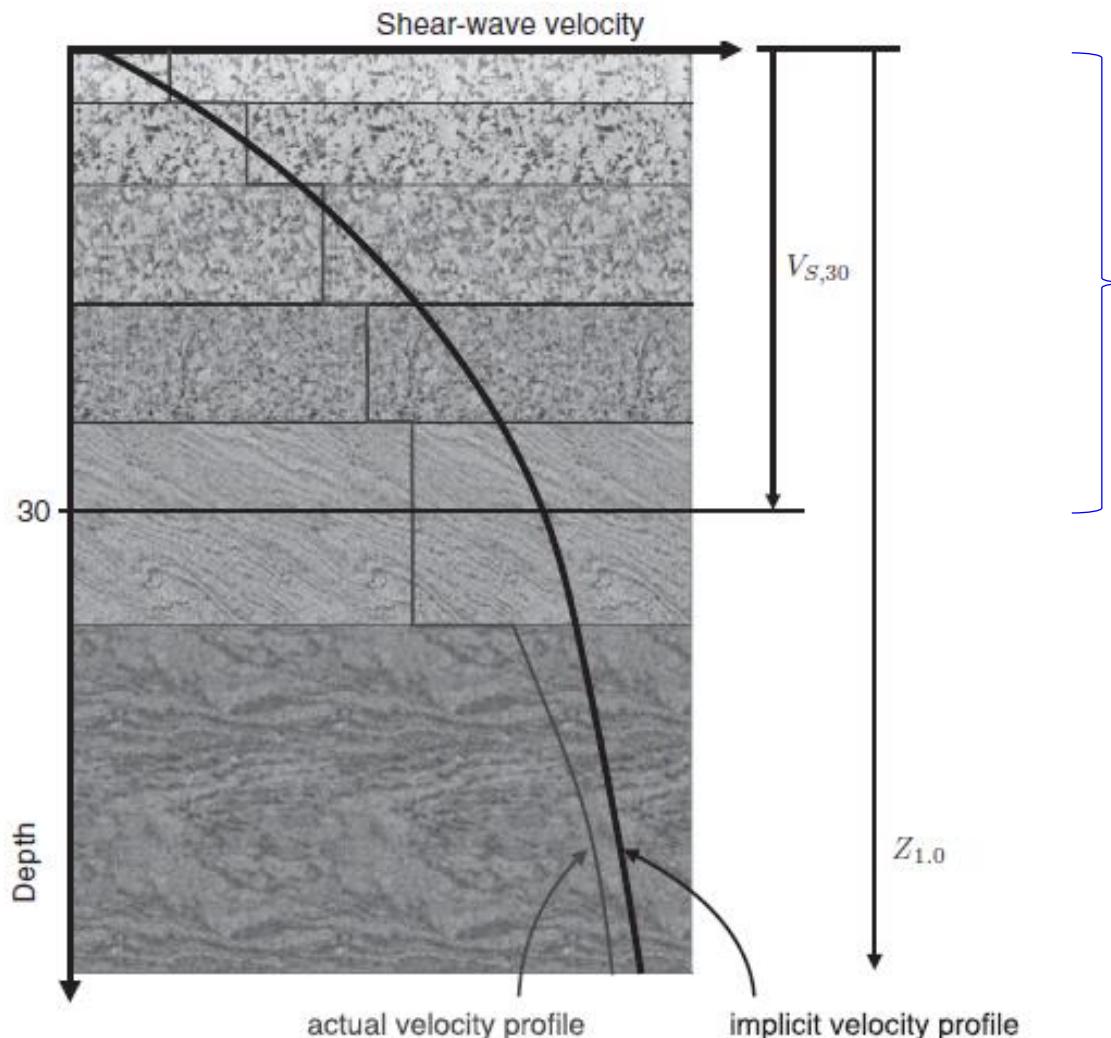
# ¿Ayuda $V_{s30}$ a responder la pregunta?



$V_{s30}$  es un buen predictor

$V_{s30}$  es un mal predictor...

