



Efecto de Sitio y Microzonificación Sísmica

Felipe Leyton, PhD

Innovación & Transferencia
Tecnológica

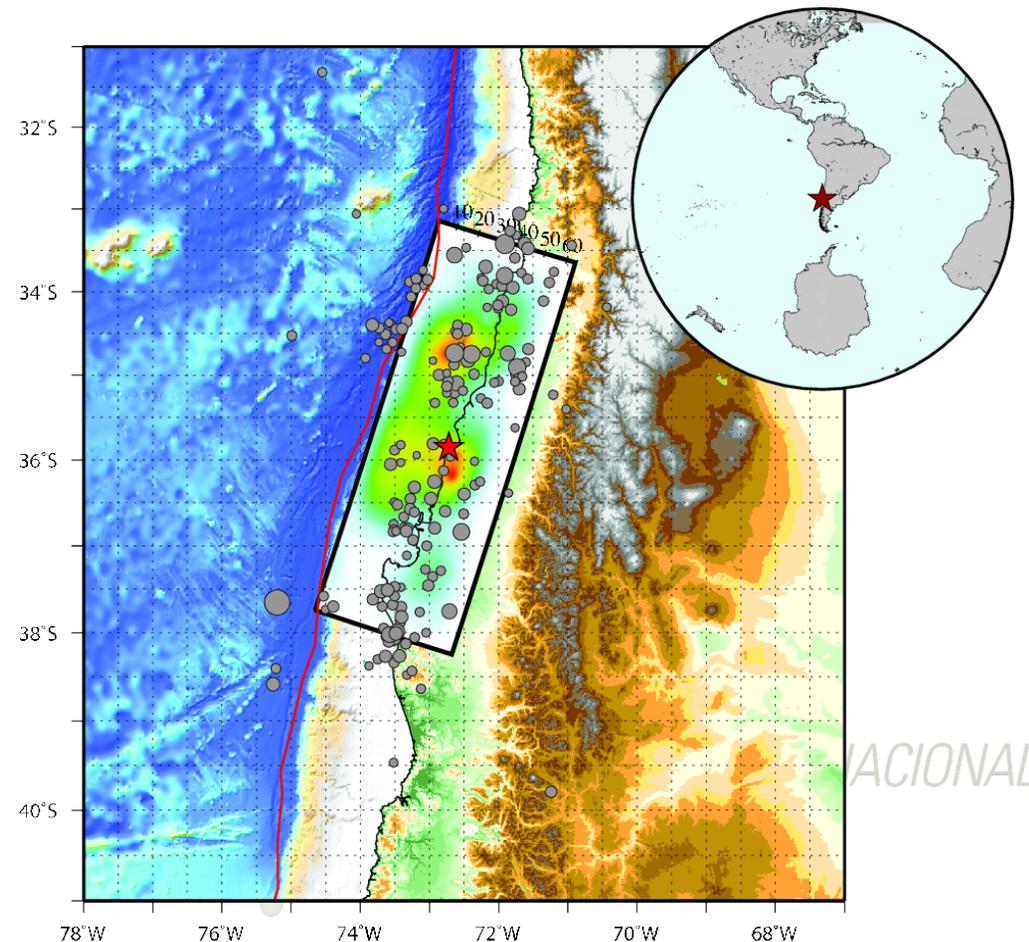
Por cubrir

- Maule 2010: observaciones de daño
- Efecto de sitio
- Microvibraciones
 - ... y geología superficial
 - ... y daño observado
 - ... y registros de movimiento fuerte
- Microzonificación Sísmica
 - Talca & Curicó
 - Valparaíso-Viña del Mar
 - Santiago
- Resultados recientes



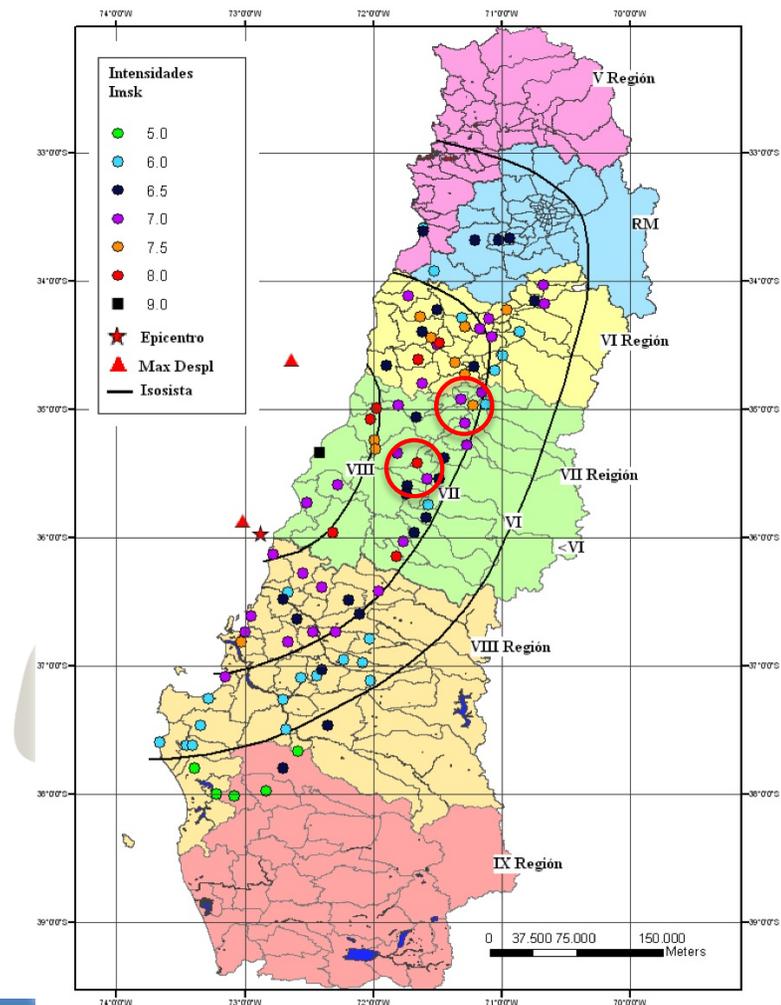
Del Terremoto del Maule 2010

- Mw 8.8
- Largo de Ruptura
Estimado: ~450 km
- Se han reportado 2
zonas de gran
deslizamiento
- Una extensa zona de
daño



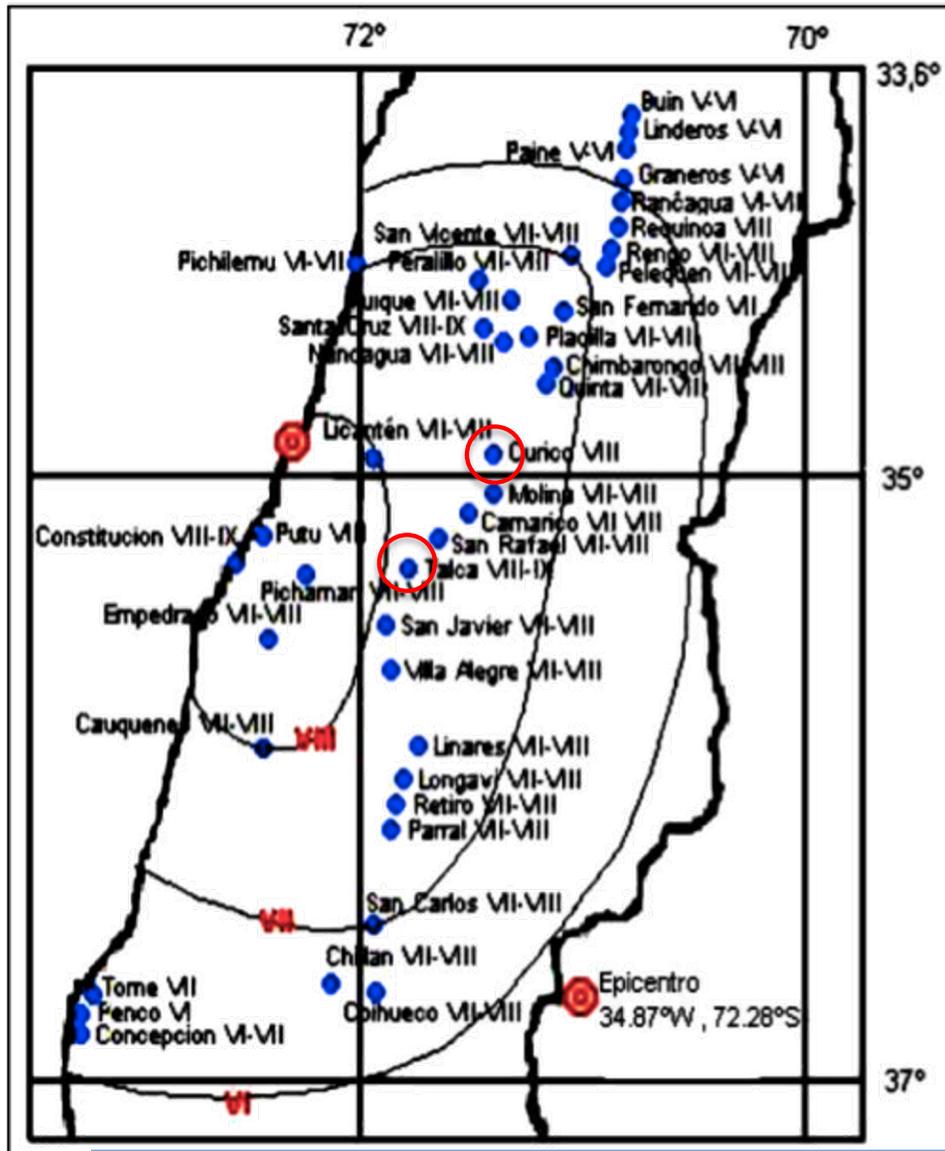
Un poco de evidencia empírica

- Intensidades MSK producto del terremoto del Maule 2010 (Mw 8,8)
- Intensidad MSK en:
 - Talca: VIII
 - Curicó: VII-VIII
- Ambos valores excedieron los valores cercanos



terremoto

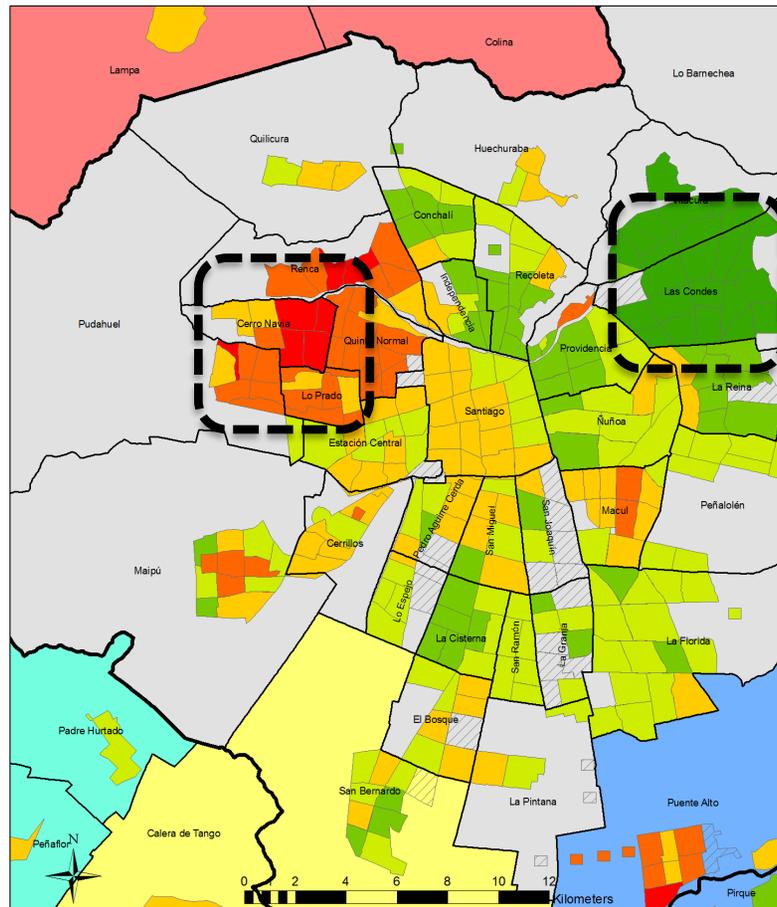




Otro ejemplo

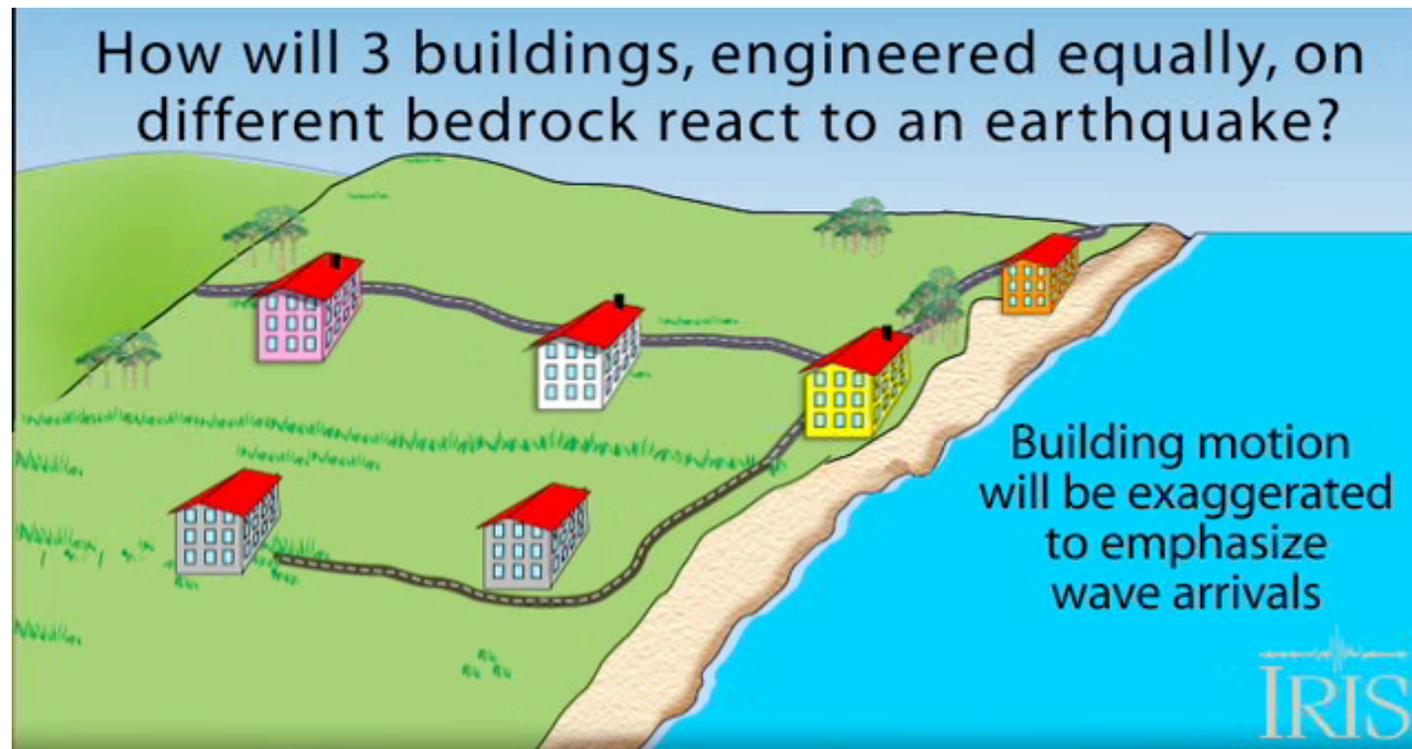
- Este comportamiento se ha observado en casos anteriores
- Isosistas para el terremoto de 1928 (Sanhueza, 2002)
- Talca reporta intensidades VIII-IX
- Curicó reporta intensidad de VIII

Más evidencia: Valparaíso 1985, en Santiago



- Color es proporcional a la intensidad MSK
- Valores van desde VI a VIII½
- Estas variaciones no pueden ser explicadas por la distancia a la fuente
- Necesitamos definir aquellas zonas más susceptibles a daños

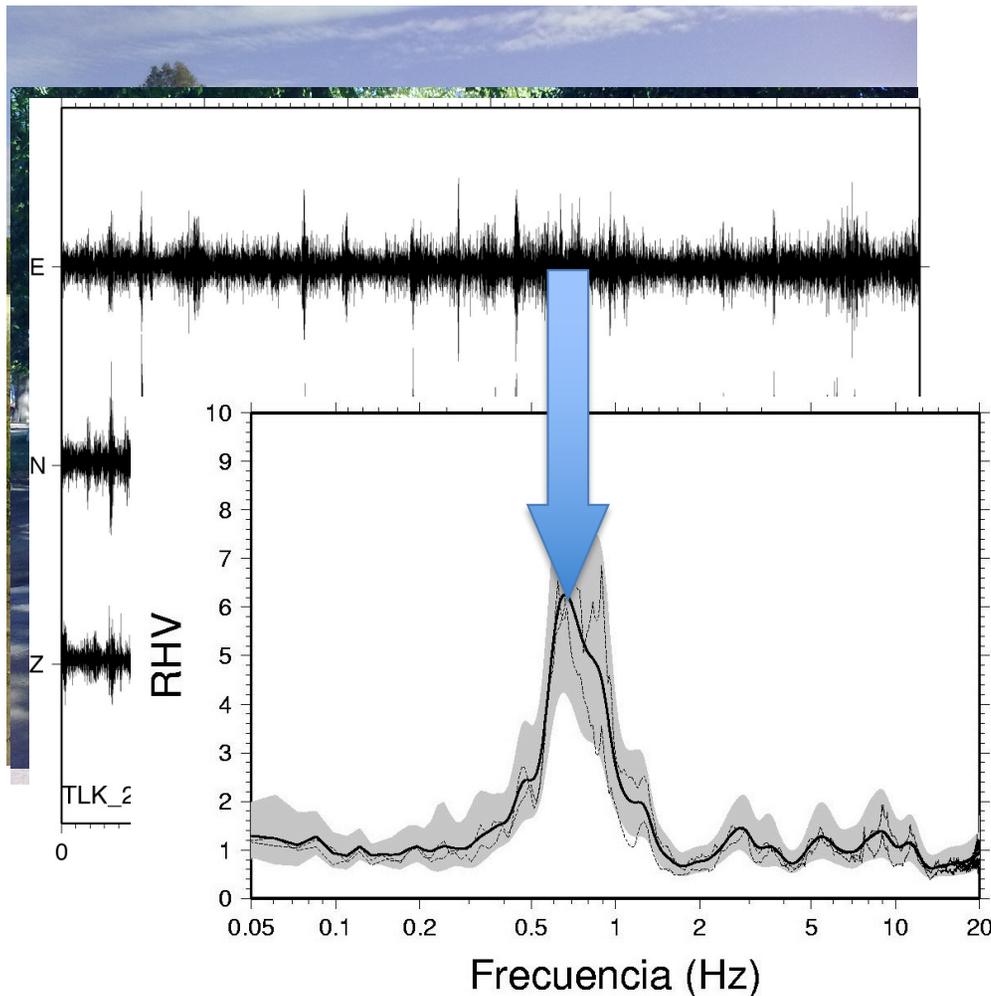
Amplificación por las condiciones locales: Efecto de Sitio



