



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



FACULTAD DE INGENIERIA
en acción continua...

PRÁCTICA PROFESIONAL SUPERVISADA

ALUMNO: Juan Manuel Barbagelata

LEGAJO N°: 10100

CARRERA: Ingeniería Civil

PROYECTO: Análisis numérico 2D de respuesta sísmica local

INSTITUCIÓN: Università degli Studi di Napoli Federico II

TUTOR DE LA INSTITUCIÓN: Prof. Francesco Silvestri

PERIODO DE PRÁCTICA: 18/09/2018 – 19/12/2018

AÑO: 2019

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	2
2.	OBJETIVOS	2
3.	DESARROLLO	3
	<i>a. Ubicación</i>	3
	<i>b. Antecedentes</i>	4
	<i>c. Procedimiento de análisis</i>	5
	<i>d. Acciones sísmicas</i>	7
	<i>e. Modelo geotécnico</i>	11
	<i>f. Análisis unidimensionales</i>	17
	<i>g. Análisis bidimensionales</i>	26
4.	RESULTADOS	29
	<i>a. Resultados 1D</i>	29
	<i>b. Resultados 2D</i>	33
	<i>c. Comparación de resultados 1D y 2D</i>	38
5.	DISCUSIÓN	42
6.	CONCLUSIÓN.....	44
7.	SUGERENCIAS PARA FUTUROS TRABAJOS	45
8.	AGRADECIMIENTOS.....	46
9.	REFERENCIAS	46
10.	ANEXOS.....	50
	<i>a. Anexo 1</i>	50
	<i>b. Anexo 2</i>	52
	<i>c. Anexo 3</i>	55
	<i>d. Anexo 4</i>	65

1. INTRODUCCIÓN

Los eventos sísmicos son de los fenómenos naturales con mayor impacto en la población e infraestructura de las ciudades. Las disciplinas ligadas a su estudio han intentado durante años evaluar sus efectos de la forma más precisa posible para así poder acondicionar las obras civiles y que estas mejoras ayuden a preservar las vidas y recursos de sus usuarios.

La Ingeniería Geotécnica Sísmica es una de estas disciplinas y entre sus objetivos es la evaluación del comportamiento del terreno durante los eventos sísmicos, al cual denomina Respuesta Sísmica Local. Los análisis de este tipo buscan no solo evaluar cómo el suelo responde frente al paso las ondas sísmicas, sino determinar los efectos en la superficie del terreno y de qué forma las diversas características y condiciones en la que se encuentran los suelos que componen el ambiente geológico regional afectan el movimiento superficial, además de evaluar el impacto que tendrían dichas condiciones en la respuesta de las obras civiles emplazadas o a emplazarse en las capas superficiales de esta porción de terreno.

El presente trabajo es objeto de un estudio de este tipo en un distrito de la Ciudad de Nápoles, en el cual se encuentran gran cantidad de edificios de altura considerable y el cual presenta condiciones geológicas particulares que exigen el desarrollo de estudios detallados para evaluar de su comportamiento.

2. OBJETIVOS

Este trabajo tiene por objeto la aplicación de modelos numéricos para evaluar la Respuesta Sísmica Local (RSL) sobre un problema particular del cual existía información detallada y trabajos previos, el cual presenta singularidades propias. Fueron destacados aspectos ligados a la respuesta de ciertos suelos de características particulares y significativamente influyentes en la respuesta, como así también al procedimiento utilizado y la evaluación de las ventajas y desventajas presentadas por cada una las diversas herramientas utilizadas. Los resultados del análisis podrían ser utilizados como parte de un estudio de caracterización de respuesta local, para el emplazamiento de edificios u otras obras civiles.

3. DESARROLLO

a. Ubicación

El sitio de estudio se ubica en la zona Este de la ciudad de Nápoles, Región de la Campania, Sur de Italia, más específicamente en el Centro Direccional de Nápoles, barrio Poggioreale, como indica la Fig. 1.

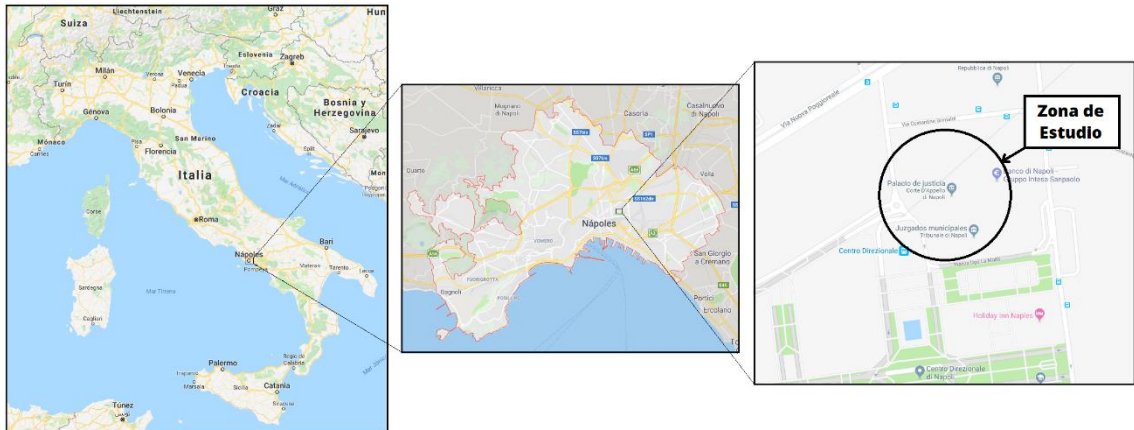


Fig. 1: Localización de la zona de estudio (Google Maps)

Dentro del Centro Direccional (Fig. 2), la zona de estudio se ubica debajo del grupo de edificios del Palacio de Justicia, donde destacan tres torres de altura considerable, superando algunas los 100 metros de desarrollo vertical.

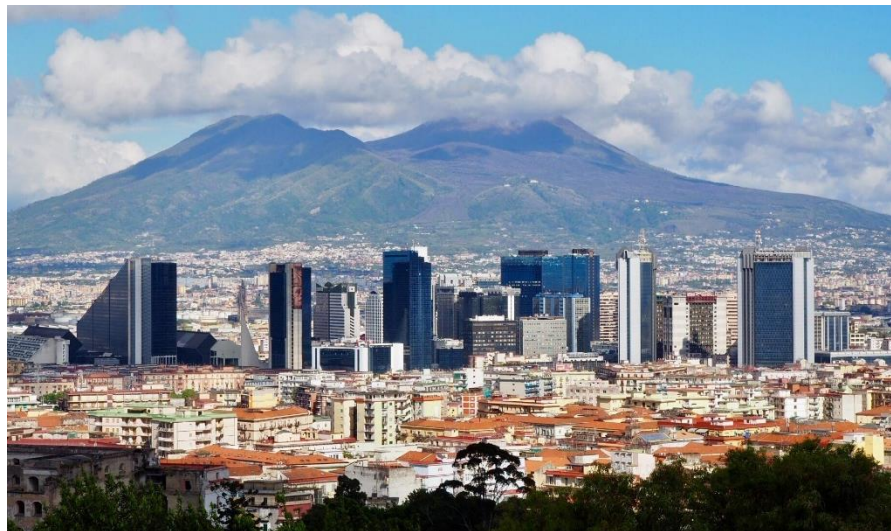


Fig. 2: Centro Direccional de Nápoles (Wikipedia)

El perfil de análisis se adopta igual al desarrollado en campañas de exploración previas y se considera representativo de las condiciones bajo el grupo de edificios (Fig. 3).

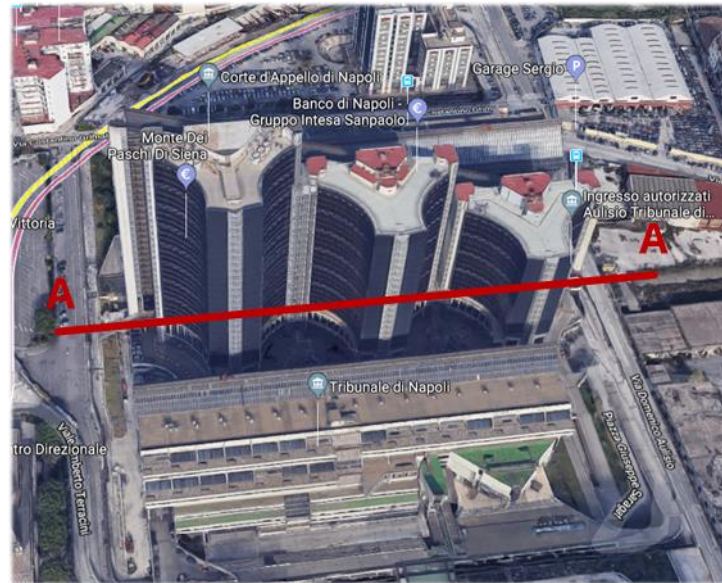


Fig. 3: Perfil de estudio bajo el Palacio de Justicia (Google Maps)

b. Antecedentes

Diversos autores han llevado a cabo estudios de exploración, caracterización y evaluación de la Respuesta Sísmica Local en la zona de estudio, con diferentes niveles de complejidad. Estos estudios, más otros similares realizados en otros puntos de la Ciudad de Nápoles, sirvieron de base y fueron la fuente de información necesaria para desarrollar los modelos del presente trabajo.

Diversos autores (Vinale, 1988), (Papa & Silvestri, 1986), (Bilotta, et al., 2015) desarrollaron trabajos en la zona y pusieron de manifiesto la influencia de un estrato de suelo orgánico de considerable espesor, y cómo su gran deformabilidad afectaba la respuesta de todo el paquete de sedimentos. Sumado a esto, la presencia de lentes de toba amarilla napolitana, con geometría errática y disposición aleatoria dentro del resto de paquete de suelos volcánicos, que conforman gran parte de la geología de la región metropolitana de Nápoles, hace que se hayan tomado estas particularidades como dos puntos clave en la evaluación de la respuesta del sitio.

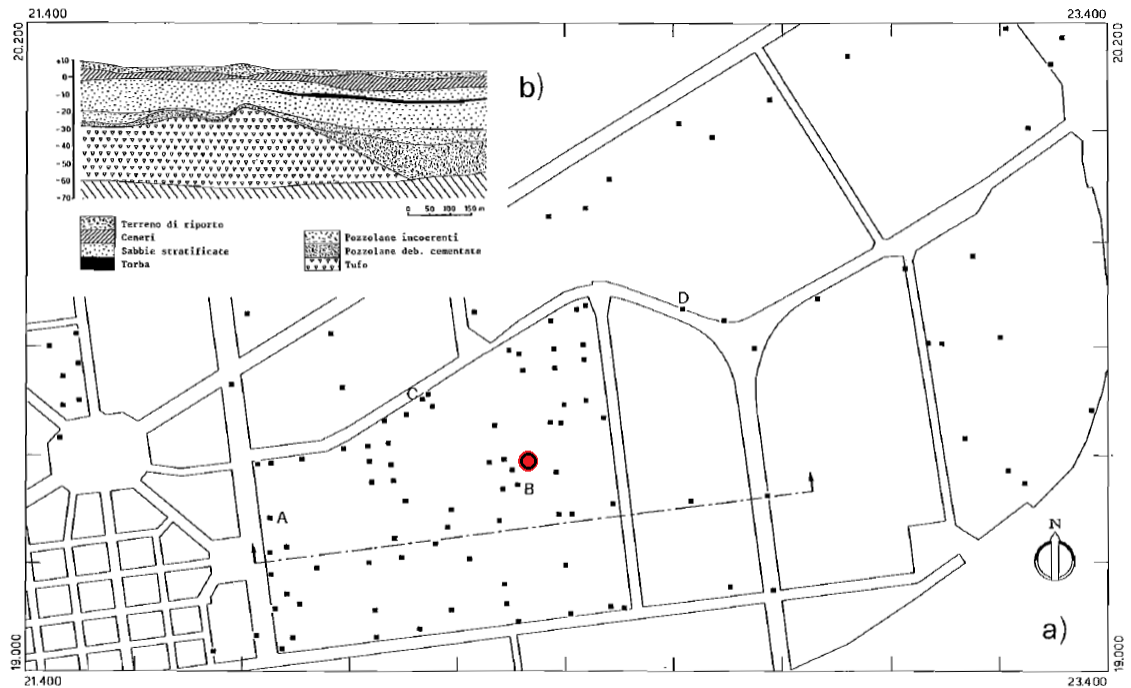


Fig. 10. - Area-campione: a) ubicazione dei sondaggi; b) sezione stratigrafica longitudinale.

Fig. 4: Perfil particular y sondeos en el Centro Direccional, extraído de (Vinale, 1988)

c. Procedimiento de análisis

Fue objeto desarrollar una evaluación de la respuesta local de Nivel 3, de la más detalladas según las prescripciones de (ISSMGE, 1999), lo cual supone que gran parte de la información recabada en los anteriores estudios será necesaria para realizar los modelos numéricos, tal cual puede apreciarse en la Tabla 1 en referencia a los elementos necesarios para llevar a cabo cada nivel de análisis.

	Conocimiento de propiedades del subsuelo	Acción sísmica de referencia	Métodos de análisis	Producto final
I Métodos Empíricos	Características generales (estratigrafía, valores medios de v_{sr} , N_{SPT} , C_u)	Acceleración max $a_{max,r}$ Espectros empíricos $S_{a,r}(T)$	Ábacos, leyes de atenuación o correlaciones empíricas	Acceleraciones máximas de sitio $a_{max,s}$ Espectros Empíricos de sitio $S_{a,s}(T)$
II Relaciones Aproximadas	Caracterización geotécnica expeditiva (perfil de v_{sr} , medidas instrumentales)		Calculo de parámetros de síntesis con métodos simplificados	Perfil $a_{max}(z)$ Periodo natural T Factor de amplificación A Espectro analítico de sitio $S_{a,s}(T)$
III Métodos Numéricos	Caracterización geotécnica detallada (relaciones tensión-deformación)	Acelerogramas $a_r(t)$	Modelación Numérica	Perfiles $a_{max}(z)$, $\gamma_{max}(z)$, $\tau_{max}(z)$ Registro temporal $a(t)$, $\gamma(t)$, $\tau(t)$ y derivados.

Tabla 1: Datos según el nivel de análisis, modificado de (Silvestri, 2018)

En referencia a la metodología para desarrollar un análisis de Respuesta Sísmica Local (RSL), es preciso definir las componentes fundamentales del mismo, que

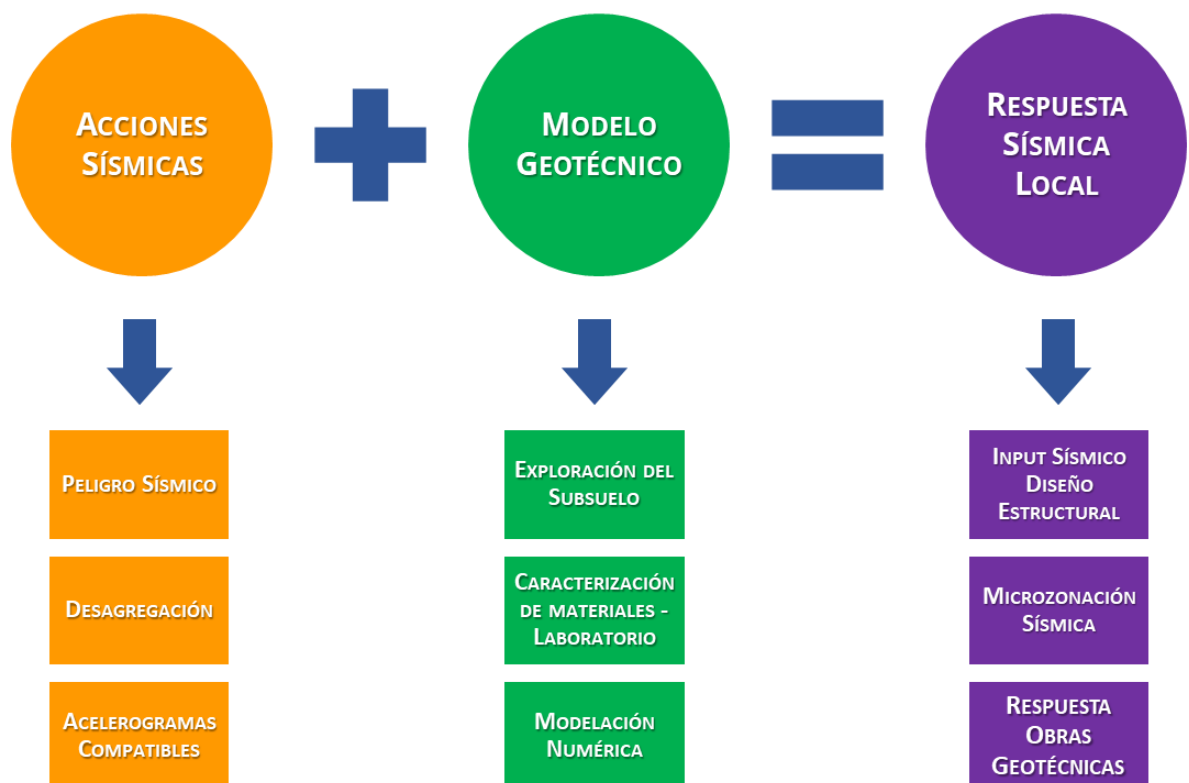


Fig. 5: Componentes de un Análisis RSL

pueden dividirse según indica la Fig. 5:

- a) **Acciones Sísmicas** relacionadas con el escenario sísmico en el que se encuentra la zona en estudio. Estas acciones son el producto de un análisis de peligro sísmico, y buscan ser lo más representativas posibles del ambiente sismo-tectónico presente, con sus fuentes potenciales y los eventos asociados a las mismas. Adicionalmente, es preciso contar con acelerogramas capaces de representar de forma explícita los niveles de intensidad de movimiento evaluados por la caracterización de la amenaza sísmica.
- b) **Modelo Geotécnico**, con el cual se busca representar el comportamiento mecánico o hidro-mecánico de la porción de suelo en, con sus características intrínsecas identificadas a través de la exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio, que luego a través del modelado físico-matemático del fenómeno por medio de herramientas numéricas puede identificar la respuesta que tendría al presentarse el escenario sísmico previsto.

Partiendo de esta descripción, se pueden adoptar cada una de las componentes como pautas a cumplir para desarrollar el trabajo.

d. Acciones sísmicas

El peligro sísmico de toda la península italiana fue evaluado de forma probabilística (Meletti, et al., 2004) e introducido en un software específico REXEL (Iervolino, et al., 2010), el cual además permite realizar la búsqueda de registros en una base de datos de eventos sísmicos históricos según ciertos parámetros característicos, como distancia a la fuente, magnitud, condición de sitio, etc., y adaptar dichos registros para ajustar su espectro de aceleraciones a un espectro objetivo, que para el caso particular es el prescripto por la Norma Técnica de Construcción italiana, NTC 2008.

Según lo descripto por (Bilotta, et al., 2015) y en correspondencia con la normativa italiana (Ministero dell'Infrastrutture e dei Trasporti, 2018) los parámetros necesarios para evaluar la el peligro sísmico según estas pautas, además de la posición geográfica, son:

$$V_R = C_u \cdot V_N = 1,5 \times 50 \text{ años} = 75 \text{ años}$$

$$a_g = 0.19 \text{ g}$$

$$T_R = 712 \text{ años}$$

En base a esta información, y el nivel de riesgo asumido para un edificio como el del Palacio de Justicia, se puede llegar a un escenario de peligro sísmico tal que su diagrama de desagregación para $T=1\text{s}$ es el que se presenta en la Fig. 6. Es posible notar que existen dos fuentes sismogénicas que tienen contribución en la amenaza sísmica del sitio en análisis, las cuales en referencia al marco sismo-tectónico regional se identifican como:

- Sismos de origen tectónico-volcánico en la zona de la isla de Ischia, de magnitud moderada ($4.3 < M < 6.0$) pero con menor distancia a la fuente ($0 < R < 20 \text{ km}$), de ahora en más llamados en este trabajo "Near Field".
- Sismos de origen tectónico de la formación de los Apeninos, de mayor magnitud ($6.3 < M < 7.3$) y mayor distancia a la fuente ($40 < R < 80 \text{ km}$), denominados en este trabajo como "Far Field".

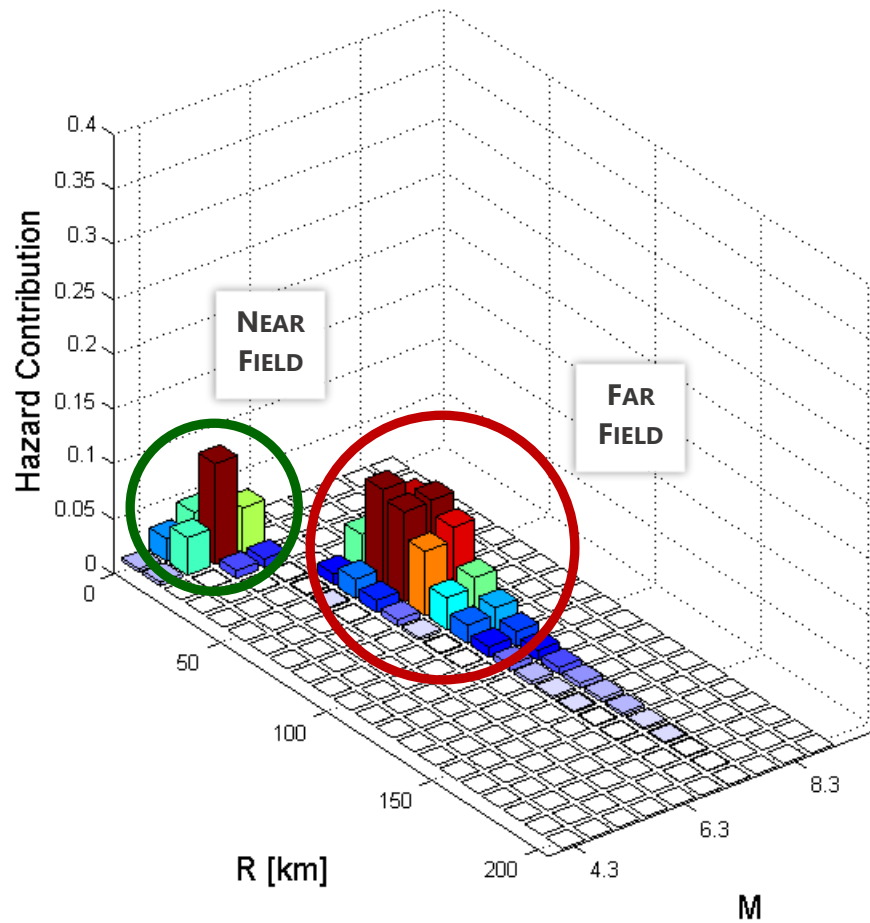


Fig. 6: Desagregación de las fuentes sísmicas (REXEL)

Con estos parámetros, definido ya el espectro de diseño correspondiente según NTC 2008 y el rango de periodos donde se exige el ajuste, entre 1s y 4s, se puede llevar a cabo la búsqueda en la base de datos de sismos europeos del programa y encontrar aquellos registros cuyos espectros se ajusten en promedio al espectro objetivo, para posteriormente escalarlos y finalmente obtener los registros de aceleración compatibles y ajustados al nivel de peligro previsto. De forma adicional, se llevó a cabo el procesamiento de los registros mediante el software SeismoSignal (Seismosoft, 2016) para evitar que los mismos presenten problemas durante la integración en la resolución numérica. Los registros se listan en Tabla 2 y Tabla 3.

Near Field							
N°	ID	Lugar	Mw	R [km]	Falla	Fecha	Estación
1	000072xa	Friuli (Aftershock)	4,5	20	Inversa	13/05/1976	ST20
2	000707ya	Friuli (Aftershock)	5,3	8	Inversa	11/09/1976	ST26
3	001243xa	Izmit (Aftershock)	5,8	15	Oblicua	13/09/1999	ST575
4	001916xa	Ierissos (Foreshock)	4,4	13	Rumbo	14/06/1983	ST1328
5	003802xa	SE de Tirana	5,9	7	Inversa	9/01/1988	ST2368
6	005078xa	Mt. Hengil area	5,4	18	Rumbo	4/06/1998	ST2496
7	005655xa	NE de Banja Luka	5,7	10	Oblicua	13/08/1981	ST2950

Tabla 2: Registros Near Field

Far Field							
N°	ID	Lugar	Mw	R [km]	Falla	Fecha	Estación
8	000195xa	Montenegro	6,9	55	Inversa	15/04/1979	ST66
9	004679ya	Sur Islandia	6,5	41	Rumbo	17/06/2000	ST2563
10	005819xa	Kalamata	6,4	48	Inversa	13/10/1997	ST1321
11	005891xa	Costa Magion Orospe	6,6	76	Rumbo	6/08/1983	ST1328
12	006267xa	Sur Islandia	6,5	46	Rumbo	17/06/2000	ST2565
13	006278ya	Sur Islandia	6,5	41	Rumbo	17/06/2000	ST2552
14	006761xa	Vrancea	7,2	49	Inversa	30/08/1986	ST40

Tabla 3: Registros Far Field

Cada uno de los registros se presenta en Anexo 1, mientras que los espectros de aceleración se presentan a continuación en Fig. 7 y Fig. 8.

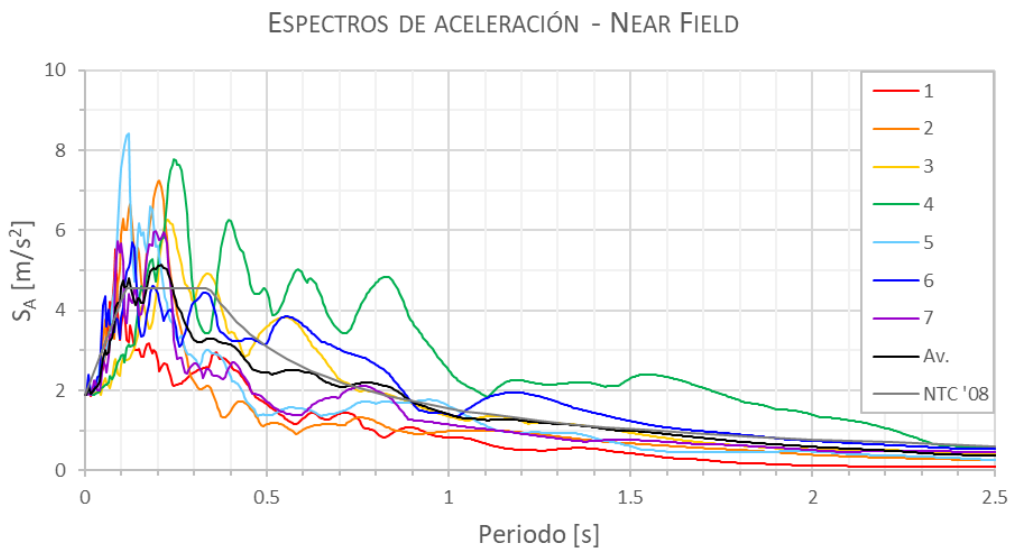


Fig. 7: Espectros de aceleración, registros Near Field

ESPECTROS DE ACELERACIÓN - FAR FIELD

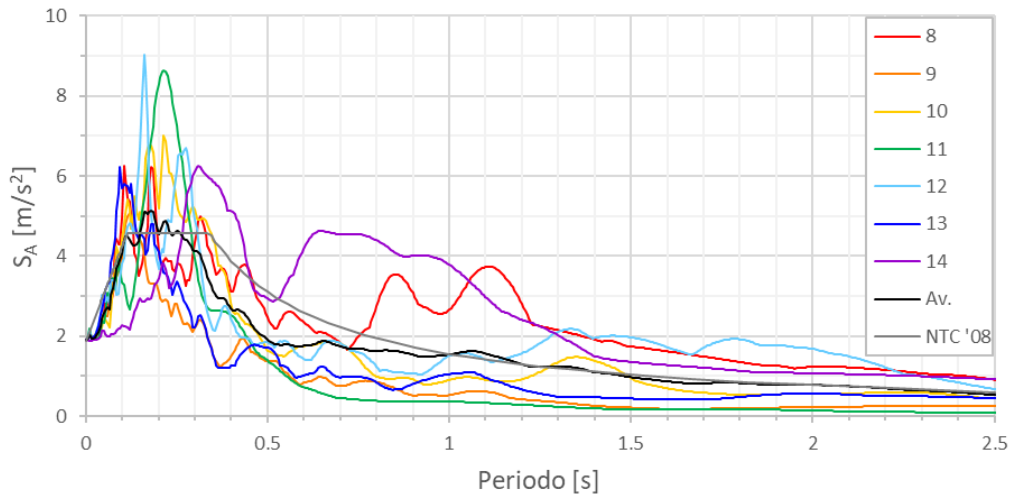


Fig. 8: Espectros de aceleración, registros Far Field

e. Modelo geotécnico

El modelo se compone, como indica la Fig. 5, de tres partes, cada una de las cuales se desarrolla a continuación.