# Aprendiendo de las Limitaciones del Enfoque Estándar...



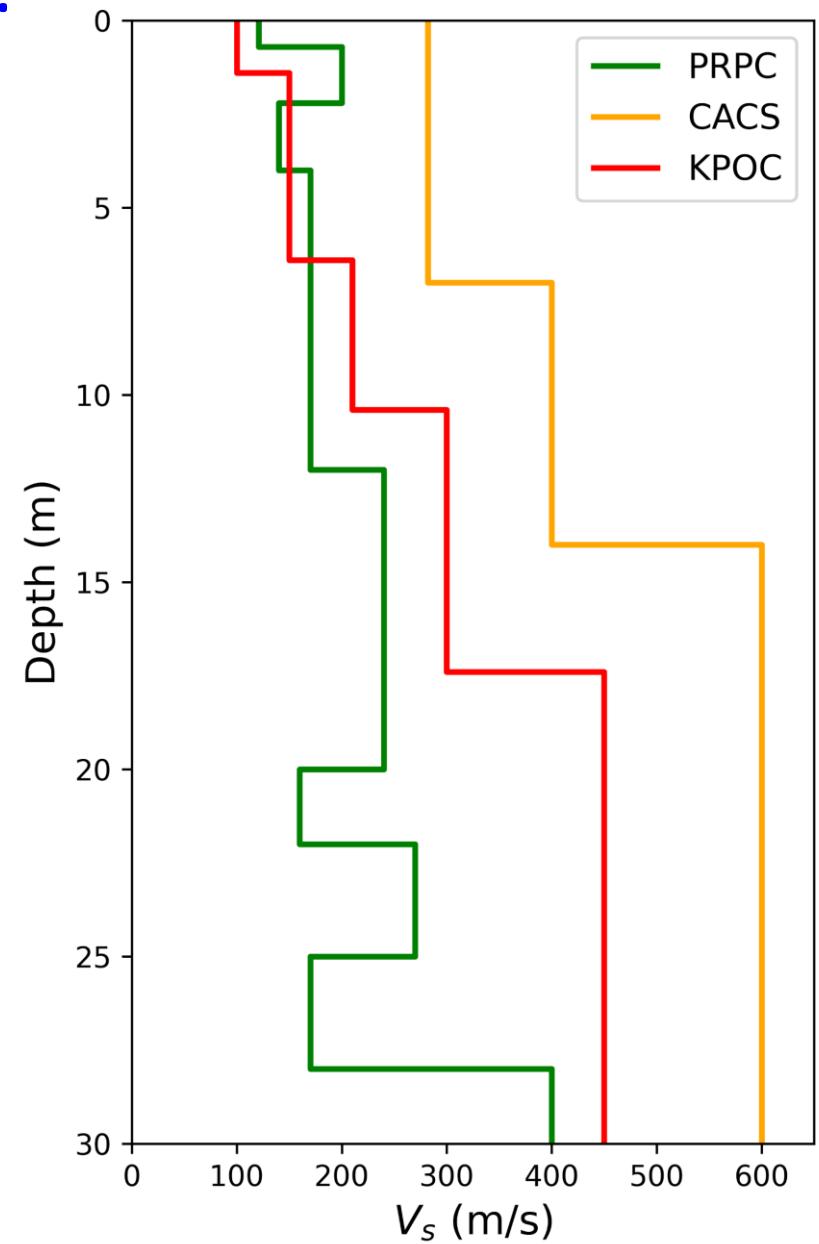
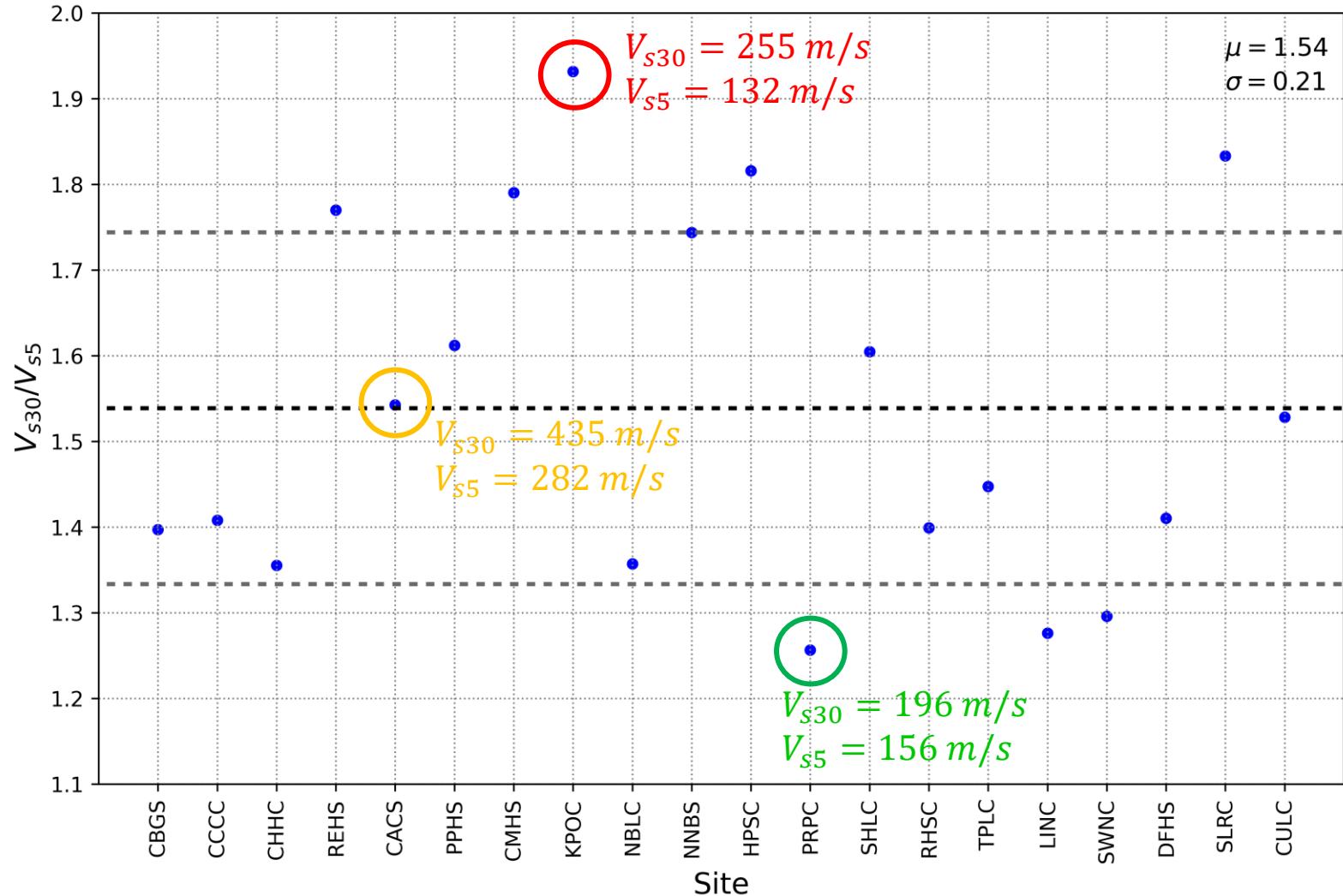
Existen múltiples perfiles con el mismo  $V_{S30}$