Two variables affect damage during earthquake:

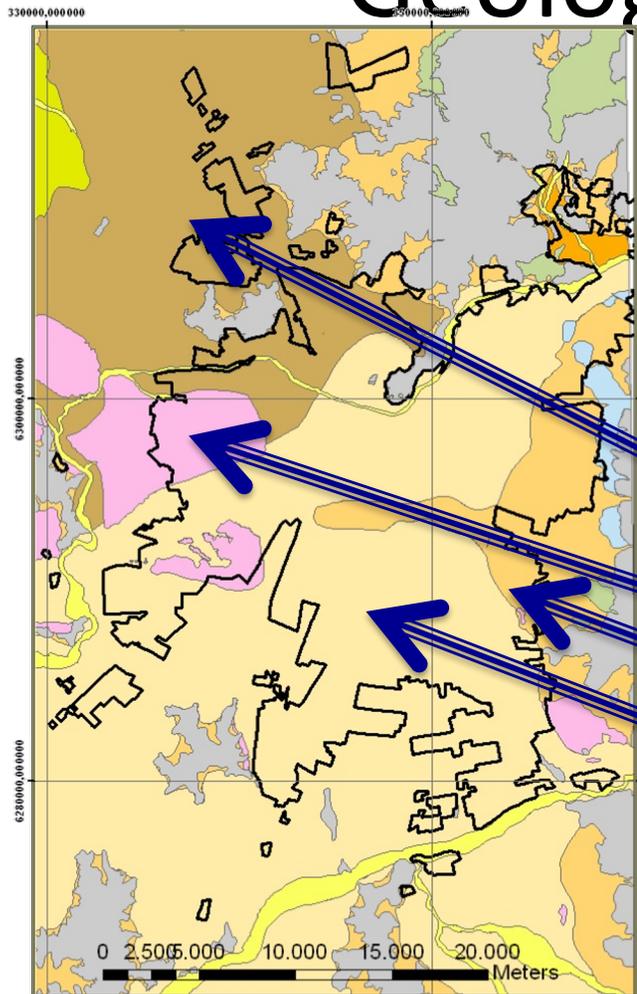
- 1) Intensity of shaking (*felt motion, not magnitude*)
- 2) engineering

Estudio mediante microvibraciones



- Propiedades dinámicas del suelo
 - Geófono de 3 componentes
- Mediciones en la ciudad
Uso microvibraciones ambientales
Proceso de las señales
Estimar la frecuencia fundamental de vibración

Veamos los suelos del Gran Santiago: Geología Superficial

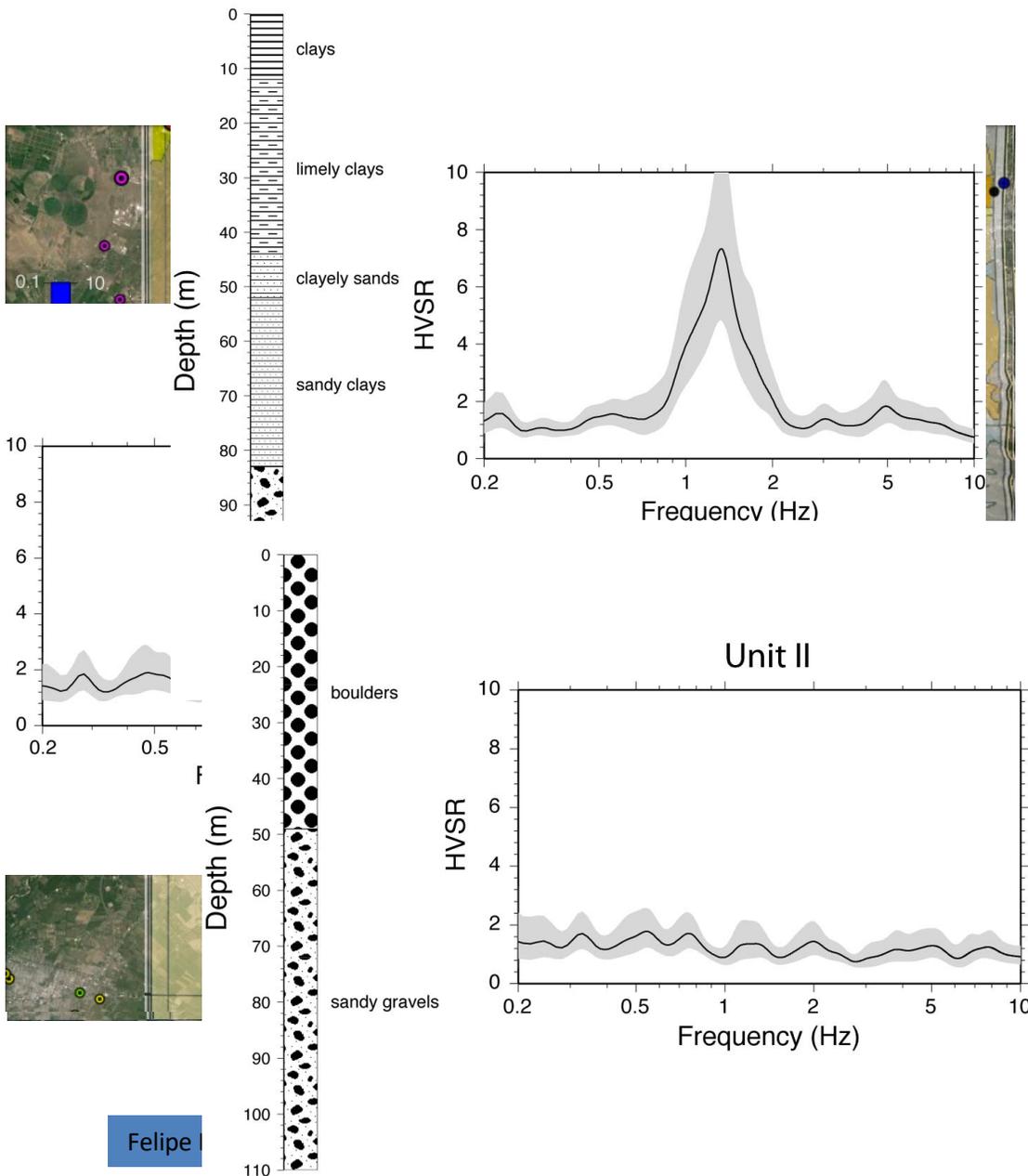


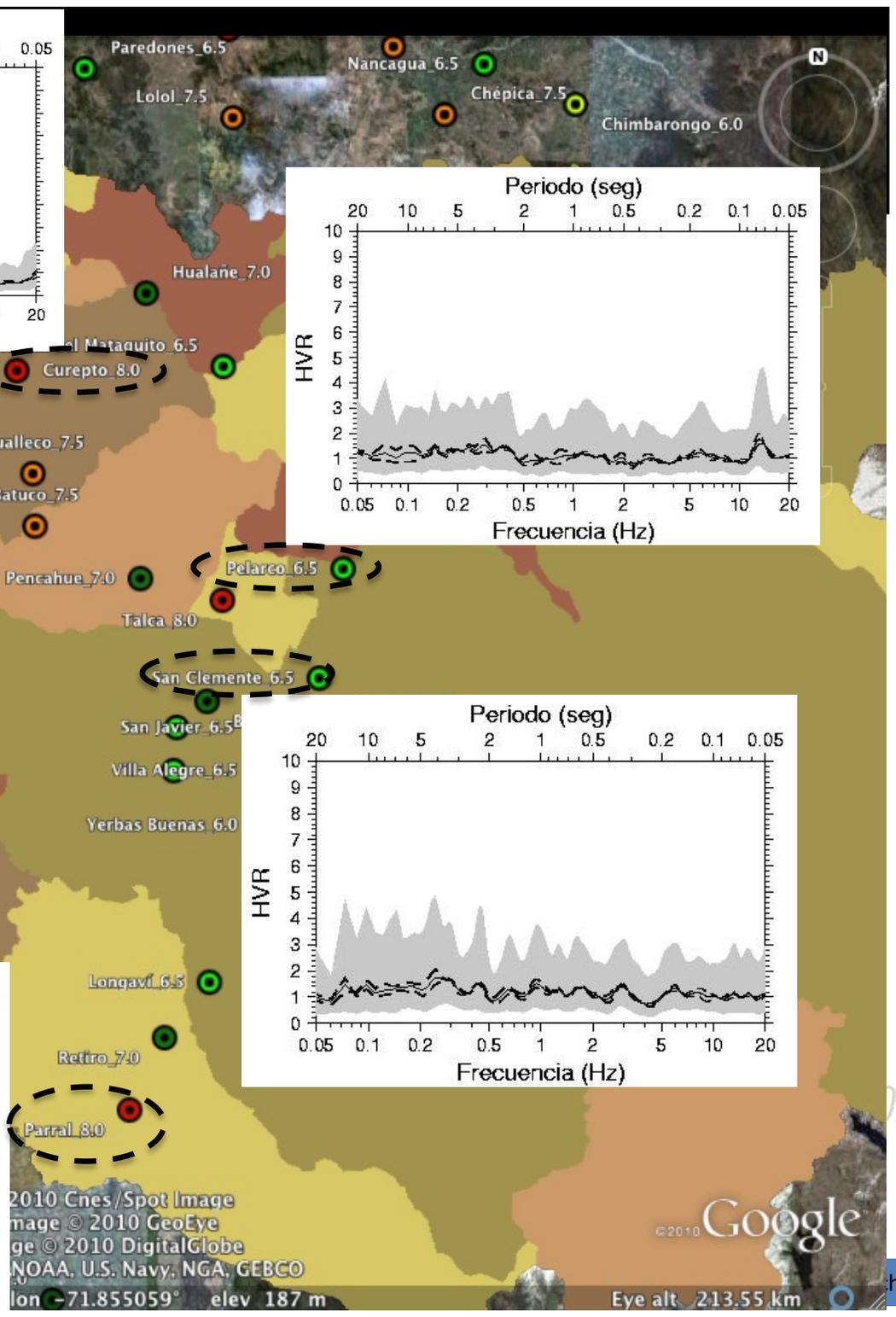
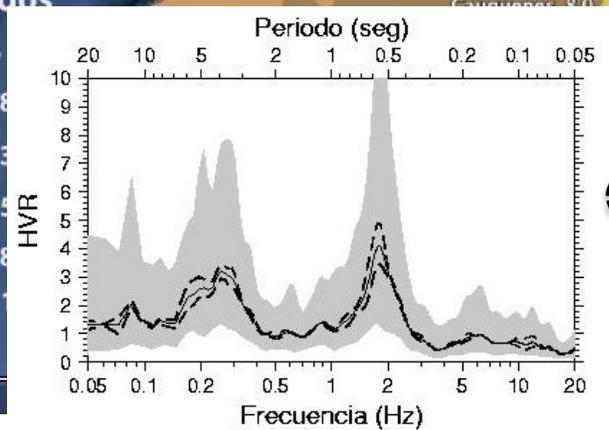
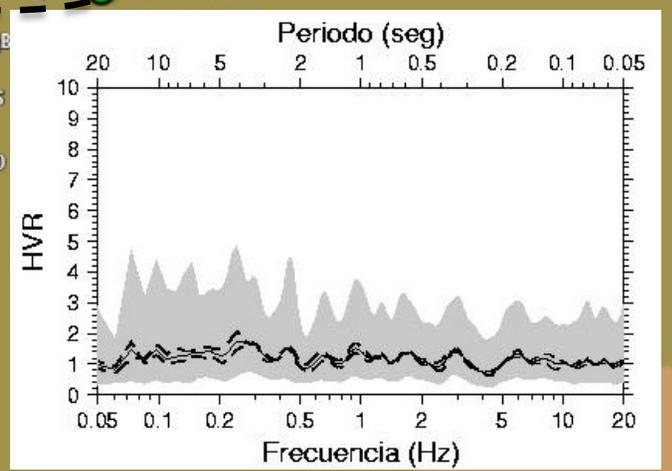
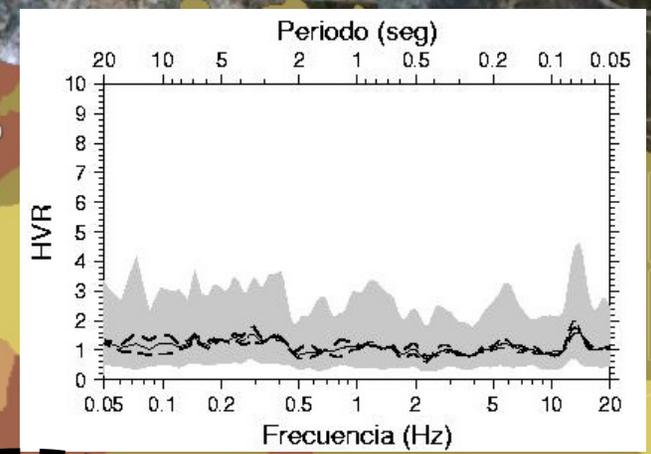
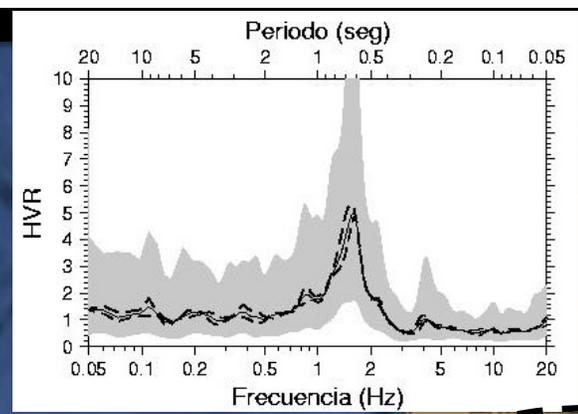
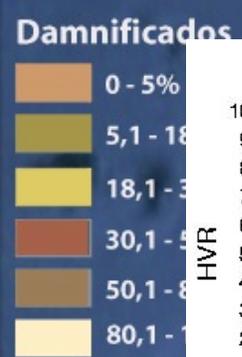
- Basada en estudios previos
- Depende fuertemente del análisis de pozos
- Considera los primeros 50 m
- Define:

- Finos del Noroeste
- Cenizas
- Depósitos de ladera
- Gravas del Maipo y Mapocho

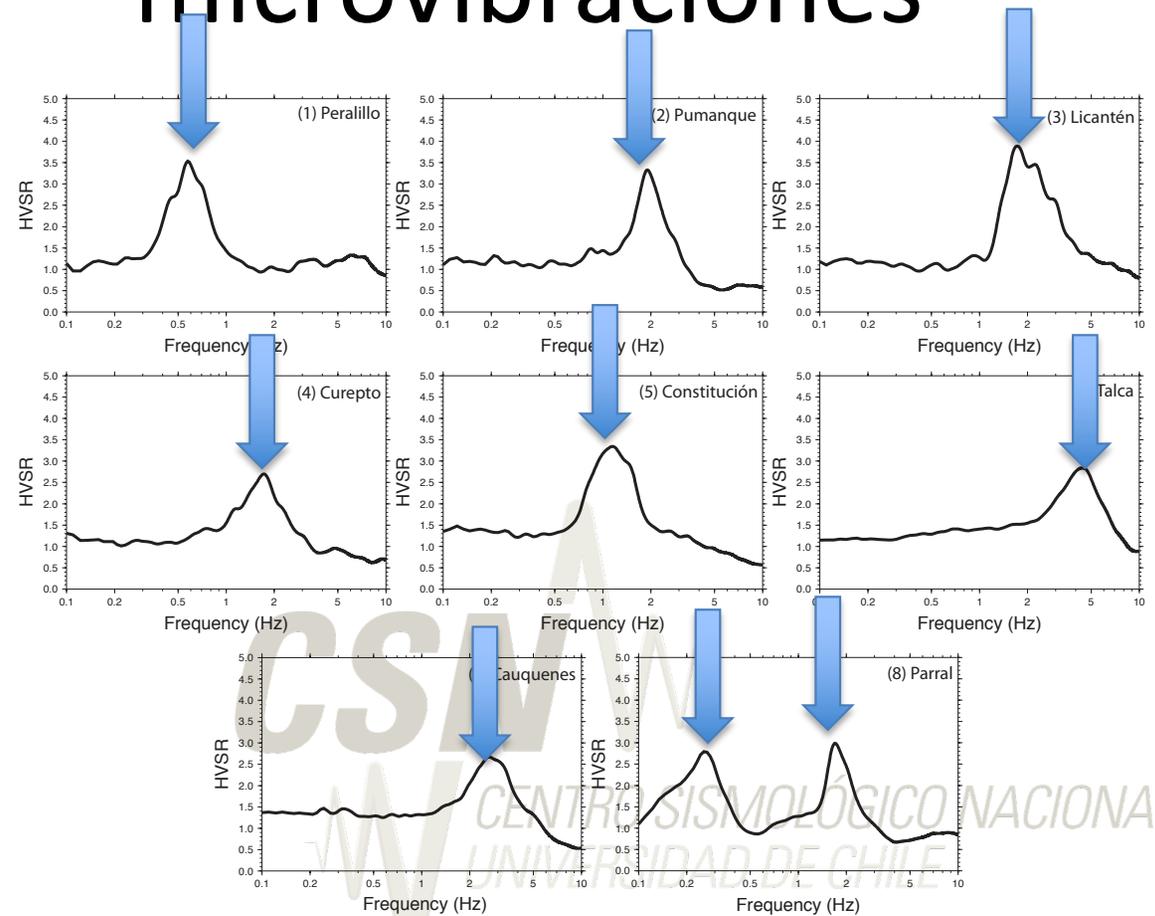
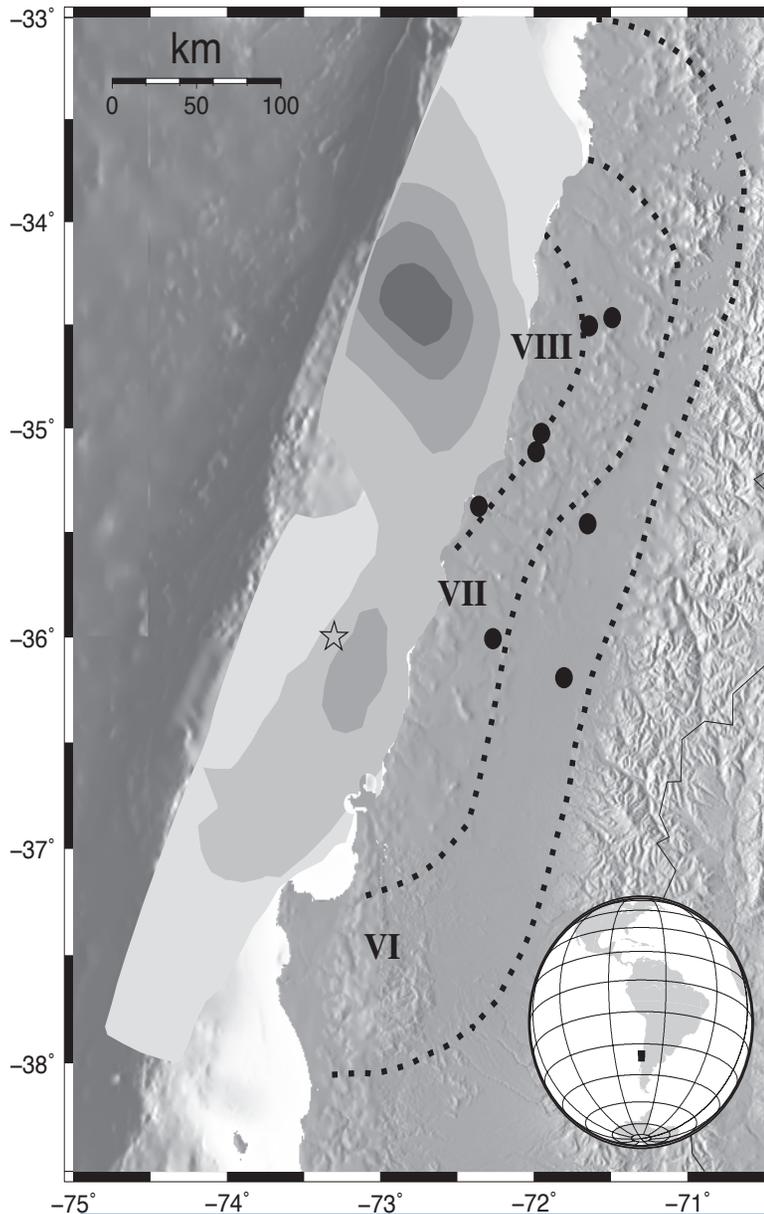
De microvibraciones y geología en Santiago