La **exploración o reconocimiento del subsuelo** se llevó a cabo en trabajos anteriores (Bilotta, et al., 2015), (Vinale, 1988), (Rippa & Vinale, 1983) y por medio de sondeos, geofísica y mapeo geológico superficial se pudo reconstituir la sección presentada en la Fig. 9, la cual representa la porción de terreno en análisis además de presentar de forma preliminar tres perfiles tentativos para los análisis unidimensionales.

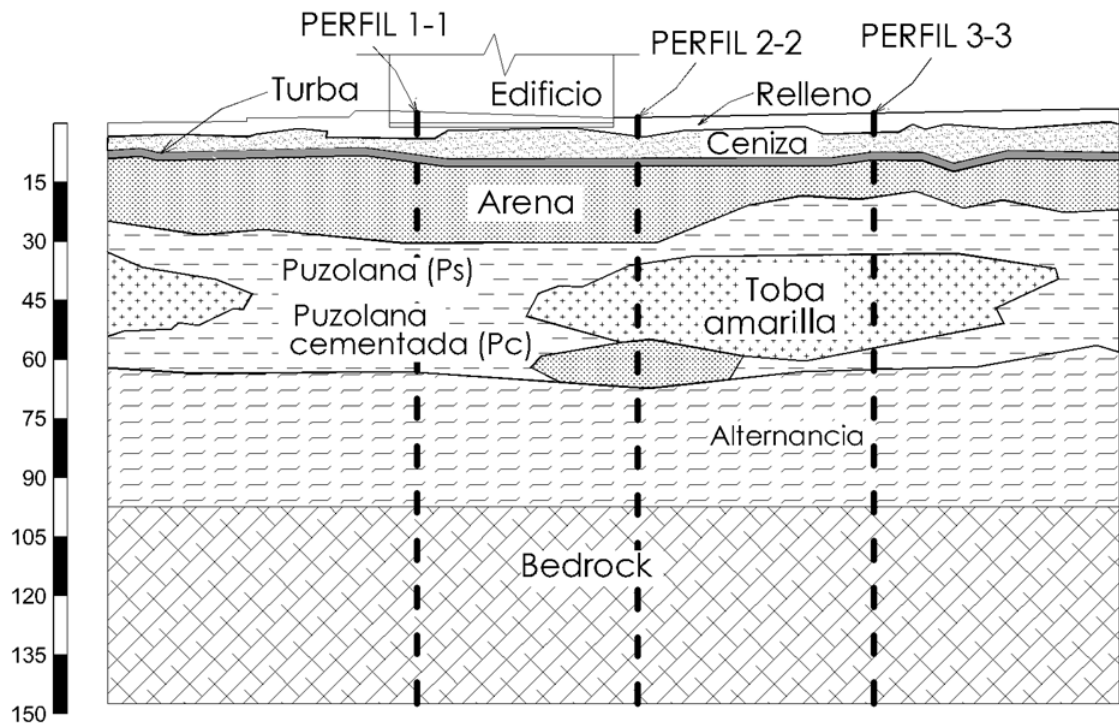


Fig. 9: Sección de estudio

Puede observarse que, partiendo desde la superficie, la secuencia de materiales muestra correspondencia con los sucesivos eventos eruptivos como consecuencia de la intensa actividad volcánica de la región, producto principalmente de los complejos volcánicos Vesubio y Campi Flegrei. La secuencia comienza con un **relleno** de materiales antrópicos de baja densidad, bajo el cual se encuentra un manto de **cenizas** correspondiente a las últimas secuencias eruptivas. Inmediatamente debajo aparece una capa de aproximadamente 1 m de espesor de suelos principalmente orgánicos, denominada **turba**, y subyacente a la misma un manto de **arenas volcánicas** que se diferencian de la ceniza por poseer una granulometría con granos de mayor tamaño. Por debajo de las arenas se desarrolla un estrato de donde se encuentran inmersos en una matriz de **puzolanas** algunas lentes o mantos de **toba amarilla napolitana**, como así también algunas lentes de arena volcánica. Hacia la parte inferior del manto de puzolanas se identifican en la misma matriz capas de **puzolana cementada**.

Los materiales por debajo de los 60 m de profundidad se componen de una alternancia de suelos piroclásticos (cenizas, arenas, puzolanas) hasta los 100 m, donde ya no se poseía más información de exploración y se adoptó un Bedrock "Ingenieril" de

velocidad de transmisión de ondas mecánicas constante, a los fines de la constitución del modelo de análisis.

La exploración no solo tiene por objeto reconocer la distribución y extensión de cada uno de los suelos que componen el paquete de sedimentos, sino también identificar ciertas propiedades geomecánicas del sitio, en especial la transmisión de ondas mecánicas (v_s y v_p), que no es posible reproducir de forma precisa en laboratorio, aun trabajando con probetas con una mínima alteración.

Una distribución en profundidad de la velocidad de onda de corte sobre la vertical del Perfil 1-1 se muestra en la Fig. 10, y acerca de la misma se menciona que en (Bilotta, et al., 2015) en virtud que en los últimos metros del perfil v_s y v_p no pudieron ser evaluadas por métodos geofísicos, las mismas fueron correlacionadas con ensayos de penetración, y como respaldo de dicha estrategia se llevó a cabo una evaluación del impacto en la respuesta que pudiera tener considerar o no la variación propuesta. Para ello se realizaron análisis de RSL 1D con un perfil de velocidad creciente con la profundidad y otro de velocidad constante para la capa de alternancia, concluyendo que no existían diferencias significativas y podrían adoptarse cualquiera de las opciones sin grandes diferencias. En este trabajo se considera la variación en profundidad, tal cual se observa en la Fig. 10.

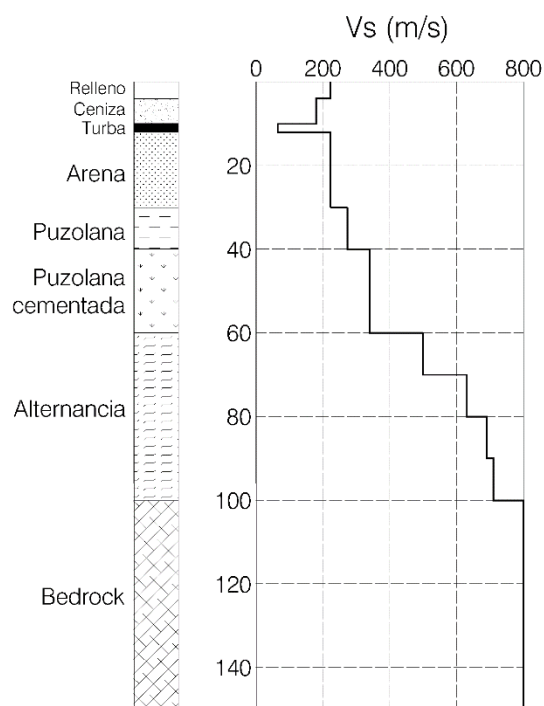


Fig. 10: Variación de v_s en el perfil 1-1

La Fig. 10 también pone de manifiesto una condición que afecta significativamente la respuesta dinámica del terreno, que es la inversión de velocidad de transmisión de ondas de corte que se produce en el perfil al atravesar la capa de suelos orgánicos.

Dada la forma en que se forman los paquetes de sedimentos, para la generalidad de los casos se espera un perfil de velocidades creciente en profundidad, con lo cual una inversión de velocidad supone un cambio significativo en las condiciones regular y no es, por ejemplo, factible de caracterizar mediante un parámetro genérico como es la v_{s30} . En este tipo de situaciones, la normativa italiana (Ministero dell'Infrastrutture e dei Trasporti, 2018) exige realizar estudios de Respuesta Sísmica Local para poder caracterizar la respuesta del terreno frente a eventos sísmicos de forma racional.

La **caracterización de las propiedades geomecánicas** de los suelos también fue producto de pruebas y ensayos desarrollados en los trabajos precedentes en la zona (Rippa & Vinale, 1983), (Papa & Silvestri, 1986), (Vinale, 1988) y otros sobre los mismos tipos de suelo de la región (de Silva, 2016), recopilados en (Bilotta, et al., 2015). Los parámetros generales se concentran en la Tabla 4.

Datos						
Suelo	γ [kN/m ³]	v_s [m/s]	D_0 [%]	G_0 [Pa]	K [Pa]	ν
R	14	222	1.87	7.0340E+7	1.5240E+08	0.30
C	15	179	1.87	4.8930E+7	7.2011E+07	0.22
T	12	65	3.00	5.1000E+6	1.3479E+07	0.33
S	17	222	0.99	8.5630E+7	1.4237E+08	0.25
Ps	15	273	0.93	1.1417E+8	1.9686E+08	0.26
Pc	15	340	0.93	1.7635E+8	3.0408E+08	0.26
TY	11	500	0.67	2.8044E+8	6.0762E+08	0.30
A4	16	500	0.50	4.0775E+8	8.8346E+08	0.30
A3	16	640	0.50	6.6805E+8	1.4474E+09	0.30
A2	16	690	0.50	7.7651E+8	1.6824E+09	0.30
A1	16	715	0.50	8.3380E+8	1.8066E+09	0.30
BR	16	800	0.50	1.0438E+9	2.2616E+09	0.30

Tabla 4: Propiedades geomecánicas de los suelos

Para caracterizar la respuesta cíclica de los suelos es regular el uso de curvas de degradación de la relación de módulo cortante (G/G_0) y la razón de amortiguamiento (D) en función a la deformación de corte (γ) (Kramer, 1996), (Lanzo & Silvestri, 1999), las cuales se obtienen por medio de ensayos de laboratorio. De esta forma es posible tener en cuenta las condiciones particulares del sitio para pequeñas deformaciones con $G_0 =$

$f(v_s)$, mientras que para grandes deformaciones que no es posible alcanzar en las pruebas en terreno se utilizan los ensayos de laboratorio para obtener G/G_0 vs. γ , posteriormente se combinan para contemplar ambas situaciones de forma simultánea.

Las curvas de degradación se encuentran, junto con los autores de las mismas, en la Fig. 11. Se destaca a las curvas de literatura utilizadas para los suelos orgánicos de (Wehling, et al., 2003), adoptadas según el criterio utilizado por (Billota, et al., 2015), al ser las únicas que no provienen de pruebas de laboratorio.

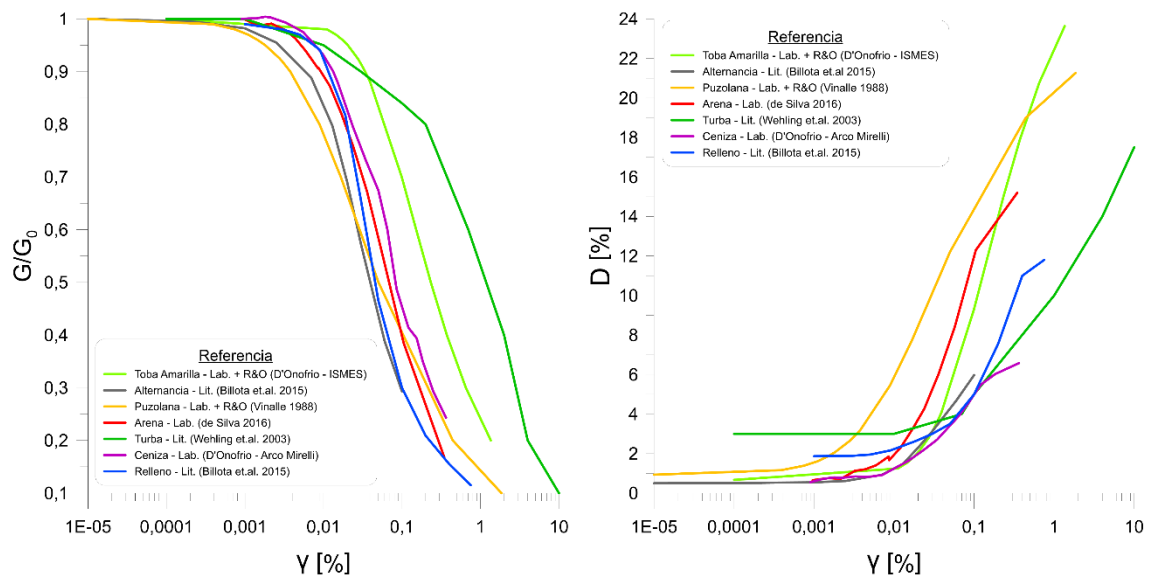


Fig. 11: Curvas de degradación G/G_0 vs. γ y D vs. γ

El software FLAC 7.0 (ITASCA, 2016), uno de los softwares utilizados en la modelación, precisa ajustar estas curvas experimentales a curvas genéricas para evaluar posteriormente el comportamiento histerético en base al modelo de Masing (Masing, 1929). Para ello se recurrió a una extensión de Matlab (The MathWorks Inc., 2015) para el ajuste de las curvas experimentales a las curvas logísticas tipo sigmoide que utiliza FLAC, de las cuales se obtienen los coeficientes a introducir como datos en dicho software.

Este modelo en particular asume amortiguamiento nulo para bajas deformaciones, lo cual no se corresponde con la realidad. Los mismos desarrolladores de FLAC indican en su manual (ITASCA, 2016) que es preciso complementar el modelo histerético propuesto con amortiguamiento viscoso para el comportamiento a bajas deformaciones, a través del amortiguamiento de Rayleigh (Strutt, 1877). El inconveniente es que los parámetros α y β del amortiguamiento de Rayleigh son dependientes de la frecuencia, y

gran cantidad de ensayos han puesto de manifiesto que este comportamiento no es propio de los suelos (Kramer, 1996), (Hashash, et al., 2010). No obstante es posible salvar este inconveniente seleccionando parámetros en los cuales el mismo sea aproximadamente independiente de la frecuencia.

Para ello fue utilizado el criterio de doble frecuencia (Huson, et al., 2003) que utiliza otro de los softwares adoptados, el QUAD4M, en el cual se utilizan la frecuencia característica del sistema y un múltiplo de la misma inmediatamente mayor a la frecuencia dominante de la señal, de forma de definir con ellas y el amortiguamiento inicial los valores de α y β que corresponden a un amortiguamiento independiente de la frecuencia. Esto se evidencia en la Fig. 12 extraída de (Silvestri, 2018).

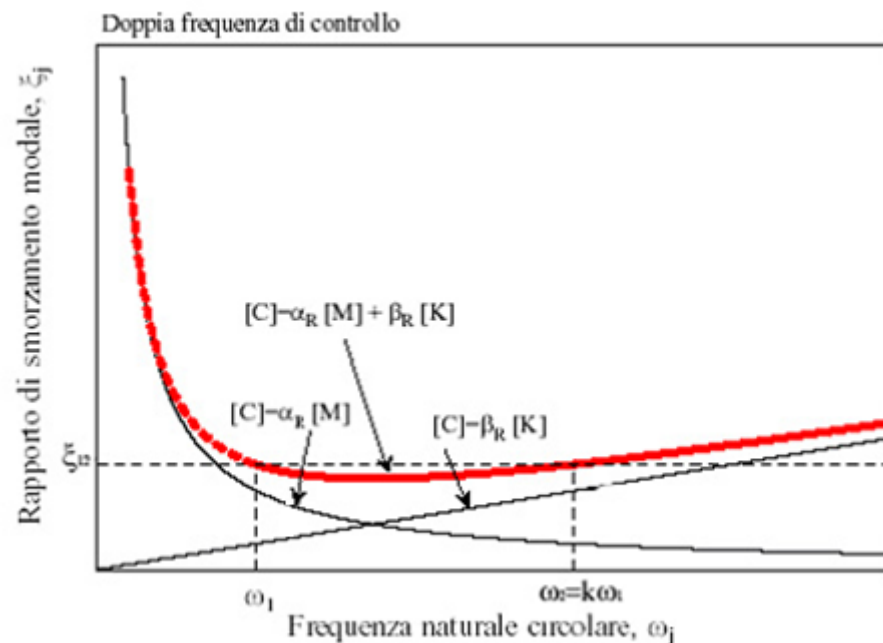


Fig. 12: Criterio de doble frecuencia (Silvestri, 2018)

También en referencia al tratamiento del amortiguamiento histerético por FLAC cabe destacar que, pese a la simplicidad que posee el criterio de Masing para representar el comportamiento histerético del material, no caracteriza de manera adecuada el comportamiento que presentan los suelos en los ensayos de laboratorio en el rango de grandes deformaciones, donde el ciclo histerético se vuelve más alargado y el criterio de Masing tiende a sobreestimar el amortiguamiento (Fig. 13). Numerosos autores han identificado este inconveniente (Hashash, et al., 2010), (Phillips & Hashash, 2009), (Arefi, et al., 2012), (Alleanza & Chiaradonna, 2018) y algunos han propuesto la utilización de

otros modelos que permitan adecuar el criterio y evitar el sobre-amortiguamiento. Hasta el momento estos modelos no se han introducido en el software, con lo cual es posible que, de incursionar en grandes deformaciones, ciertos suelos puedan presentar una respuesta sobre-amortiguada respecto a lo observado en ensayos de laboratorio, como indica la Fig. 13. En el Anexo 2 se compara el ajuste de FLAC y las curvas originales, y se pone de manifiesto el efecto mencionado para grandes deformaciones.

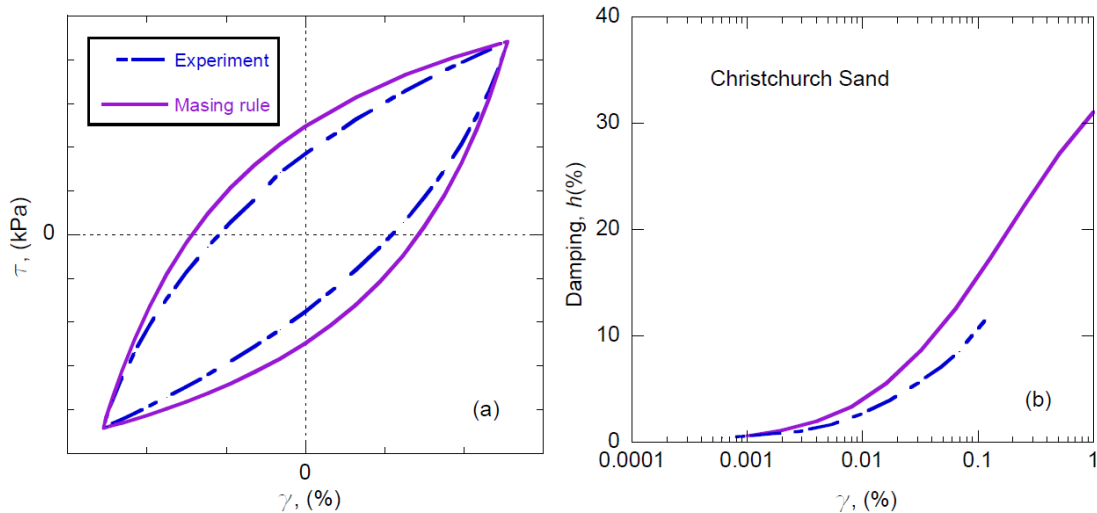


Fig. 13: Sobre-amortiguamiento de Masing (Arefi, et al., 2012)

Con respecto a la **modelación numérica**, la misma será abordada en los siguientes incisos al presentar variantes significativas para cada una de las variantes de análisis. Es importante destacar que en todos los análisis que se describen a continuación se considera de forma explícita la no-linealidad de los materiales, haciendo referencia a los esquemas de resolución Lineal-equivalente y No-lineal como variantes y dejando de lado los análisis Elástico y Visco-elástico lineal, que solo se utilizan para calibrar los modelos.

f. Análisis unidimensionales

Los análisis unidimensionales caracterizan la respuesta de una columna de suelo de sección unitaria, lo cual los hace representativos y útiles para modelar extensiones de terreno donde son constantes la geometría y propiedades mecánicas en ambas direcciones perpendiculares en el plano, y solo varían en su dimensión vertical. Se trata por supuesto de análisis mucho más sencillos de resolver que los respectivos en 2D y 3D, no solo por la cantidad de elementos sino además por las facilidades que presentan en la

variante Lineal-equivalente, la cual fue precursora en la evaluación de RSL considerando no-linealidad vía métodos numéricos.

No obstante, de presentarse variaciones significativas en las propiedades geomecánicas o la geometría en la región en análisis, posiblemente sus resultados no sean lo suficientemente representativos y sea necesario recurrir a análisis en 2D o 3D.

Para resolver un problema utilizando esta metodología, una vez identificado el perfil de suelo, como en la Fig. 10, y con las características geomecánicas de los suelos definidas (Tabla 4 y Fig. 11) es necesario discretizar dicho perfil, para obtener una respuesta aproximada a la real en términos numéricos, en elementos de una longitud tal que estos sean capaces de captar la respuesta del modelo frente al paso de las ondas mecánicas que más contribuyen al comportamiento del sistema. Se adopta entonces el criterio de Kuhlemeyer & Lysmer (Kuhlemeyer & Lysmer, 1973) el cual considera que los elementos deben tener como máximo una extensión de entre 1/6 y 1/8 de la longitud de onda más pequeña, lo cual se puede observar en la Fig. 14 y expresarse como en la Ecuación 1:

$$h_{max} = \frac{\lambda_{min}}{6 \div 8} = \frac{v_s}{(6 \div 8) \cdot f_{max}}$$

Ecuación 1

Donde f_{max} es la máxima frecuencia que el sistema puede evaluar para la v_s considerada, la cual suele definirse entre 20-25 Hz dado que frecuencias superiores tienen poca influencia en las señales sísmicas, tal cual indican los espectros de Fourier de los registros de terremotos. Por ejemplo, el Software Strata tiene como opción discretizar de forma automática según f_{max} y el número de divisiones de la onda.

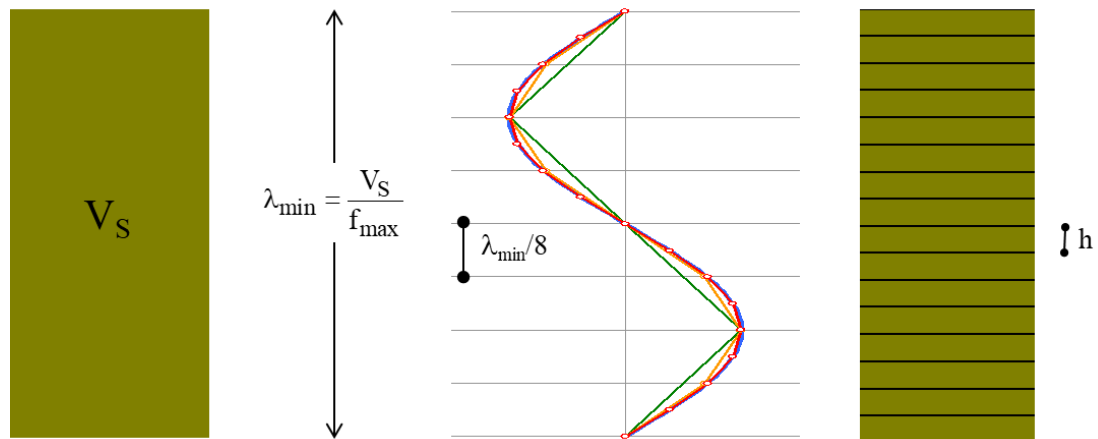


Fig. 14: Discretización según criterio de Kuhlemeyer & Lysmer, extraído de (Silvestri, 2018)

De esta manera se cuenta con todos los parámetros a introducir en los programas computacionales y en conjunto con los registros definidos en Acciones sísmicas llevar a cabo del análisis de Respuesta Sísmica Local. Tal cual fue mencionado, serán utilizados dos esquemas de resolución diferentes que consideran la no-linealidad intrínseca a los suelos, tomando como ejemplo problemas similares presentados por (Alleanza, 2018), (Alleanza & Chiaradonna, 2018), (Chiaradonna, et al., 2017):

El método **Lineal-Equivalente** consiste en un esquema de solución iterativa, en el cual se utiliza un modelo visco-elástico lineal, en principio uniforme, cuyas propiedades mecánicas (G y D) se obtienen de las curvas de degradación. De dicho modelo físico-matemático complejo, descrito en (Kramer, 1996), se obtiene una función que caracteriza al modelo llamada Función de Transferencia, que no es más que la relación de amplitudes entre la base y parte superior del modelo para cada frecuencia, la cual según se aprecia en el esquema de la Fig. 15 funciona como curva de convolución para obtener a partir de la señal de entrada, en dominio de frecuencia a través de su transformada de Fourier, hasta la señal de salida, que posteriormente al aplicar la transformada inversa de Fourier resulta en la señal de salida en superficie, en dominio del tiempo.

Obtenida tal señal de aceleración, es posible integrar en el dominio temporal para llegar al registro de desplazamientos, el cual derivado en el espacio permite obtener un registro de deformaciones de corte en función del tiempo. Con el máximo valor deformación es posible actualizar los valores de G y D del modelo original y así obtener un nuevo modelo que representa más fielmente las condiciones degradadas del suelo. Se

ha demostrado que utilizar el valor máximo de deformación no arroja resultados satisfactorios, por lo cual el mismo se afecta de un coeficiente β , inversamente proporcional a la magnitud y que oscila alrededor de 0,65, de forma de tener una deformación de corte efectiva con la cual actualizar los parámetros mecánicos del modelo. De esta manera, se resuelve el problema por un número de iteraciones suficiente (no menos de 10) hasta que la diferencia entre las deformaciones efectivas de dos ciclos consecutivos esté dentro de una tolerancia aceptable, que ronda el 2-5%.

Cuando el sistema introduce varias capas de diversos materiales, o condiciones de borde inferior como un bedrock elástico o visco-elástico, el problema numérico se vuelve más complejo y es preciso el uso de métodos numéricos para su resolución, con la ayuda de programas informáticos. No obstante esto, su esquema de resolución se mantiene simple y hace que el costo computacional sea bajo, incluso en problemas complejos, con lo cual se muestra como una alternativa muy atractiva.

Las desventajas del método radican en que paso a paso sigue siendo un problema lineal, con lo cual el comportamiento no-lineal real y la historia de deformaciones acumulada no se consideran, y puede arrojar resultados conservadores desde la perspectiva del efecto de sitio cuando los suelos incursionan en deformaciones significativas, cerca de la resonancia o se tratan perfiles de suelo de gran profundidad (Byungmin, et al., 2016). Tampoco se muestran como una opción frente a problemas de licuación de suelos al no poder representar la generación de exceso de presión de poros.

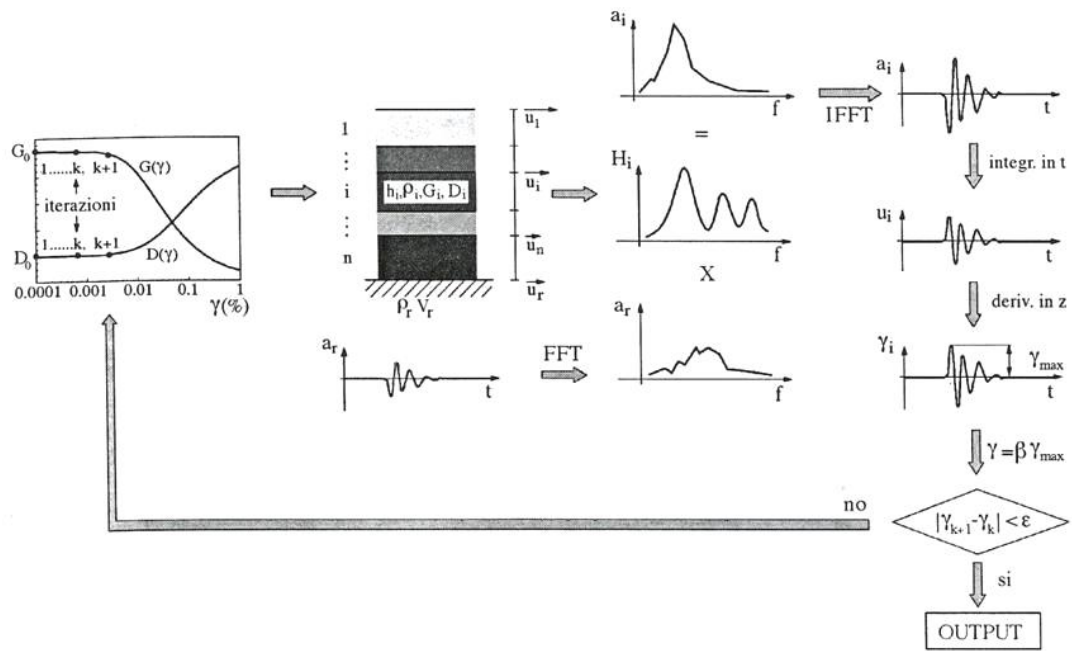


Fig. 15: Esquema de resolución Lineal-Equivalente (Lanzo & Silvestri, 1999)

En este trabajo se utiliza para la resolución unidimensional por esta vía el software Strata (Kottke & Rathje, 2008), Fig. 16, el cual permite introducir varias capas de suelo caracterizadas por sus propiedades geomecánicas y curvas de degradación, experimentales o de literatura, además de un Bedrock visco-elástico modelado como un semi-espacio capaz de considerar su amortiguamiento y rigidez.

