

5. ESTIMACIÓN DE EFECTOS LOCALES EN LA ZONA DE ESTUDIO

En el estudio de efectos locales se aplican métodos experimentales y numéricos; para el presente trabajo se han seleccionado el método experimental de Nakamura y el método numérico ProShake. Estos métodos, que se describen a continuación, se aplicarán a los núcleos urbanos de Andorra la Vella, Escaldes-Engordany, Santa Coloma y La Margineda.

5.1. Método experimental de Nakamura a partir de registros de microsismos.

El método de Nakamura (1989) se basa en la relación entre los espectros de Fourier de las componentes horizontal y vertical de registro de microsismos en superficie. Este método ha sido ampliamente difundido en los últimos años y utilizado por la fiabilidad de sus resultados, acompañada de rapidez y economía en su ejecución.

El método propuesto por Nakamura para estimar la respuesta empírica de las capas superficiales de suelo supone que el ruido de los microterremotos está compuesto por varios tipos de ondas. Este método pretende eliminar el efecto de las ondas Rayleigh. Se considera que las componentes horizontal y vertical del registro son similares en la base rocosa.

Dichos registros son amplificados por las capas de suelo blando que yacen sobre el substrato rocoso. Se considera además que las componentes horizontales se amplifican debido a multirreflexiones de la onda S, en tanto que los microterremotos verticales lo hacen por multirreflexiones de la onda P. La velocidad de propagación de la onda P es generalmente mayor que 100 m/s, y los movimientos con frecuencias de aproximadamente 10 Hz o menos pueden no amplificarse, debido a la multirreflexión en las capas superficiales de varias decenas de metros de espesor.

Por otra parte, el efecto de la onda Rayleigh aparece resaltado en el movimiento vertical, su efecto puede conocerse usando la componente vertical, haciendo la relación entre la superficie y el substrato. Normalmente el efecto de la onda Rayleigh es cercano a uno, cuando la relación anterior es aproximadamente uno.

En la medida en que la relación aumenta, el efecto de las ondas Rayleigh puede volverse crítico. La propuesta de Nakamura pretende eliminar este efecto.

Generalmente la función de transferencia S_t de estratos superficiales se define de la siguiente forma:

$$S_t = \frac{S_{hs}}{S_{hb}} \quad (5.1)$$

Donde S_{hs} y S_{hb} son los espectros de amplitud de Fourier de las componentes horizontales del movimiento en la superficie y del movimiento incidente en el basamento rocoso, respectivamente.

Sin embargo, el espectro de la componente horizontal en la superficie S_{hs} , está afectado fácilmente por las ondas superficiales, ya que en la mayoría de los casos el ruido artificial se propaga principalmente como ondas Rayleigh; probablemente S_{hs} se encuentra afectado por estas. El efecto de las ondas Rayleigh debe ser incluido en el espectro de la componente vertical del movimiento en la superficie S_{vs} , pero no en el espectro de la componente vertical del movimiento en el basamento rocoso S_{vb} .

Asumiendo que el movimiento vertical no se amplifica por las capas superficiales, E_s representa el efecto de las ondas Rayleigh en el movimiento vertical:

$$E_s = \frac{S_{vs}}{S_{vb}} \quad (5.2)$$

Si no existiera onda Rayleigh entonces, $E_s = 1$. Si se aumenta el efecto de la onda Rayleigh, E_s se hace mayor que la unidad.

Asumiendo que el efecto de la onda Rayleigh es igual para las componentes vertical y horizontal, se considera que la relación $S_{tt} = S_t / E_s$ es una función de transferencia más fiable, después de eliminar el efecto de las ondas Rayleigh, y llamando:

$$S_{tt} = \frac{R_s}{R_b} \quad (5.3)$$

donde:

$$R_s = \frac{S_{hs}}{S_{vs}} \quad \text{y} \quad (5.4)$$

$$R_b = \frac{S_{hb}}{S_{vb}} \quad (5.5)$$

R_s y R_b fueron obtenidas dividiendo el espectro horizontal entre el espectro vertical, para los microterremotos en superficie y en el basamento. Como se muestra en la figura 5.1, R_b está cerca de la unidad, para registros en el afloramiento rocoso.

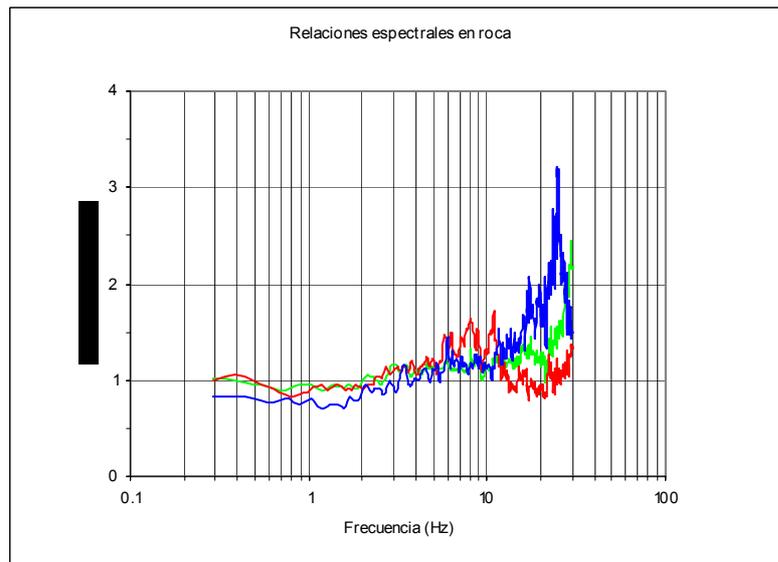


Figura 5.1. Ejemplo de relaciones espectrales horizontal y vertical en emplazamientos en roca (Coral, H. et al., 2002)