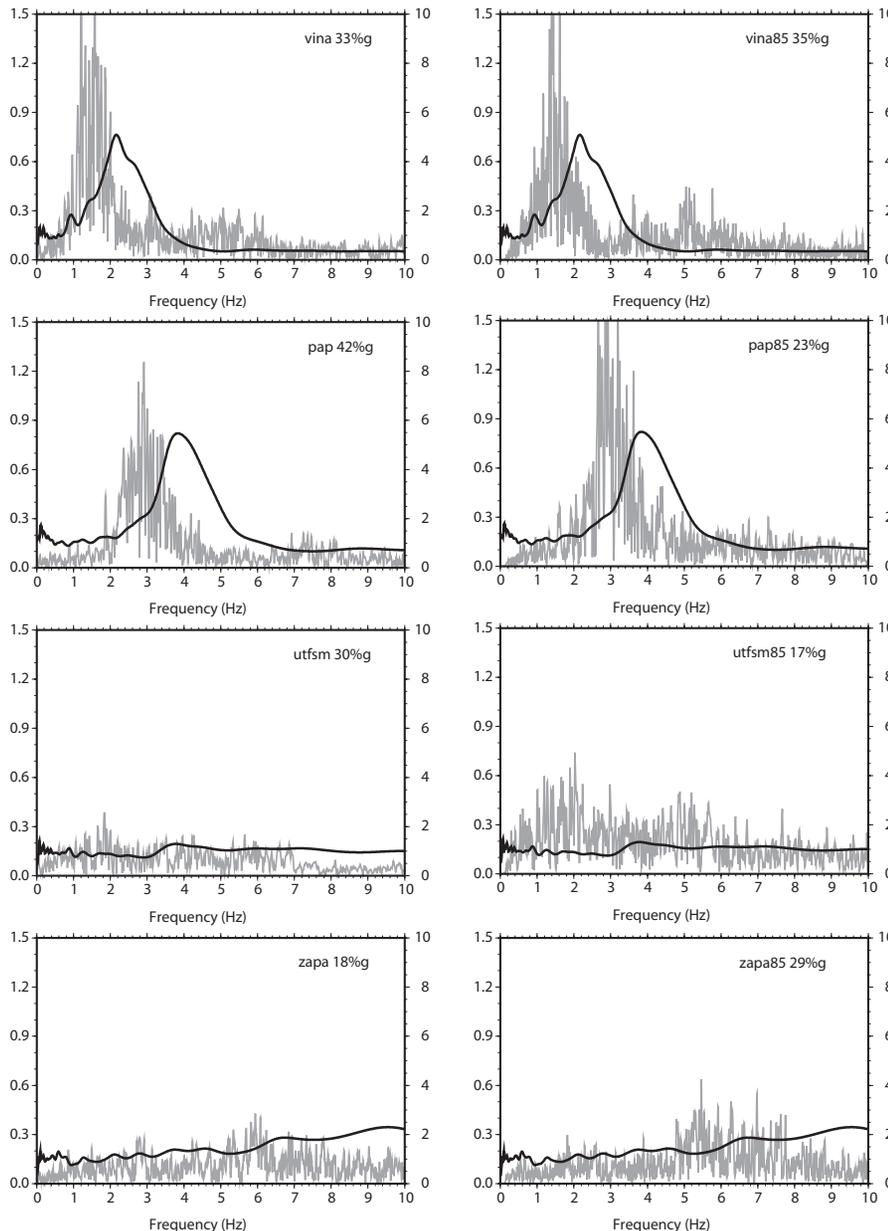
- Analicemos Santiago
- Veamos la geología superficial
- Color es proporcional a la frecuencia fundamental
- Tamaño es proporcional a la amplitud
- Distintos suelos poseen distintas respuestas dinámicas
 - Gravas
 - Ignimbrita de Pudahuel
 - Finos del Noroeste





De intensidad & microvibraciones



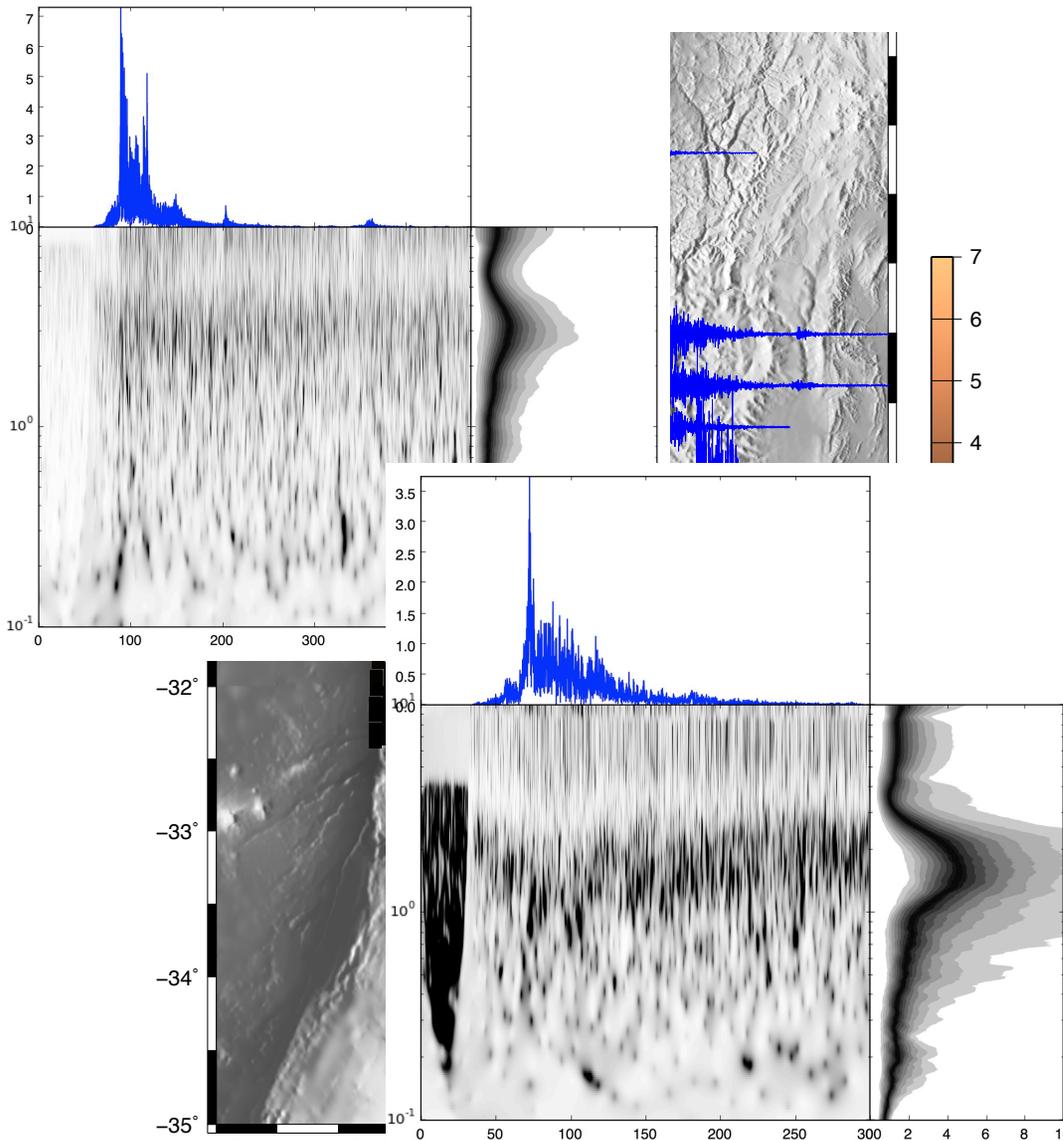


Microvibraciones & Movimiento Fuerte

- Acelerógrafos en Talca y Curicó durante Maule 2010
- Altas aceleraciones máximas (PGA)
 - Talca: 0.48 g
 - Curicó: 0.47 g
- Líneas discontinuas muestran las amplitudes del espectro (FSA) normalizadas por PGA
- Líneas continuas muestran resultado de microvibraciones
- Otros ejemplos

Veamos datos: Illapel 2015

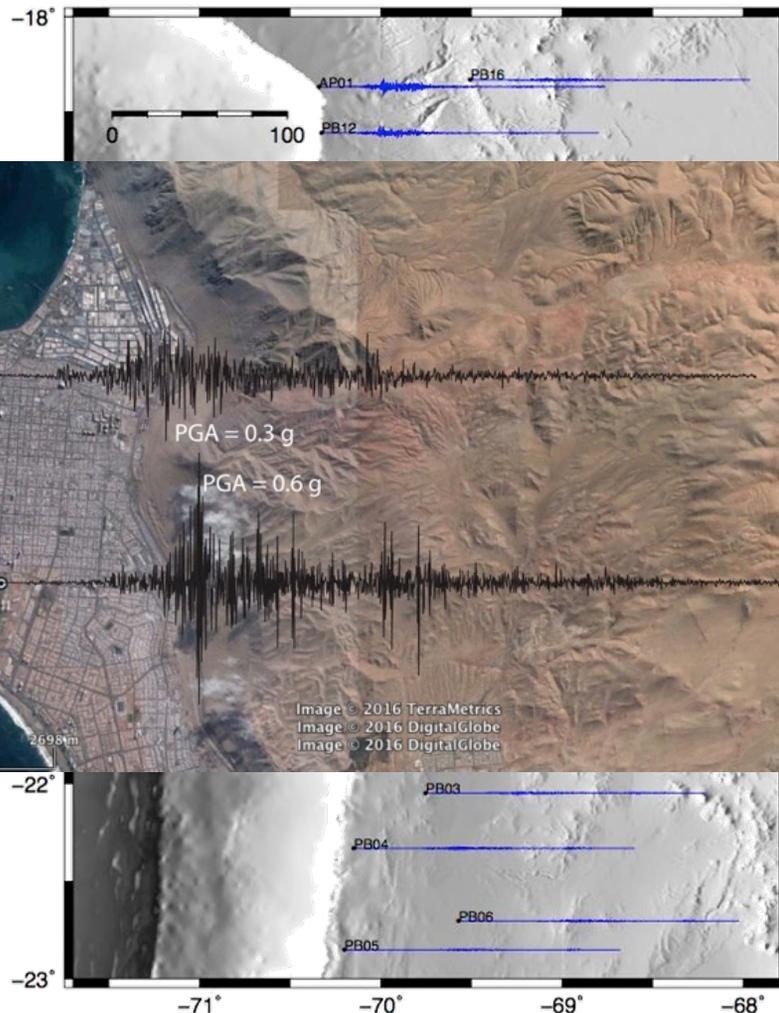
- Se presentan las componentes Este-Oeste de los registros del terremoto
- En C110 (Monte Patria) se registró 0.8 g
- Se ve el sitio en los registros?
- Se presentan los resultados para C110 y G004
- No linealidad



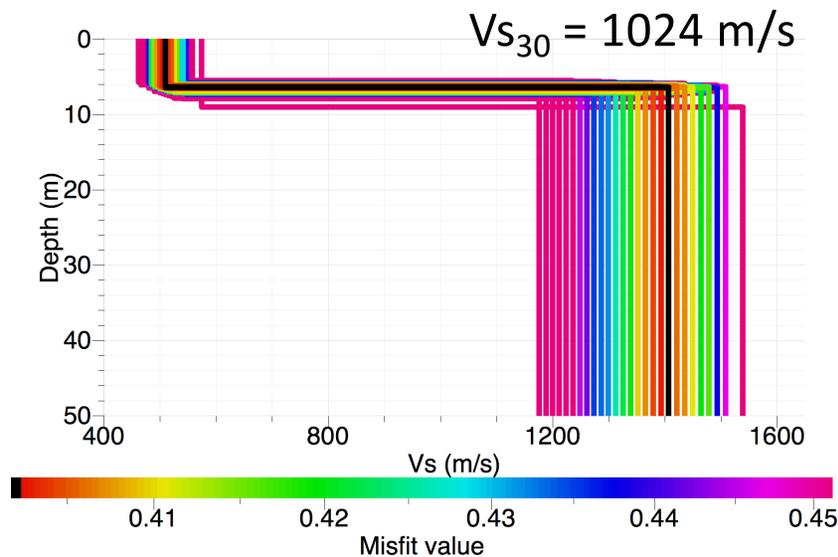
Más datos:

Iquique 2014

- Terremoto de magnitud Mw 8.1
- Se muestran las componentes horizontales con mayor aceleración (PGA)
- Los colores son proporcional al desplazamiento (S.Ruiz)
- Recordemos que se observa una gran diferencia de PGA en la ciudad de Iquique

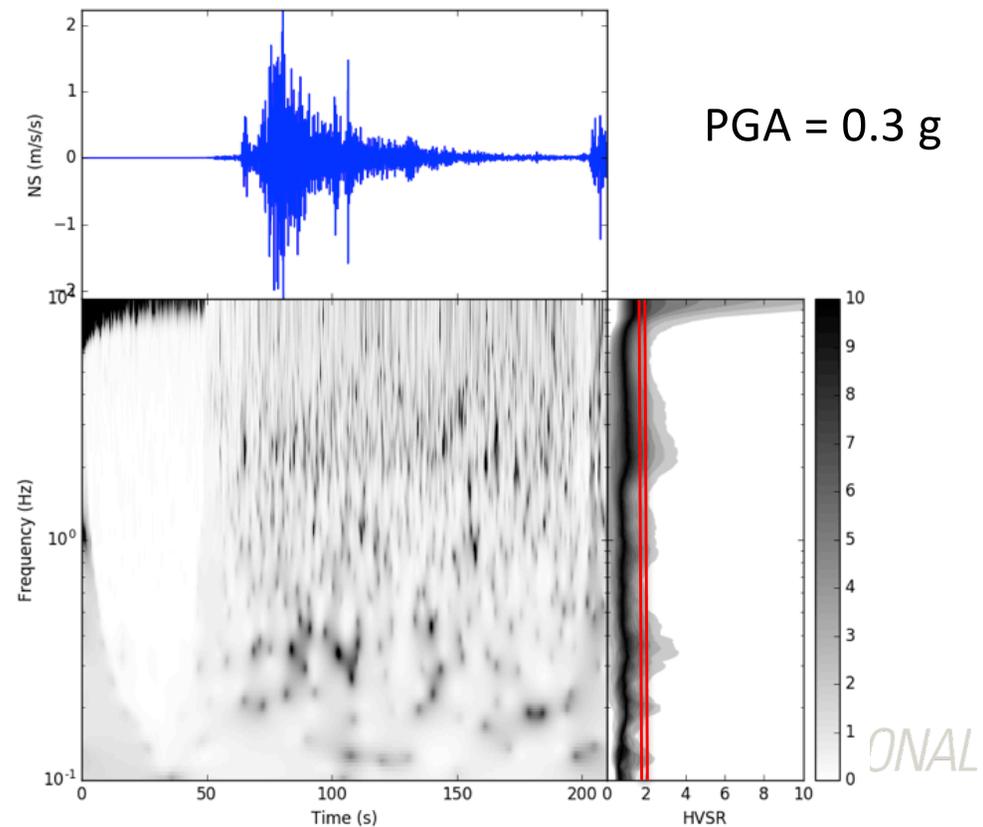
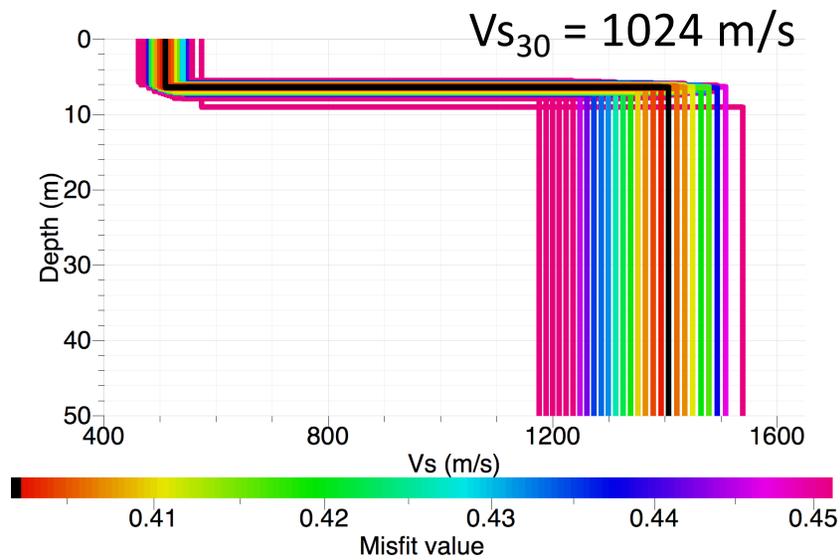


Para T05A se tiene...