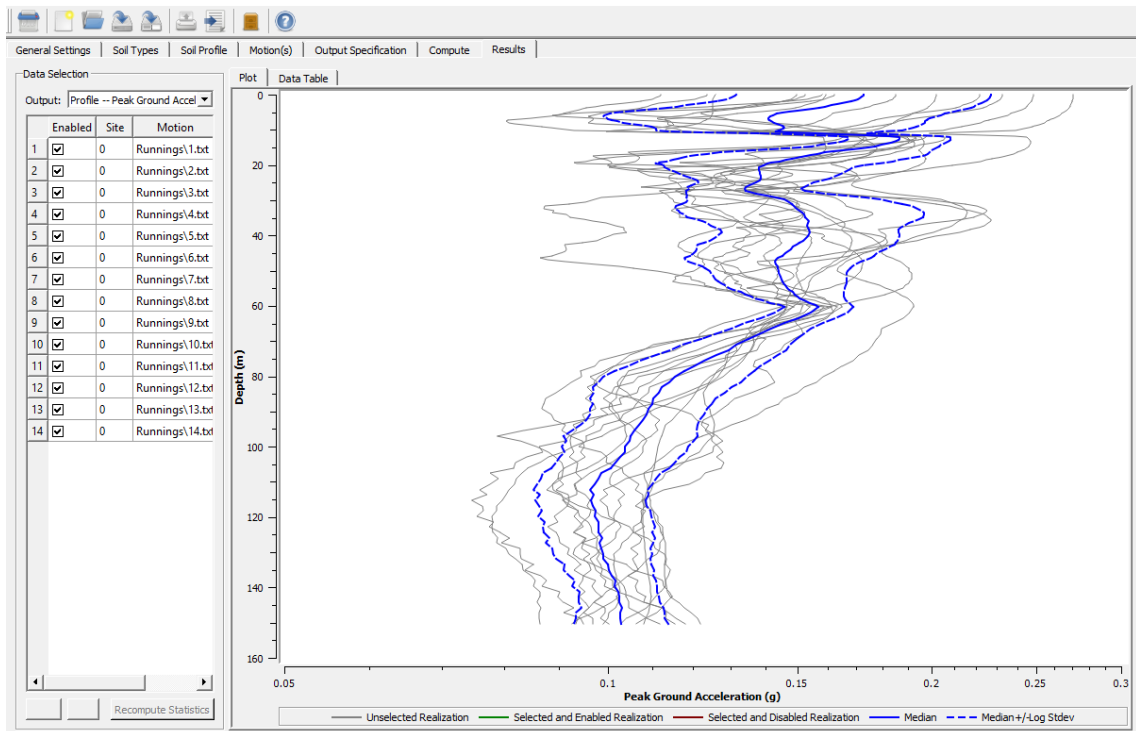


Fig. 16: Interfaz gráfica de Strata

El método **No-Lineal** en cambio presenta en el software utilizado un esquema de resolución directa, de tipo implícito, en el cual se utiliza un modelo mecánico que contempla la no-linealidad de los materiales a través de ciertas relaciones constitutivas y en base al cual se evalúa para cada paso de tiempo un campo de esfuerzos y deformaciones, el cual sirve de base para actualizar los parámetros geomecánicos del paso siguiente. En cada paso de tiempo, una vez verificadas las condiciones de equilibrio en el sistema (lo cual internamente es iterativo) se procede a avanzar al siguiente paso temporal (Fig. 17).

El sistema de ecuaciones diferenciales que domina el problema puede ser resuelto por diversos métodos matemáticos, en el caso de FLAC 7.0 plantea una solución vía Diferencias Finitas, pero existen otros que utilizan sistemas de masas concentradas (Deep-Soil, SCOSSA), elementos finitos (Plaxis), etc. El esquema de FLAC presenta un planteo simple y muestra un buen desempeño en la resolución de problemas dinámicos, siempre que se controlen los pasos de tiempo y el dominio espacial presente una discretización razonable.

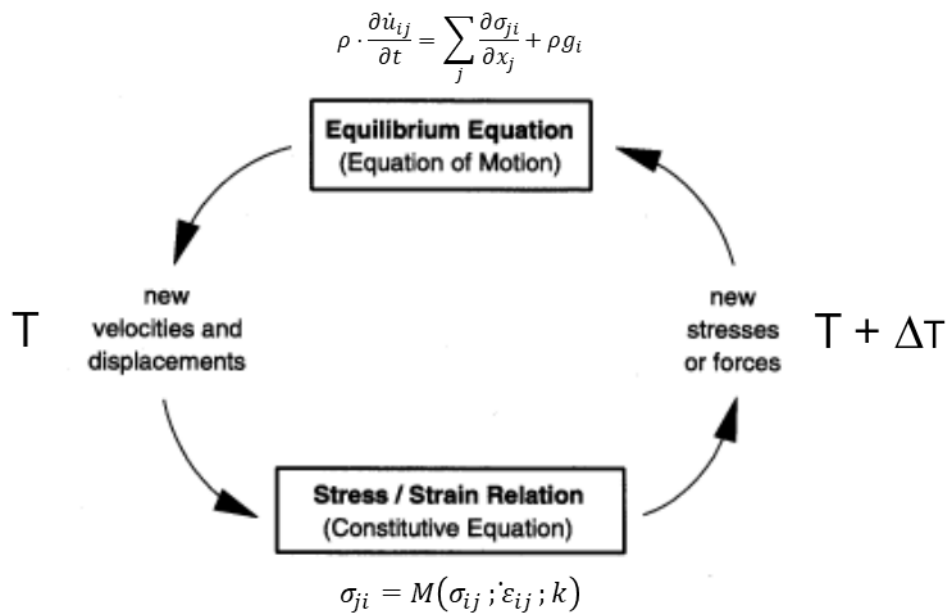


Fig. 17: Esquema de resolución No-Lineal (Silvestri, 2018)

Como todo método de resolución numérica implícito, es crucial la elección del paso de tiempo para que este sea estable y pueda converger a una solución próxima a la real. El paso de tiempo en este tipo de problemas está fuertemente condicionado por el tamaño del elemento, que se sabe está influenciado por la velocidad de transmisión de ondas de corte, debido a lo cual los elementos de menor velocidad serán los de menor tamaño, y por ello también los que controlen el paso de tiempo.

El software FLAC 7.0 (ITASCA, 2016) propone una selección del paso de tiempo crítica sectorizada, de forma de no tener la necesidad de resolver todo el dominio del modelo al paso de tiempo crítico del elemento más desfavorable, adoptando un criterio de Paso de Tiempo Dinámico en el cual las zonas del modelo con menor paso de tiempo crítico se resuelven a cada paso global, mientras las de mayor paso de tiempo se resuelven a múltiplos de este apenas por debajo del paso de tiempo crítico que les corresponde. El esquema planteado se presenta en el extracto de la Fig. 18 mientras el paso de tiempo crítico se define en la Ecuación 2.

$$\Delta t_{crit} = 2 \sqrt{\frac{M}{k}}$$

Ecuación 2

Integer multipliers, M_{gp} , to the global timestep are then determined for each gridpoint according to the algorithm illustrated by the flow chart in Figure 1.1. This algorithm ensures that multipliers are powers of 2. In the current implementation, M_{gp} is set to 1 for nodes that are assigned a null material model, connected to structural elements, attached to other gridpoints, or part of a quiet boundary. All zones are then scanned, and an integer multiplier, M_z , is calculated for each zone as the minimum of the multipliers for the four surrounding gridpoints.

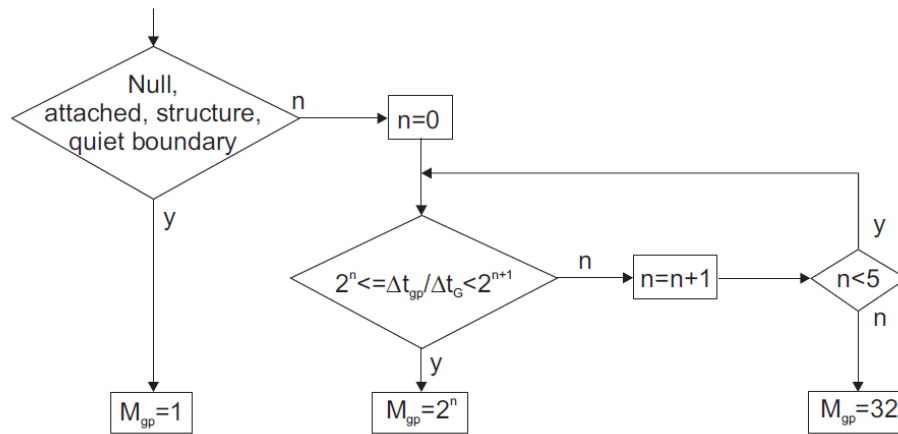


Figure 1.1 Flow chart for determination of gridpoint multiplier, M_{gp}

Calculations for a zone (i.e., derivation of new stresses from surrounding gridpoint velocities and accumulation of gridpoint force sums from stress components) are only performed every M_z timesteps. In all expressions involving a timestep, the global timestep is replaced by $\Delta t_G M_z$.

Fig. 18: Extracto que explica el Paso de Tiempo Dinámico (ITASCA, 2016)

La resolución de problemas vía métodos no-lineales presenta ventajas significativas en relación mayor ajuste a las condiciones reales que se presentan en el suelo cuando es afectado por acciones dinámicas, en especial cuando se incursiona en grandes deformaciones y es por eso que es uno de los métodos utilizados para evaluar de forma numérica problemas de licuación de suelos (Hashash, et al., 2010).

No obstante, es claro que su complejidad y los recursos computacionales insumidos son significativamente mayores a los del método Lineal-Equivalente. Además, el ajuste de los modelos constitutivos a ensayos de laboratorio suele ser un punto crítico en esta metodología, ya que los autores de los mismos en busca de cubrir lo mejor posible algún aspecto en particular del comportamiento del suelo recaen en modelos muy complejos, con parámetros empíricos que oscilan en rangos poco definidos, con escasa interpretación física, difíciles de ajustar a los ensayos de laboratorio. Esto en el esquema Lineal-Equivalente no sucede ya que el modelo visco-elástico lineal es simple, mientras que las propiedades no lineales quedan cubiertas por las curvas de degradación.

Para el trabajo actual, el software utilizado en estos casos es el FLAC 7.0 (ITASCA, 2016) presentando su interfaz en la Fig. 19. En este se utiliza como modelo constitutivo el modelo de hiperbólico de Kondner & Zelasko modificado por (Matasovic & Vucetic, 1993) vinculado a una curva de degradación logística de tipo sigmoide que es necesario ajustar a los datos de laboratorio, y las reglas de Masing (Masing, 1929) para formar el ciclo histerético.

Además, es necesario suplementar el amortiguamiento a bajas deformaciones con el amortiguamiento de Rayleigh, tal cual se indicó anteriormente. Las condiciones del Bedrock se definen según el modelo de Frontera o Base Compatible de (Lysmer & Kuhlemeyer, 1969), definidos de forma sencilla con su rigidez y amortiguamiento viscoso, mientras los laterales utilizan la condición de Campo Libre, ambas expuestas en el siguiente inciso.

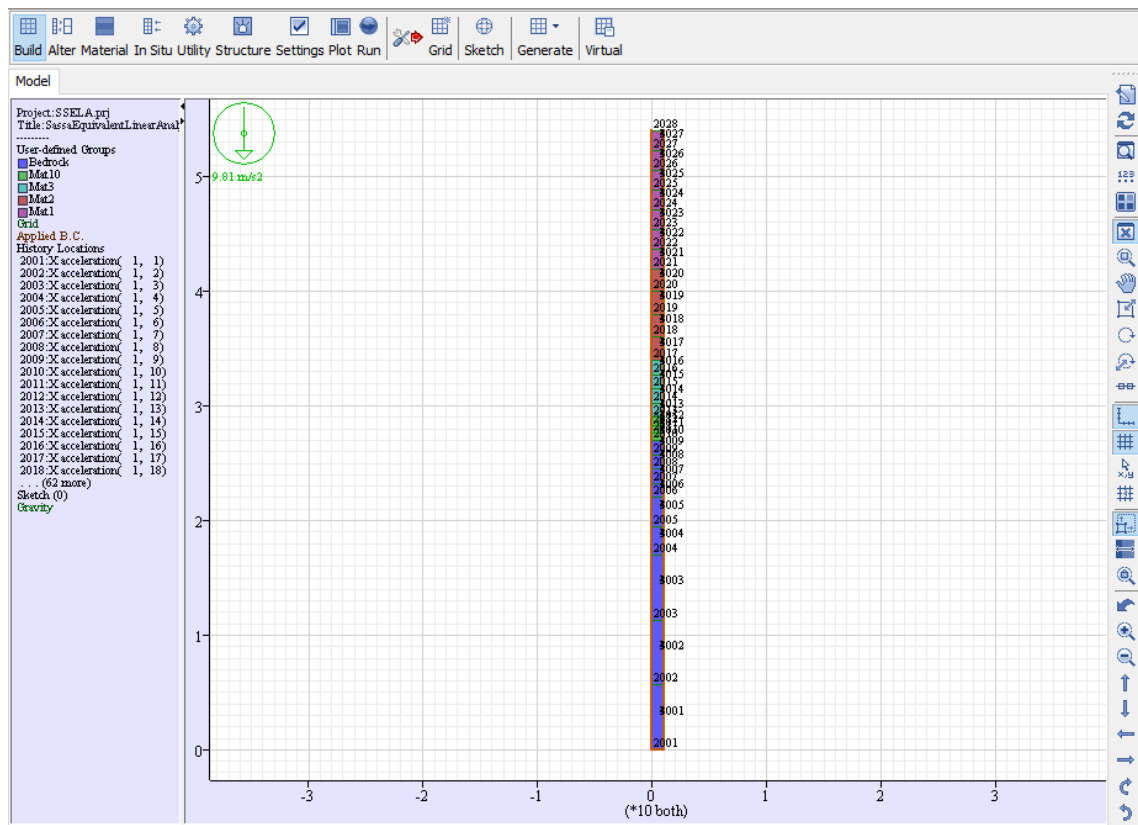


Fig. 19: Interfaz gráfica de FLAC 7.0

g. Análisis bidimensionales

Para el caso de los análisis en dos dimensiones, se adoptan nuevamente los dos esquemas de resolución planteados con anterioridad, pero la extensión del dominio presenta algunas singularidades que es necesario mencionar.

En el caso del **análisis Lineal-Equivalente en 2D**, el software utilizado fue QUAD4M, desarrollado por (Huson, et al., 2003), el cual utiliza un esquema de resolución por elementos finitos para el modelo visco-elástico lineal, pero en lo restante sigue el mismo proceso iterativo presentado en la Fig. 15. Al tratarse de un software desarrollado en lenguaje Fortran, es preciso generar un archivo de input para lo cual se utilizó un código de Matlab (Alleanza, 2018) capaz de generarlo en base a una serie de archivos de texto plano que contienen: la geometría de la malla definida con ayuda de un software de generación de mallas, parámetros geomecánicos, curvas de degradación y registros de aceleración. Todos ellos se introducen en el directorio del programa para luego ser llamados desde la línea de comandos y así dar inicio a la modelación.

Una de las desventajas que presenta este software es que solo presenta condiciones de borde libre o de frontera compatible. Esta última constituye una aproximación que busca reemplazar de forma sencilla al semi-espacio que por hipótesis rodea al modelo, con un sistema resorte-amortiguador ligado a un vínculo rígido. Esta propuesta presenta buenos resultados para modelar la respuesta del Bedrock en la parte inferior del modelo, pero no así en los laterales, donde la rigidez variable en profundidad hace que esta condición sea muy rígida y pueda sobre-estimar las acciones reales en los laterales.

Como forma de solución a este problema, se puede adoptar la siguiente estrategia: es posible considerar una extensión del modelo a cada lado del dominio original, constante y con las propiedades del suelo presente en cada borde, y sus extremos libres. La longitud de la extensión debe ser suficiente como para que sea posible representar los efectos de reflexión de ondas y capturar el amortiguamiento por radiación en el espacio circundante.

Así, la longitud de esta extensión debe ser calibrada (podría para esto ser utilizado un modelo elástico por simplicidad) para presentar en su intersección con el modelo

original la misma respuesta que una columna unidimensional, la cual sería una representación correcta de un semi-espacio, y es regular que luego de la calibración la extensión resulte de la misma extensión que el propio modelo, hacia cada lado. De esta manera el modelo de análisis posee una extensión de 3 veces la original, lo que aumenta significativamente el costo computacional pero brinda una solución para la problemática de las condiciones de borde laterales.

Para el caso en estudio, la malla del modelo se puede apreciar en la Fig. 20 y es claro que el modelo se vuelve mucho más extenso con la necesidad de resolver los inconvenientes la frontera lateral.

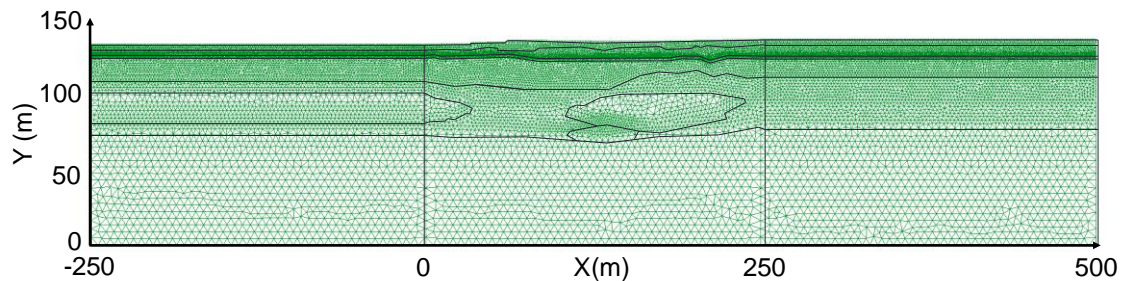


Fig. 20: Malla del modelo QUAD4M, modelo original entre X= 0-250 m

Con respecto al **análisis No-Lineal en 2D**, el software es nuevamente FLAC 7.0 bajo la misma metodología de resolución indicada para análisis unidimensionales. Con respecto a las condiciones de borde y para realizar una comparación con QUAD4M, FLAC presenta en la frontera inferior el mismo criterio de frontera compatible de (Lysmer & Kuhlemeyer, 1969) pero adaptado a la resolución por diferencias finitas. Dicho ajuste consiste en introducir de forma directa, como input a cada nodo de la parte inferior, un registro de tensiones de corte que se obtiene como indica la Ecuación 3:

$$\tau = -\rho \cdot v_s \cdot v(t)$$

Ecuación 3

Donde ρ es la densidad del bedrock, v_s su velocidad de transmisión ondas de corte y $v(t)$ corresponde al registro de velocidad derivado de cada acelerograma a analizar. Esta propuesta indicada en el manual de FLAC (ITASCA, 2016) cita varios autores que han probado su fiabilidad.

En cuanto a las fronteras laterales, este software presenta una ventaja significativa frente a QUAD4M ya que utiliza una frontera de Campo Libre, la cual vincula la frontera lateral del modelo 2D a través de amortiguadores como los propuestos por (Lysmer & Kuhlemeyer, 1969) a un modelo unidimensional con las propiedades del mencionado borde, de forma de poder tomar la rigidez del mismo a cada paso de tiempo como si se tratara de un semi-espacio infinito. Dicho esquema, presentado en la Fig. 21 junto al modelo, permite representar de forma más adecuada las condiciones de borde adoptadas como hipótesis, sin necesidad de aumentar el dominio del modelo y poder contemplar con él los efectos de reflexión y refracción de ondas mecánicas en la frontera, además del amortiguamiento por radiación.

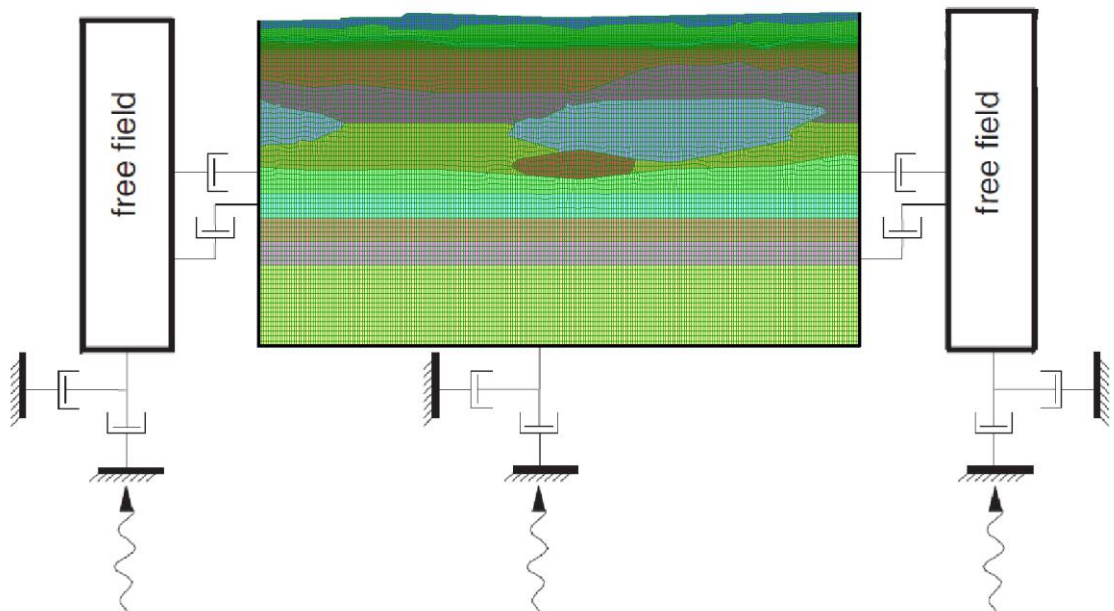


Fig. 21: Modelo de FLAC con condiciones de borde

En referencia a la discretización y de igual manera que para los modelos unidimensionales, se adoptó el criterio de (Kuhlemeyer & Lysmer, 1973) tanto en QUAD4M como en FLAC, donde en este último recomienda utilizar 1/10 de la longitud de onda (ITASCA, 2016) en lugar de 1/6 a 1/8. Dadas las herramientas que posee FLAC para generar la malla de diferencias finitas se utilizó una dimensión de elemento uniforme sobre la extensión horizontal del modelo, pero variable en vertical según las características de cada suelo.

De esta forma, fueron llevados a cabo 4 modelos: 2 unidimensionales y 2 bidimensionales, de los cuales uno de ellos se resuelve con un esquema Lineal-Equivalente y el otro con uno No-Lineal, para cada uno de los 2 grupos de 7 registros de aceleración, resultando un total de 56 corridas.

4. RESULTADOS

El volumen de información disponible de cada una de las corridas es realmente significativo, lo cual hace preciso concentrar los datos de forma de poder obtener rédito de los mismos y poder realizar una interpretación física del comportamiento de cada uno de los modelos, en correspondencia con los resultados que se espera obtener. El correcto tratamiento de los datos de salida es fundamental para poder dar utilidad a la modelación.

Dado que se trata de un análisis que tienen como input un registro temporal de aceleraciones, las principales salidas serán en la forma de series temporales, tanto de variables estáticas como cinemáticas, en cada punto en el cual se haya dispuesto el registro. En base a ellas se pueden obtener variables derivadas, como así también diagramas o gráficos útiles como diagramas de colores, espectros, perfiles de valores máximos, etc.

a. Resultados 1D

Desde el punto de vista del comportamiento del terreno, uno de las mejores formas de representar los resultados de este tipo de análisis son los perfiles verticales de valores máximos, que si bien no se presentan de forma simultánea en un instante de tiempo dado, ayudan a identificar los puntos críticos de la respuesta.

Se presentan entonces los resultados correspondientes al Perfil 1-1 de distribución vertical de aceleración máxima, tensión de corte máxima y deformación de corte máxima para el promedio de los 7 registros de cada grupo de acelerogramas, para ambas metodologías de análisis. Se acompaña dichas gráficas del perfil de suelo y la distribución de velocidades, para facilitar la interpretación física de los resultados.

Puede claramente observarse en la Fig. 22 y la Fig. 23 que la deformación en la capa de suelo orgánico es significativamente mayor a la desarrollada por las restantes

capas de suelo, y que el modelo No-Lineal presenta en dicha capa mayores deformaciones que el Lineal-Equivalente.

En términos de aceleraciones se puede observar que el modelo No-Lineal presenta menores valores que el Lineal-Equivalente, a la vez que ambos muestran una notable disminución en la aceleración por encima de la capa de turba. El grupo de registros Near Field muestra además valores de aceleración en superficie algo mayores que los registros Far Field.