Esto implica que para el basamento la propagación es la misma en todas las direcciones.

$$R_b \cong 1 \quad (5.6)$$

y por tanto,

$$S_{tt} \cong R_s \quad (5.7)$$

Esto significa que la función de transferencia de las capas superficiales puede ser estimada a partir, únicamente, del movimiento en superficie. De tal manera, el movimiento vertical en la superficie retiene las características del movimiento horizontal en el substrato, sustituyendo el último; pero R_s se vuelve cercano a uno en el rango de las frecuencias donde la onda Rayleigh prevalece, y esto no es notorio en la función de transferencia estimada. Hasta este punto se asume que R_s incluye dicho efecto con lo cual se elimina el efecto de la onda Rayleigh.

Sin embargo, es de aclarar que la exactitud de la estimación decae cuando existe un ruido coincidente con la frecuencia predominante de la función de transferencia estimada.

R_b puede estar libre del efecto de las ondas Rayleigh y tener exclusivamente las características de un punto dado. Consecuentemente, S_{tt} más fiable puede estimarse multiplicando por $1/R_b$ como un término de la compensación cuando se suministra la información del basamento.

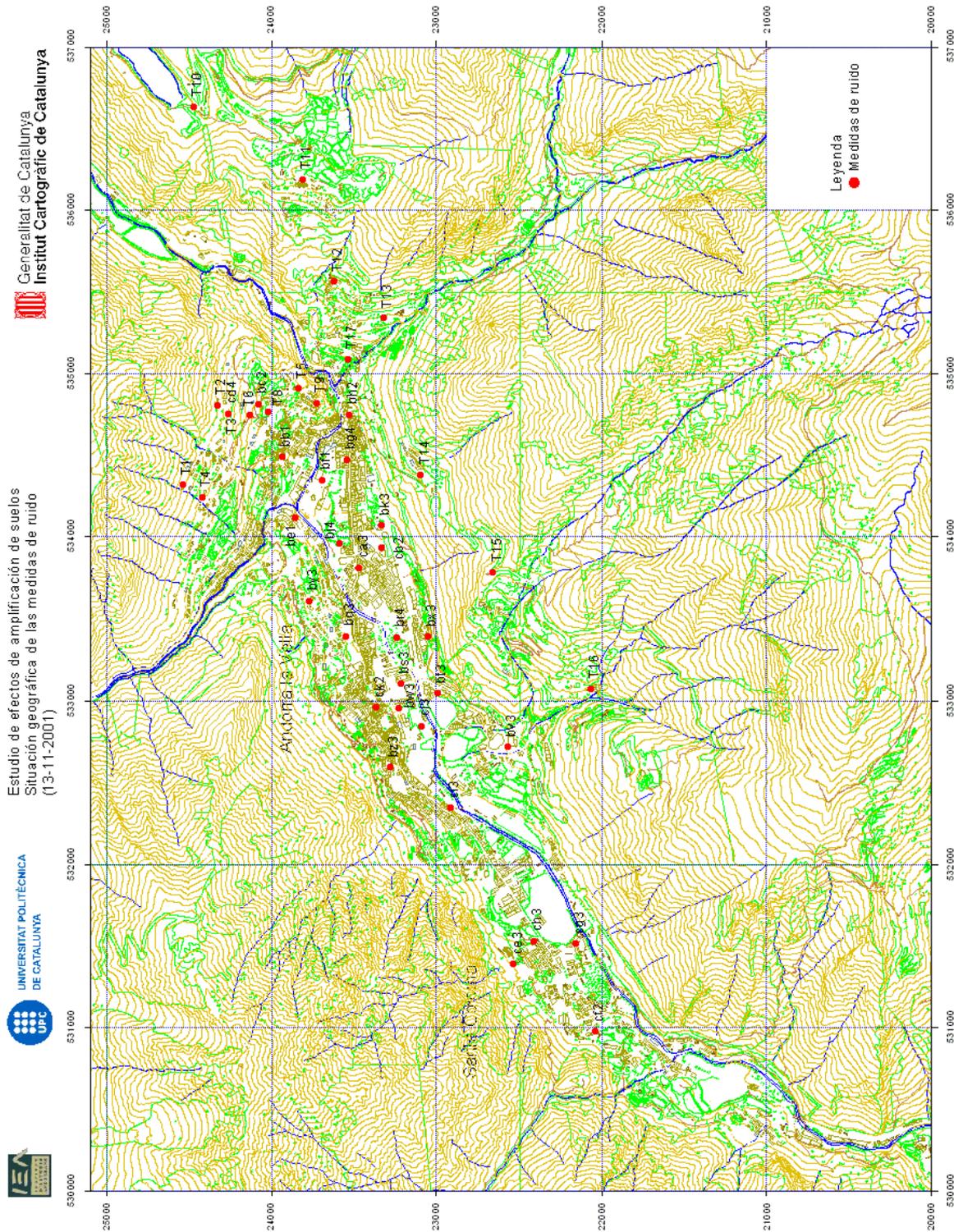
Según Nakamura (1989), el método del cociente espectral permitiría obtener la función de transferencia completa del suelo (período y amplificación). Sin embargo, algunas investigaciones teóricas y trabajos experimentales (Lachet y Bard, 1994) han demostrado que no es así, sino que el método únicamente permite la determinación del período predominante.