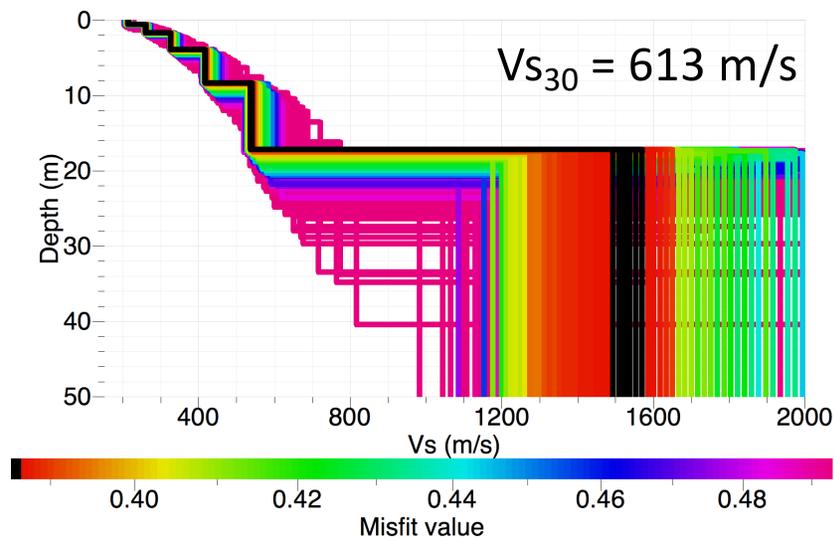


- Se observa un importante salto en los primeros metros
- Partiendo de velocidades $\sim 400 \text{ m/s}$ saltamos a valores sobre 1200 m/s
- Probablemente se trate de una pequeña capa de relleno sobre la roca

Veamos el H/V del registro

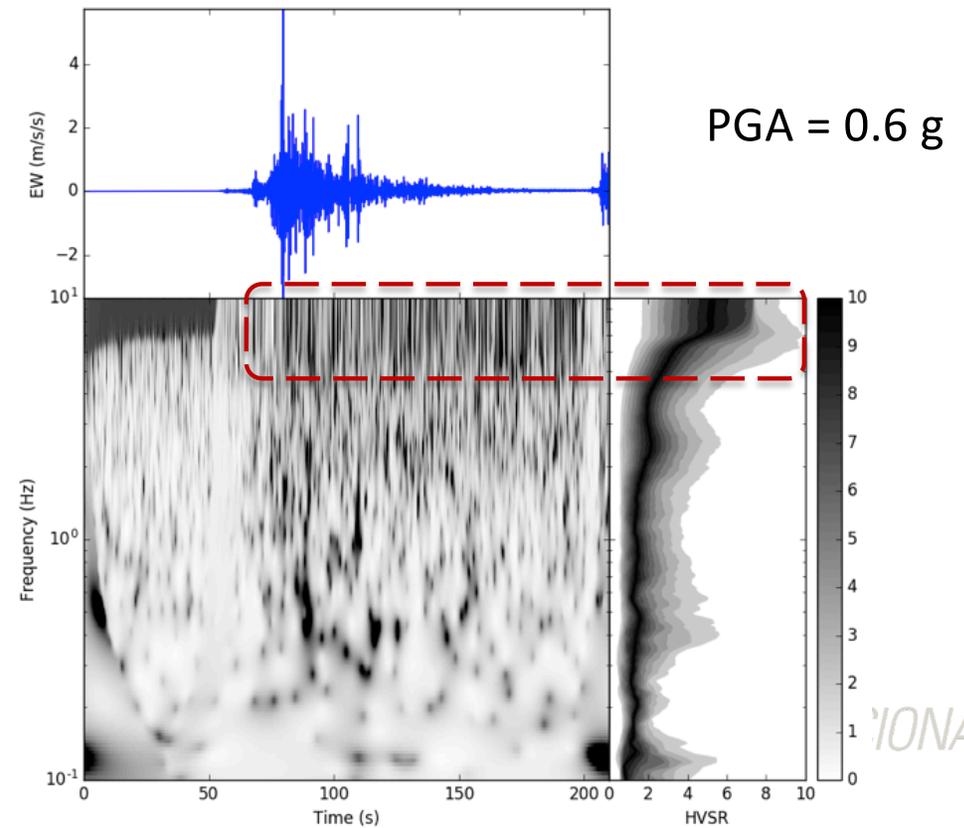
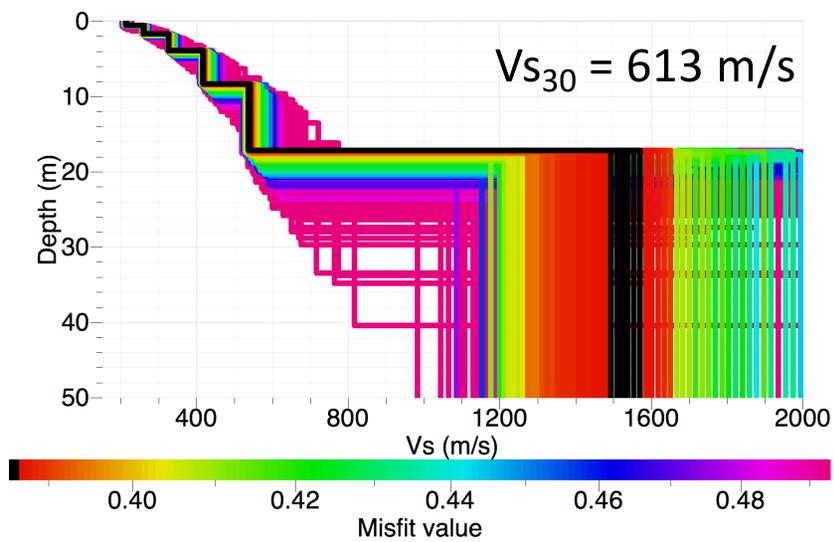


Mientras, en T03A...



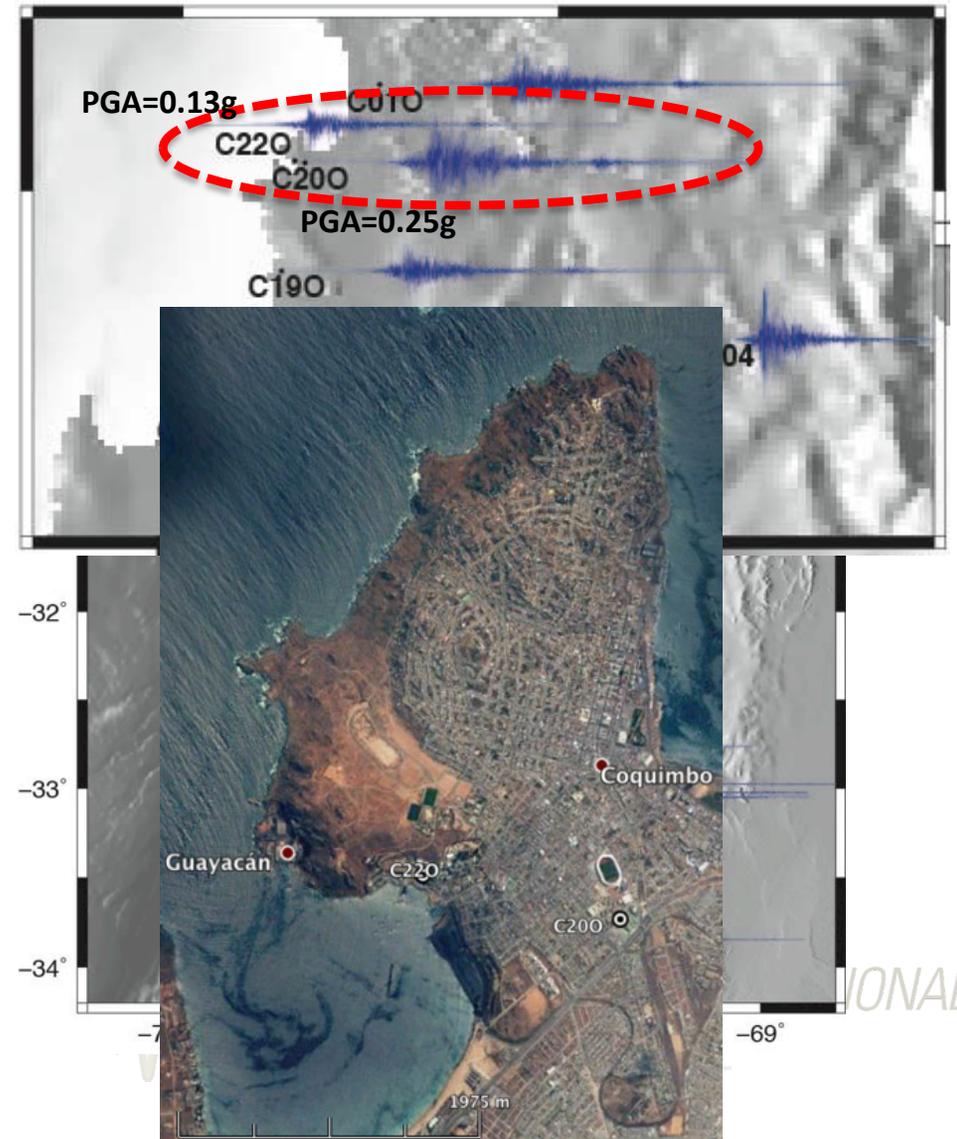
- Cerca de la superficie, se observan una serie de capas de baja velocidad
- Luego, un salto importante $\sim 20 \text{ m}$
- Se llegan velocidades sobre 1000 m/s
- Probablemente se trate de roca

¿Y su H/V?



Para Illapel 2015

- Ahora nos fijaremos en las estaciones del norte
- En Coquimbo habían 2 estaciones:
 - C220: 0.13g
 - C200: 0.25g
- Un factor de 2 estando muy cerca una de otra!



Veamos qué produce esta diferencia

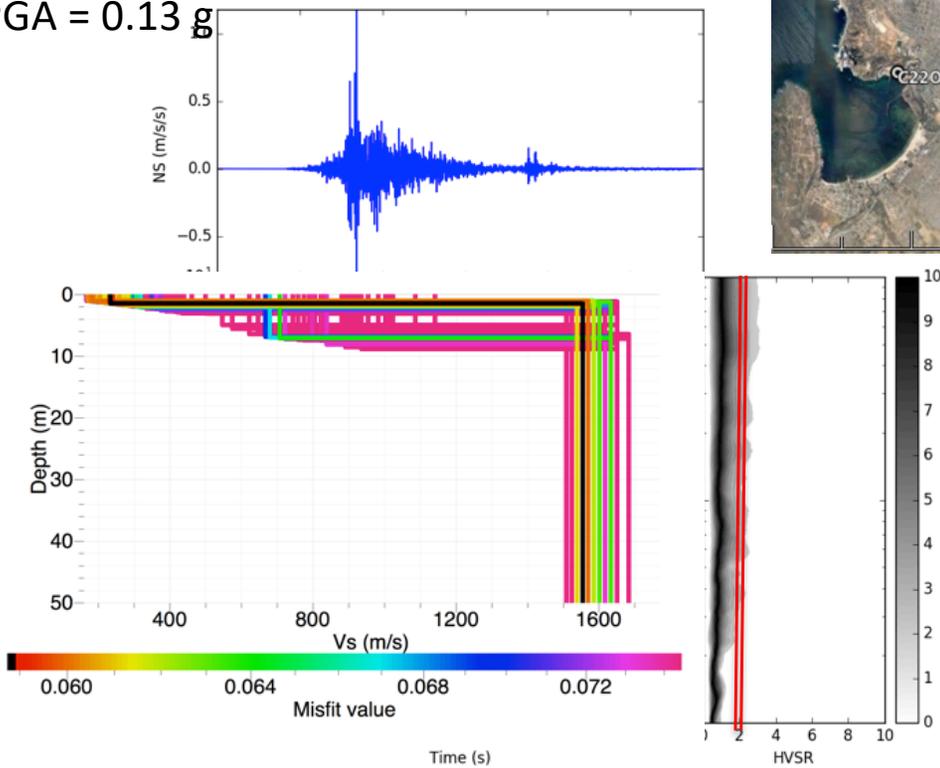
C220 – UCN Guayacán

C200 – Hospital de Coquimbo

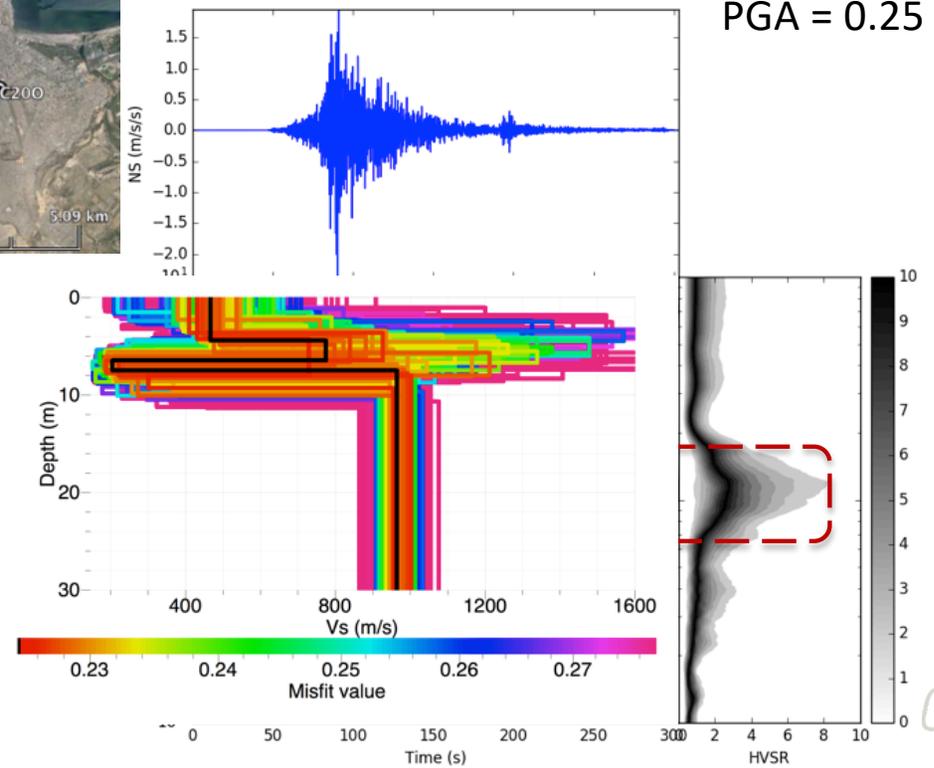
PGA = 0.13 g



PGA = 0.25 g



Presenta un curva plana



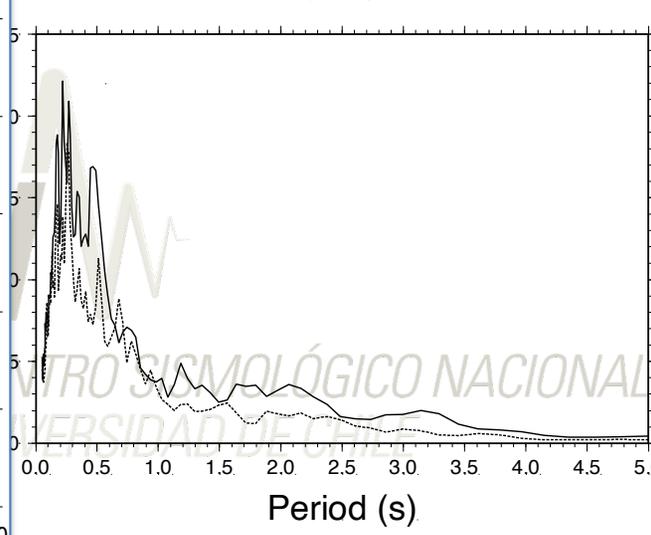
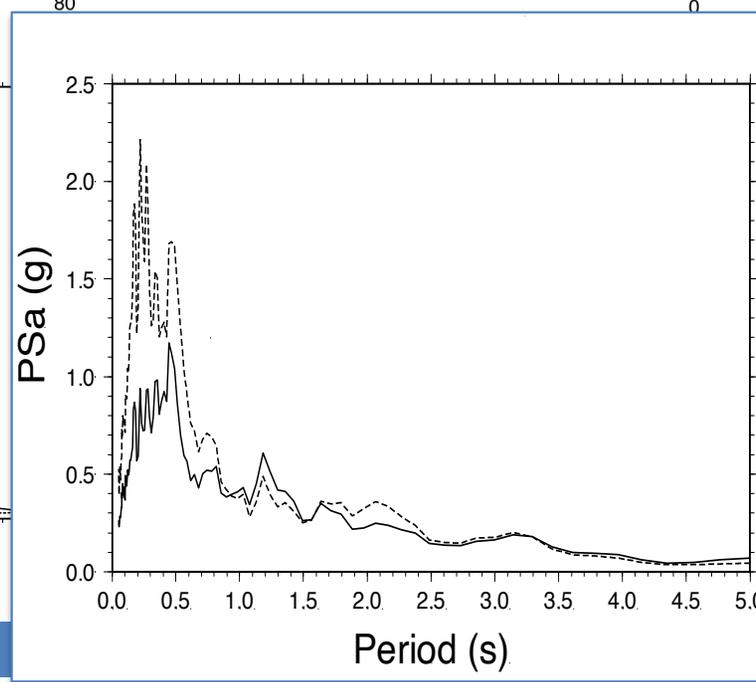
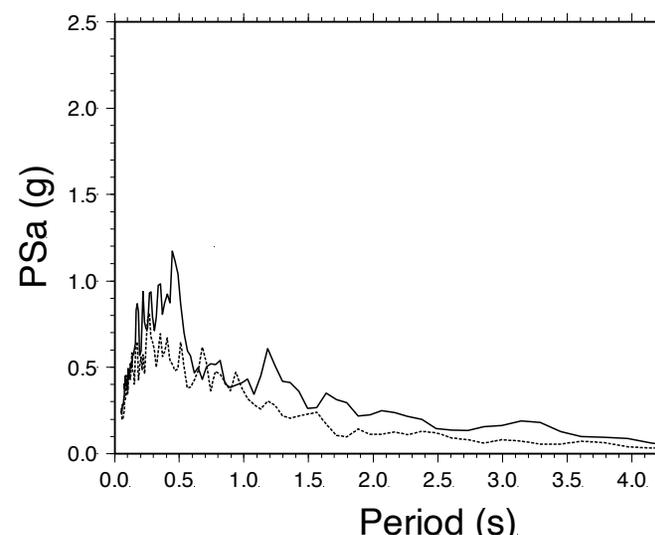
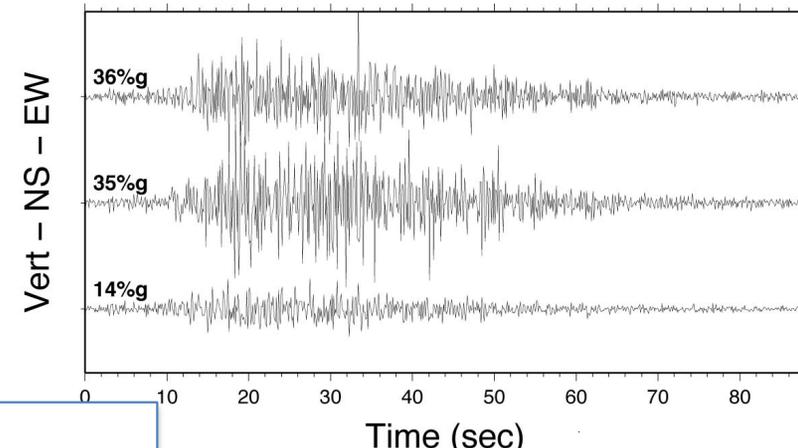
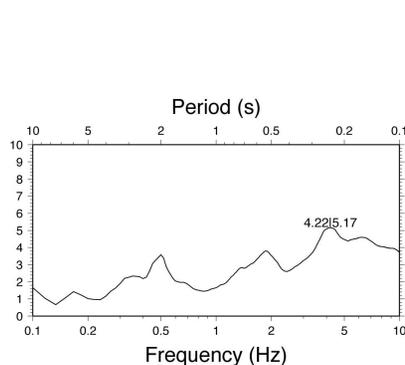
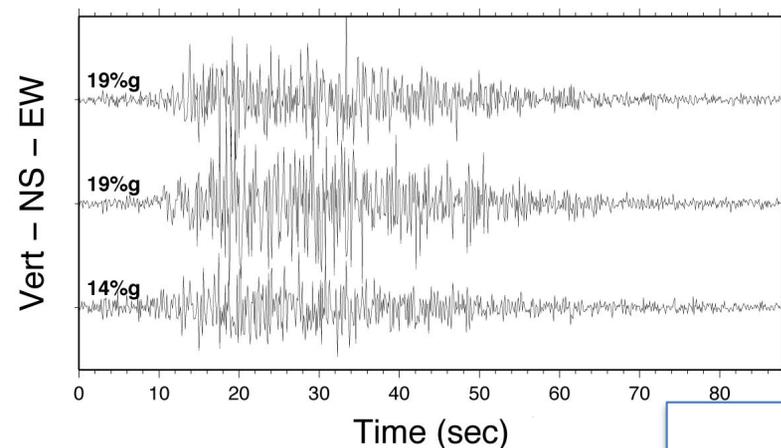
Se observa un claro peak ~ 1 Hz