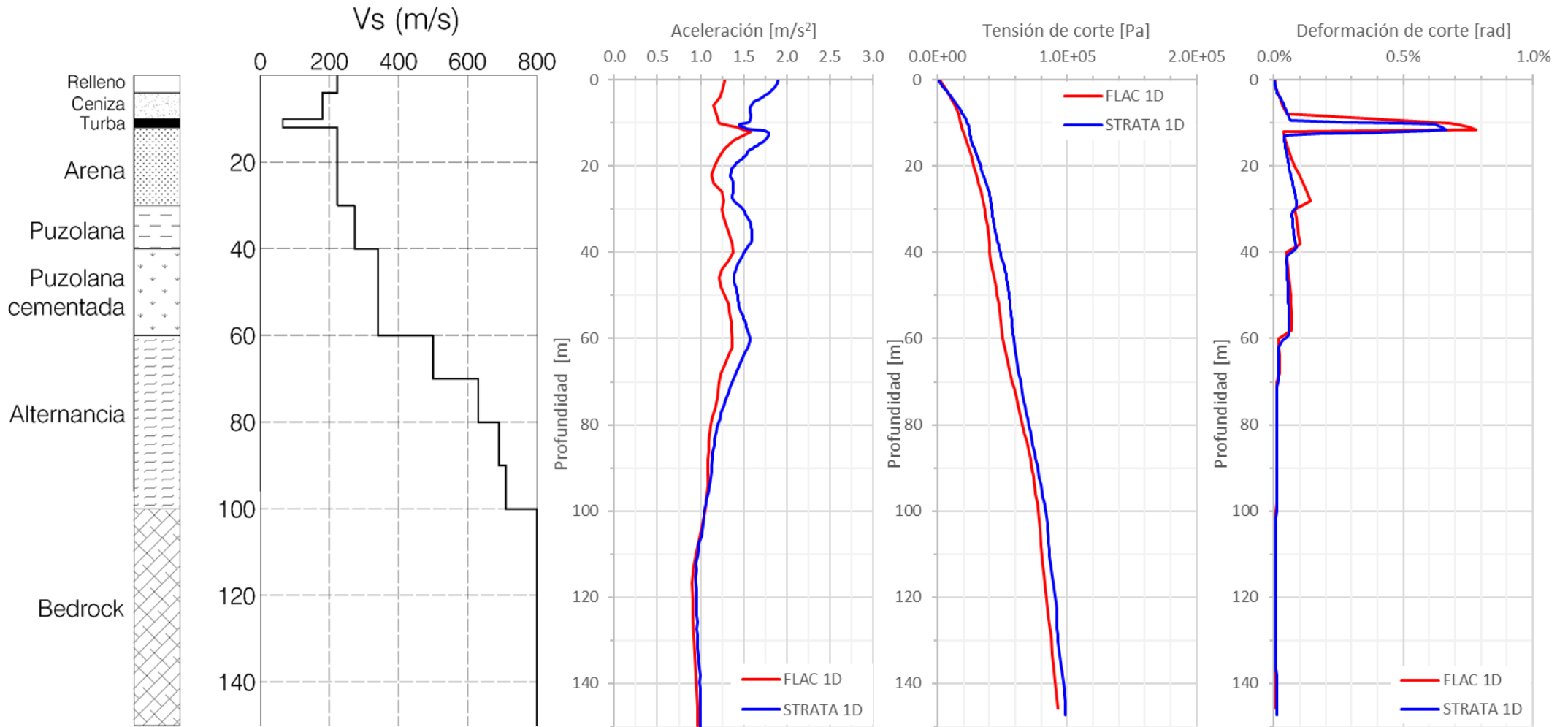


Fig. 22: Perfiles de velocidad de transmisión de ondas de corte, aceleración, tensión de corte y deformación de corte máximas, para registros Near Field

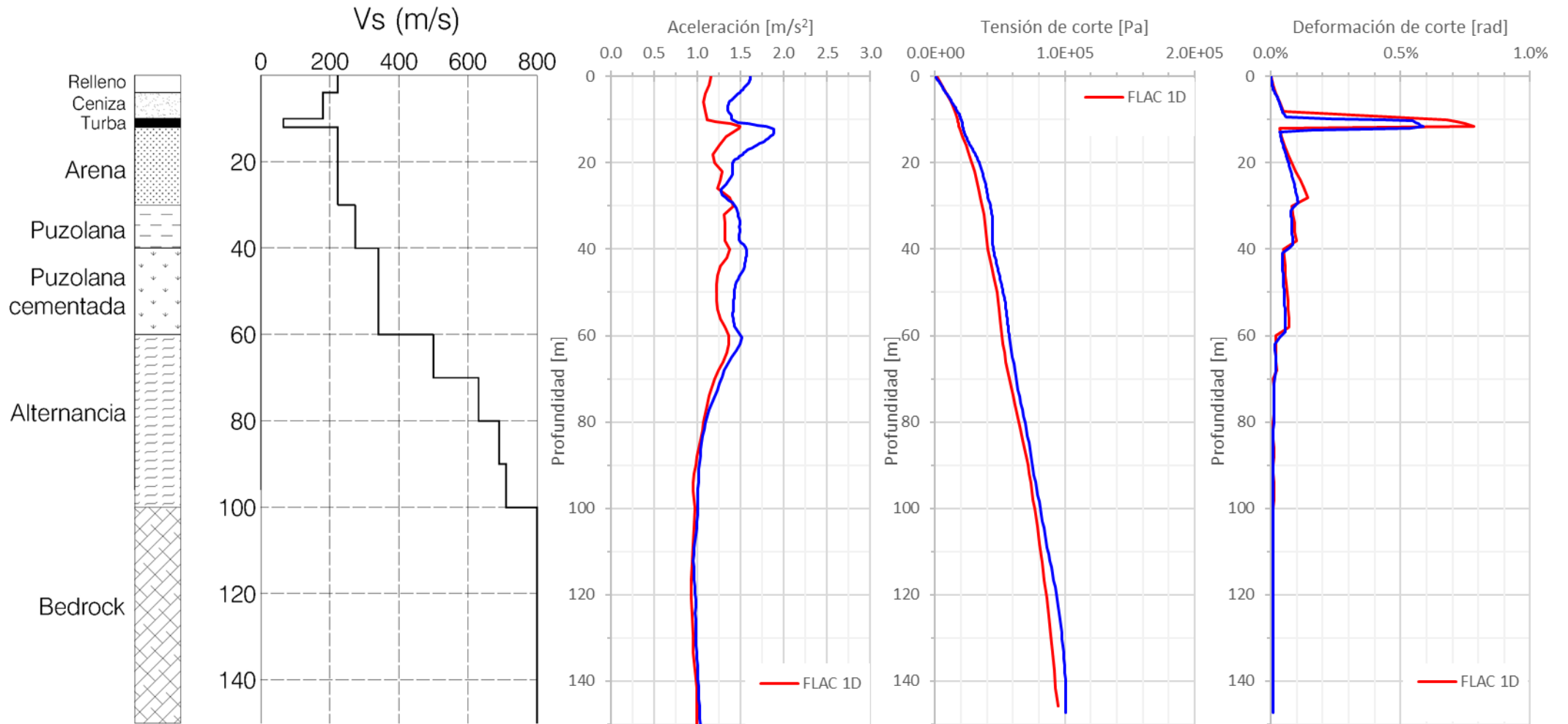


Fig. 23: Perfil de velocidad de transmisión de ondas de corte, aceleraciones, tensiones de corte y deformaciones máximas, para registros Far Field

Más adelante se presentan otros resultados de análisis unidimensionales combinados con los de los análisis bidimensionales.

b. Resultados 2D

Los análisis bidimensionales ayudan en este caso a evaluar la influencia de la geometría y las propiedades variables de cada uno de los estratos que componen la sección de estudio, situaciones que no es posible cubrir con análisis 1D, de las cuales se destacan la geometría y propiedades de la capa de turba y la presencia de las lentes de toba amarilla en la matriz de puzolanas.

En primera instancia se presentan las aceleraciones en superficie, para ambos modelos y ambas series de registros, en las Fig. 24 y Fig. 25.

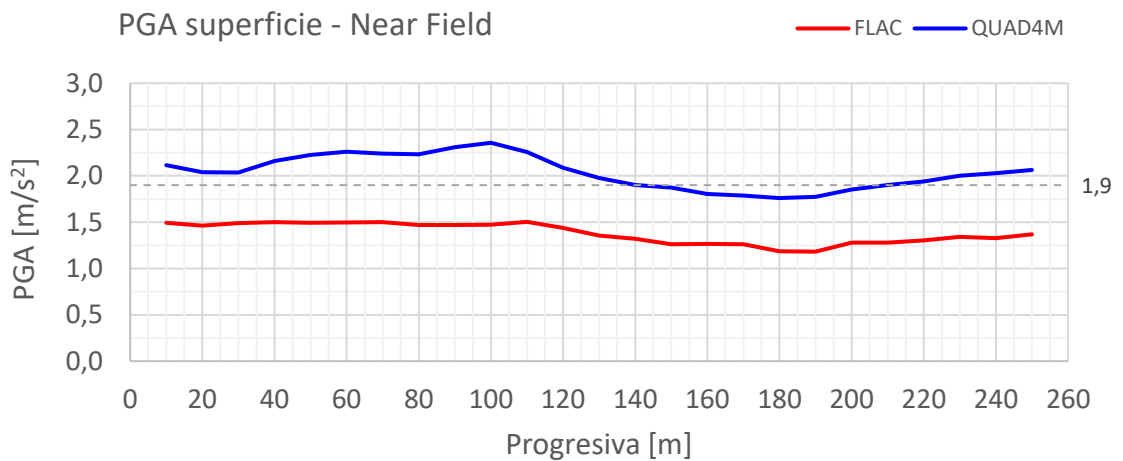


Fig. 24: PGA en superficie, registros Near Field

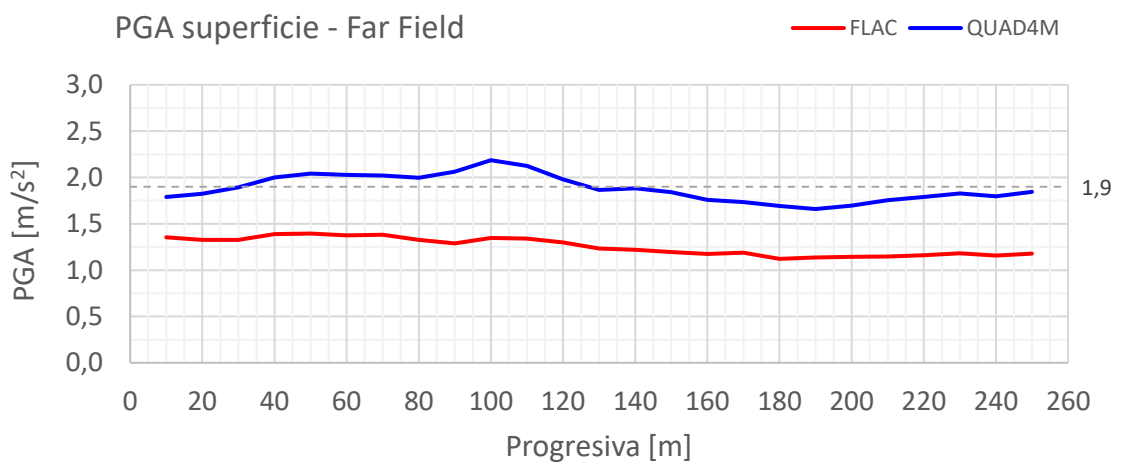


Fig. 25: PGA en superficie, registros Far Field

Es destacable que el modelo No-Lineal arroja menores valores que el Lineal-Equivalente en una proporción casi constante, y que ambos están cerca o incluso por debajo del PGA de referencia utilizado para ajustar los registros. Se identifica además un ligero aumento entre las progresivas 30m y 90m, que es la zona que se ubica entre los lentes de toba amarilla.

Se indica además que los registros Near Field presentan valores de aceleración sensiblemente mayores a los correspondientes a los registros Far Field.

Analizar la respuesta exclusivamente en términos de PGA no es algo recomendable, ya que la naturaleza transitoria de las señales hace muchas veces que los valores de punta no sean representativos del desarrollo temporal de la señal, por lo que en ocasiones se busca el uso de parámetros integrales (Silvestri, 2018), que están más relacionados con la parámetros energéticos y que tienen en cuenta todo el desarrollo acumulado de la señal, como lo son los factores de amplificación.

El factor de amplificación de ordenadas espectrales de aceleración (Ecuación 4) y el factor de amplificación de intensidad de Housner (Ecuación 5) se muestran como dos de los más utilizados a la hora de evaluar los efectos de respuesta de sitio.

$$F_A = \frac{\int_{T_a}^{T_b} S a_s(T) dT}{\int_{T_a}^{T_b} S a_r(T) dT}$$

Ecuación 4

$$F_H = \frac{\int_{T_a}^{T_b} S v_s(T) dT}{\int_{T_a}^{T_b} S v_r(T) dT}$$

Ecuación 5

Para poder dar utilidad a los mismos, es preciso definir intervalos de período tales que sean característicos de rangos de periodo propios de estructuras sobre las que podrían impactar. Es por esto que se definen los rangos de periodo [0,1s - 0,5s], [0,4s - 0,8s], [0,7s - 1,1s], [1,0s - 1,3s], [1,2s - 1,6s] y [1,5s - 1,8s] y se evalúa F_A para ambos grupos de registros y tipos de análisis, como indican la Fig. 26, Fig. 27, Fig. 28 y Fig. 29.

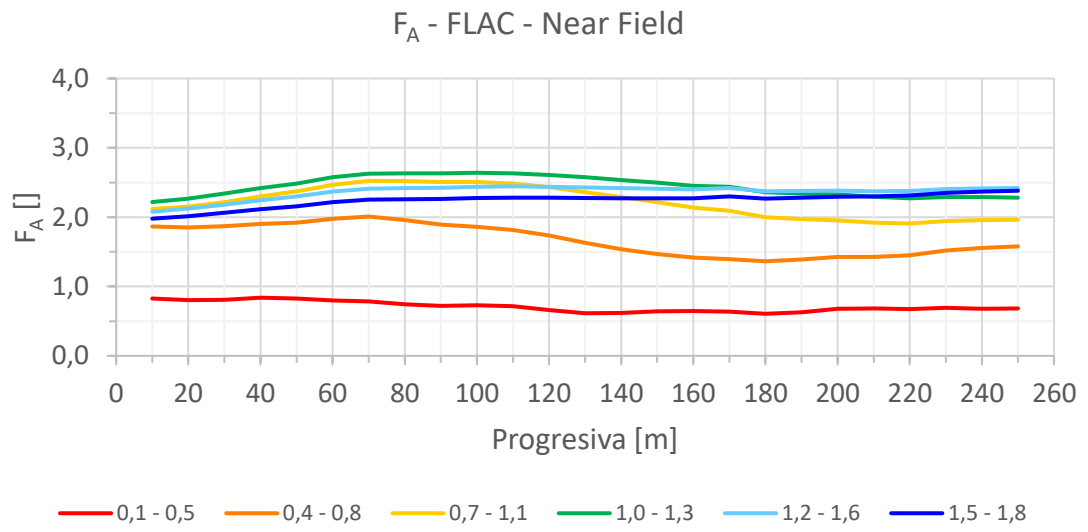


Fig. 26: Factor de amplificación, registros Near Field, modelo FLAC

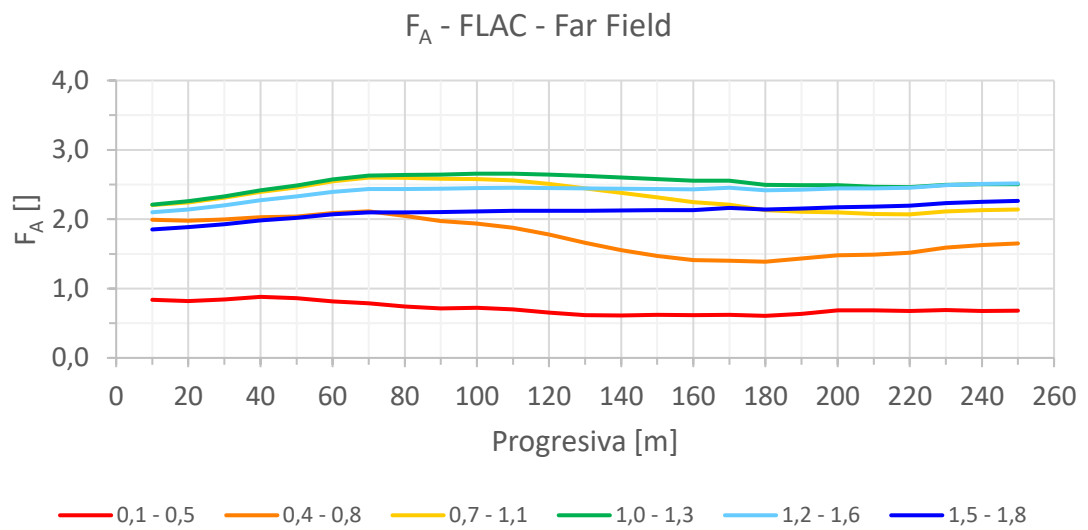


Fig. 27: Factor de amplificación, registros Far Field, modelo FLAC

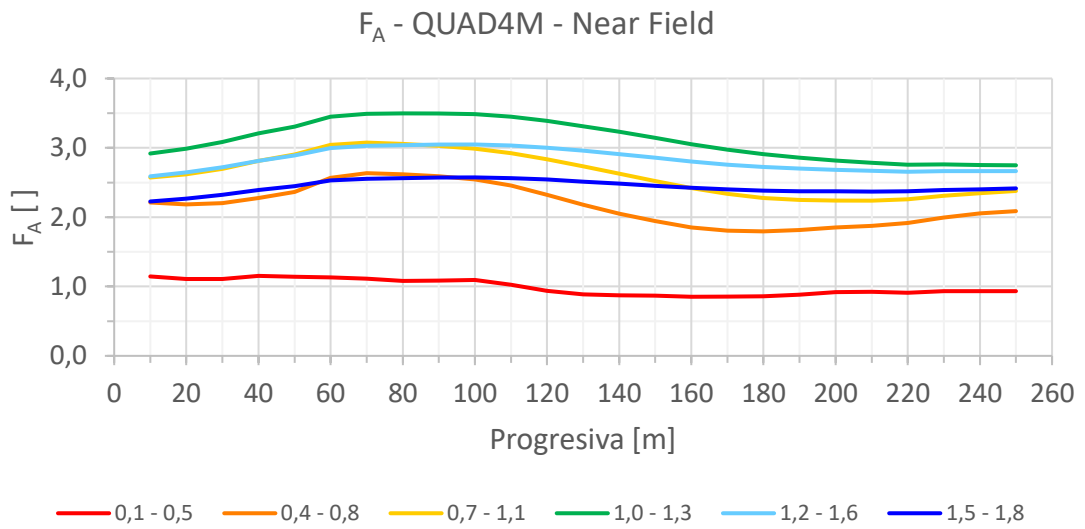


Fig. 28: Factor de amplificación, registros Near Field, modelo QUAD4M

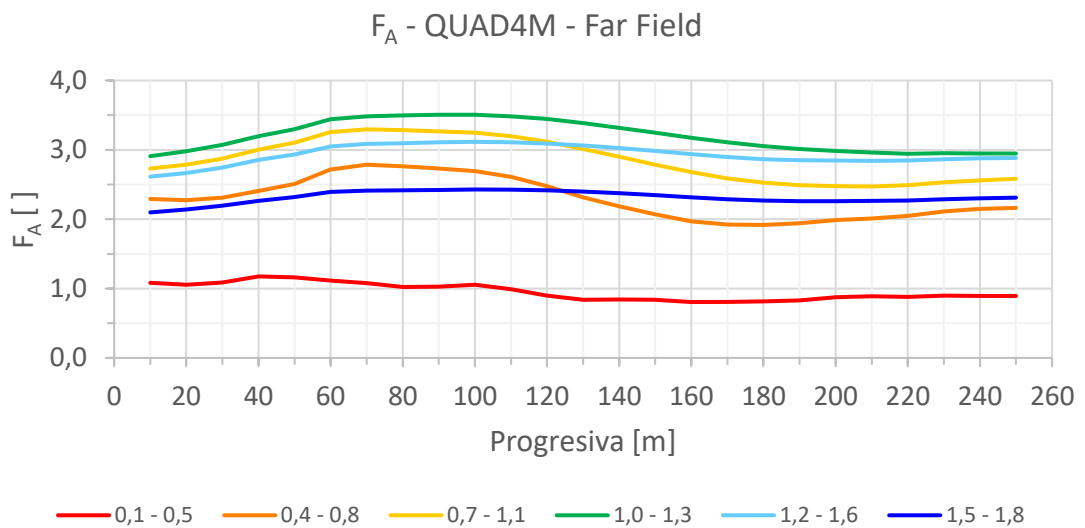


Fig. 29: Factor de amplificación, registros Far Field, modelo QUAD4M

Es notorio que solo se verifique amplificación baja o incluso atenuación en el rango de periodos más bajo y cercano al PGA ($T=0s$), mientras que en los restantes rangos de periodos se identifique una amplificación de entre 2 a 4 veces.

Los resultados correspondientes al modelo Lineal-Equivalente son mayores que aquellos que corresponden al modelo No-Lineal, y nuevamente se verifica, aunque de forma leve, un aumento en las magnitudes entre las progresivas 30m y 90m.

El factor de amplificación de la intensidad de Housner será utilizado en la comparación entre los análisis 1D y 2D.

Adicionalmente, y como una herramienta que ayuda a comprender de forma conceptual e integral cómo se comporta el sistema, se suelen utilizar diagramas de colores de varios de los parámetros evaluados durante la modelación. De forma ilustrativa se presenta en la Fig. 30 el mapa de colores para el registro N°4 evaluado en QUAD4M para las variables de máxima aceleración, amortiguamiento máximo, máxima degradación del módulo cortante y máximas deformaciones de corte.

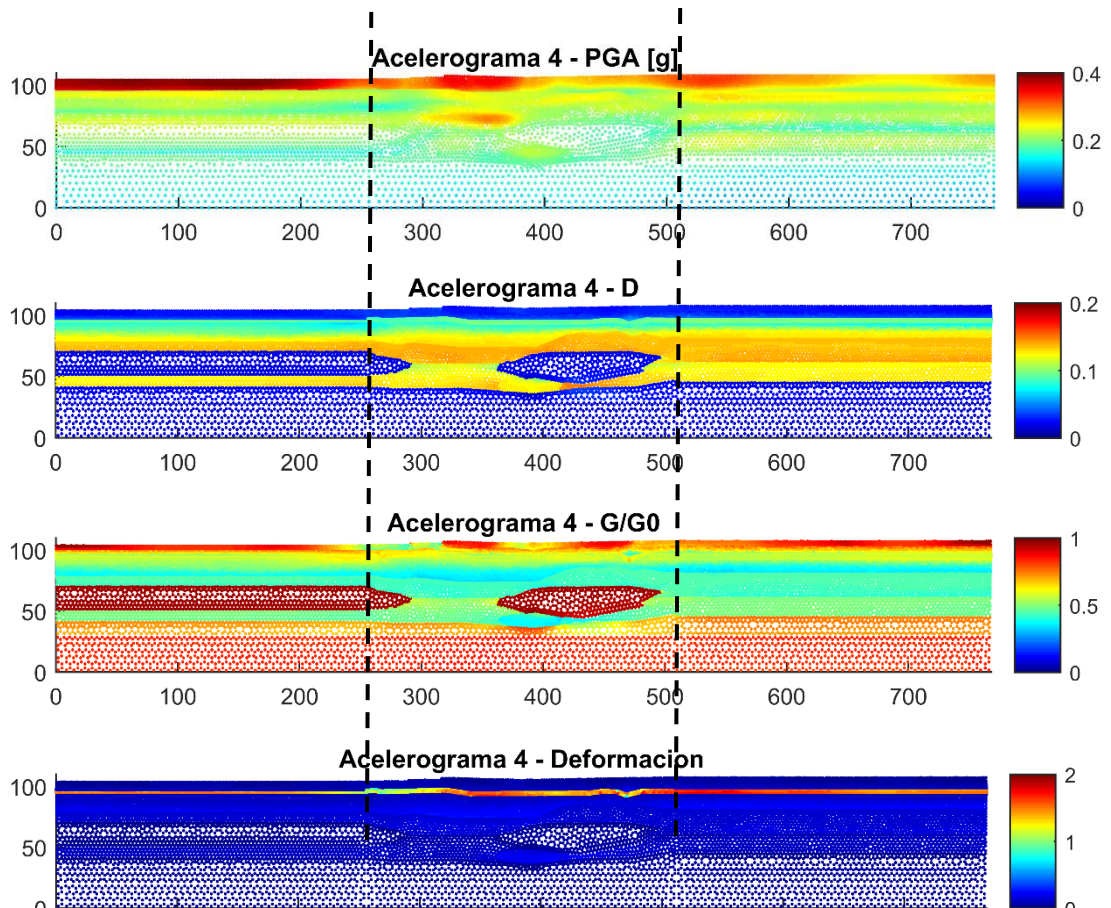


Fig. 30: Mapas de colores de variables máximas - registro N°4 - QUAD4M

Algunos aspectos destacables son:

- a. En el espacio entre las lentes de toba se observa mayor aceleración que en el resto de la superficie.
- b. Las capas por encima de la turba muestran bajas degradaciones del módulo cortante y bajas razones de amortiguamiento, igual que las lentes de toba mientras las capas centrales de puzolanas y arenas volcánicas son la más degradadas y amortiguadas.

- c. La capa de turba se deforma significativamente más que las restantes, y aún más donde presenta cambios de geometría.

Los restantes diagramas de colores se incorporan al Anexo 3.

c. Comparación de resultados 1D y 2D

Como parte del trabajo, además de evaluar la Respuesta Sísmica Local particular se busca aplicar diversas herramientas de modelación, con lo cual es preciso llevar a cabo una comparación entre algunos de los resultados de los 4 análisis desarrollados, en busca de similitudes o diferencias.

La Fig. 31 muestra la distribución vertical de aceleración para los dos grupos de registros a lo largo del Perfil 1-1, para cada uno de los modelos.

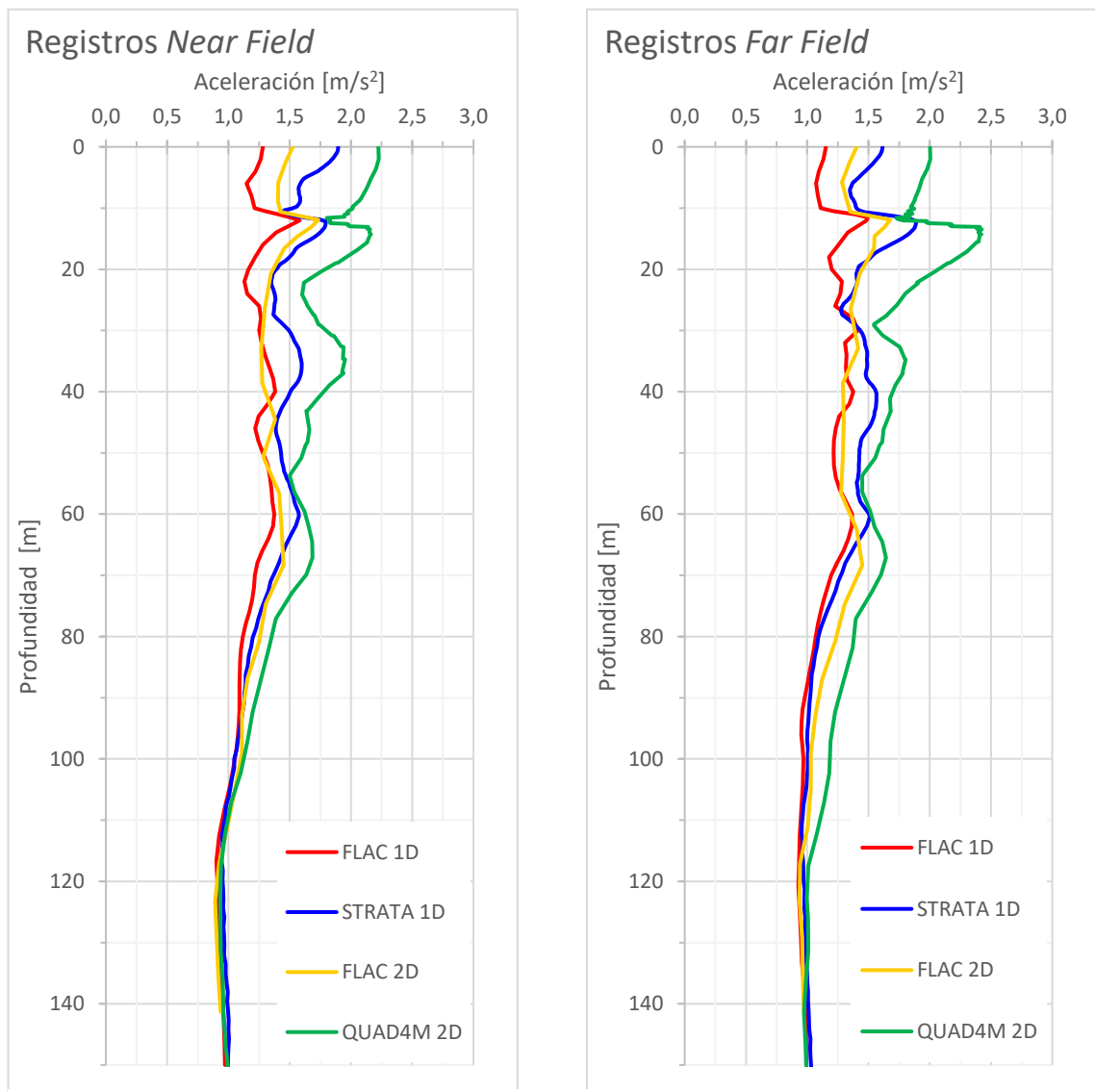


Fig. 31: distribución vertical de aceleración, Perfil 1-1

Se puede observar que los análisis 2D presentan mayores valores de aceleración que los 1D, lo cual indica que existe en cierta medida influencia de las condiciones bidimensionales en la respuesta del perfil de terreno. Se enfatiza además que los análisis No-Lineales presentan menores aceleraciones que los Lineal-Equivalentes, manteniendo la tendencia antes indicada para los perfiles 1D.

Por lo demás, los perfiles presentan una forma similar, se aprecia en todos la brusca reducción de las aceleraciones sobre la capa de turba y las amplificaciones en términos de aceleración no se muestran significativas en relación a la aceleración de referencia de $1,9 \text{ m/s}^2$.

Las ventajas que presentan los parámetros integrales pueden observarse en la Fig. 32, Fig. 33, Fig. 34 y Fig. 35 que presentan el factor de amplificación de intensidad de Housner tal cual se definió en la Ecuación 5, en dos intervalos de periodo, $[0,1\text{s} - 0,5\text{s}]$ y $[0,5\text{s} - 1,5\text{s}]$. El factor F_H se representa como una curva para los modelos 2D y puntos para los modelos 1D, ubicados estos últimos en la progresiva del Perfil 1-1.