En lo expuesto anteriormente se ha descrito el método de Nakamura (1989) de acuerdo a su interpretación inicial; sin embargo, teniendo en cuenta las experiencias de su aplicación en otras ciudades (Teves-Costa, 1995; Teves-Costa, 1996; Fäh, 1995; Sánchez et al., 1996; Alvarez, 1994; Acosta, 1994; Alfaro, 1997; Cid, 1998; y Alfaro et al., 2002), en estos únicamente se ha considerado la utilidad del método para la determinación de la frecuencia predominante del suelo.

5.1.1. Recopilación de datos

Para estudiar los posibles efectos de amplificación se ha recopilado previamente la información disponible: geología superficial (BRGM, 1990), modelo de elevaciones del terreno (ICC, 2001) y estudios geotécnicos disponibles (CRECIT, 2001), como se ha indicado en el capítulo anterior y posteriormente, se ha realizado una campaña de medidas de ruido para la obtención de los períodos predominantes del suelo.

Se han seleccionado distintos emplazamientos en el valle para analizar la amplificación del material sedimentario y algunos emplazamientos según perfiles que atraviesan distinta topografía para la observación de las posibles amplificaciones debidas a ésta. En la figura 5.2 se muestra la zona de estudio con la situación geográfica de los emplazamientos seleccionados para la experimentación.



En la tabla 5.1 se presentan las coordenadas, pendientes y las características geológicas de cada uno de los emplazamientos escogidos para la experimentación.

Nombre	X	Y	Z	Pendiente	Geología
bb1	534492	23935	1037.41	19.11	Fy-z
bc2	534815	24074	1102.14	20.87	Fy-z
be1	534121	23856	1016.35	9.37	DC
bf1	534353	23691	1027.88	2.16	Fy-z
bg4	534476	23541	1038.99	4.10	Fy-z
bh2	534751	23528	1099.35	12.58	E
bj4	533966	23587	1015.33	1.46	Fy-z
bk3	534074	23327	1054.06	11.43	Fy-z
bq3	533395	23544	1013.34	17.39	G
br4	533388	23241	1011.99	3.33	Fy-z
bs3	533111	23213	996.84	4.32	Fy-z
bt3	533050	22988	1010.31	12.14	Fy-z
bv3	532725	22571	1073.93	12.47	E
bw3	532962	23224	993.69	6.40	DC
bx3	533393	23050	1094.58	21.41	Fy-z
by3	533613	23766	1044.52	17.89	DC
bz3	532601	23279	1006.16	26.12	E
ca3	533816	23464	1009.66	1.27	Fy-z
cb2	533939	23330	1018.58	5.62	Fy-z
cd4	534759	24262	1163.67	35.13	DM
ce3	531395	22534	1000.10	18.85	E
ci3	532350	22913	994.95	9.90	E
ch3	531535	22414	978.63	5.16	E
cg3	531520	22158	979.28	1.95	Fy-z
cj3	532852	23090	996.45	1.19	Fy-z
ck2	532966	23360	999.11	9.90	G
cf2	530983	22037	991.90	7.77	E
T1	534322	24536	1235.72	31.29	DC
T2	534812	24327	1213.90	37.77	DM
T3	534759	24262	1163.67	35.13	DM
T4	534248	24418	1177.89	26.66	DC
T5	534912	23836	1147.94	15.18	Fy-z
T6	534753	24129	1112.33	27.66	Fy-z
T8	534768	24017	1085.90	15.72	Fy-z
T9	534825	23725	1059.71	23.04	Fy-z
T10	536638	24468	1612.43	11.20	G
T11	536194	23809	1484.01	14.74	E
T12	535567	23617	1287.57	23.74	E
T13	535345	23319	1182.76	23.85	E
T14	534384	23091	1217.95	19.84	E
T15	533787	22659	1327.91	19.83	E
T16	533080	22065	1216.65	19.26	E
T17	535091	23531	1127.06	16.67	E

Tabla 5.1. Características de los puntos medidos: situación geográfica, pendiente (ICC, 2001) y epígrafe geológico (BRGM, 1990). **Nombre**, código de la estación de medición; **X**, **Y** y **Z**, datos altimétricos; **pendiente**, grados respecto a la horizontal; **geología**: Fy-z, aluviones; E, derrubios de ladera; G, granodiorita con biotita; dC, esquistos localmente micáceos; dM, calizas nodulosas y calco-esquistos.

5.1.2. Mediciones de los microterremotos

La toma de registros se realizó entre el 25 de junio y el 3 de julio de 2001 en las poblaciones de Andorra la Vella, Escaldes-Engordany, Santa Coloma y La Margineda, tanto en el valle como en las laderas. Se realizaron 16 mediciones de microsismos en la zona de ladera y el resto en la cubeta, hasta completar un total de 44 medidas.