Efectos en la aceleración

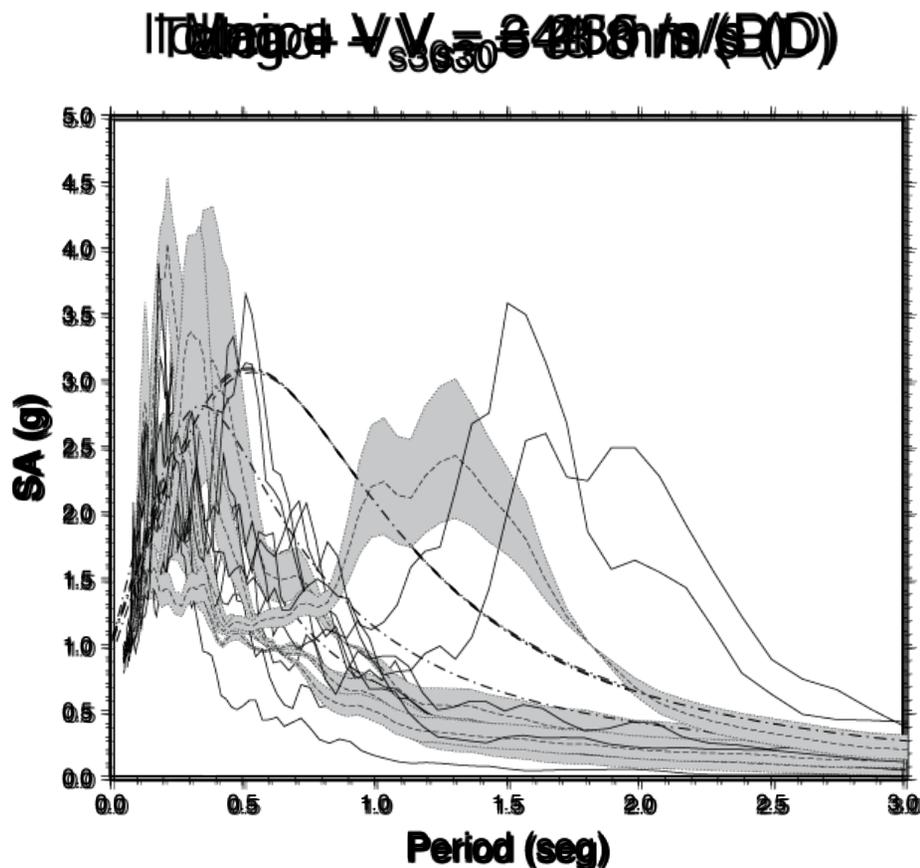
Registros en roca

Función de Transferencia

Registros con efecto de sitio

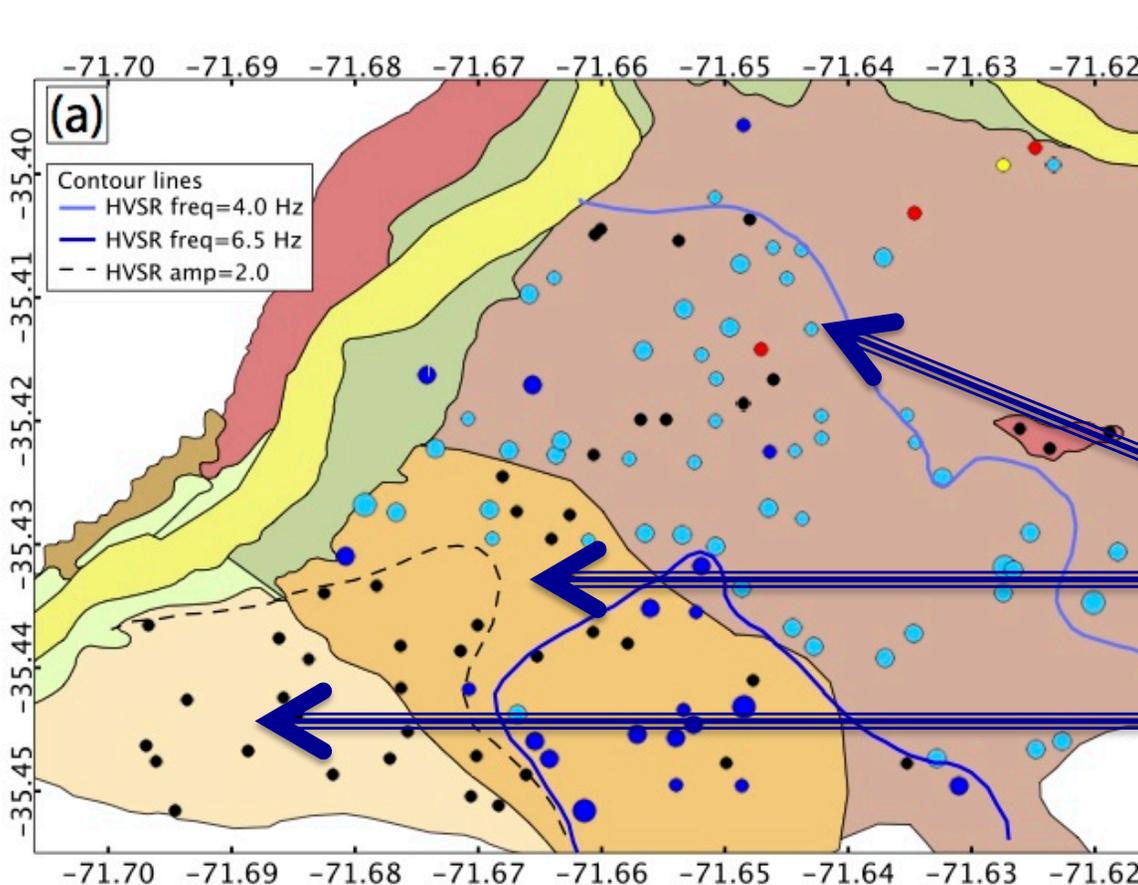


Microvibraciones & Movimiento Fuerte (cont)



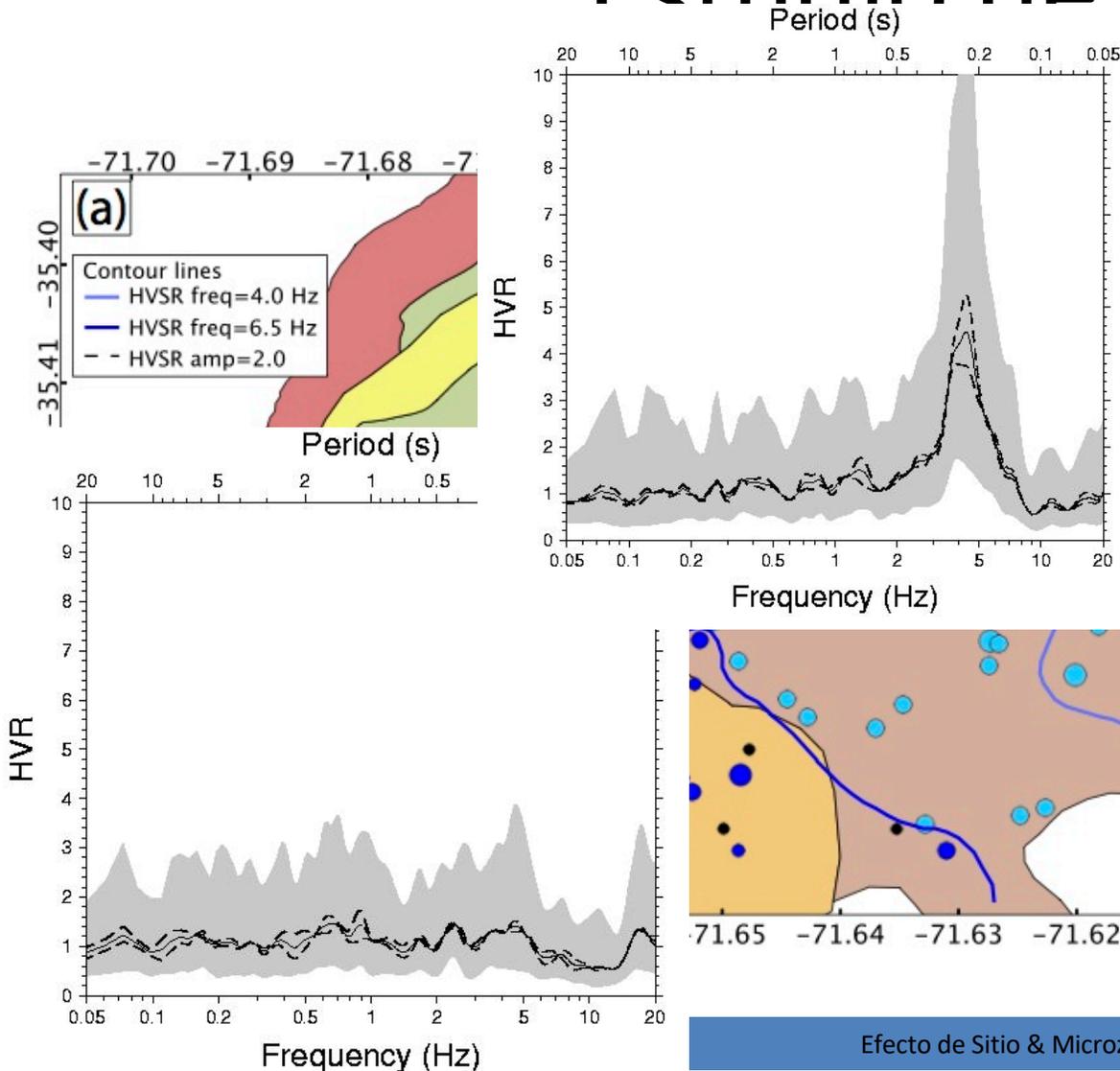
- Teniendo esta información... podemos predecir el comportamiento del suelo en movimiento fuerte?
- Claro!
 - Líneas continuas: espectros de respuesta observados
 - Líneas punteada: espectro estimado de H/V
 - Línea segmentada: espectro de la norma (DS61)
- O no tan claro...

Estudio de Talca



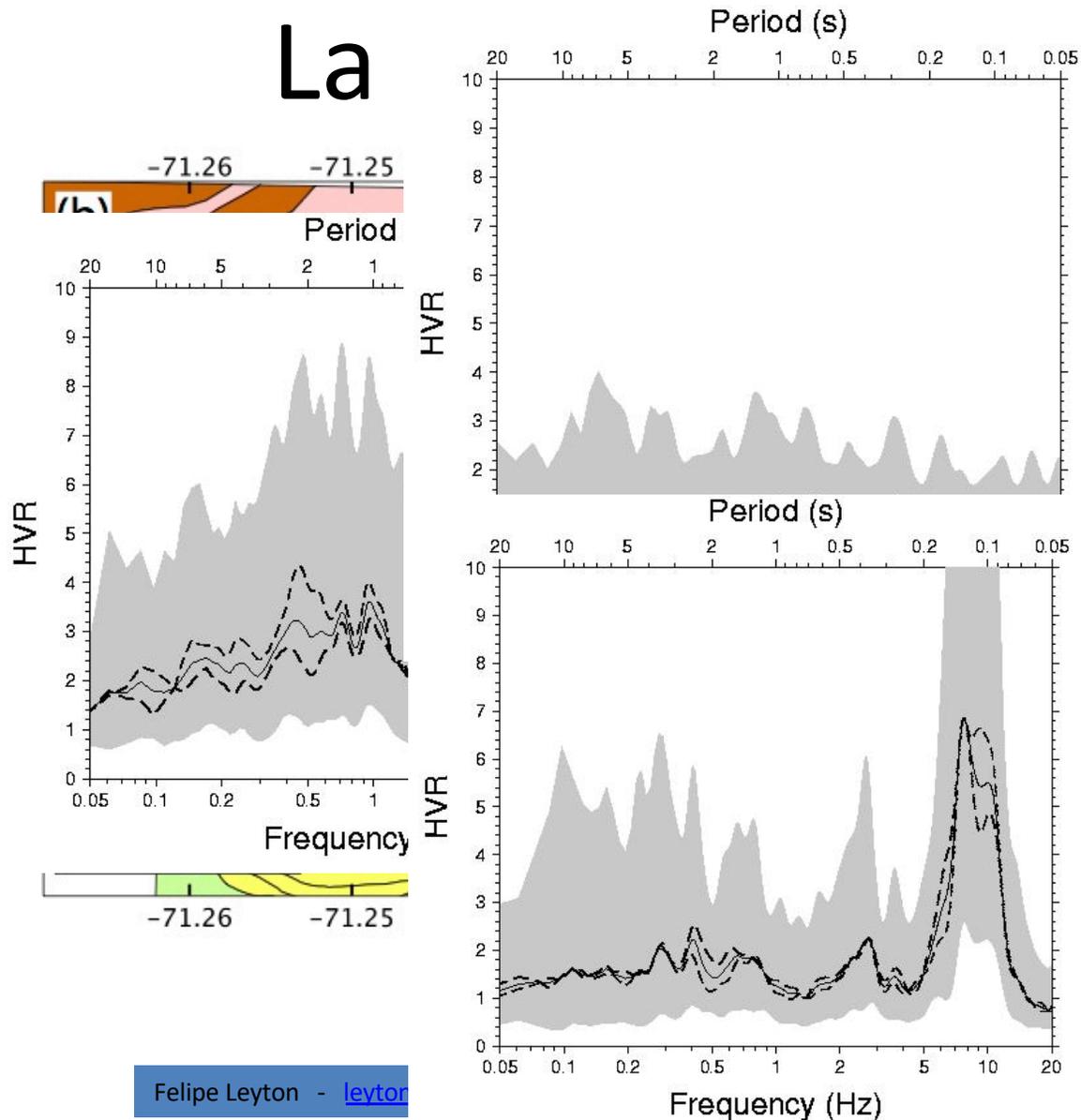
- Mide $\sim 20 \text{ km}^2$, Población: 200.000 hab
- Geología superficial, basada en Thiele (1995), actualizada en base a pozos y terreno
- Se distinguen las siguientes zonas:
 - Qv: Depósitos piroclásticos
 - QfaQv: Fluviales antiguos y piroclásticos
 - Qfa: Fluvial antiguo en abanico

Estudio de Talca



- Se realizaron 130 mediciones de microvibraciones
- Color es proporcional a la frecuencia fundamental
- Negro es para curva H/V plana
- Se distinguen 2 sectores
 - Curvas planas + alta frecuencia
 - Frecuencias 2 a 6 Hz

La



Felipe Leyton - leyton

id de Curicó

Población: 110.00 hab

Geología Superficial,
actualizada en base a pozos
y terreno

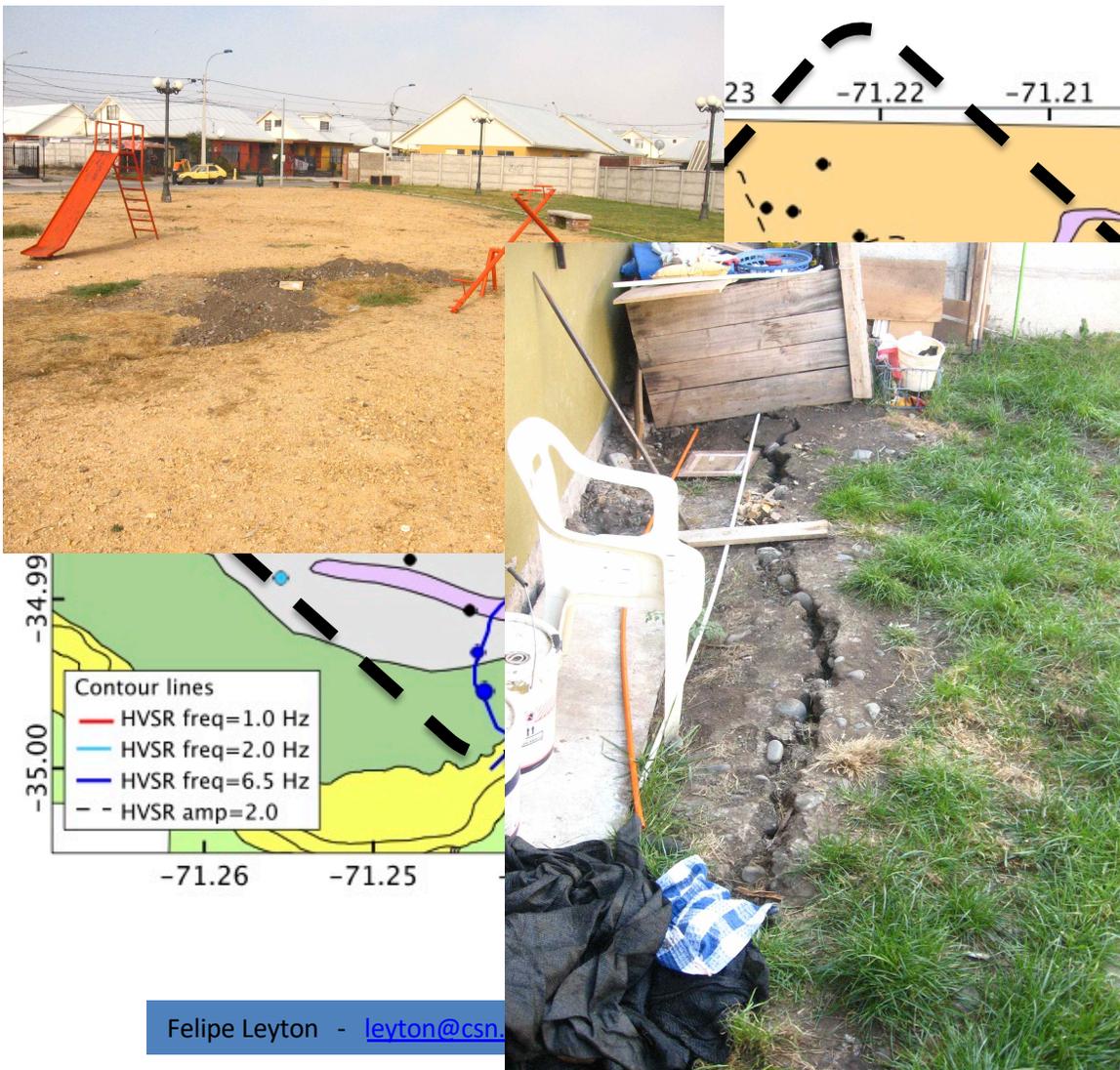
Qfa: gravas antiguas en
abanico

Qt: fluviales antiguos

Microvibraciones:

- Curvas planas
- Picos en alta frecuencia
- Picos en baja frecuencia???