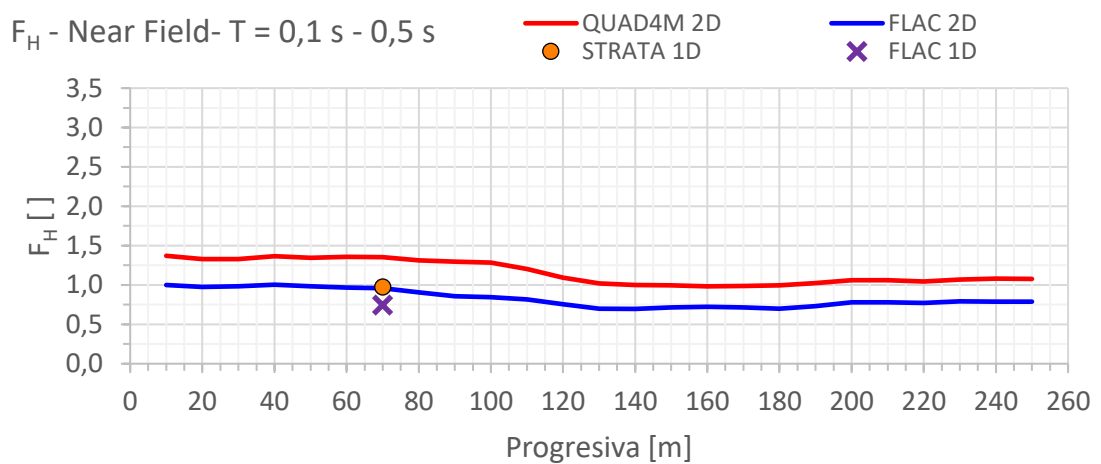


Fig. 32: Factor de amplificación de intensidad de Housner, Near Field, $T=0,1-0,5 \text{ s}$

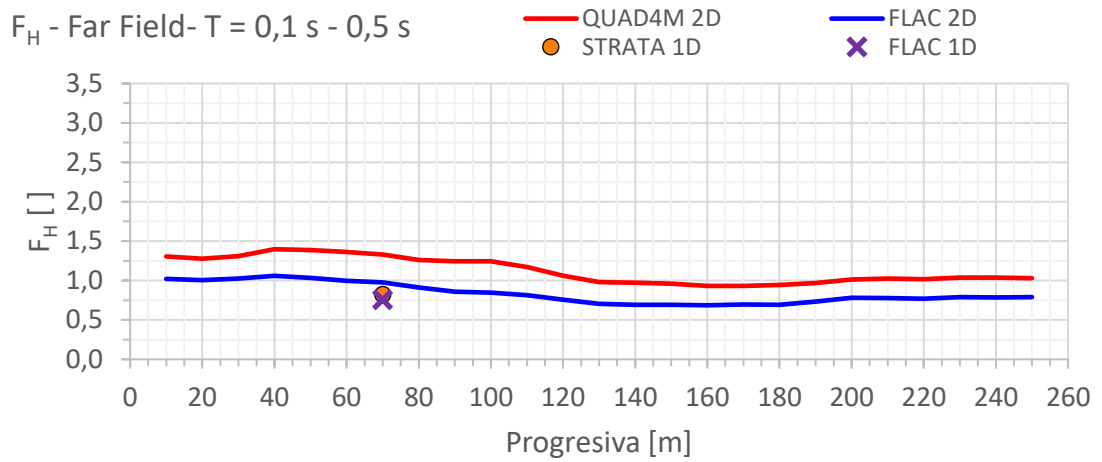


Fig. 33: Factor de amplificación de intensidad de Housner, Far Field, $T=0,1-0,5 \text{ s}$

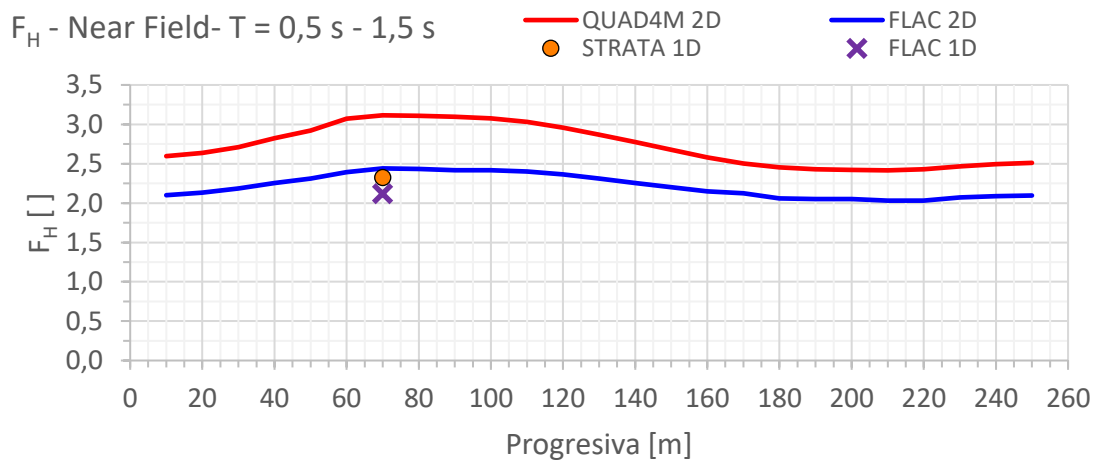


Fig. 34: Factor de amplificación de intensidad de Housner, Near Field, $T=0,5-1,5 \text{ s}$

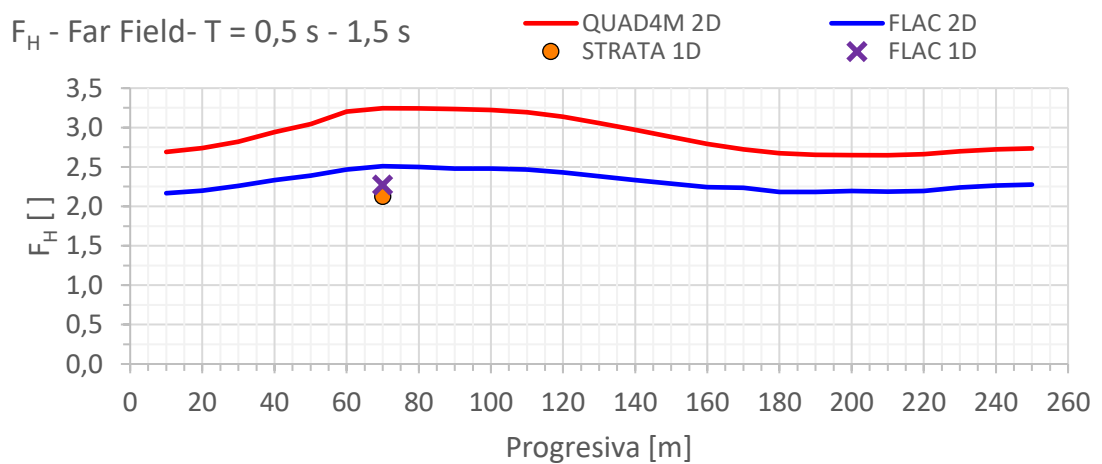


Fig. 35: Factor de amplificación de intensidad de Housner, Far Field, $T=0,5-1,5 \text{ s}$

Siguiendo la tendencia presentada por los anteriores parámetros, para bajos periodos no se presentan grandes amplificaciones mientras que para periodos altos si se observan mayores amplificaciones. Este parámetro acentúa aún más la amplificación alrededor de la zona de implantación del edificio, entre las dos lentes de toba amarilla.

Además, en la mayoría de los casos se observa que los análisis 1D presentan menores valores de F_H que los 2D, así como también los análisis No-Lineales presentan magnitudes menores a los Lineales-Equivalentes.

Por último se presenta en la Fig. 36 y la Fig. 37 la comparación de los espectros de aceleración promedio de cada análisis para ambos grupos de registros, además del espectro que corresponde al registro promedio de input y el espectro de diseño dado por NTC 2008. Los mismos tipos de gráfico correspondientes a cada acelerograma se presentan en el Anexo 4.

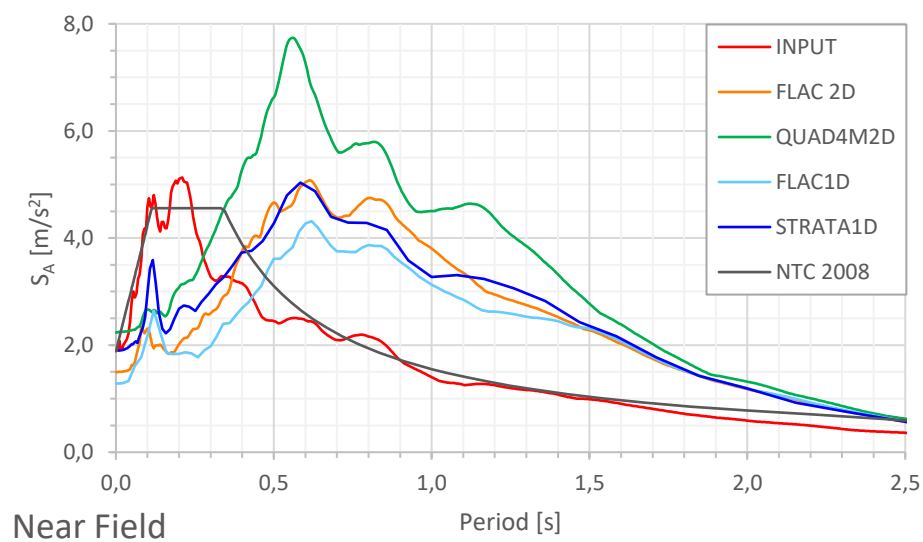


Fig. 36: Espectros de aceleración, registros Near Field

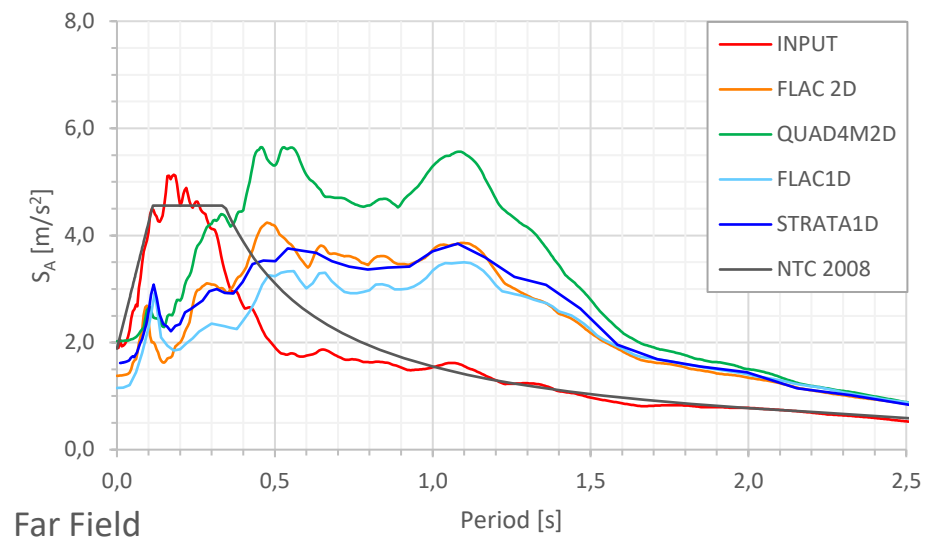


Fig. 37: Espectros de aceleración, registros Far Field

Estas figuras logran condensar gran parte de las observaciones realizadas anteriormente, son de las más representativas y útiles de este trabajo y por sobre todo pueden ser fácilmente interpretadas por profesionales de la geotécnica y el diseño estructural.

Es posible advertir que el espectro promedio de los registros de input efectivamente se ajusta al espectro del código en el rango de periodos de $T = 1,0$ s a $2,5$ s, parte del rango donde se buscó el ajuste. No obstante esto, vemos que para ambos grupos de registros todos los análisis por encima de los $0,5$ s superan de forma significativa tanto al espectro promedio de inputs como al espectro de diseño, mientras que para periodos menores a $0,5$ s se encuentran por debajo.

Además, se presenta también aquí la condición de que los modelos 2D superan en magnitud a los 1D, como así también los modelos Lineal-Equivalentes superan a los No-Lineales en sus respectivas comparaciones, confirmando una vez más lo advertido durante todo el análisis de resultados.

5. DISCUSIÓN

Luego de analizar los resultados, se pueden afirmar que el efecto benéfico de la capa de turba al concentrar la deformación y actuar como un "aislador natural" dentro

del paquete de suelos, solo se verifica en bajos períodos, mientras en los periodos altos se observa una amplificación en la todo el conjunto de variables analizadas.

Además, es claro que la influencia de las lentes de toba amarilla induce mayores aceleraciones en la pequeña cuenca de material menos rígido que se forma entre ellas. Al tratarse de una roca volcánica de menor densidad, pero mayor rigidez que los suelos circundantes, no se ve significativamente afectada por los efectos inerciales en tanto sí se observa la influencia que tiene en la respuesta global producto del cambio geométrico y mecánico de las condiciones del subsuelo. No obstante esto, el aumento observado no es demasiado acentuado y se presenta como un rasgo de amplificación topográfica de influencia moderada.

En relación a las estrategias de modelación, es claro que la influencia de los factores antes mencionados hacen que la respuesta 2D sea diferente a la respuesta 1D en términos de amplitud, pero pese a esto no se aprecian grandes cambios en la distribución general de ninguno de los parámetros analizados, con lo cual es preciso indicar que si bien el análisis 2D es más adecuado para este caso al considerar las variaciones geométricas y mecánicas del perfil, los perfiles 1D arrojan en la mayoría de los parámetros respuestas que corresponden con lo que podría esperarse de un paquete de suelos piroclásticos como el perfil bajo estudio.

Finalmente mencionar que existen dos consideraciones relativas respecto a las diferencias entre los análisis Lineal-Equivalentes y No-Lineales. Una hace énfasis en el sobre-amortiguamiento que sufren los modelos No-Lineales al utilizar para evaluar su comportamiento histerético un criterio basado en las reglas de Masing, problema que aumenta conforme se incurre en grandes deformaciones, como en la capa de turba. Una propuesta para corregir este problema es la utilización de un modelo constitutivo que contemple un ajuste en cada paso de tiempo de las curvas de degradación a las curvas experimentales, el cual no está presente al día de hoy en FLAC y hace que el sobre-amortiguamiento sea inevitable, reduzca la magnitud de los parámetros de control y no deje en claro qué porcentaje de reducción se debe al efecto de la no-linealidad material y qué parte al sobre-amortiguamiento.

La otra razón por la cual los modelos Lineal-Equivalentes arrojan resultados mayores a los No-Lineales es intrínseca a la estrategia de modelación, que por el hecho de considerar en cada iteración una deformación efectiva menor a la máxima durante la actualización de los parámetros geomecánicos, en los casos de grandes deformaciones se obtiene mayor rigidez y un menor amortiguamiento que el correspondiente a la deformación real. Esto resulta en una capa más rígida y capaz de transmitir mayores esfuerzos hacia las capas adyacentes, haciendo que la transmisión de ondas sea más eficiente y no se logre el efecto benéfico de una capa deformable que sirve como “aislador natural” del movimiento sísmico en superficie.

6. CONCLUSIÓN

Este trabajo tuvo por objeto la aplicación de diversas estrategias de modelación numérica en busca de poder averiguar la Respuesta Sísmica Local de un perfil de suelo particular situado en la ciudad de Nápoles, Italia.

Para ello fue necesario primero reconocer los elementos necesarios para llevar a cabo el análisis, identificar fortalezas y debilidades de cada uno de los métodos utilizados y resolver los inconvenientes propios de un estudio en el cual interviene información de diversas fuentes, y que es necesario compatibilizar y dar el uso debido en pos de obtener resultados lo más representativos posibles.

Realizados los análisis, fue necesario condensar una significativa cantidad de datos en gráficos capaces de describir la naturaleza del fenómeno de la forma más fehaciente posible, y así poder obtener un panorama de lo que sucedería a los edificios situados en la zona de análisis si llegara a presentarse algunos de los eventos previstos por el escenario sísmico previsto.

De esta forma, se puede manifestar que la presencia de una capa de suelo orgánico uniforme y de espesor significativo entre otras capas de un paquete de suelos de baja velocidad de transmisión de ondas de corte condiciona fuertemente la respuesta de los estratos que se encuentran por encima de la misma, presentando una condición particular en la cual generalmente las acciones se atenúan para bajas frecuencias y mientras se amplifican en frecuencias medias y altas.

La influencia de lentes de rocas volcánicas de baja densidad y considerable rigidez en relación la de los suelos que las circundan, inducen condiciones locales que pueden focalizar las ondas sísmicas y generar pequeñas cuencas que tienden a amplificar sensiblemente los efectos superficiales las acciones sísmicas.

Finalmente se observan las ventajas significativas que ofrece un estudio de este tipo en la caracterización de la Respuesta Sísmica Local de una región con una geología compleja, donde están implantados edificios de altura considerable y donde la normativa italiana exige, al presentar una inversión de velocidades de transmisión de ondas de corte en profundidad, la ejecución de este tipo de estudios para poder definir con claridad la respuesta esperada del terreno frente a probables eventos sísmicos futuros.

Como consecuencia de este trabajo fue desarrollado un artículo (Barbagelata, et al., 2020) presente en las actas del 7^{mo} Congreso Nacional Italiano de Investigadores en Ingeniería Geotécnica en *Geotechnical Research for Land Protection and Development, Proceedings of CNRIG 2019*, cuyo resumen puede encontrarse en: https://doi.org/10.1007/978-3-030-21359-6_25

7. SUGERENCIAS PARA FUTUROS TRABAJOS

Dado que los parámetros que demostraron ser más influyentes en la respuesta del terreno durante el presente trabajo fueron la capa de suelo orgánico y los lentes de toba, se podrían analizar casos donde la geometría de la capa de turba presente variaciones en su geometría y espesores, como así también lentes de toba amarilla podrían presentar geometrías más complejas, como las indicadas en (Vinale, 1988) y (Papa & Silvestri, 1986).

También sería un gran avance, no solo para este análisis en particular sino para todos los estudios de Respuesta Sísmica Local, que los modelos No-Lineales que utilizan los programas disponibles en el mercado solucionen el problema de sobre-amortiguamiento que presentan al utilizar las reglas de Masing por otros modelos sin perder su simplicidad, como el propuesto por (Phillips & Hashash, 2009) que con una modificación sobre el modelo de Kondner & Zelasko modificado por (Matasovic & Vucetic, 1993) es capaz de ajustarse a las curvas de laboratorio y evitar el sobre-amortiguamiento.

La introducción de registros de aceleración vertical en coincidencia con los registros horizontales, evaluados de forma racional, podría presentar un escenario más realista del peligro sísmico y muy posiblemente una condición más desfavorable para el suelo y su respuesta.

8. AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primera instancia al Prof. Arnaldo Barchiesi por haberme dado la oportunidad de realizar este intercambio, el cual me fue muy provechoso.

En igual medida agradecer al Prof. Francesco Silvestri, principal responsable de mi presencia en Italia y quien fue mi tutor, profesor y siempre estuvo atento a mis necesidades e inquietudes.

Agradecer también a la Prof. Anna d'Onofrio, la Dra. Anna Chiaradonna y el Ing. Giorgio Alleanza, quienes fueron junto con el Prof. Silvestri las personas que estuvieron cerca de mí y disponibles en todo momento, haciendo oído a mi infinita cantidad de preguntas y tomando como propios mis problemas, tanto en el ámbito académico como el personal.

Agradecer también a los doctorandos del área de Geotécnica (Gianluca, Pepe, Gabriela, Luca, Domenico, Sara, Filomena, Ximing, Tina, Lucia, Fausto, Valeria, Augusto, Roberta, Lucia, Rosario, Ana Chiara, Xingua) con los cuales compartí toda mi estancia en Italia y que hicieron que siempre me sintiera como si estuviera en casa.

Agradecer también a mi familia que fue una parte infaltable de toda esta experiencia, experiencia que me ayudó a mi formación académica, profesional, cultural y personalmente en una forma que no hubiera podido prever antes emprender el viaje.

9. REFERENCIAS

Alleanza, G. A., 2018. Confronto fra due codici di calcolo bidimensionali per analisi di risposta sismica locale: il caso studio di pretare (Arquata del Tronto). *Incontro Annuale Giovani Ingegneri Geotecnici (IAGIG)*, Volumen 8, pp. 178 - 181.

Alleanza, G. A. & Chiaradonna, A., 2018. Previsione degli effetti di non linearità dei terreni: confronto tra codici di calcolo per analisi 1D di Risposta Sismica Locale. *Incontro Annuale Giovani Ingegneri Geotecnici*, Volumen 8, pp. 182 - 185.

Arefi, M. J., Cubrinovski, M. & Bradley, B., 2012. A Model for Nonlinear Total Stress Analysis. *15 World Conference in Earthquake Engineering WCEE 15*.

Barbagelata, J. M. y otros, 2020. Evaluation of Site Amplification for the Seismic Protection of a Strategic District in Naples. *Geotechnical Research for Land Protection and Development: Proceedings of CNRIG 2019. Lecture Notes in Civil Engineering*, Volumen 40, pp. 235 - 244.

Bilotta, E. y otros, 2015. Importance of seismic site response and soil-structure interaction in dynamic behaviour of a tall building. *Géotechnique*, 65(5), pp. 391 - 400.

Byungmin, K. y otros, 2016. Relative Differences between Nonlinear and Equivalent-Linear 1-D Site Response Analyses. *Earthquake Spectra*, 32(3), pp. 1845 - 1865.

Chiaradonna, A., Tropeano, G. & Fasano, G., 2017. Confronto tra codici di calcolo per analisi di risposta sismica locale nell'ipotesi di comportamento visco-elastico lineare del terreno. *Incontro Annuale Giovani Ingegneri Geotecnici (IAGIG)*, Volumen 7, pp. 168 - 171.

de Silva, F., 2016. *Dynamic Soil-Foundation-Structure Interaction for masonry towers: the case study of Carmine bell tower in Napoli*. Ph.D. Dissertation: University of Napoli Federico II.

Hashash, Y., Phillips, C. & Groholski, D., 2010. Recent Advances in Non-Linear Site Response Analysis. *International Conferences on Recent advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Volumen 8.

Huson, M., Idriss, I. & Beikae, M., 2003. *QUAD4M: a computer program to evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base*. Center for Geotechnical Modeling, University of California, Davis.

Iervolino, I., Galasso, C. & Cosenza, E., 2010. REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8(2), pp. 339 - 362.

ISSMGE, 1999. *Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazard*. s.l.:Japanese Geotechnical Society.

ITASCA, 2016. *FLAC - Fast Lagrangian Analysis of Continua - Version 8 User Manual*, Minneapolis: Itasca Consulting Group.

Kottke, A. & Rathje, E., 2008. Technical Manual for Strata. En: U. o. California, ed. *PEER Report 2008/10*. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center.

Kramer, S., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. 1 ed. Upper Saddle River: Prentice Hall.

Kuhlemeyer, R. & Lysmer, J., 1973. Finite element method accuracy for wave propagation problems. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division - ASCE*, 99(5), pp. 421 - 427.

Lanzo, G. & Silvestri, F., 1999. *Risposta Sismica Locale, Teoria ed esperienze*. 1 ed. Benevento: Hevelius Edizioni.

Lysmer, J. & Kuhlemeyer, R., 1969. Finite dynamic model for infinite media. *Journal of the Engineering Mechanics Division - ASCE*, 95(4), pp. 859 - 878.

Masing, G., 1929. Eigenspannumyen und verfeshungung beim messing. *Procedings of International Congress for Applied Mechanics*, pp. 332 - 335.

Matasovic, N. & Vucetic, M., 1993. Cyclic Characterization of Liquefiable Sands. *Journal of Geotechnical Engineering - ASCE*, 119(11).

Meletti, C. y otros, 2004. Zonazione sismogenetica ZS9 - App.2 al Rapporto Conclusivo. *Gruppo di Lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica*, Ordinanza PCM 20.03.03(3274).

Ministero dell Infrastrutture e dei Trasporti, 2018. *Aggiornamento delle Norme tecniche per le contruzioni*, s.l.: Gazzetta Ufficiale.

Papa, V. & Silvestri, F., 1986. *Caratterizzazione dinamica del sottosuolo per l'analisi del comportamento sismico*. Tesi di laurea: Università di Napoli Federico II.

Phillips, C. & Hashash, Y., 2009. Damping formulation for nonlinear 1D site response analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volumen 29, pp. 1143 - 1158.

Rippa, F. & Vinale, F., 1983. Experiences with CPT in Eastern Naples area. *Proceedins of the 2nd European Symposium on Penetration Testing (ESOPT)*, Volumen 2.

Seismosoft, 2016. *SeismoSignal - A computer program for signal processing of time-historie*. s.l.:s.n.

Silvestri, F., 2018. *Apuntes de clase del Curso Dinamica dei Terreni e Geotecnica Sismica*. Nápoles: UNINA.

Strutt, J. W. B. R., 1877. *The theory of sound*. Londres: Macmillan and Co..

The MathWorks Inc., 2015. *Matlab R2015a and Toolbox*. Natick, Massachusetts, United States: s.n.

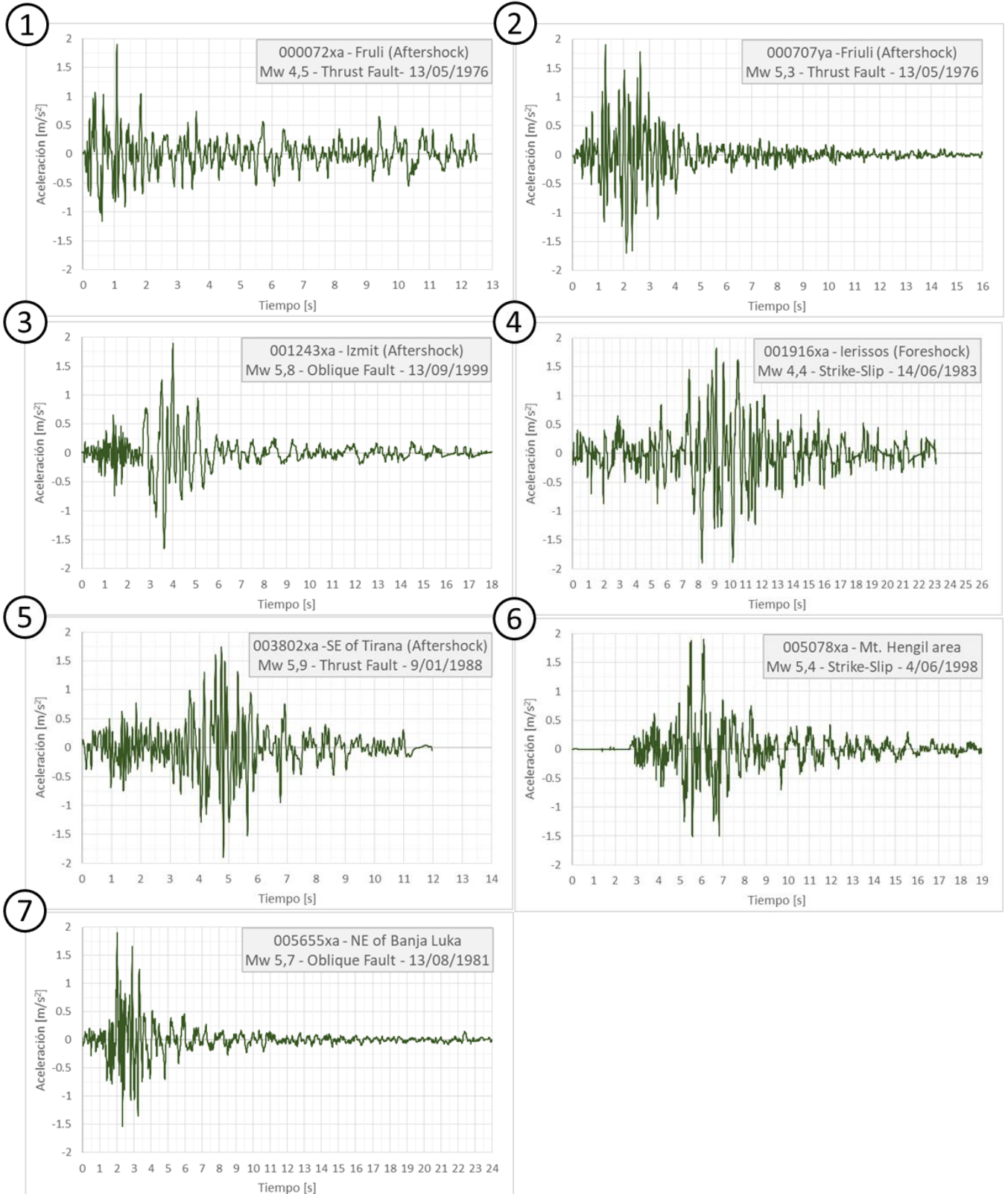
Vinale, F., 1988. Caratterizzazione del sottosuolo di un'area campione di Napoli ai fini d'una microzonazione sismica. *Rivista Italiana di Getecnica*, 17(2), pp. 59 - 84.