La selección de los puntos de medición se ha realizado teniendo en cuenta la topografía, geología, geotecnia y la facilidad de los accesos a los diferentes emplazamientos. Las mediciones, por razones técnicas, se ejecutaron en la zona de la ladera entre las 9 de la mañana y las 7 de la tarde y en zonas del valle entre las 9 de la noche y las 2 de la mañana. Con esto se buscan las menores interferencias del tráfico peatonal y vehicular, facilitando así la toma de las medidas adecuadamente.

Los registros se obtuvieron con un acelerógrafo (K2 de Kinematics) en el valle y con un sismógrafo (PDAS de Teledyne Geotech) en la ladera. El acelerógrafo (figura 5.3), con sensor triaxial, tiene las siguientes especificaciones: respuesta plana hasta 50 Hz, rango dinámico 114 db, fondo de escala 1g y nivel de resolución ($37.4 \mu \text{m/s}^2$) por bit.



Figura 5.3. Acelerógrafo K2 de Kinematics

El sismógrafo PDAS de propiedad de la Universidad de Barcelona (figura 5.4) con sensor triaxial Lennartz tiene las siguientes especificaciones: período propio 5s, respuesta plana hasta 100 Hz, rango dinámico 132 db, nivel de resolución 16 bits y factor de sensibilidad $1.16 \cdot 10^{-12} \text{ m/s} / \text{bit}$.



Figura 5.4. Sismógrafo PDAS de Teledyne Geotech

En el anexo 1 se explica el proceso de la instalación y manejo del acelerógrafo K2 y sismógrafo PDAS.

La duración de los registros fue de tres minutos, obteniéndose en cada sitio el registro de las tres componentes a 100 muestras por segundo. Se analizaron los registros con niveles de ruido superiores al nivel de resolución de cada equipo, lo cual garantiza la validez de los resultados. Un ejemplo se muestra en la figura 5.5.

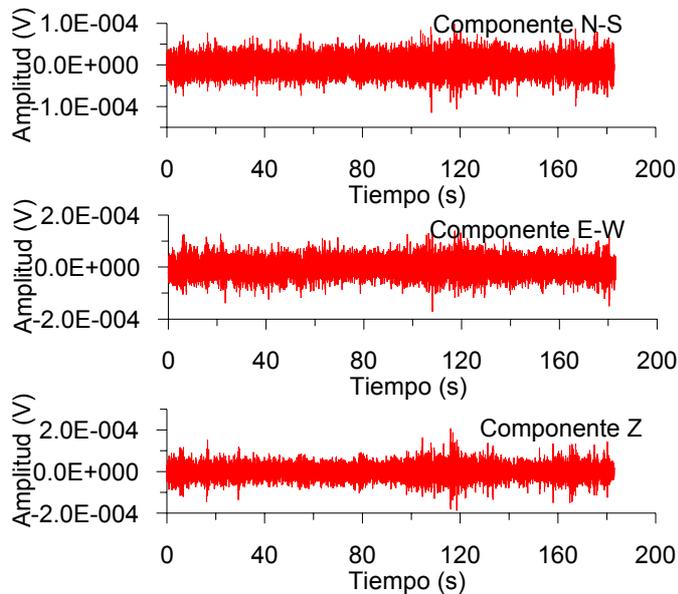


Figura 5.5. Registro de ruido ambiental en el emplazamiento ci3 (fondo del valle).

5.1.3. Análisis de registros de microterremotos

Como en cualquier tratamiento de señales éstas deben ser corregidas por línea base y luego se calculan los espectros de Fourier de cada componente, los cuales son suavizados y finalmente se calculan las relaciones espectrales punto a punto.

Para realizar sistemáticamente dichas operaciones, López (1996) elaboró un programa en Fortran, revisado y modificado por Chavarría (1997), que necesita como entrada los registros de las tres componentes de los microterremotos, el intervalo de tiempo de la señal a analizar y la longitud de la ventana a utilizar. Teniendo como base la experiencia de las investigaciones de López (1996) y Gutiérrez (1996) se utiliza ventanas de longitud variable solapadas un 25% una con la siguiente. La corrección de línea base se realiza ajustando una recta mediante mínimos cuadrados y posteriormente efectuando la resta punto a punto entre la señal y la recta de regresión obtenida, ya que las señales registradas presentan inclinación de la pendiente; sin embargo, para unos pocos casos se observaron derivas del tipo parabólico.