La hermosa ciudad de Curicó

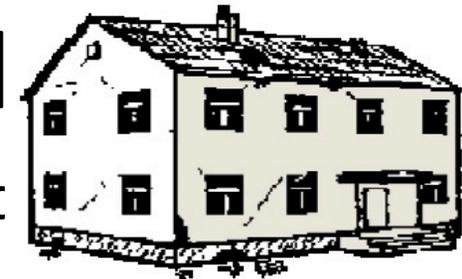


- La situación en Curicó es mucho más compleja
- Abanico aluvial en transición de:
 - Proximal (al Noreste): granos gruesos y gravas
 - Distal (al Surponiente): granos más finos (arenas y limos)
- Evidencias de licuación

Estimaciones de intensidad Clases de Vulnerabilidad

Clase C: Albañilería Confinada

Clase A: Ac



Daños del Terremoto del 2010

Intensidades MSK en Talca

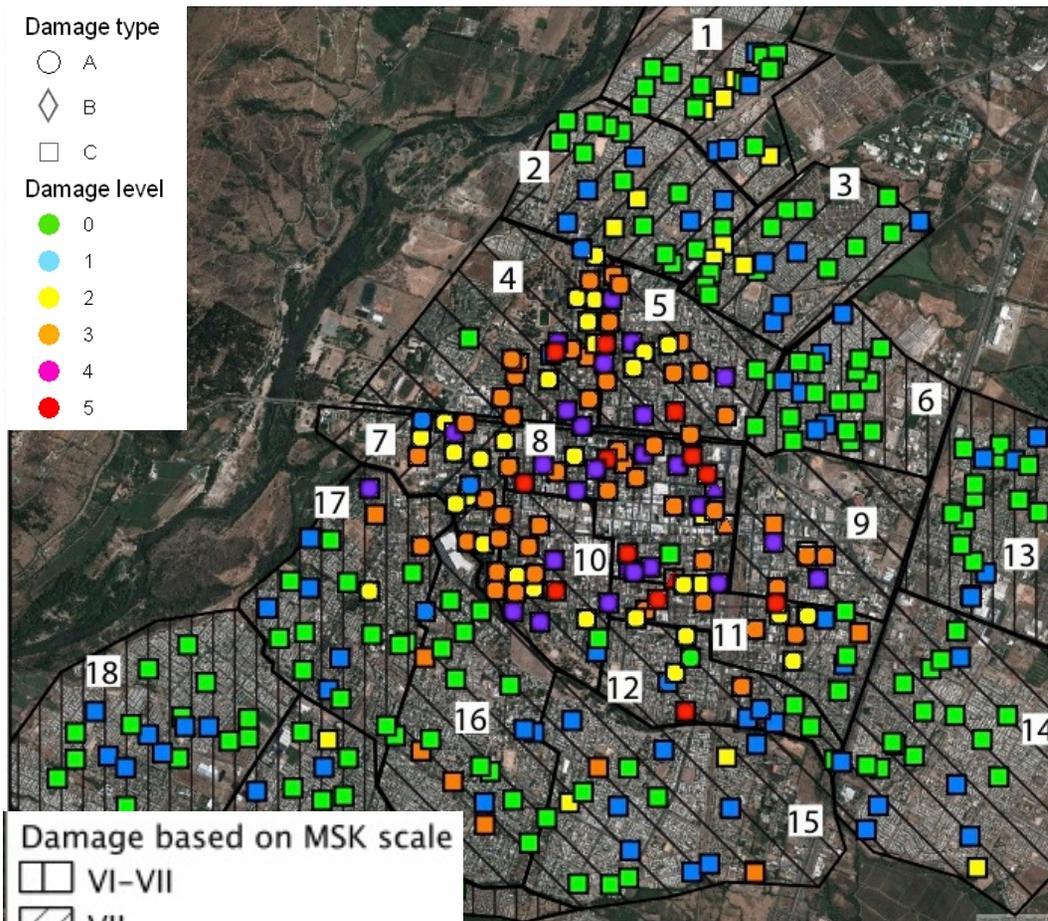
LEGEND

Damage type

- A
- ◇ B
- C

Damage level

- 0
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5



Damage based on MSK scale

- VI-VII
- ▨ VII
- ▩ VII-VIII
- ▧ VIII

- Se realizaron más de 200 encuestas
- Siguiendo Monge & Astroza (1989) se considera:
 - Tipo de vivienda (clase de vulnerabilidad)
 - Nivel de daño (1 a 5)
- Intensidad MSK varía entre VI-VII hasta VIII

Daños del Terremoto del 2010

Intensidades MSK en Curicó

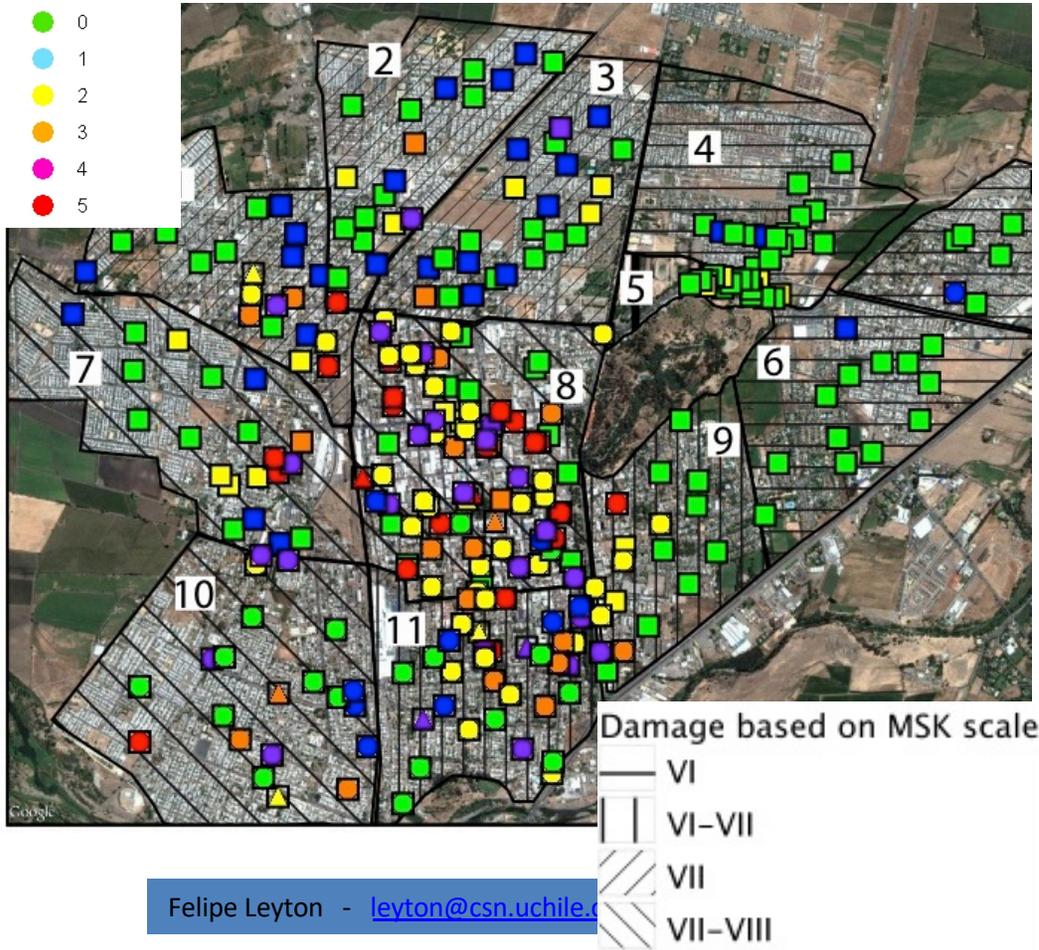
LEGEND

Damage type

- A
- ◇ B
- C

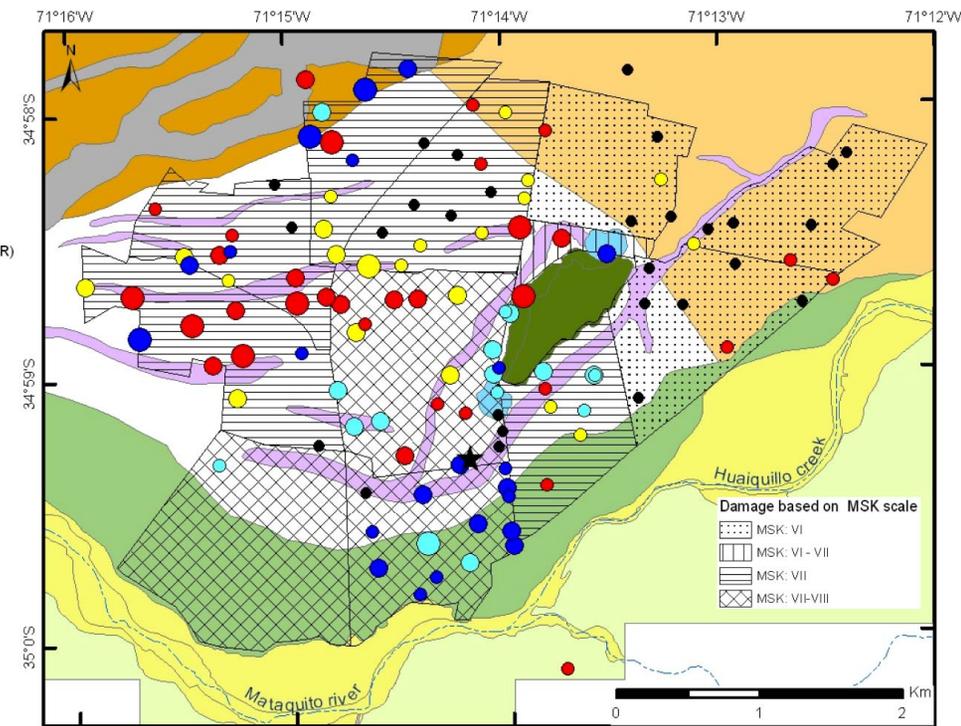
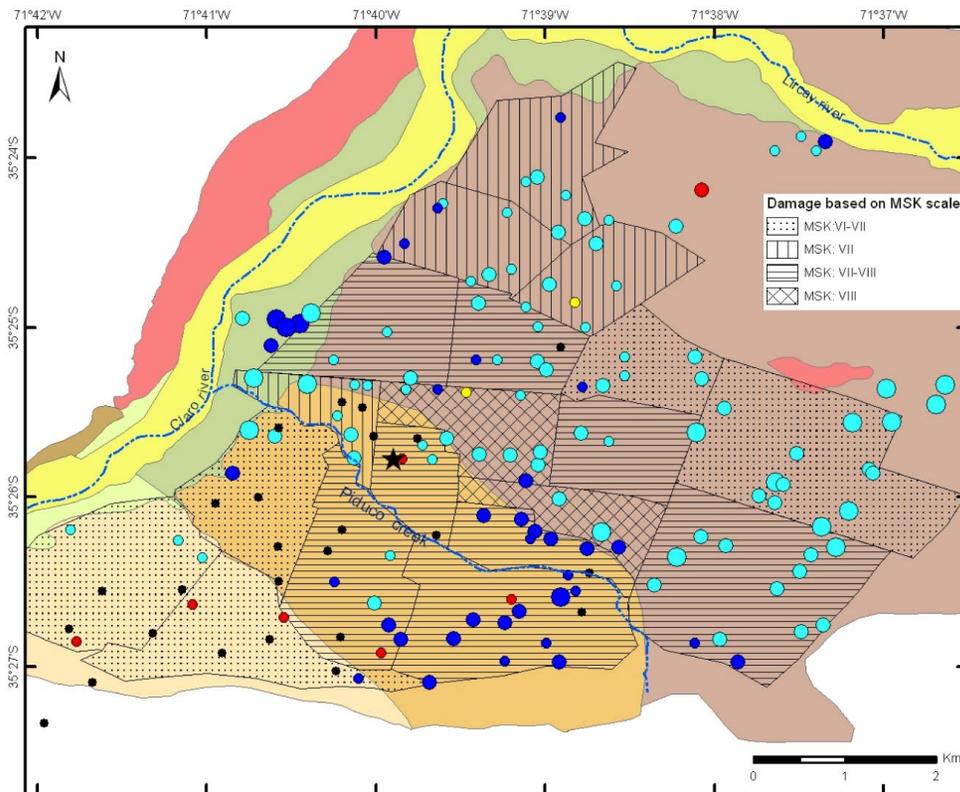
Damage level

- 0
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5



- Se realizaron más de 170 encuestas
- Siguiendo Monge & Astroza (1989) se considera
 - Clase de vulnerabilidad (A, B ó C)
 - Nivel de daño (1 a 5)
- Intensidad MSK varía entre VI y VII-VIII

En resumen: Microzonificación Sísmica



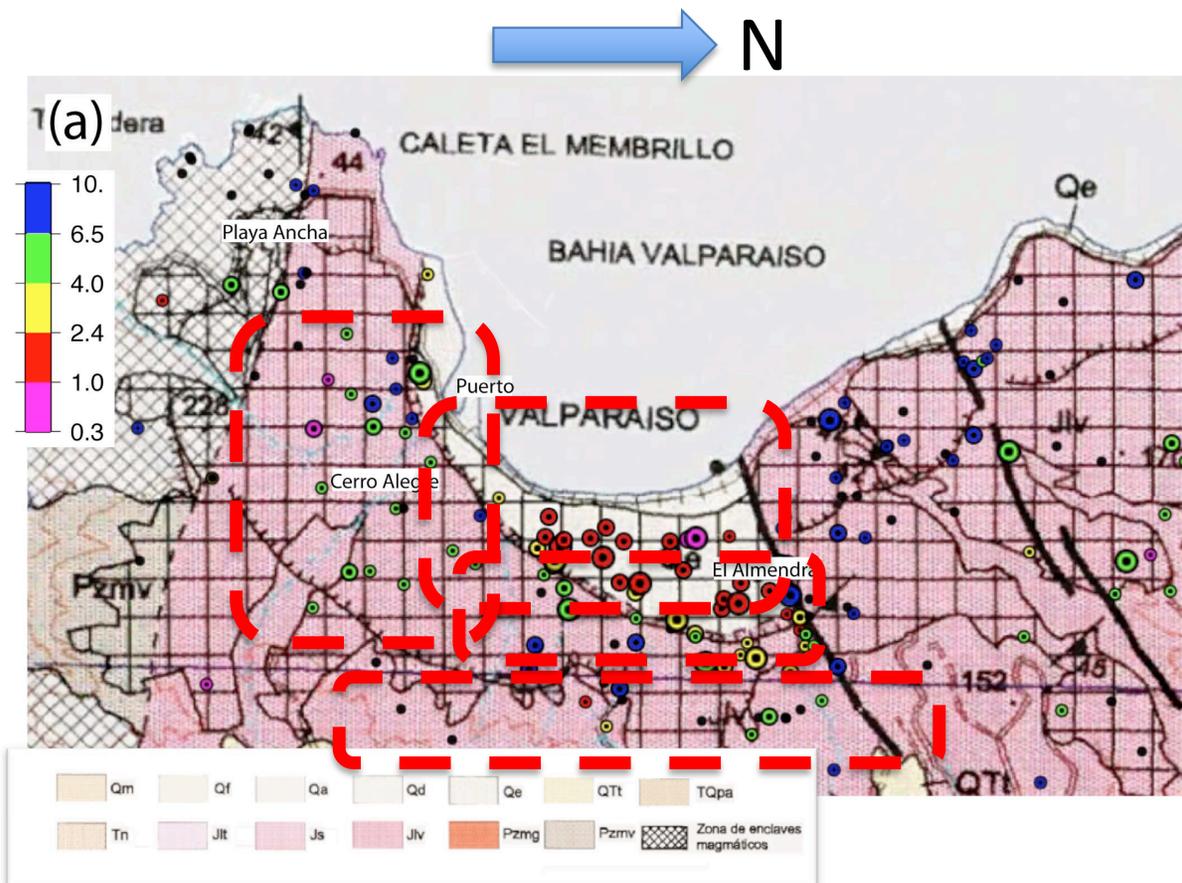
Leyton et al (2013)

Otro ejemplo: Valparaíso & Viña del Mar

- La zona comprendida, de Sur a Norte:
 - Valparaíso
 - Viña del Mar
 - Recreo
 - Concón
- Revisamos al Geología, parte de ella actualizada
- Realizamos casi 400 mediciones de microvibraciones