Wehling, T. y otros, 2003. Nonlinear Dynamic Properties of a Fibrous Organic Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - ASCE*, 129(10).

10. ANEXOS

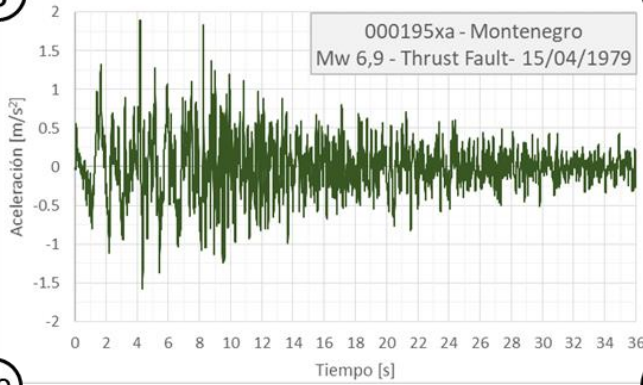
a. Anexo 1

Registros Near Field

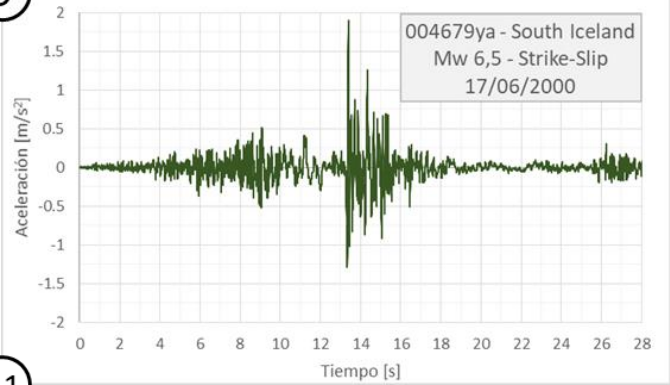


Registros Far Field

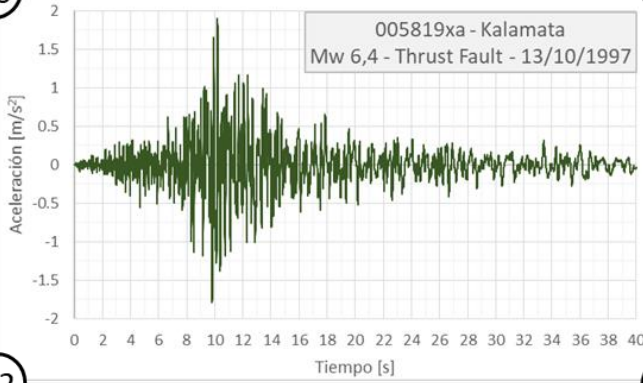
8



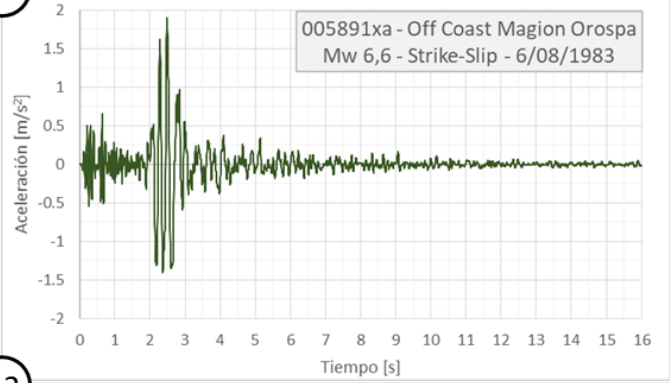
9



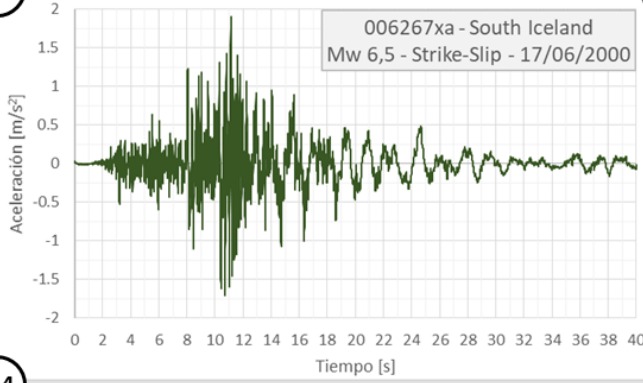
10



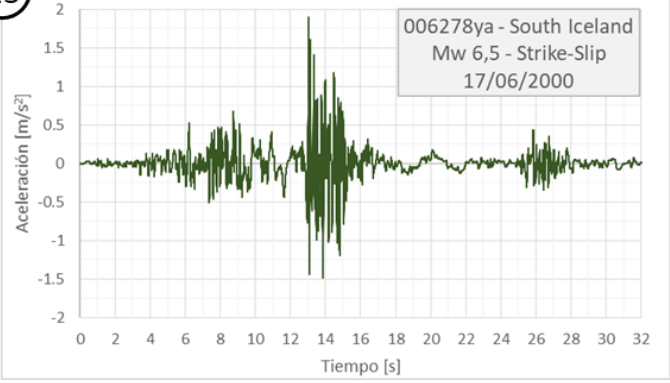
11



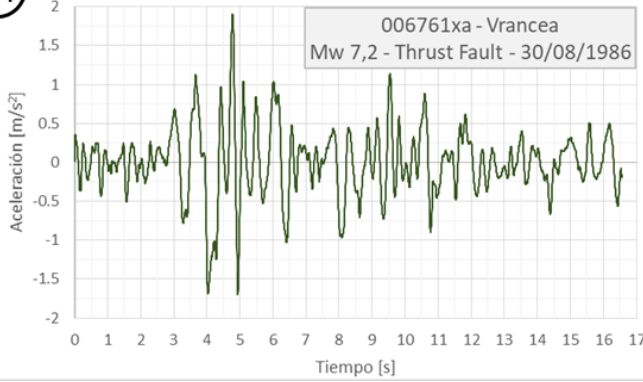
12



13

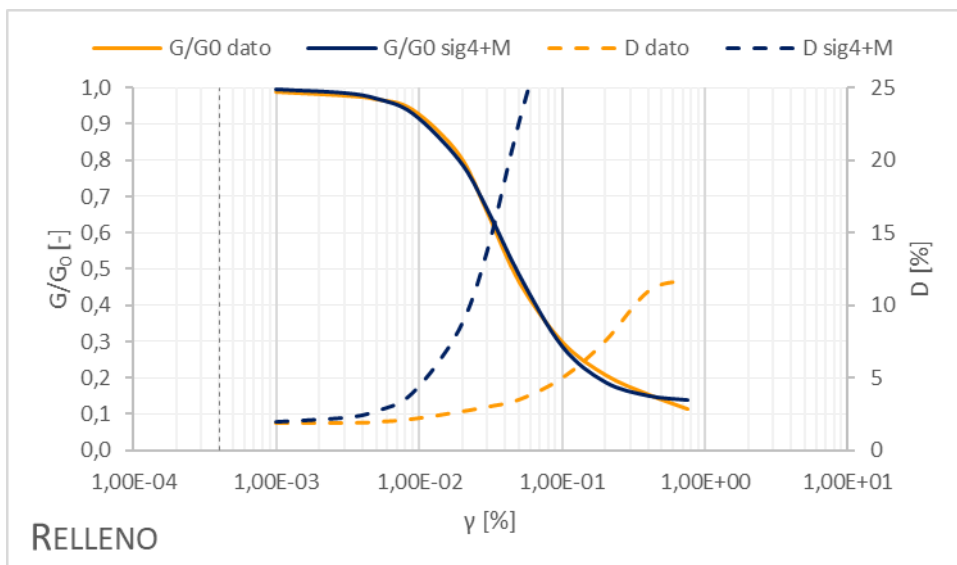
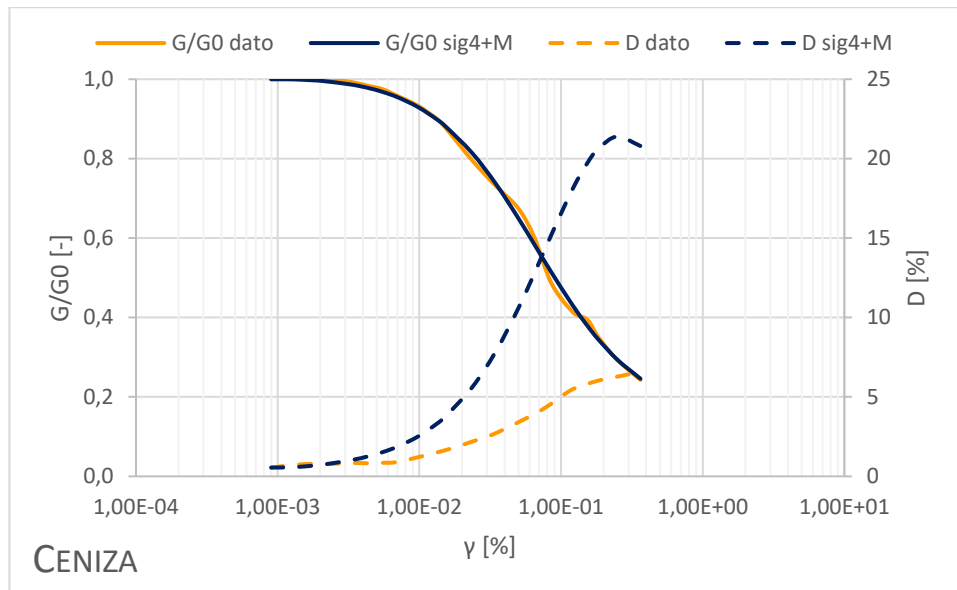


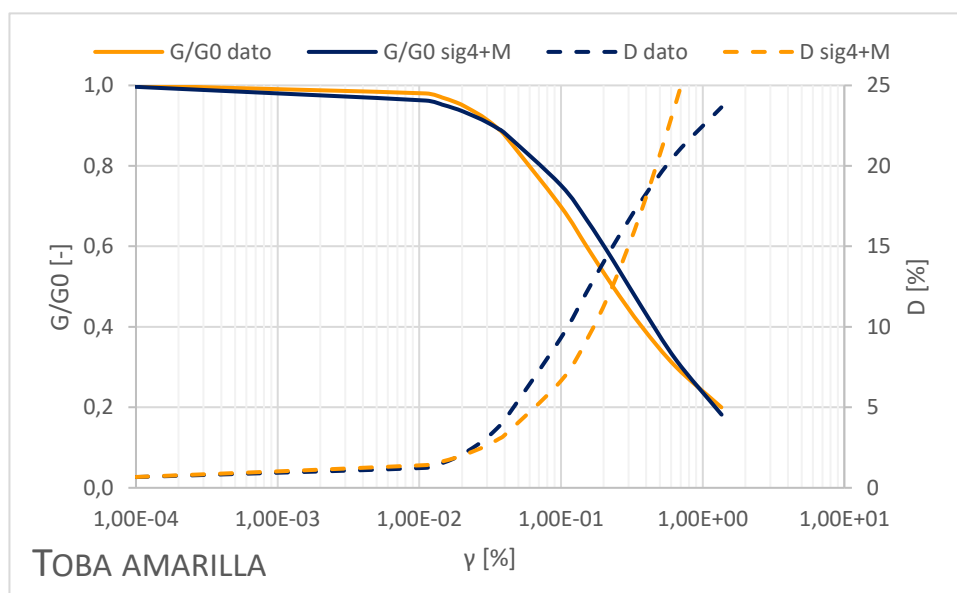
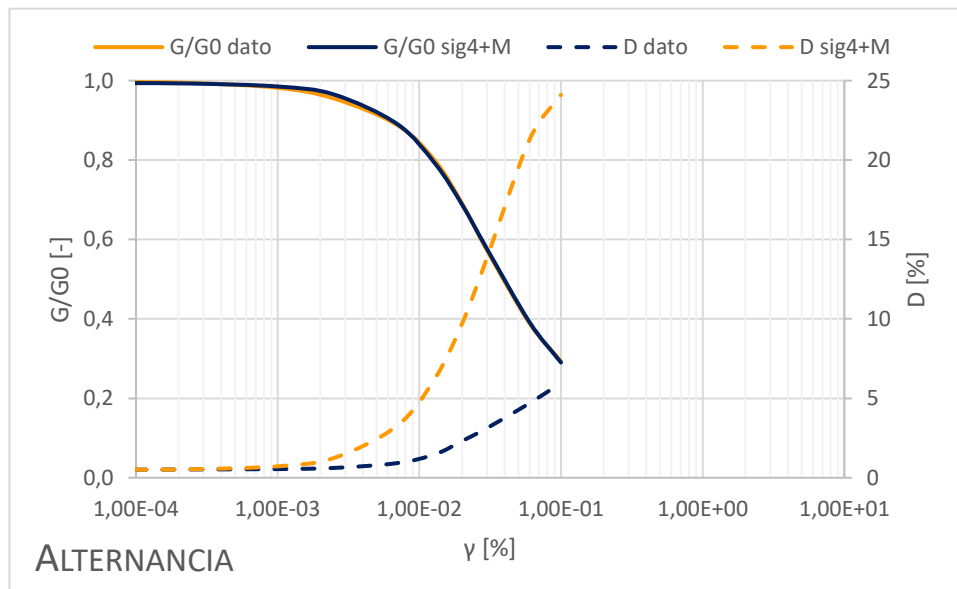
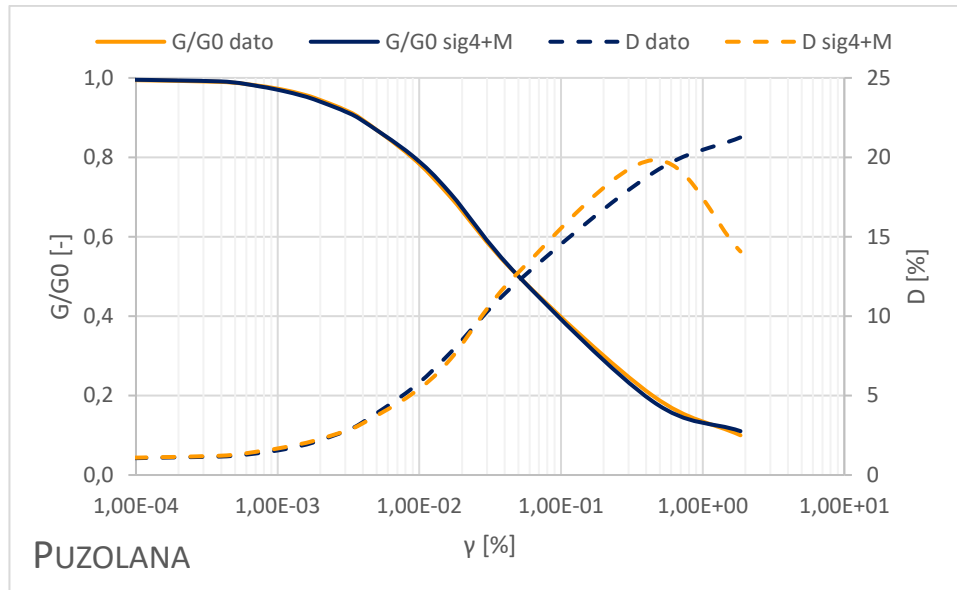
14

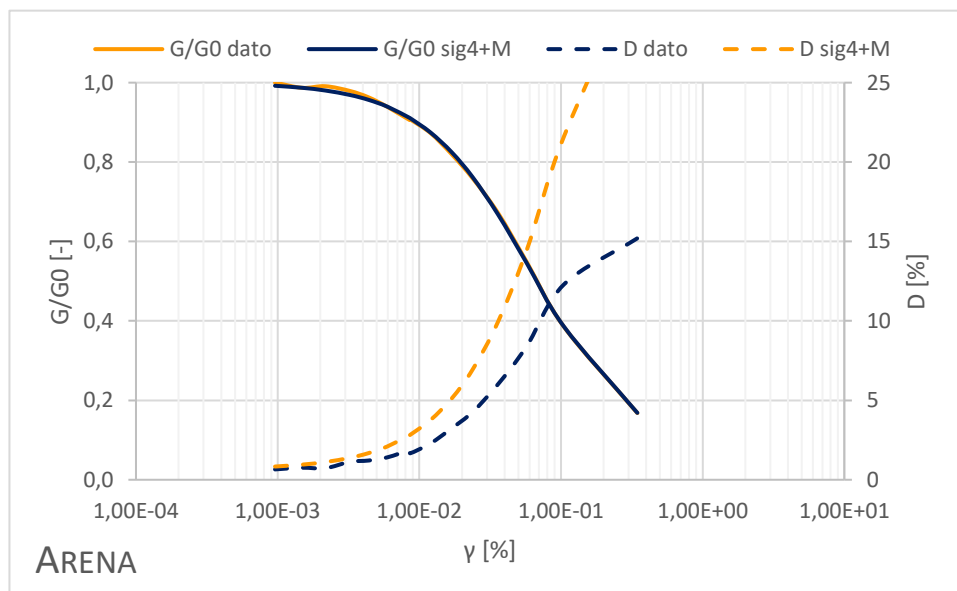
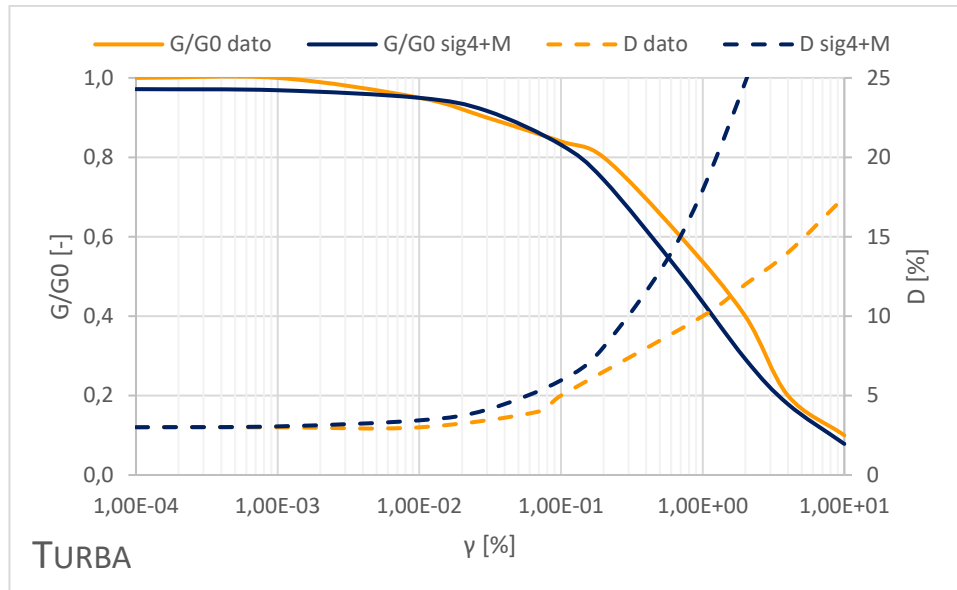


b. Anexo 2

Curvas de degradación experimentales y su ajuste con Sig 4 + Masing



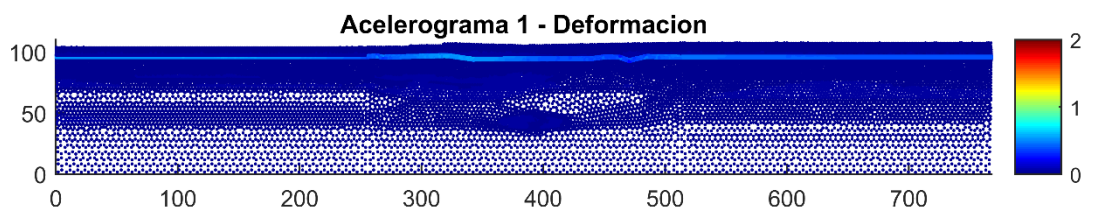
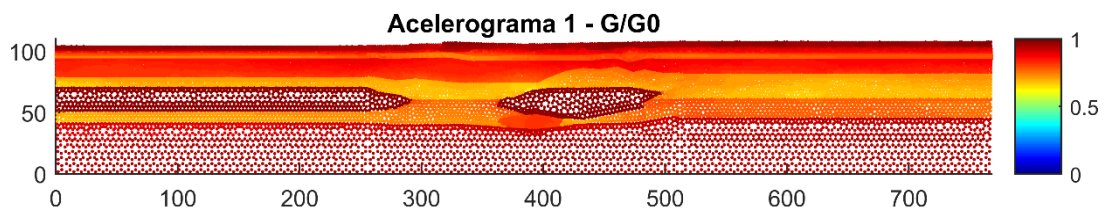
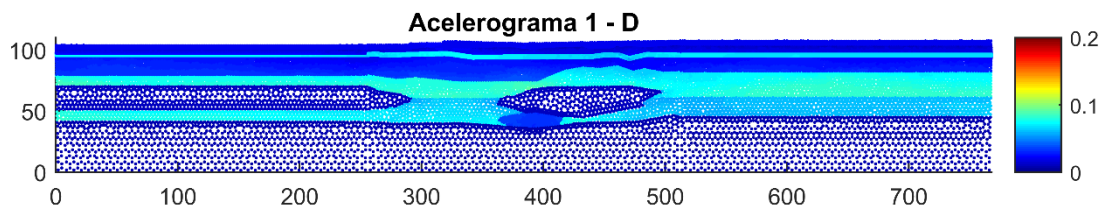
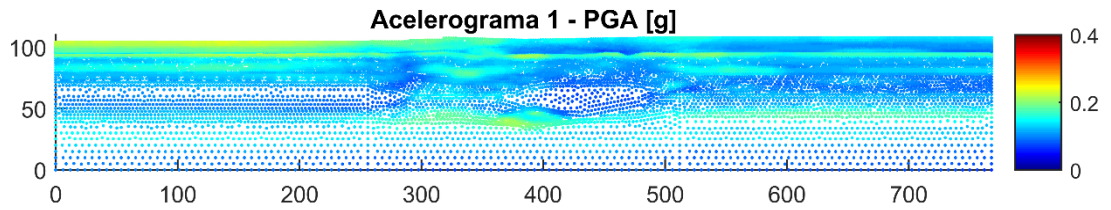




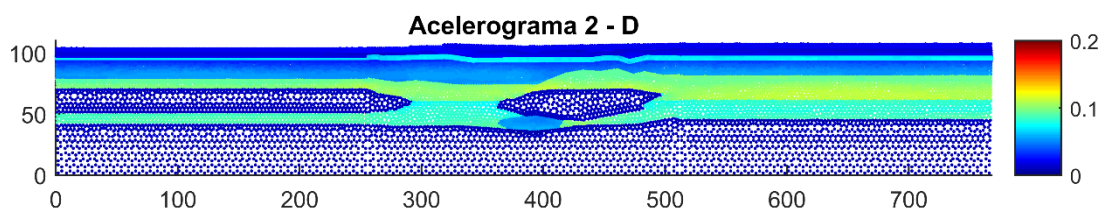
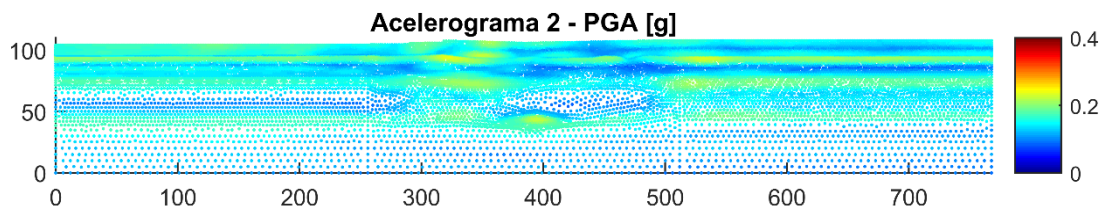
c. Anexo 3

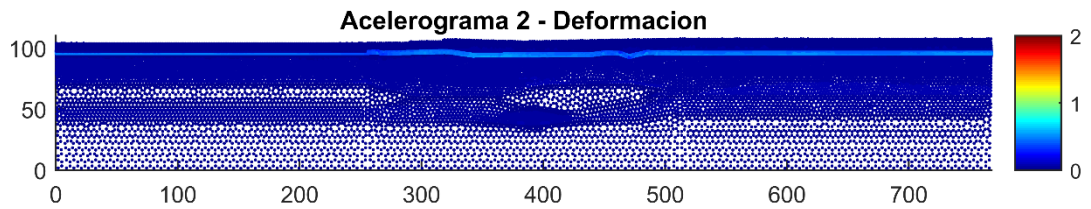
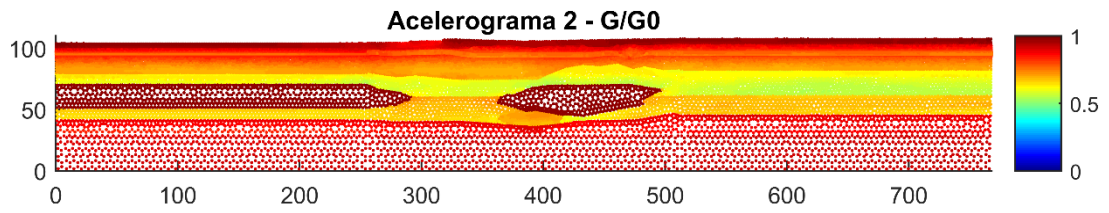
Gráficos de colores de PGA, D_{max} , G/G_0 max y γ_{max}

Acelerograma N°1

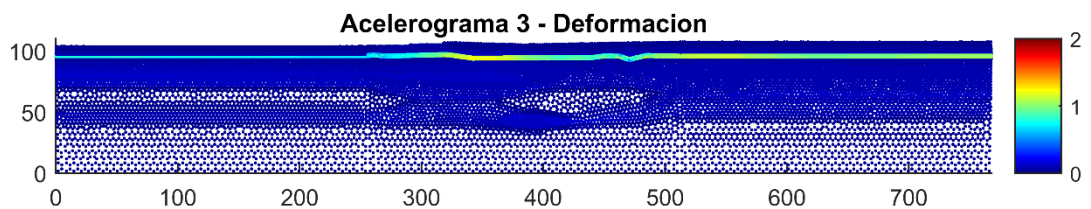
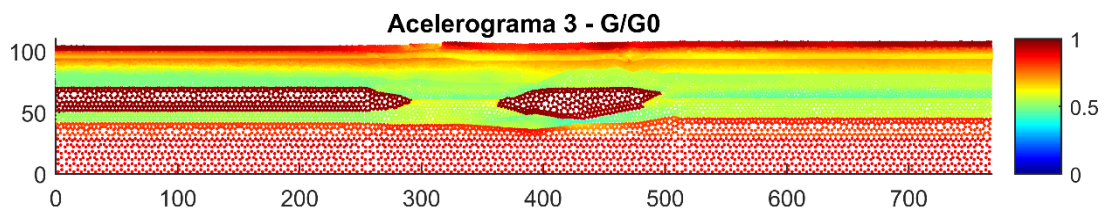
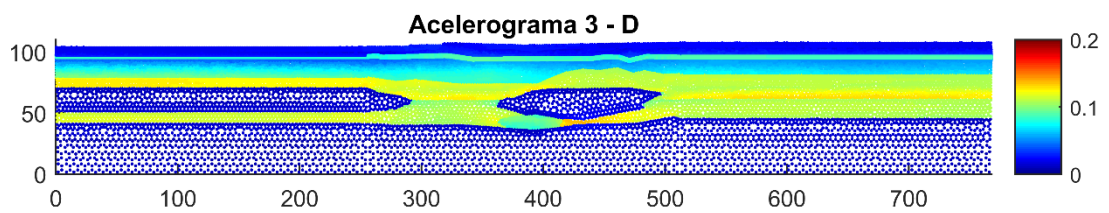
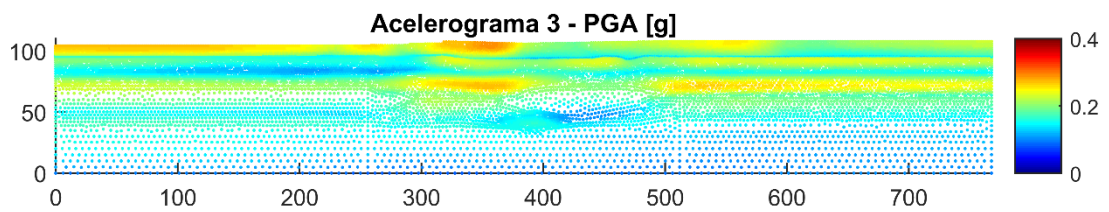