A partir de los espectros suavizados se calculan las relaciones espectrales:

$$\frac{S_{NS}}{S_V} \quad (5.8)$$

$$\frac{S_{EW}}{S_V} \quad (5.9)$$

y

$$\frac{S_{NS} + S_{EW}}{2S_V} \quad (5.10)$$

S_{NS} : módulo del espectro de Fourier suavizado de la componente N-S

S_{EW} : módulo del espectro de Fourier suavizado de la componente E-W

S_V : módulo del espectro de Fourier suavizado de la componente V

- **Suavizado de los espectros de Fourier**

El suavizado de los espectros de Fourier de los registros de microterremotos, se realiza mediante diferentes técnicas, algunas comúnmente utilizadas como la de ponderación de amplitudes y las medias móviles. La que se ha utilizado en este estudio, es la de ponderación, que a continuación se explica:

El suavizado se aplica a los módulos de FFT (Fast Fourier Transform). Consiste en calcular una media ponderada, dando un peso mayor a la amplitud dada y disminuyendo a los lados. La expresión utilizada es:

$$y(i) = \frac{1}{64} [x(i-3) + x(i-2) \cdot 6 + x(i-1) \cdot 15 + x(i) \cdot 20 + x(i+1) \cdot 15 + x(i+2) \cdot 6 + x(i+3)] \quad (5.11)$$

donde,

$x(i)$, es el valor calculado del módulo de la FFT en el punto i

$y(i)$, es el valor suavizado del módulo de la FFT en el punto i

El programa de computación desarrollado por López (1996) y modificado por Chavarría (1997) consta de los siguientes módulos:

- **Módulo de lectura de datos**

Lectura de las tres componentes del registro de los microterremotos a analizar, componentes NS, EW y V.

Lectura de la longitud de la ventana temporal y del tramo del registro a considerar en el análisis definido por el tiempo inicial y el tiempo final considerado.

- **Módulo de corrección de línea base**

Se efectúa la corrección por línea base ajustando a una recta y corrigiendo la señal punto a punto por una recta de tendencia, obteniéndose una señal libre del efecto de offset y deriva instrumental.

- **Módulo de cálculo de los espectros de Fourier**

Para la ventana ya definida se calcula la transformada de Fourier de la señal, para cada componente, con un algoritmo de cálculo de FFT.

- **Modulo de suavizado de los espectros de Fourier**

El suavizado del módulo de los espectros de Fourier de las tres componente, se realiza considerando un promedio ponderado o media móvil.

- **Módulo de cálculo de las relaciones espectrales**

A partir de los espectros de Fourier suavizados, se calculan las relaciones espectrales ya anotadas.

De acuerdo al número de ventanas temporales consideradas en el análisis, se obtienen las relaciones espectrales promedio, las desviaciones estándar y los intervalos de confianza.

- **Módulo de salida**

Se generan archivos para graficar la señal corregida, los espectros de Fourier sin suavizar y suavizados y relaciones espectrales calculadas.

5.1.4. Determinación de las frecuencias predominantes

A partir del análisis de las relaciones espectrales de la aplicación del método de Nakamura a los registros de ruido ambiental, y teniendo en cuenta las frecuencias predominantes, se han caracterizado dos zonas en el valle. En la figura 5.6. se muestra un ejemplo de las relaciones espectrales obtenidas en cada zona. Una zona en roca donde no hay frecuencia predominante y otra de fondo de valle, conformada por aluviones de poco espesor, en la que se obtienen frecuencias predominantes entre 6 y 9 Hz. Las diferentes relaciones espectrales obtenidas en la zona de estudio se detallan en la figura 5.7.

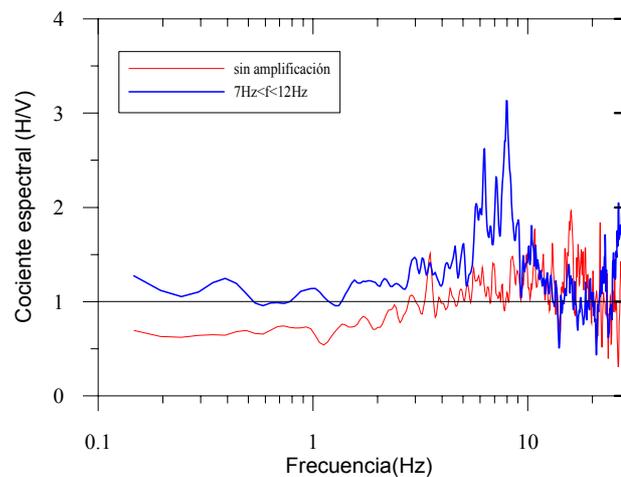


Figura 5.6. Relaciones espectrales promedio obtenidas en el fondo del valle.