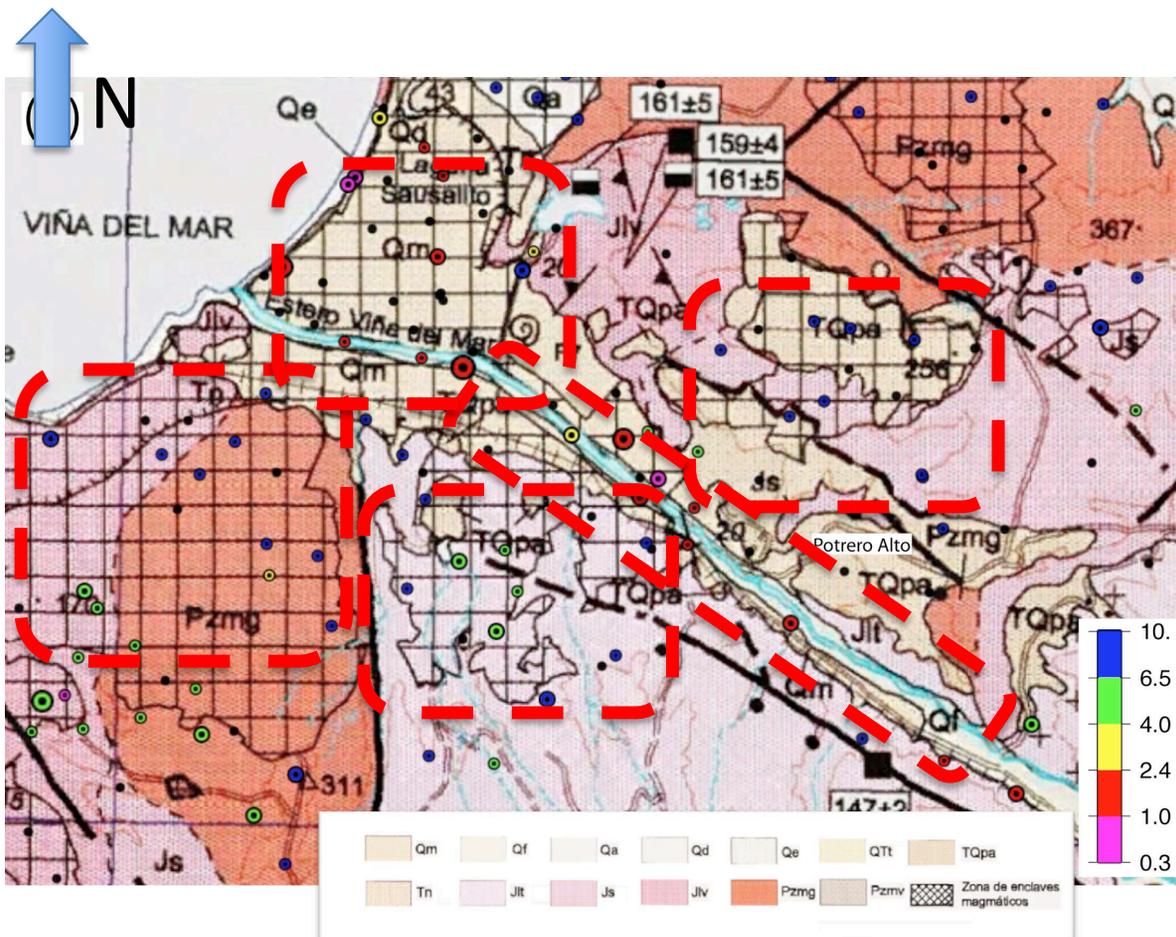
Baquedano (2012)

En Valparaíso

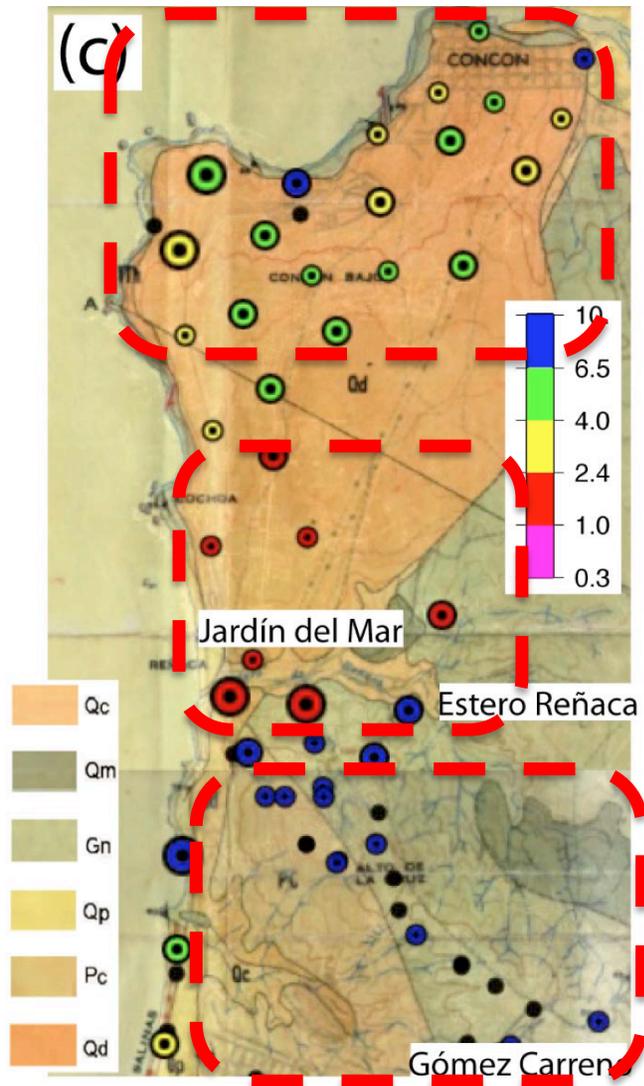


- **Plano** (depósitos litorales y eólicos actuales): frecuencias bajas
- **Sector oriente** (rocas intrusivas del Jurásico): predominancia de frecuencias muy altas y curvas planas
- **Sector centro poniente**: frecuencias altas producto del regolito tipo maicillo
- **Centro**: transición entre el relleno del plano y los cerros: a medida en que se avanza hacia los sectores altos en roca, las frecuencias van aumentando

En Viña del Mar



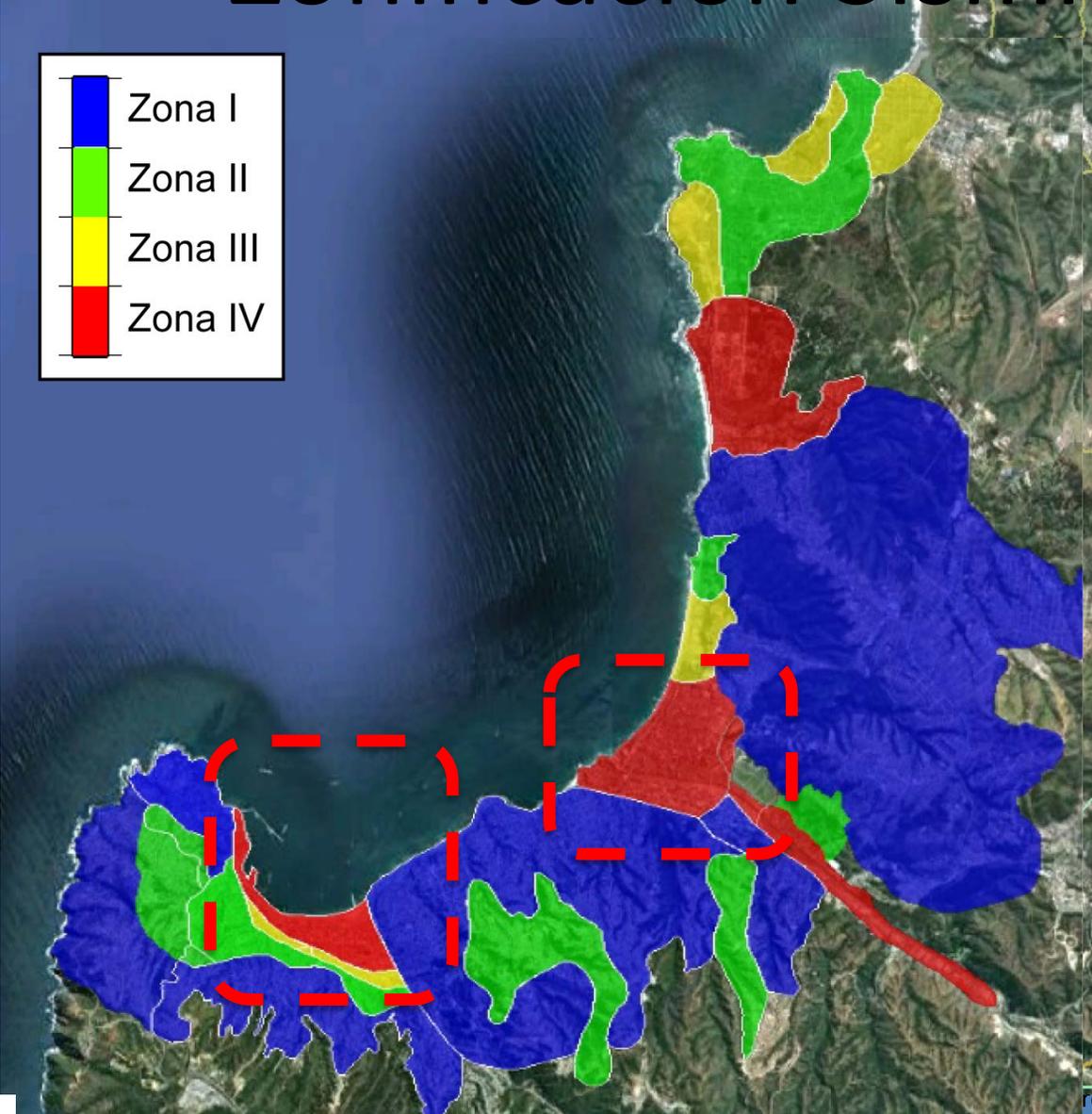
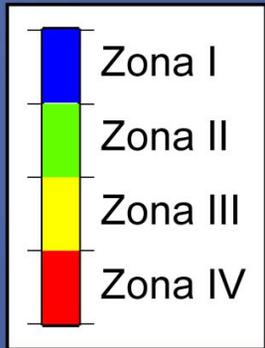
- **Rocas intrusivas del Paleozoico y del Jurásico:** frecuencias muy altas y curvas planas
- **Sector al surponiente del estero Marga Marga:** frecuencias altas, probablemente debido al regolito
- **Estratos de Potrero Alto:** curvas planas
- **Estero Marga Marga:** frecuencias bajas
- **Plano de Viña del Mar** (sedimentos marinos cuaternarios): frecuencias bajas con curvas planas esto se traduce en que esta zona tiene un comportamiento heterogéneo



Reñaca & Concón

- **Población Gómez Carreño hasta las cercanías de Jardín del Mar en Reñaca (roca):** curvas planas y frecuencias muy altas
- **Entre el estero de Reñaca hasta la entrada a la localidad de Concón (arenas eólicas):** frecuencias bajas y de gran amplitud
- **Concón:** frecuencias medias y altas, encontrándose sobre la misma unidad geológica que la localidad de Reñaca.
- La diferencia en puede deberse al grado de compactación o que el estrato de suelo sea de menor espesor al que se encuentra en Reñaca

Zonificación Sísmica Preliminar



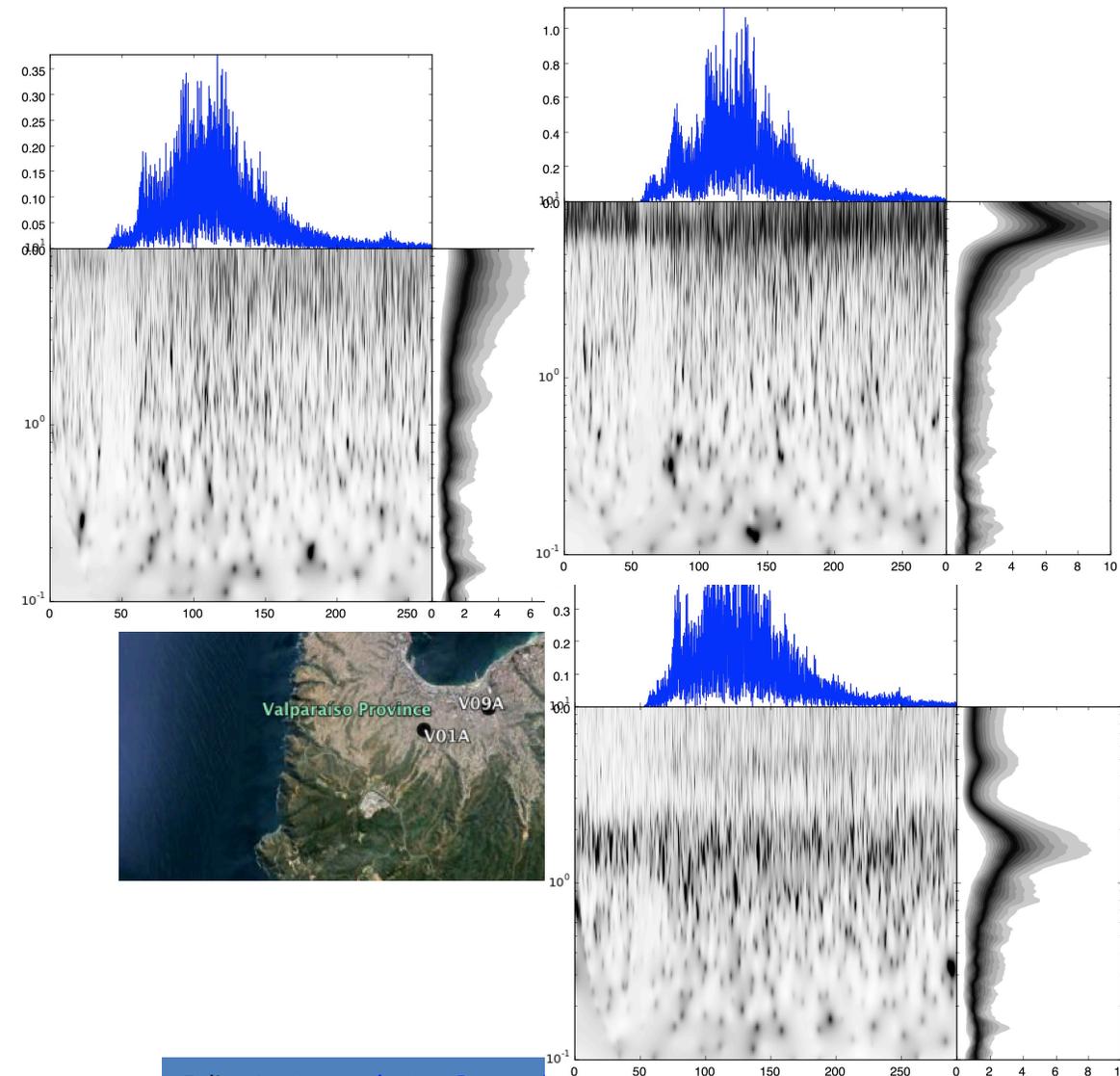
- En la Zona IV se espera más daño, la Zona I es roca
- Destacan el plano de Valparaíso y de Viña del Mar (población Vergara) los cuales han sufrido grandes daños para los eventos de 1906 y 1985
- Grandes contrastes entre roca y relleno de suelo

Baquedano (2012)

Y el Movimiento Fuerte?

Para el terremoto de Illapel 2016

- En V01A estamos en roca
- V09A está en el plano de Valparaíso, en el Congreso
- V02A se encuentra sobre roca, probablemente con una capa delgada meteorizada

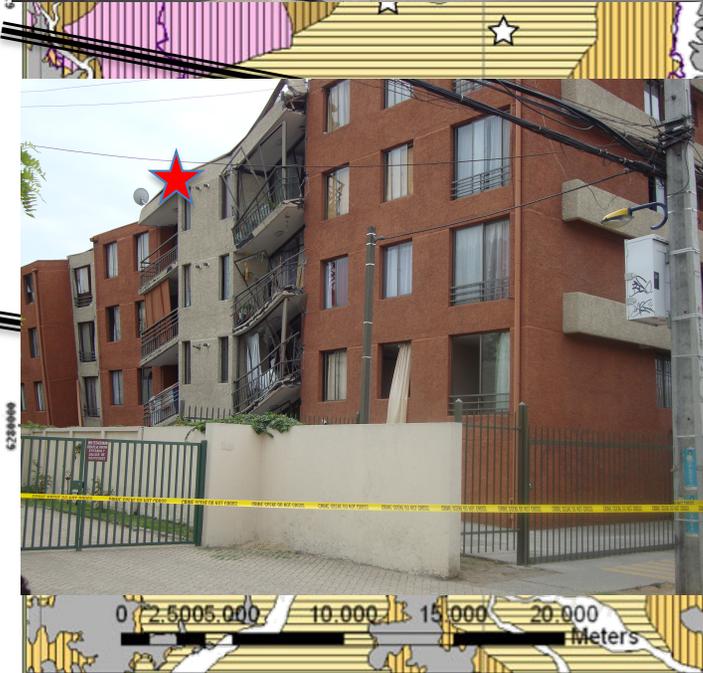


En Santiago

- Zona B:
 - Finos del Noroeste
 - Cenizas
 - Depósitos de laderas
- Zona A:
 - Gravas del Maipo y Mapocho
- Tras el terremoto del 2010



- ▨ Seismic Zone A
- ▨ Seismic Zone B
- ☆ Damage Reported after Maule 2010



OLÓGICO NACIONAL
DE CHILE

Otra mirada:

Ecuaciones de Predicción de Movimiento

- Siguiendo Kotha et al (2018), se ajusta un modelo predictivo del espectro de respuesta PSa:

$$\log(\text{PSa}) = f_R(\text{Mw}, R) + f_M(\text{Mw}) + f_s(\text{Vs}_{30}) + \delta B_e + \delta W_{es}$$

donde

- $f_R(\text{Mw}, R)$: función considera la atenuación con la distancia
- $f_M(\text{Mw})$: función considera de la fuente
- $f_s(\text{Vs}_{30})$: función del efecto de sitio
- Mw: magnitud (momento, por ejemplo)
- R: distancia hipocentral (o al plano de falla)
- Vs_{30} : velocidad promedio de la onda S en los 30 m superiores
- δB_e & δW_{es} : residuales entre & intra eventos