Acelerograma N°2

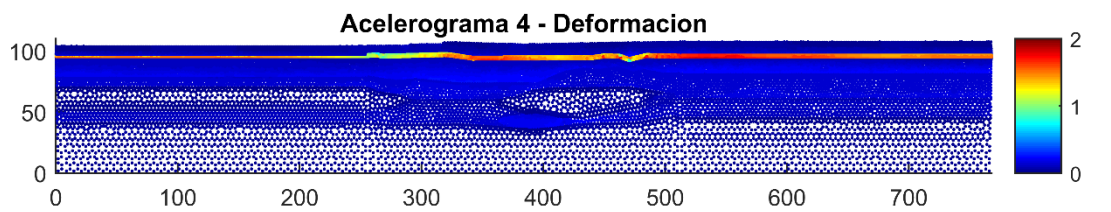
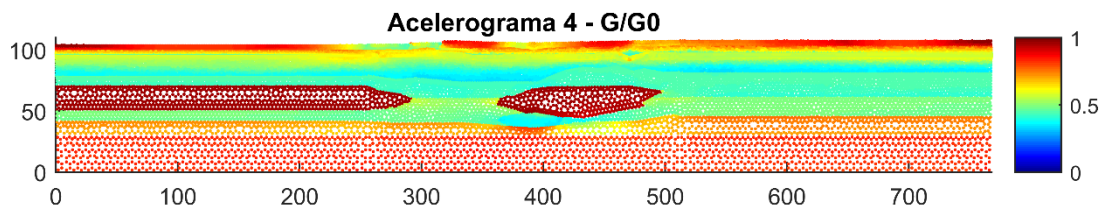
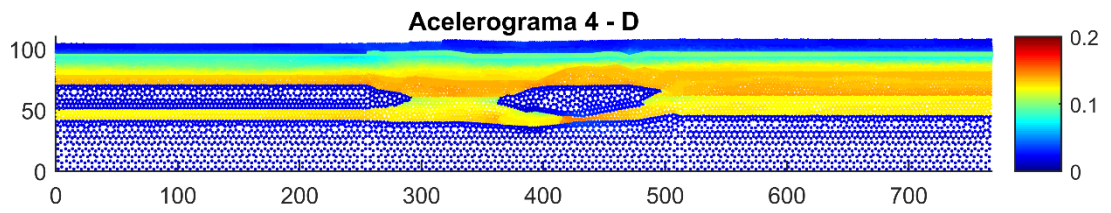
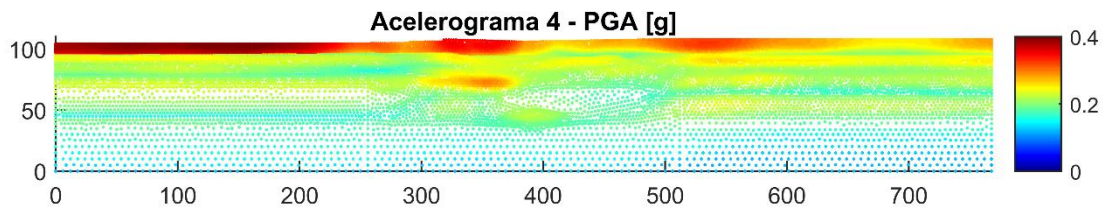




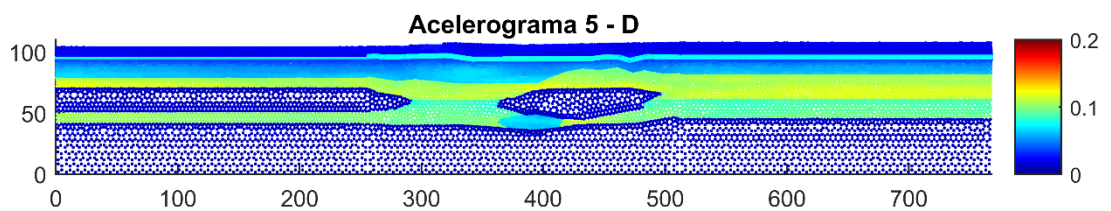
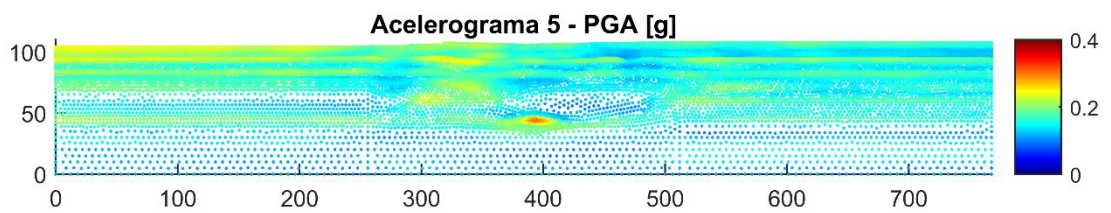
Acelerograma N°3

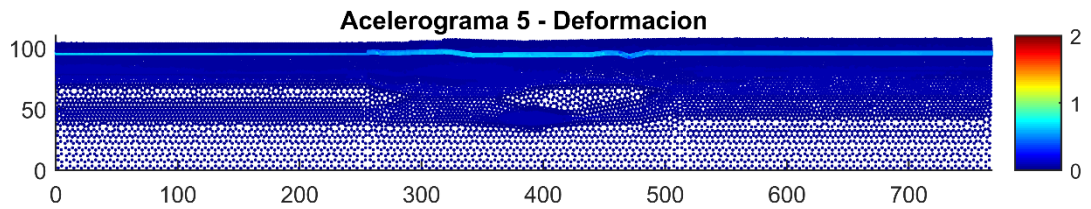
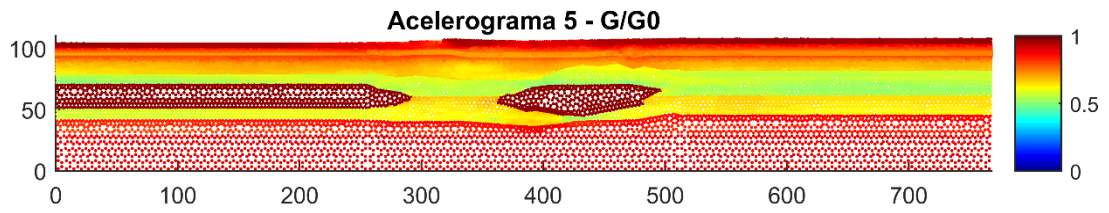


Acelerograma N°4

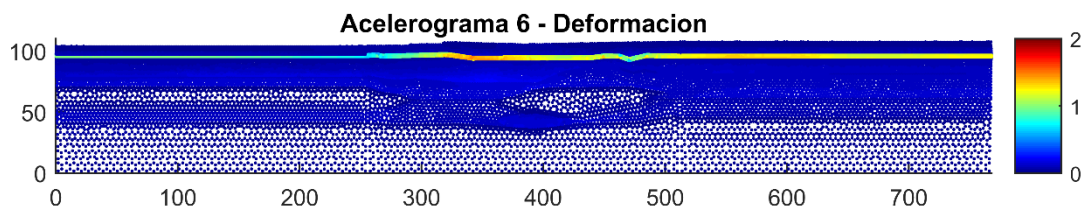
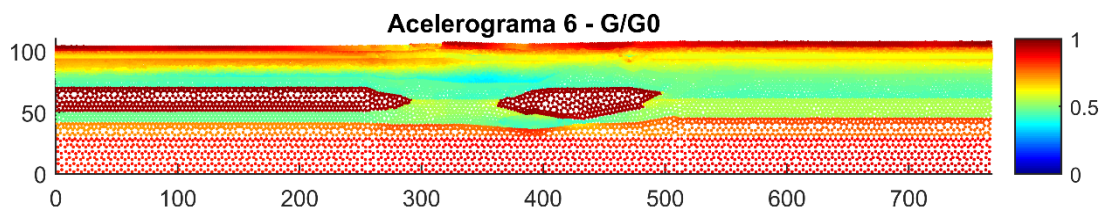
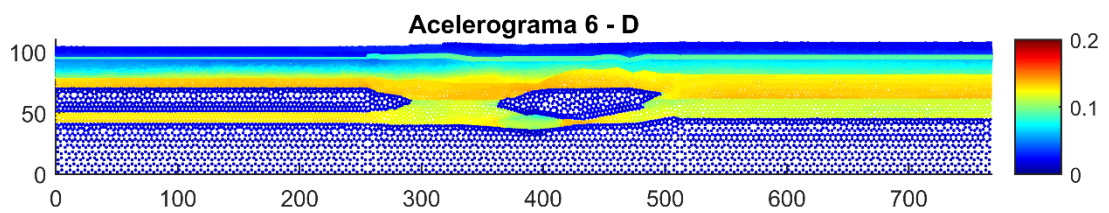
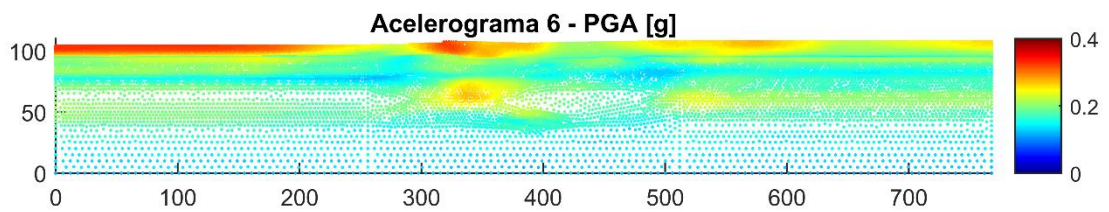


Acelerograma N°5

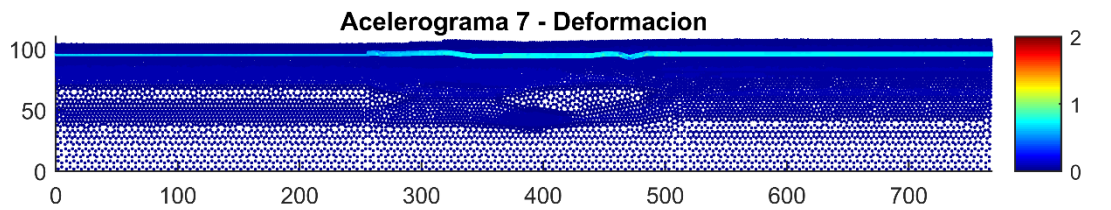
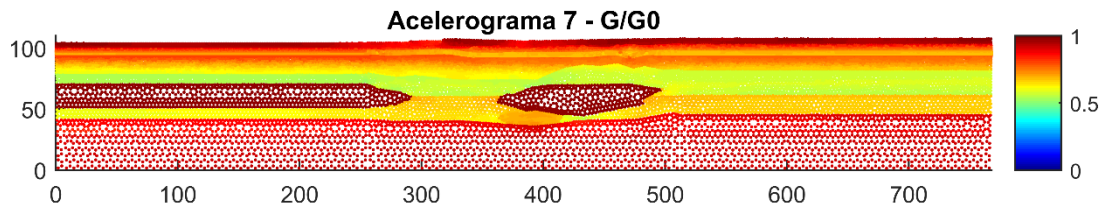
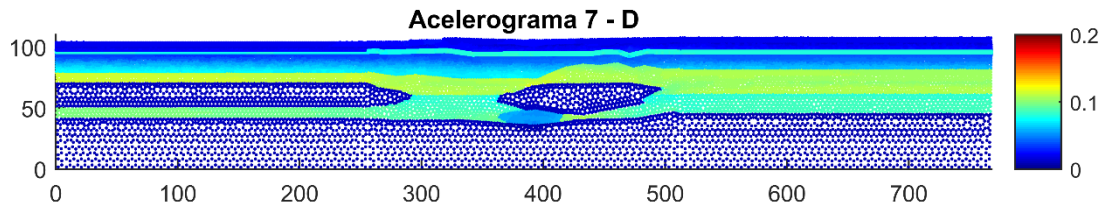
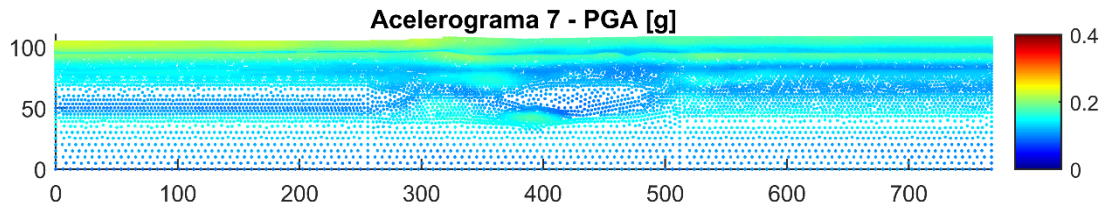




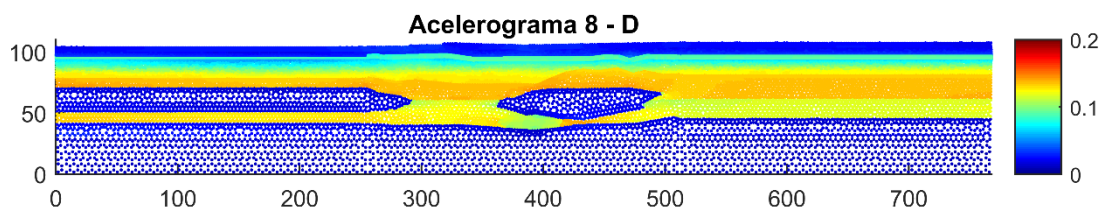
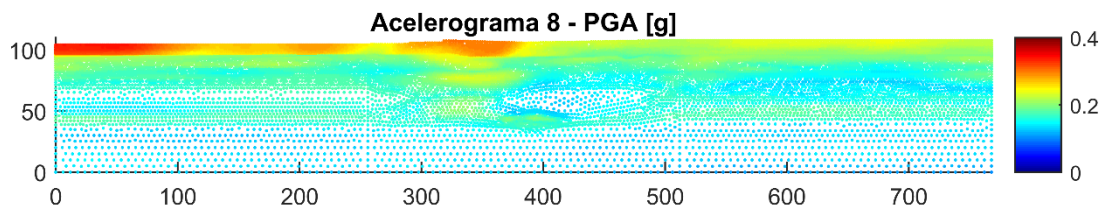
Acelerograma N°6

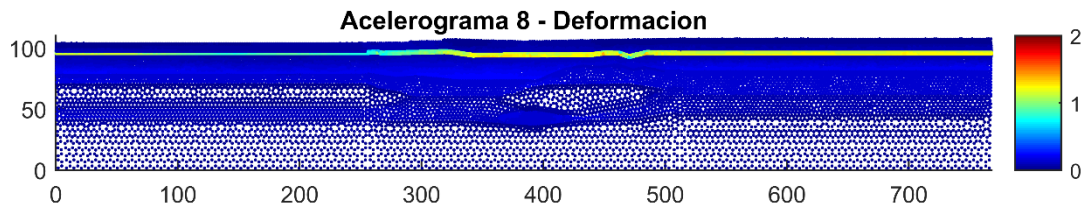
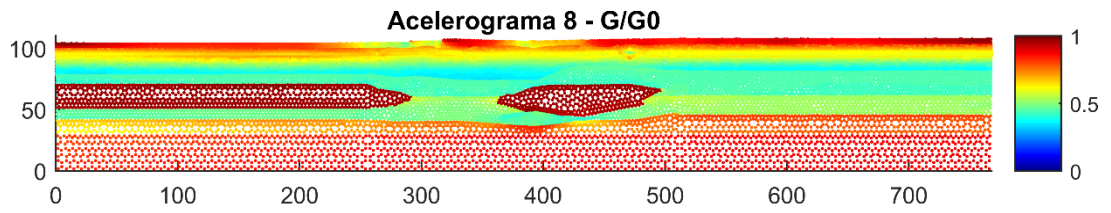


Acelerograma N°7

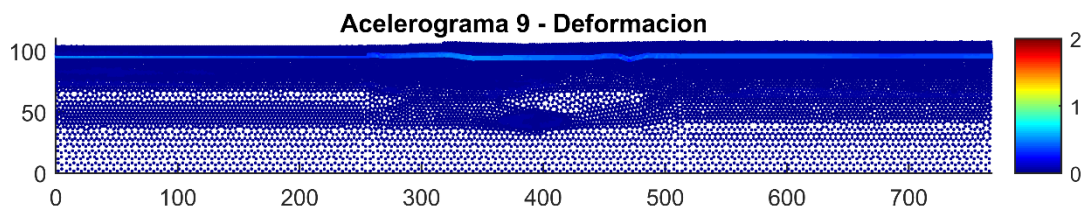
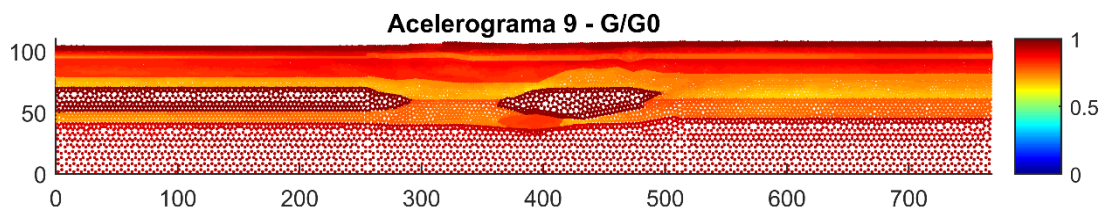
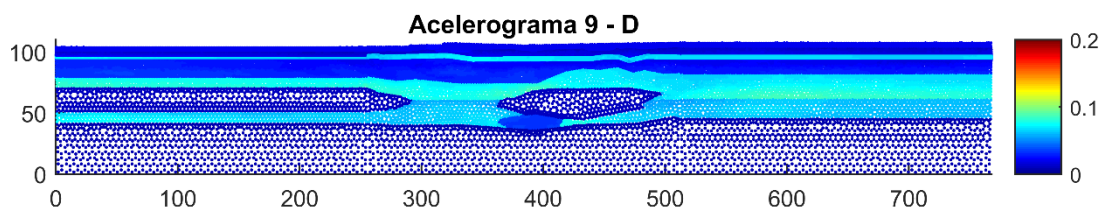
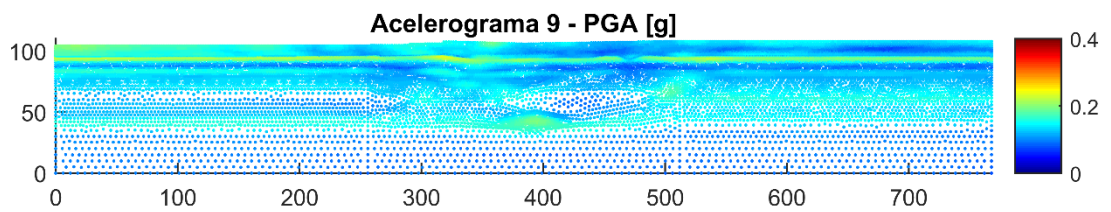


Acelerograma N°8

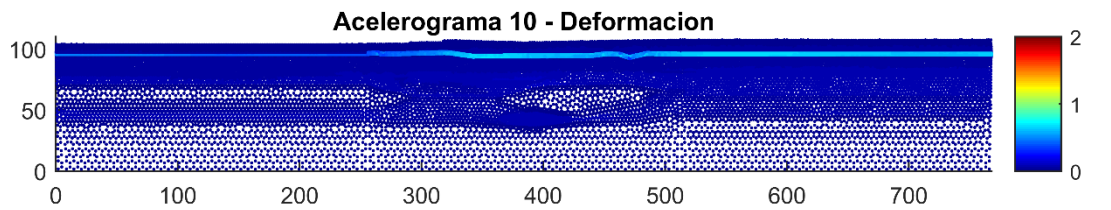
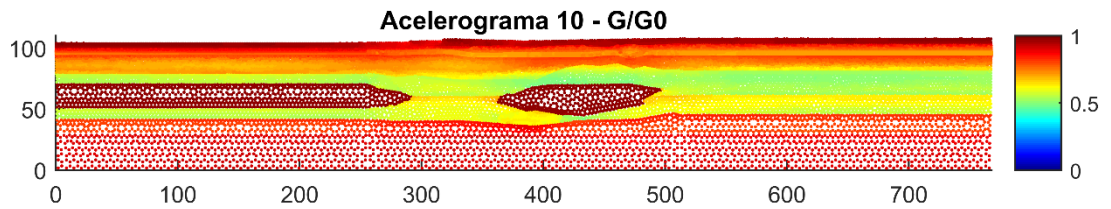
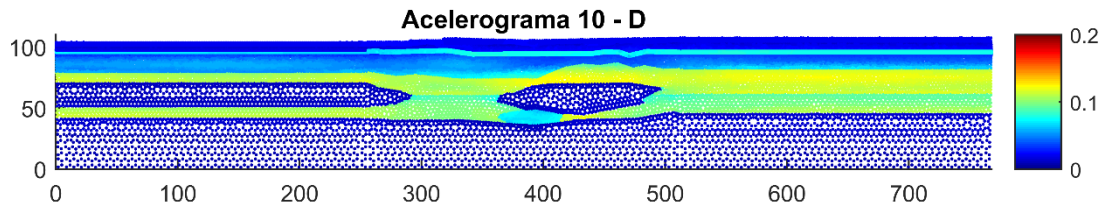
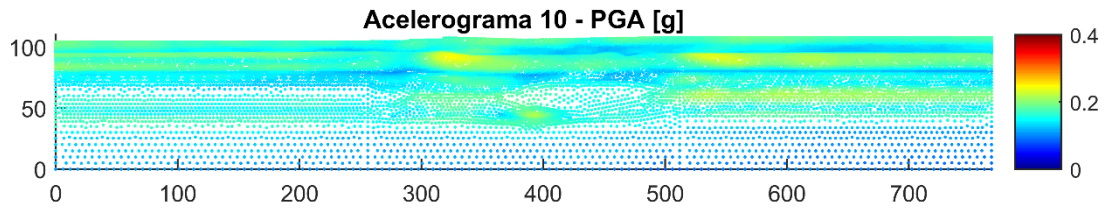




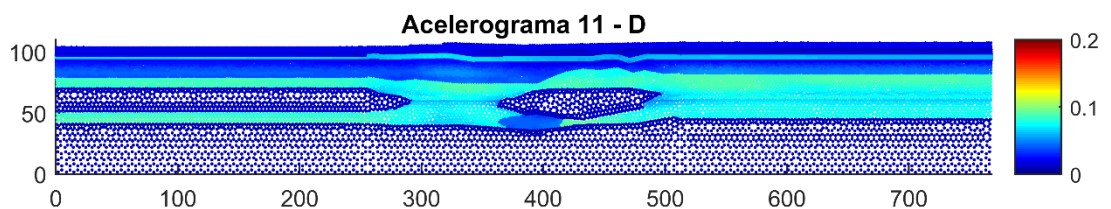
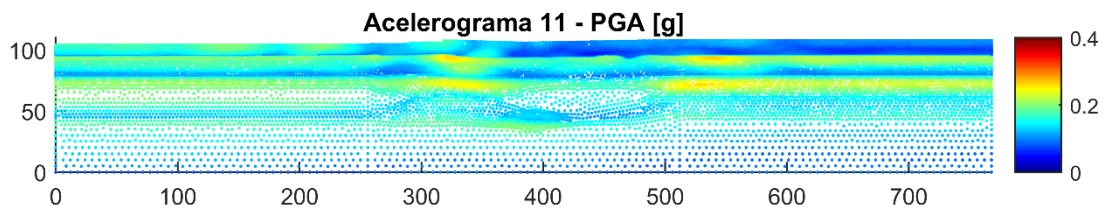
Acelerograma N°9

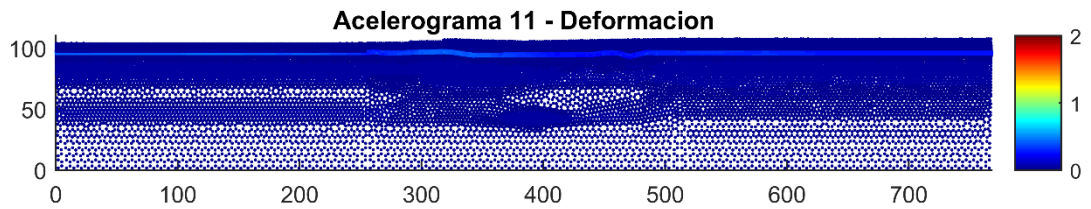
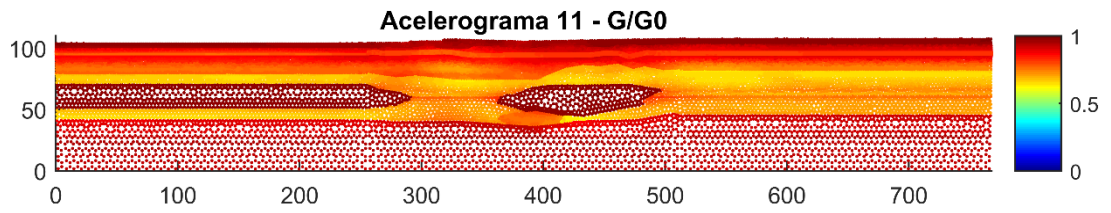


Acelerograma N°10

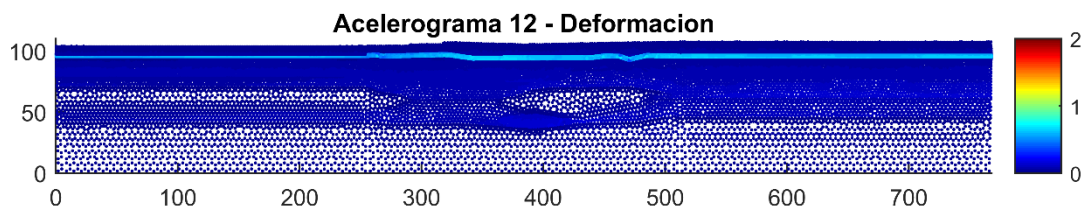
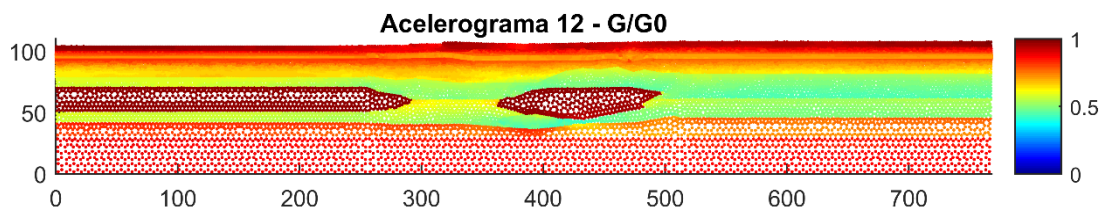
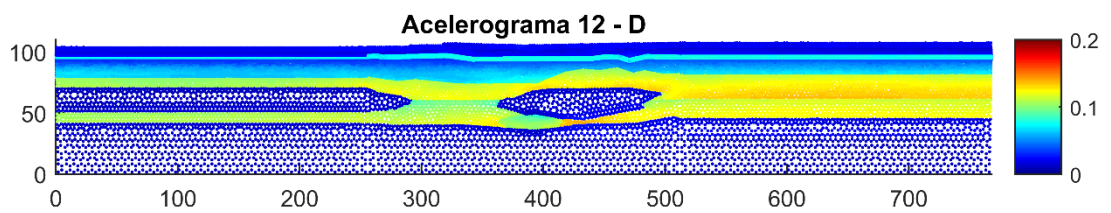
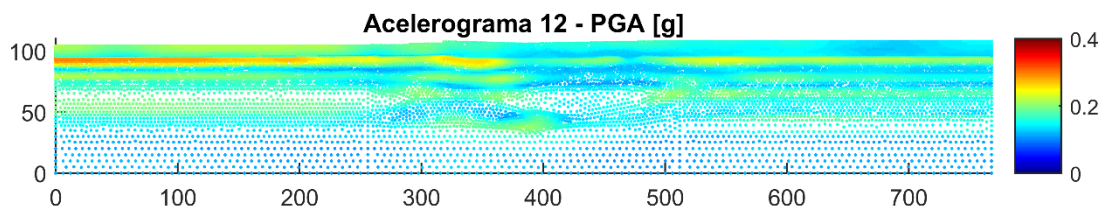