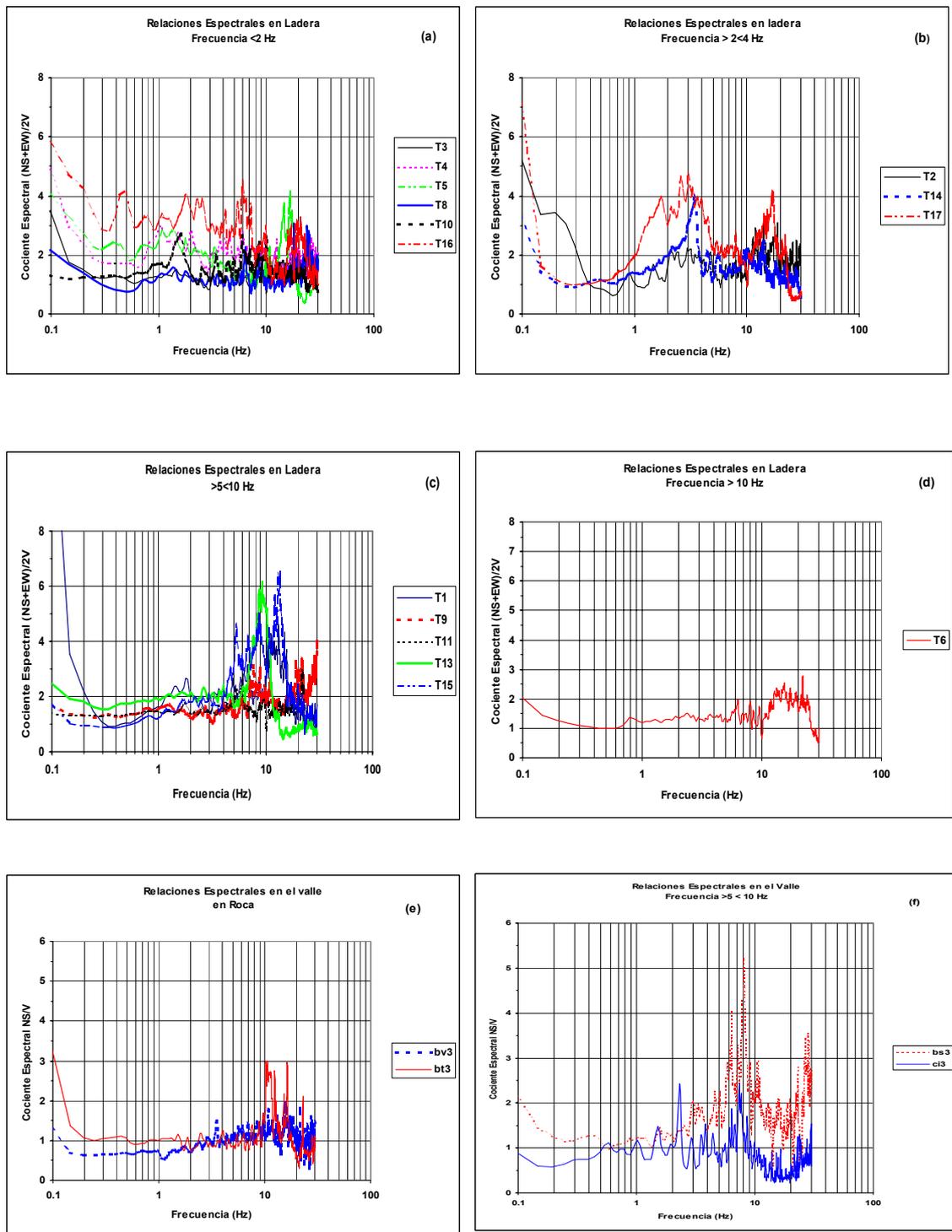


Figura 5.7. Relaciones espectrales de los diferentes sitios de la zona en estudio tanto en laderas ((a), (b), (c) y (d)) como en el valle (e) y (f).

Estimación de efectos locales en la zona de estudio

En las tablas 5.2 y 5.3 se presentan las frecuencias predominantes obtenidas en los distintos emplazamientos a partir de los registros realizados con K2 y PDAS respectivamente. En el caso de los registros K2 se han indicado aquellas medidas que tienen un nivel por encima de la resolución del instrumento. Desgraciadamente han sido muy pocas las medidas válidas, por lo cual sería necesario realizar más medidas con una instrumentación mejor adaptada al ruido presente en la zona, a fin de caracterizar de manera más representativa la frecuencia predominante de las zonas del valle.

REGISTRO	FRECUENCIA PREDOMINANTE (Hz)
bs3	8
bt3	ROCA
bv3	ROCA
ci3	7 – 8

Tabla 5.2. Resultados de las frecuencias predominantes en la cubeta a partir de los registros de aceleración del K2.

REGISTRO	FRECUENCIA PREDOMINANTE (Hz)
T1	11 – 15
T2	3
T3	1.5
T4	1
T5	1.4
T6	15
T8	1.4
T9	7 – 8
T10	1.6
T11	6
T12	11
T13	9.2
T14	3.5
T15	13
T16	0.5
T17	3

Tabla 5.3. Resultados de las frecuencias predominantes en laderas a partir de los registros de velocidad del PDAS.

5.1.5. Resultados obtenidos de la aplicación del método experimental de Nakamura

5.1.5.1. Efectos de amplificación en la cubeta

- ✓ En el análisis preliminar de la campaña de medidas de ruido ambiental en Andorra se han observado diferencias en los períodos predominantes, tanto en la zona del valle como en la de laderas. Ver figura 5.7.

- ✓ En el NE del valle, donde se sitúan la mayoría de los sondeos geotécnicos disponibles, se obtienen en promedio frecuencias predominantes entre 5 y 10 Hz figura 5.7 (f), estos valores indican un espesor de sedimentos no muy grande en esta zona. En la zona de transición entre el valle y la ladera no se observa amplificación (figura 5.7(e)).

5.1.5.2. Evaluación del efecto topográfico

En las medidas de las laderas se han observado (figura 5.7) tres zonas con diferente frecuencia predominante: una con frecuencia predominante entre 2 y 4 Hz (figura 5.7(a) y (b)), otra con frecuencia predominante entre 5 y 10 Hz (figura 5.7(c)) y una tercera sin amplificación o frecuencia superior a 10 Hz (figura 5.7(d)).