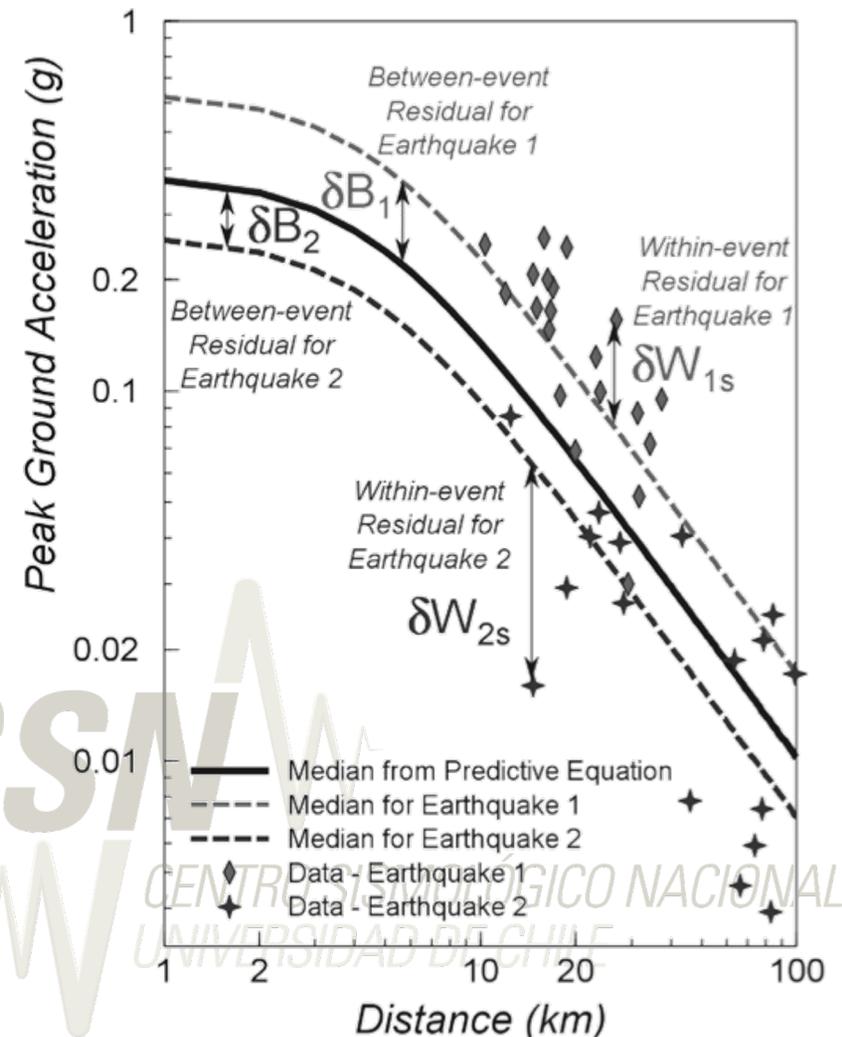
El modelo

$$\log(\text{PSa}) = f_R(\text{Mw}, R) + f_M(\text{Mw}) + \delta B_e + f_s(\text{Vs}_{30}) + \delta W_{es}$$

- Veamos qué son estos residuales: δB_e & δW_{es}
- Simplificando, podemos definir un **espectro de referencia** como

$$\log(\text{PSa}_{\text{REF}}) = f_R(\text{Mw}, R) + f_M(\text{Mw}) + \delta B_e$$

donde se ha removido el efecto de sitio ($f_s(\text{Vs}_{30})$ - sitio) y el residual intra-evento (δW_{es} - del evento)



Veamos el residual

- El residual intra-evento (δW_{es}) posee 2 factores:

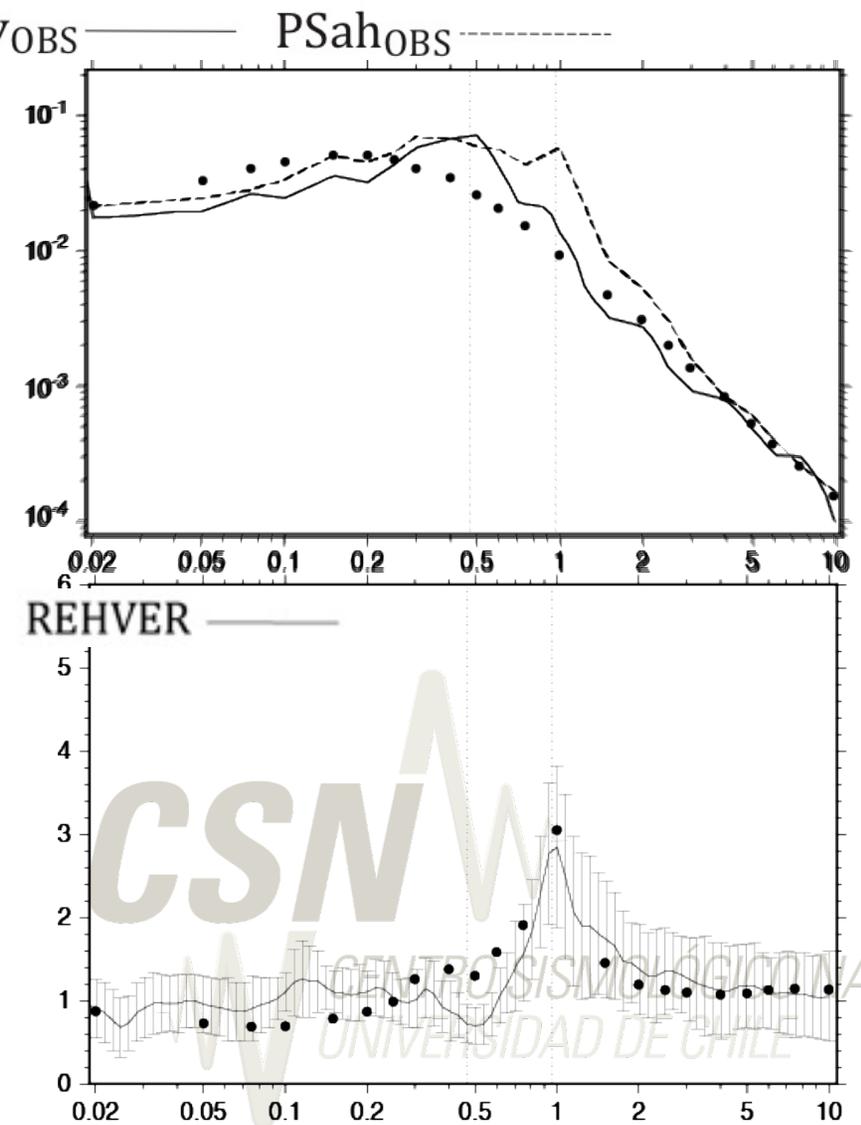
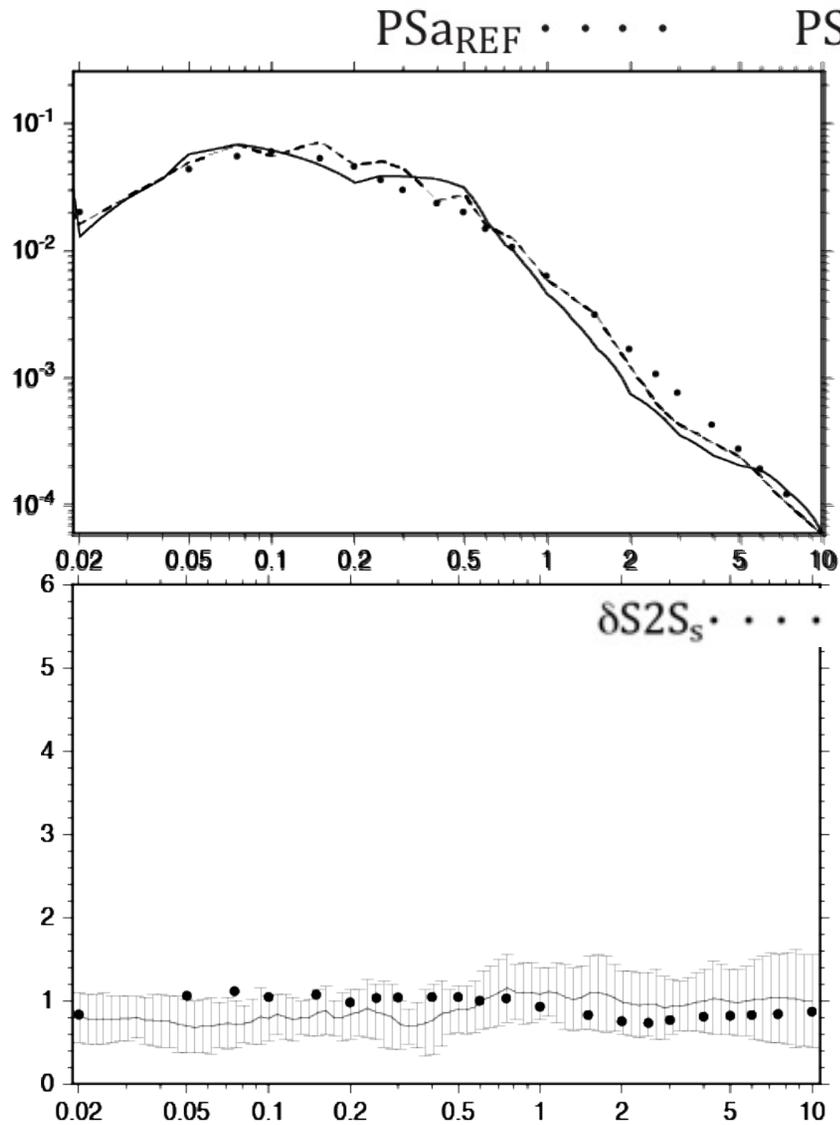
$$\delta W_{es} = \delta S2S_e + \delta WS_{es}$$

donde

- $\delta S2S_e$ corresponde al **efecto de sitio**
- δWS_{es} son variaciones de 1 sola estación, para este evento
- Del trabajo de Rodriguez-Marek et al. (2011), el factor de sitio se puede obtener como:

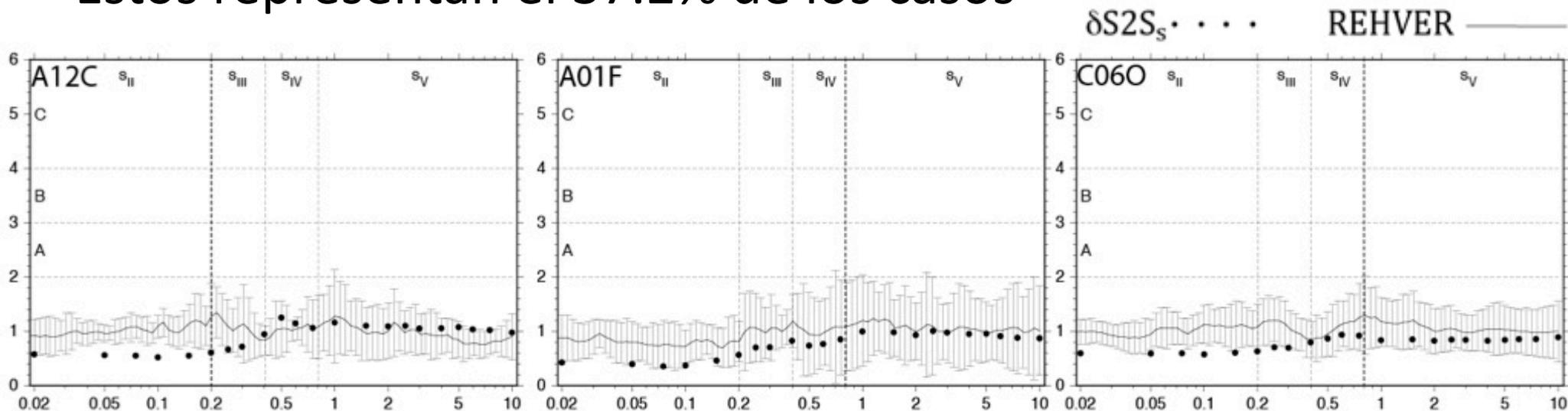
$$\delta S2S_e = 1/N_{es} \sum \delta W_{es}$$

- Esta estimación será comparada con la REHV de espectros de respuesta



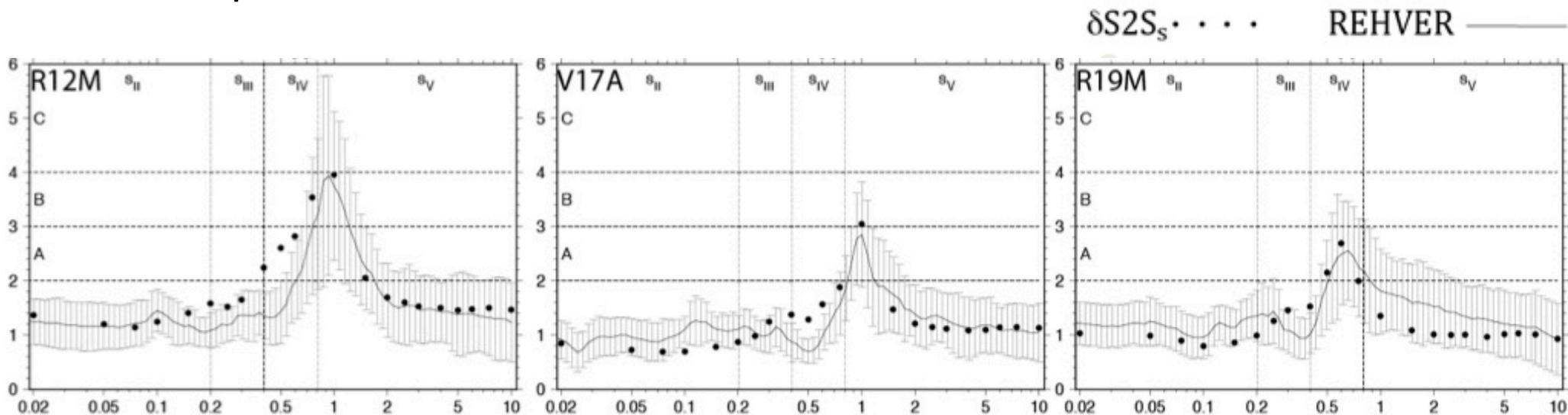
Análisis de resultados: Caso 1

- Se presentan resultados para A12C, A01F y C06O
- Se observa una coincidencia entre los resultados entre $\delta S2S$ y REHVER
- En ambos casos, no se observa un periodo predominante
- Estos representan el 37.2% de los casos



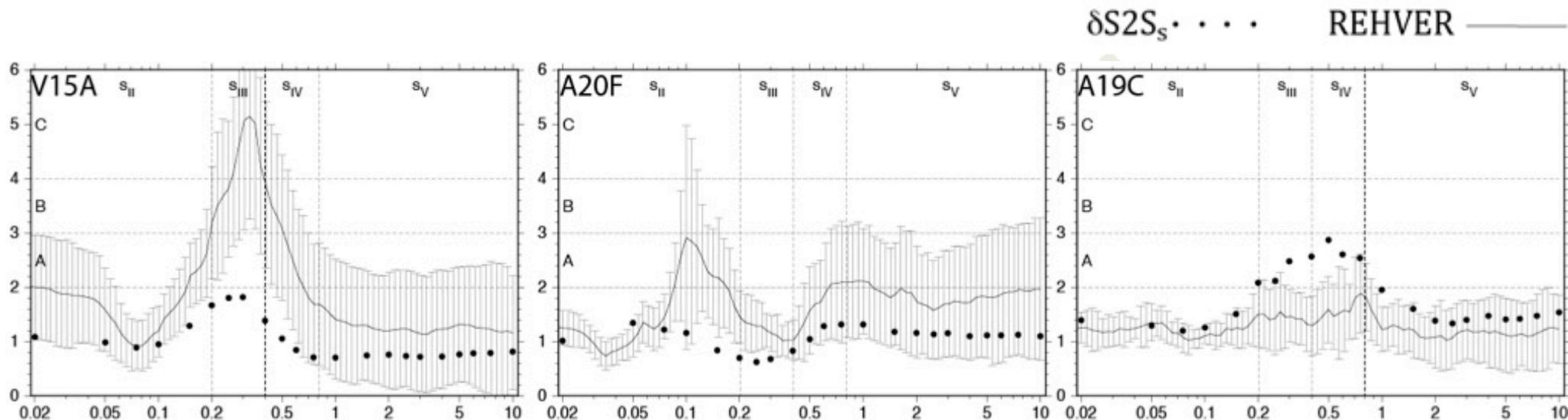
Análisis de resultados: Caso 2

- Nuevamente, se observa una coincidencia entre los resultados entre $\delta S2S$ y REHVER
- Ahora, ambos métodos presentan un periodo predominante y amplitud similares
- Se espera amplificación de la componente horizontal en dichos periodos
- Estos representan el 36.6% de los casos

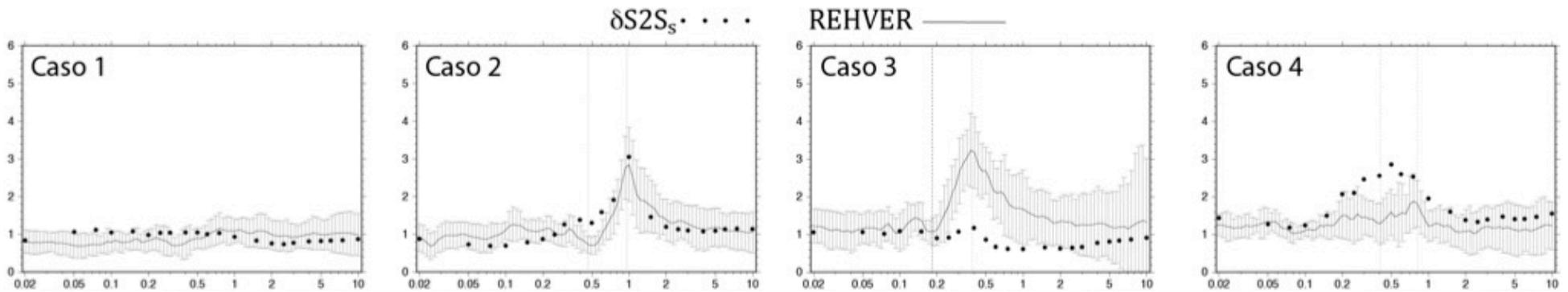


Análisis de resultados: Casos 3+4

- Vemos discrepancias entre los resultados entre $\delta S_2 S_s$ y REHVER:
 - Para V15A y A20F, REHVER presenta un peak, pero $\delta S_2 S_s$ no (caso 3)
 - Para A19C, $\delta S_2 S_s$ presenta un peak, pero REHVER no (caso 4)
- En el caso 3 se predice amplificación que no existe (20.7% del total)
- En el caso 4 no se predice una amplificación existente (5.5% del total)



Tratando de entender



Sin amplificación

Amplificación en
ambos casos

REHVER predice
amplificación, pero
 $\delta S2S$ no

$\delta S2S$ tiene
amplificación, pero
REHVER no la
observa

37.2% del total

36.6% del total

20.7% del total

5.5% del total

¿Preguntas?

¡Gracias!