Existe un “perfil implícito” en el modelo empírico por cada  $V_{S30}$

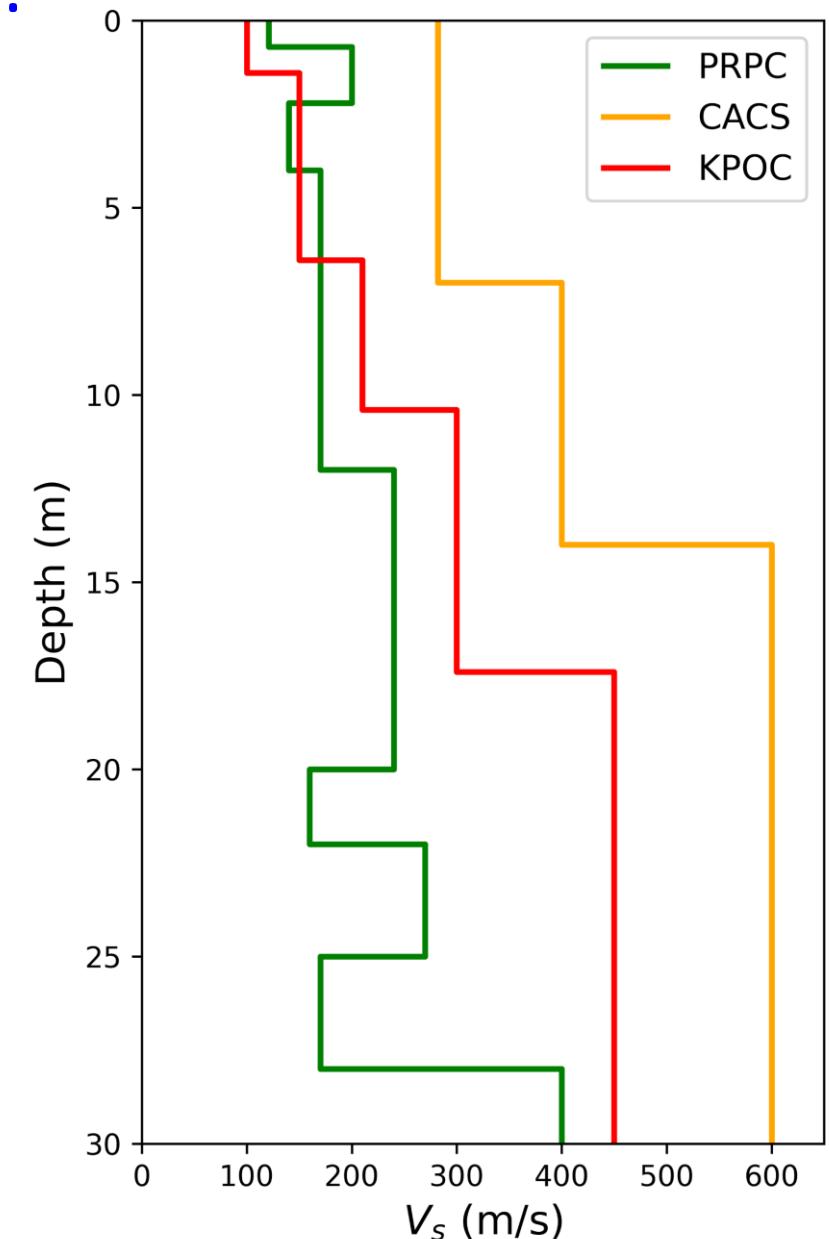
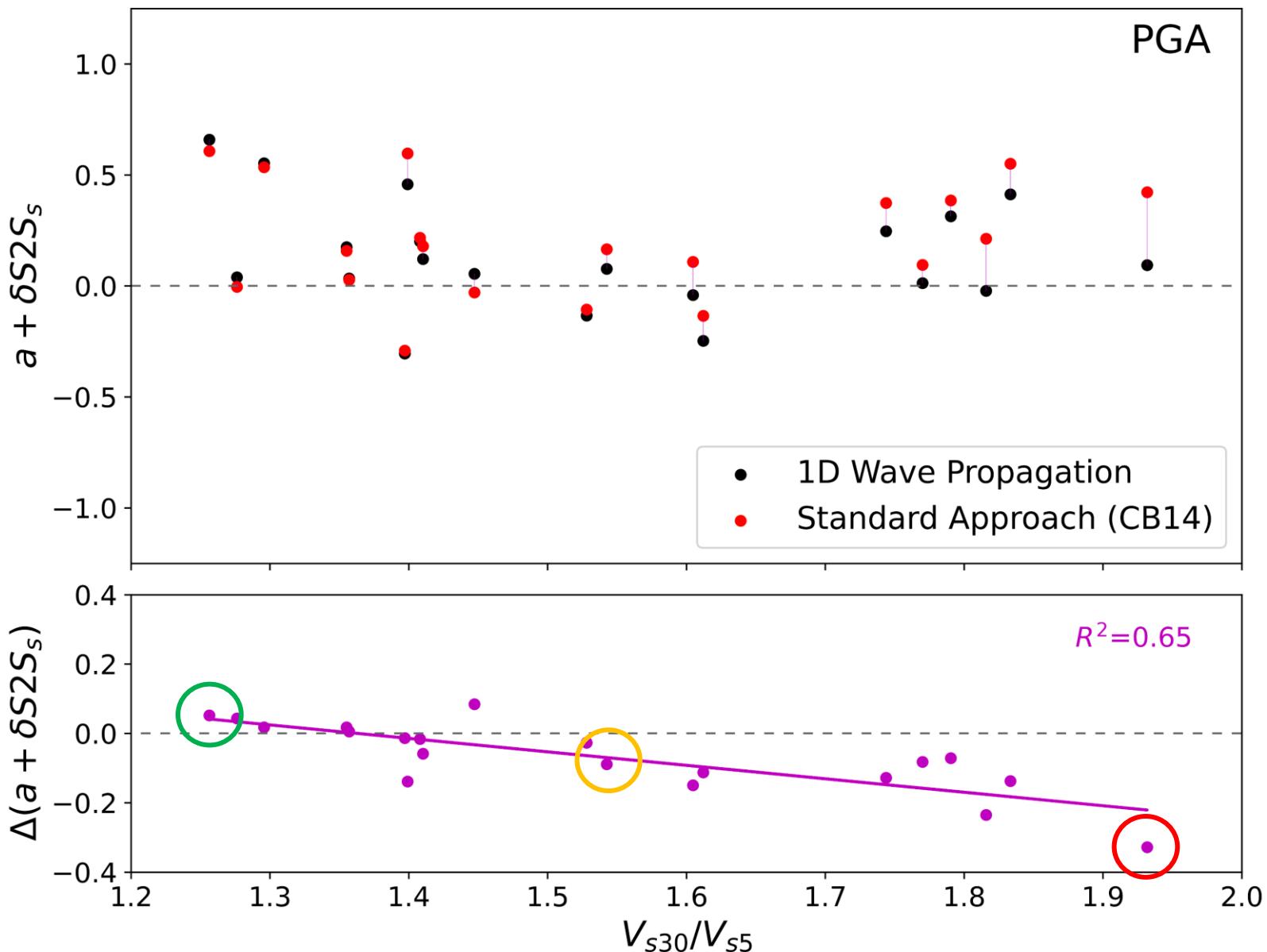