Para las medidas hechas en la cima, si se considera una velocidad de propagación de ondas se cizalla (V_s entre 1500 y 2000 m/s), aplicando la expresión $f = V_s / l$ (Bard, 1985) donde l es la anchura de la base de la colina, se obtienen frecuencias predominantes del mismo orden que las obtenidas con el método de Nakamura. En la figura 5.8. se presenta como ejemplo el perfil topográfico del emplazamiento T9, considerando $l=240m$ y aplicando la expresión anterior se obtiene una frecuencia predominante entre 6 y 8 Hz que es comparable con la frecuencia predominante obtenida en la aplicación del método Nakamura en este punto (figura 5.7(c)).

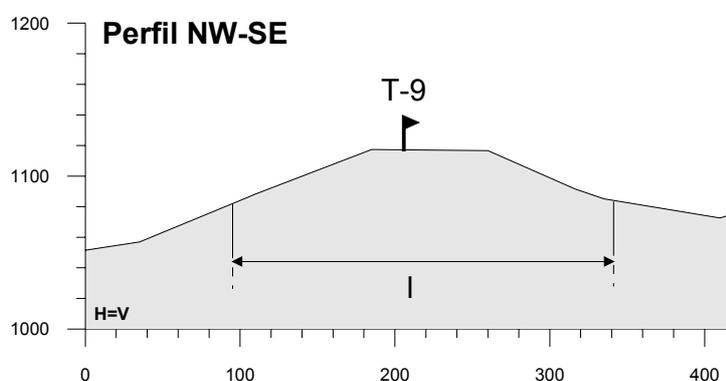


Figura 5.8. Perfil topográfico correspondiente al emplazamiento T9.(Escala en m.)

A partir del análisis del modelo digital de elevaciones de Andorra (ICC, 2001) se obtiene la pendiente de los puntos estudiados. Así se puede reconocer que la frecuencia predominante en las zonas de ladera varía en función de la pendiente. En general la frecuencia predominante aumenta al aumentar la pendiente. En la figura 5.9 se comparan las relaciones espectrales de los emplazamientos T3, T6, T8 y T9. En el emplazamiento T8 de pendiente baja (menor de 20°), la frecuencia predominante tiene valores entorno a 0.5-2 Hz; en los emplazamientos T6 y T9 con pendiente media a alta

Estimación de efectos locales en la zona de estudio

(entre 20° y 30°) la frecuencia predominante tiene valores entorno a 4-6 Hz; el emplazamiento con pendiente más alta (mayor de 30°), T3, no presentan amplificación a frecuencias cercanas a 10 Hz. En conclusión a medida que aumenta la pendiente, aumenta el valor de la frecuencia predominante.