Acelerograma N°11

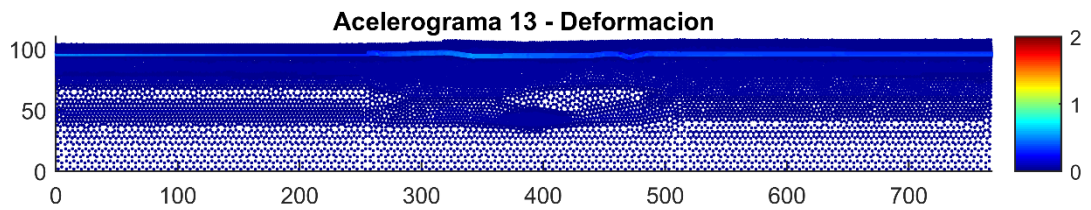
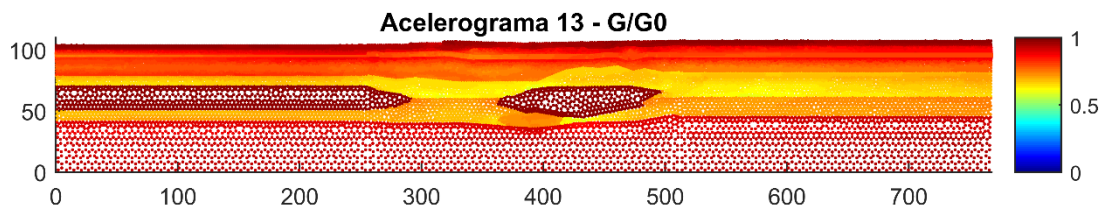
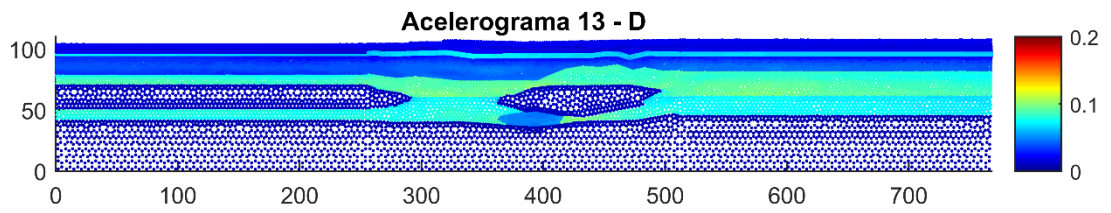
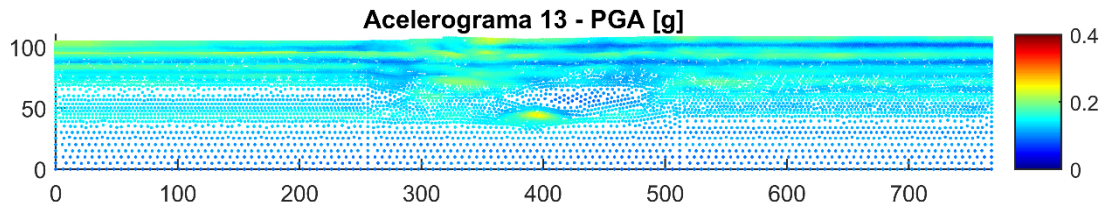




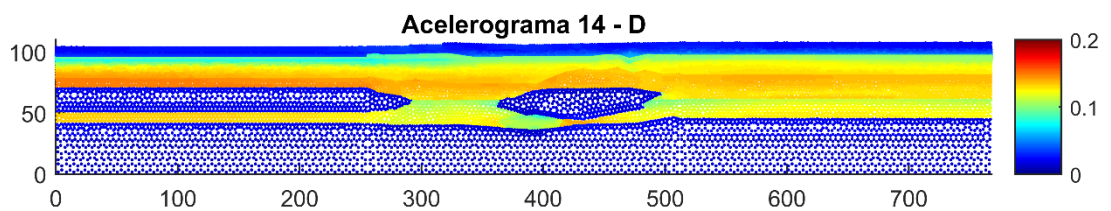
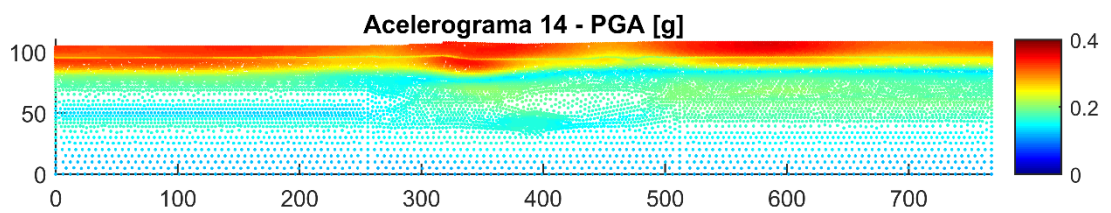
Acelerograma N°12

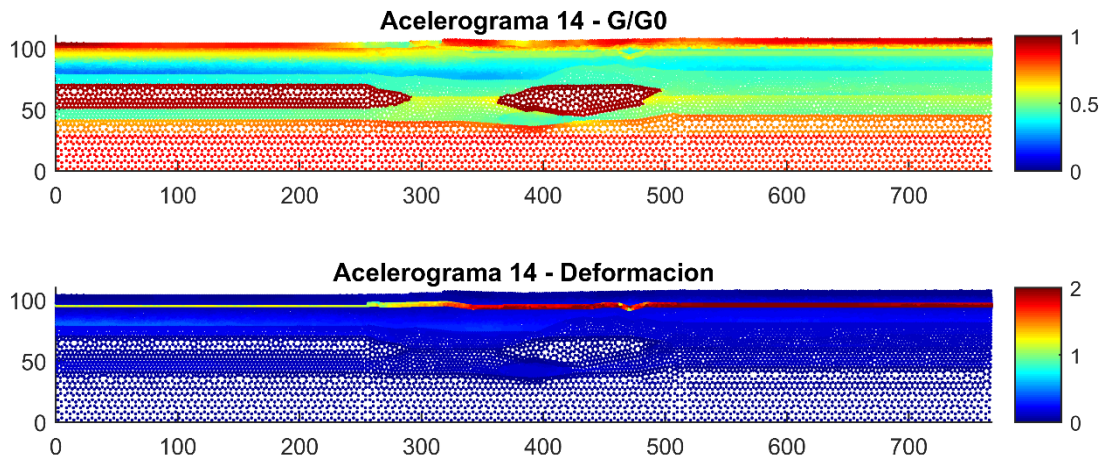


Acelerograma N°14



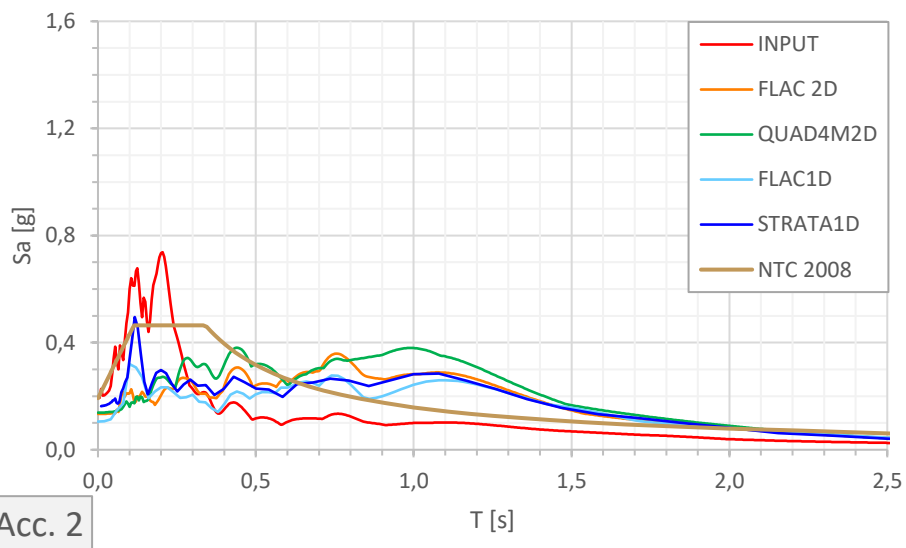
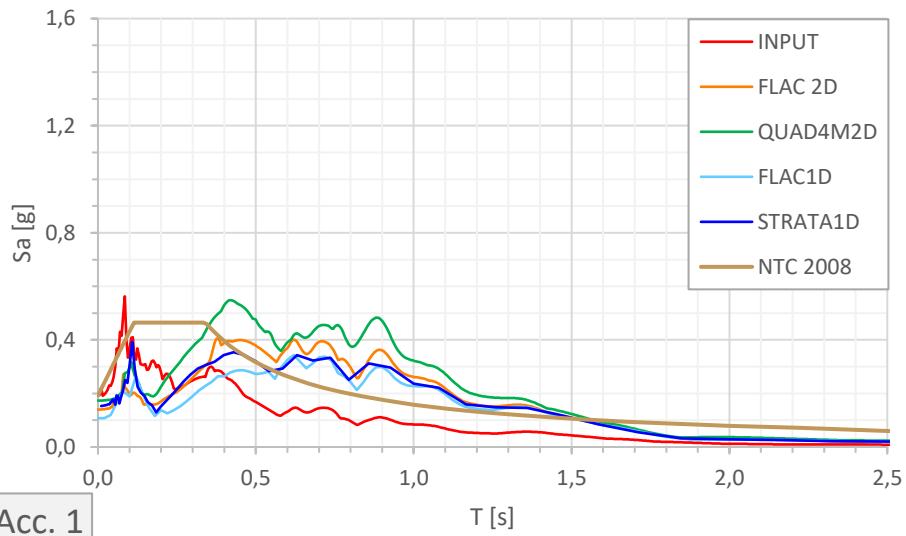
Acelerograma N°14

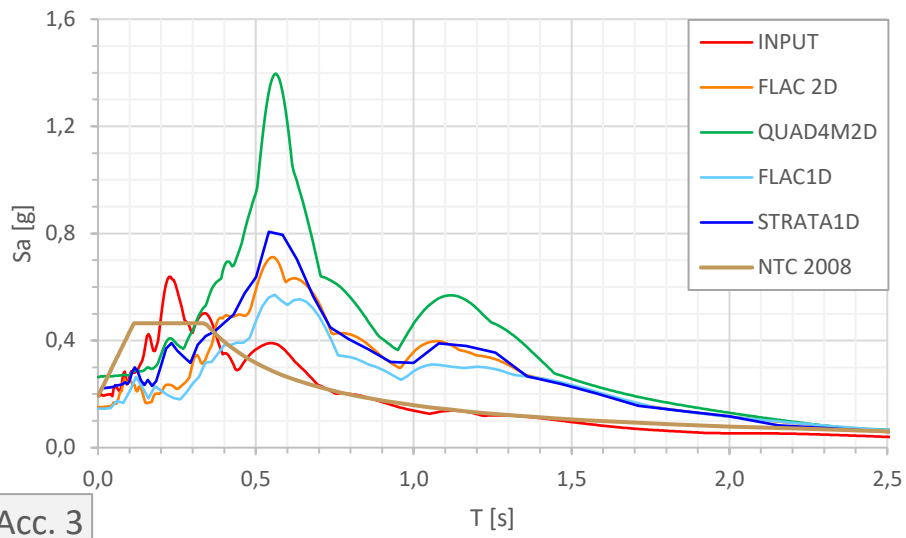




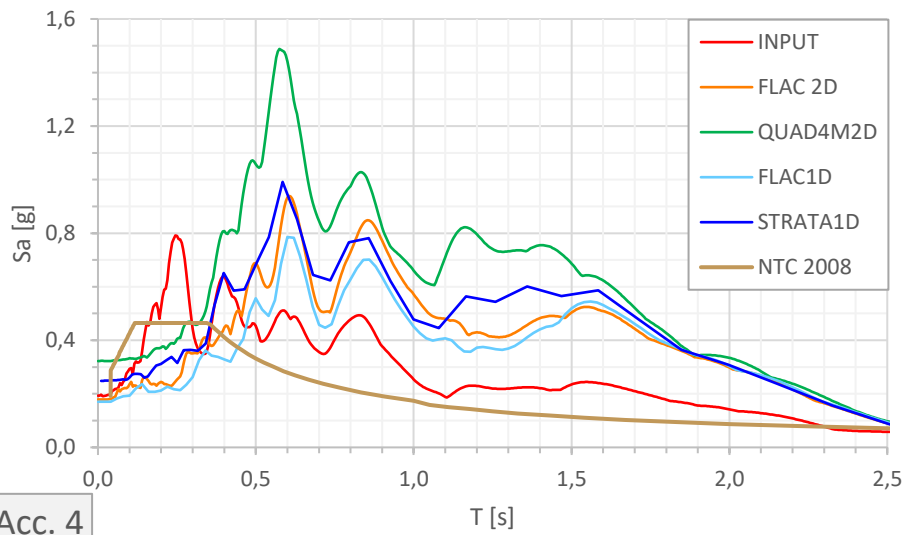
d. Anexo 4

Espectros de aceleración para cada registro.

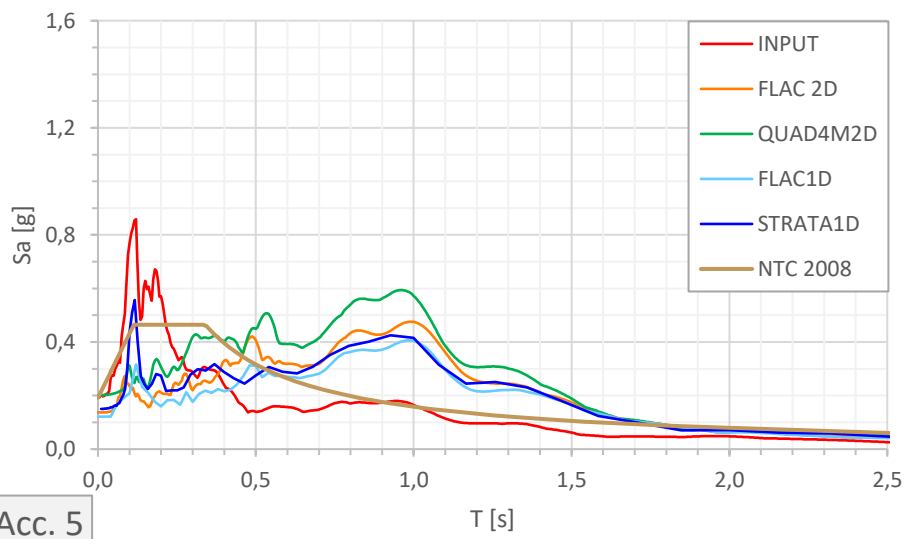




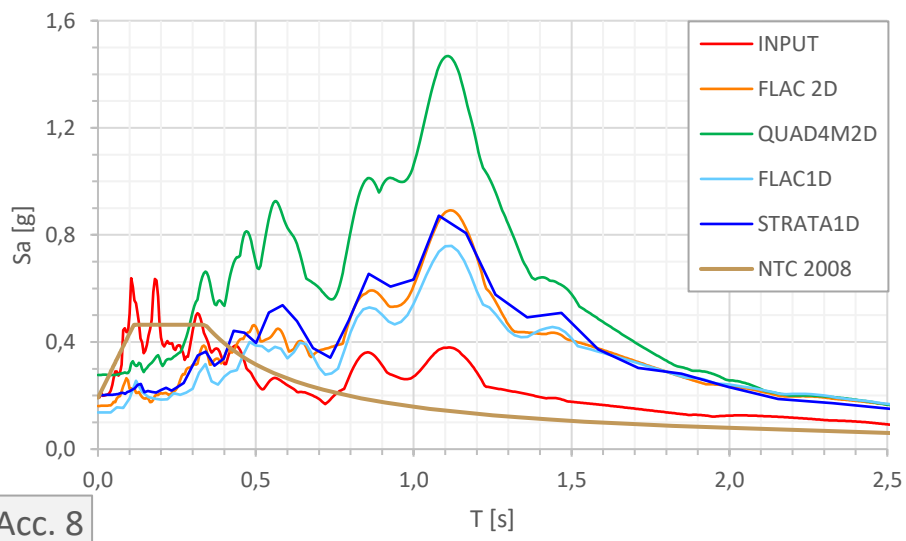
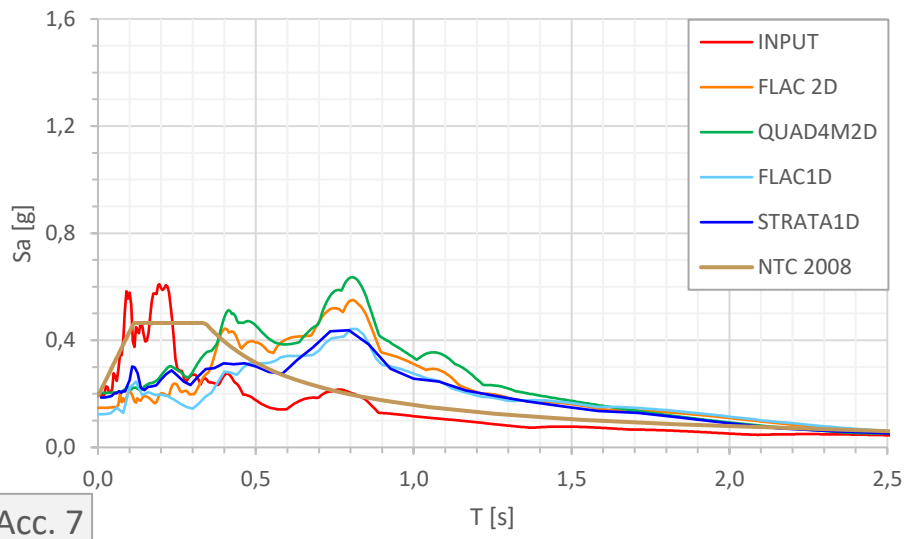
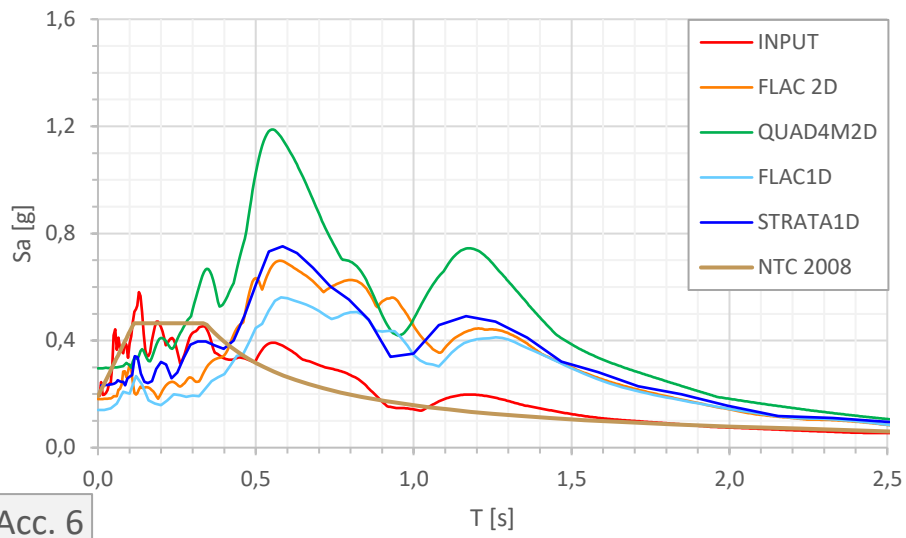
Acc. 3

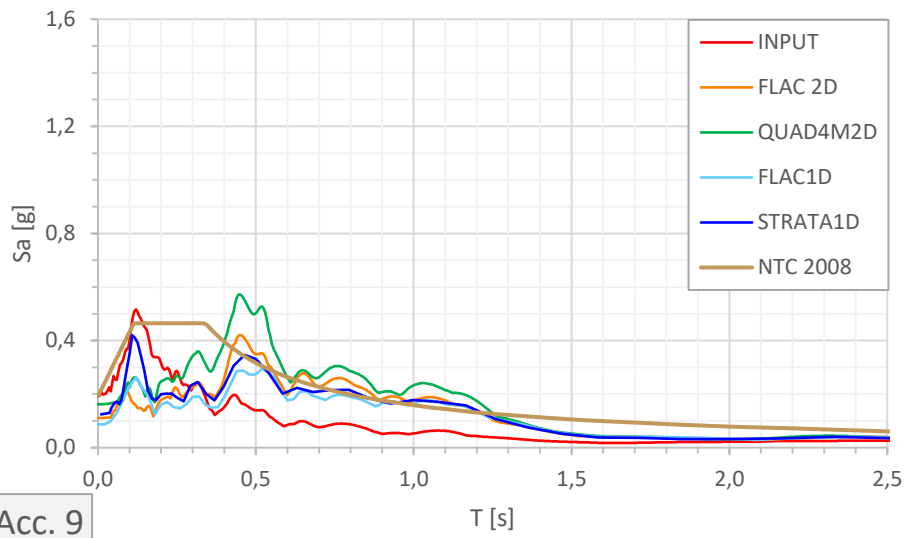


Acc. 4

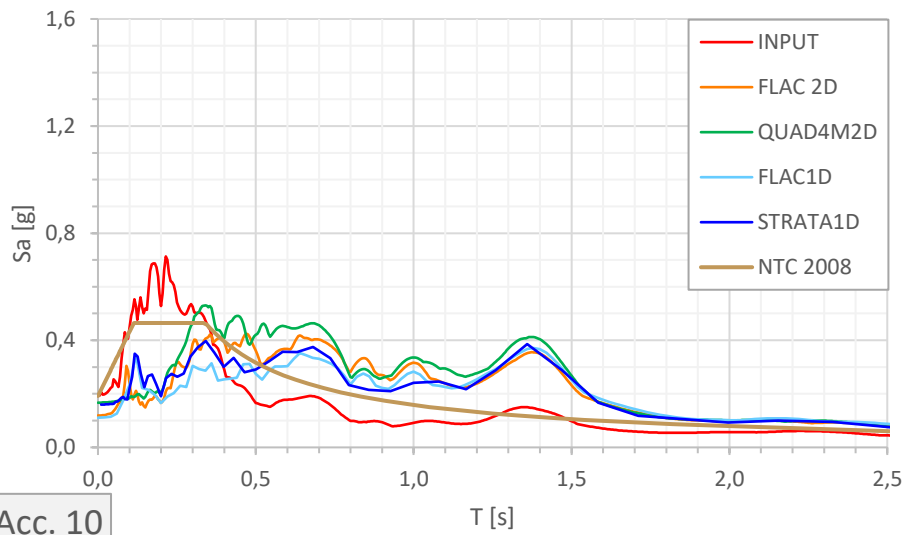


Acc. 5

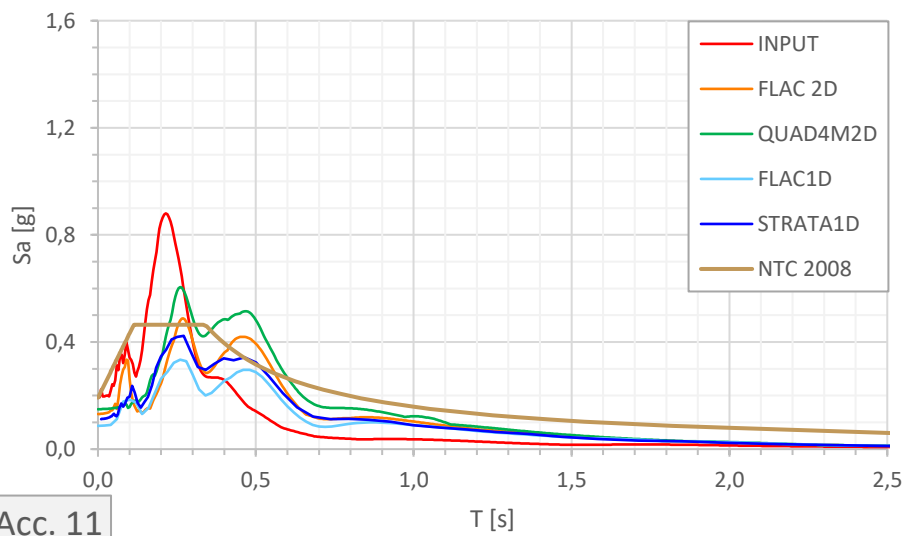




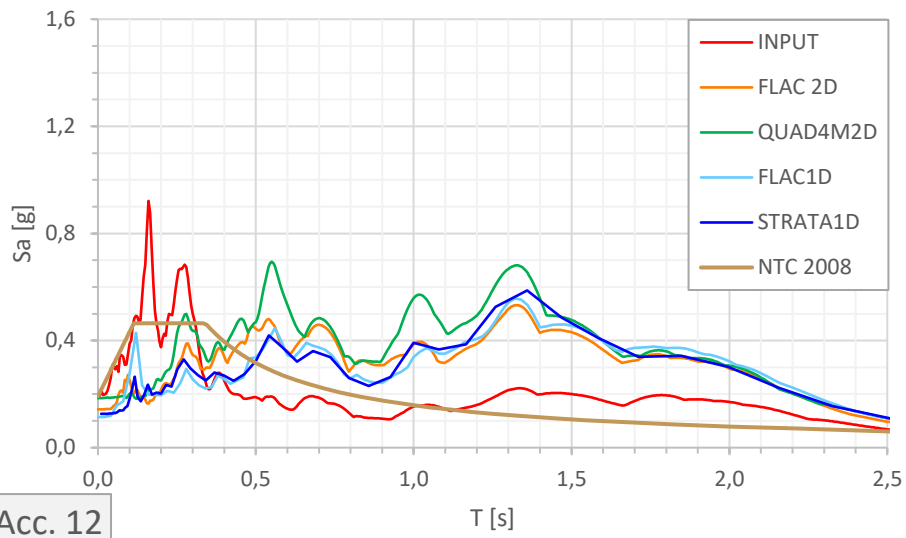
Acc. 9



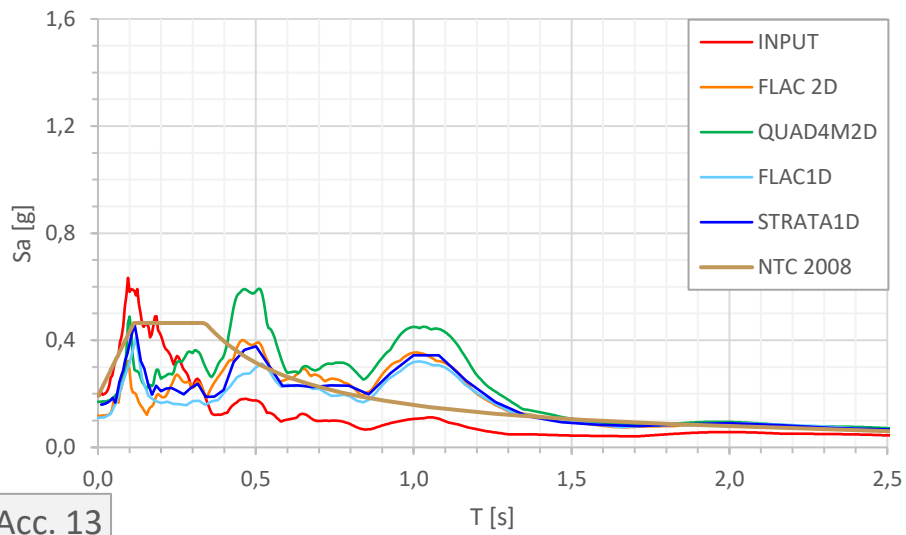
Acc. 10



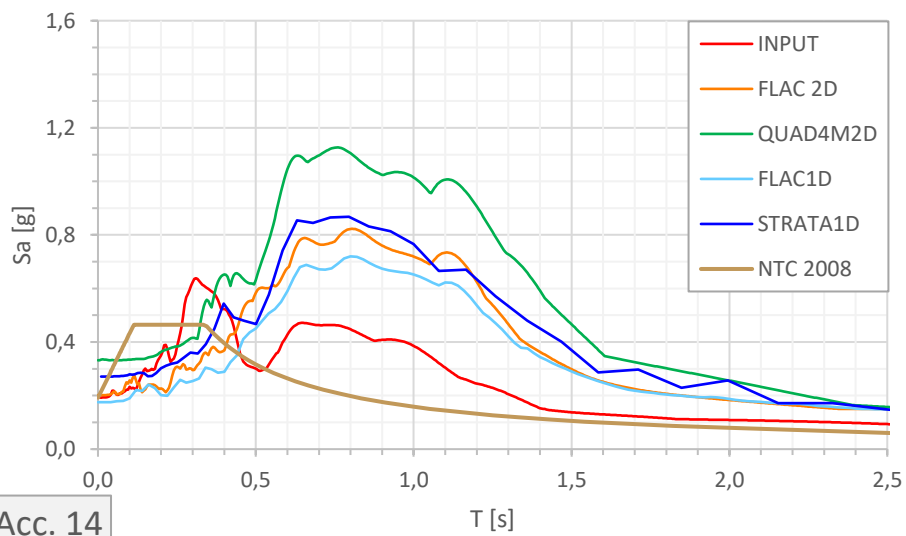
Acc. 11



Acc. 12



Acc. 13



Acc. 14