A diferencia de  $V_{S30}$ , un parámetro como  $V_{S30}/V_{S5}$  describe la forma del perfil de velocidad

# ¿Ayuda $V_{s30}/V_{s5}$ a responder la pregunta?



# ¿Ayuda $V_{s30}/V_{s5}$ a responder la pregunta?



# Comentarios Finales

- En general, la modelación de efectos de sitio superficiales con cualquiera de los métodos estudiados **mejoró la exactitud y precisión de las simulaciones**
- El uso de los dos métodos alternativos estudiados resultó en **una reducción significativa del sesgo del modelo** relativo al enfoque estándar (basado en Vs30), sin embargo, **la variabilidad en el residual resultó ser similar**
- Una mirada más detalladas a los resultados desagregados indica que el beneficio de usar los enfoques alternativos es muy dependiente de las características del sitio

# Modelación de Efectos de Sitio en Simulaciones del Movimiento Sísmico del Terreno: Aprendiendo de Pequeños Terremotos en Nueva Zelanda

Felipe Kuncar<sup>1</sup>

Brendon Bradley<sup>1</sup>, Chris de la Torre<sup>1</sup>, Adrian Rodriguez-Marek<sup>2</sup>,  
Chuanbin Zhu<sup>1</sup>, Robin Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup>University of Canterbury, Nueva Zelanda

<sup>2</sup>Virginia Tech, Estados Unidos