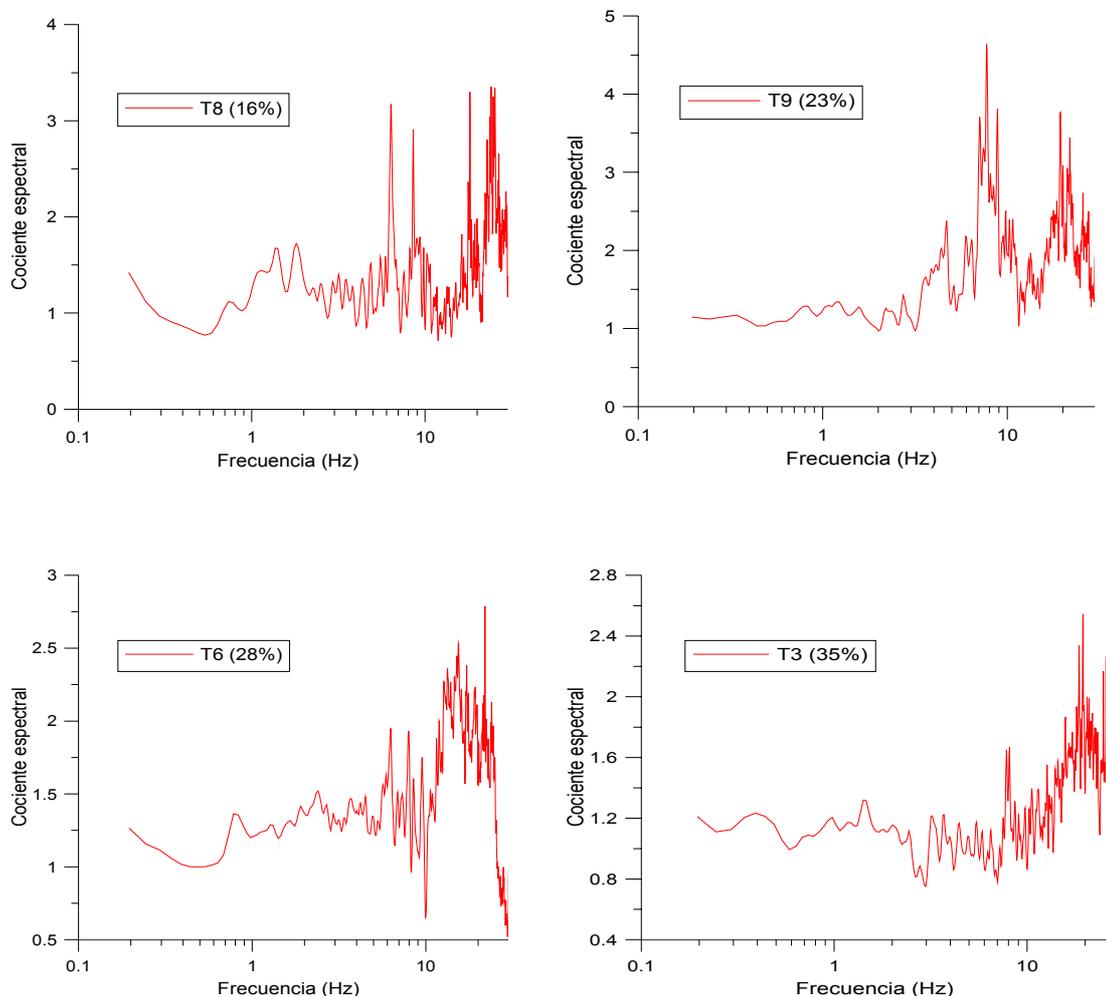


Figura 5.9. Cocientes espectrales obtenidos en emplazamientos de distinta pendiente situados en la ladera.

5.1.6. Ejemplo de aplicación de la norma francesa

Para aplicar de una manera demostrativa el coeficiente de amplificación topográfica según la norma francesa, se ha seleccionado en la zona de estudio, un sector ubicado entre la Massana y Ordino. Ver figura 5.10.

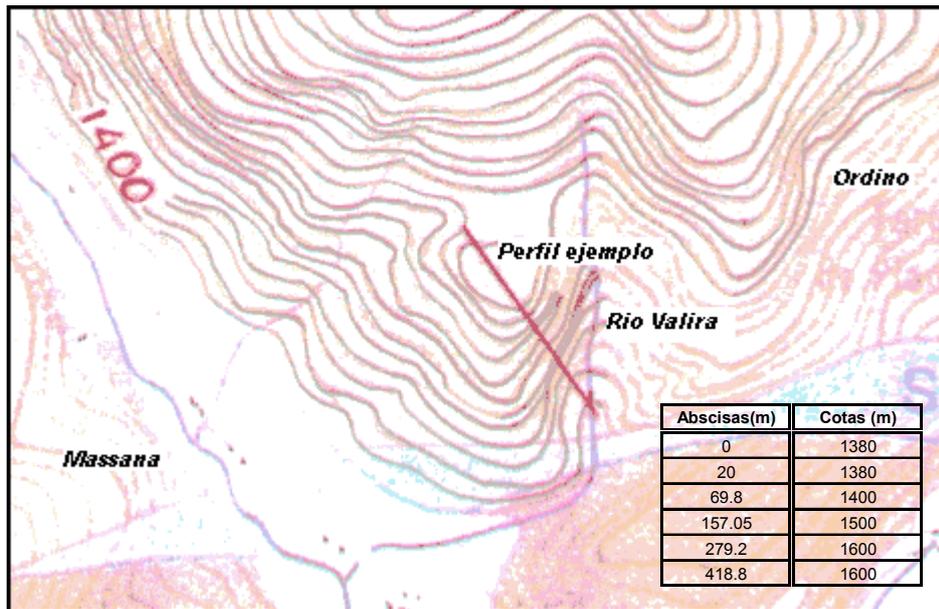


Figura 5.10. Sector del mapa geológico(BRGM,1991) seleccionado como ejemplo para obtener el coeficiente de amplificación topográfica según la Norma Francesa.

Cálculos:

Del perfil ejemplo que se indica en la figura 5.10, se ha leído las abscisas y cotas para obtener el perfil topográfico que se muestra en la figura 5.11, en la que se calcula la altura H determinada entre la base (punto más bajo del relieve) y la cima. En este perfil se encontró 3 tramos de pendientes diferentes: I_1 , I_2 e I_3 ; para aplicarle la norma, estas son remplazadas por la media ponderada, I_m .

$$H = 220 \text{ m}$$

$$i=0$$

$$I_1 = 0.40$$

$$I_2 = 1.15$$

$$I_3 = 0.82$$

$$I_m = \frac{\sum h_i I_i}{\sum h_i} = 0.93$$

Según el apartado **Borde de cresta**, se tiene:

$$H \geq 10 \text{ m e } i \leq I_m$$

Estimación de efectos locales en la zona de estudio

Cálculos de **a**, **b** y **c**:

$$a = H/3 = 73.3 \text{ m}$$

b = mínimo de:

$$\begin{cases} 20I_m = 18.6 \text{ m} \\ \frac{H+10}{4} = 57.5 \text{ m} \end{cases}$$

$$b = 18.6 \text{ m}$$

$$c = H/4 = 55 \text{ m}$$

En la figura 5.11 se indica en los ejes internos τ e y el comportamiento del coeficiente de amplificación según la topografía recomendado por la norma francesa y en los ejes exteriores el perfil topográfico. Es importante observar en la figura 5.11, que el coeficiente de amplificación topográfica se aumenta linealmente a medida que el punto en estudio se ubica por encima de A hasta lograr un valor de 1.40 en C, este valor se conserva en el tramo C hasta B, a partir de B y hasta D el coeficiente disminuye también linealmente hasta tomar de nuevo el valor de 1.00 y a partir de D ya no se tiene en cuenta el efecto por topografía.

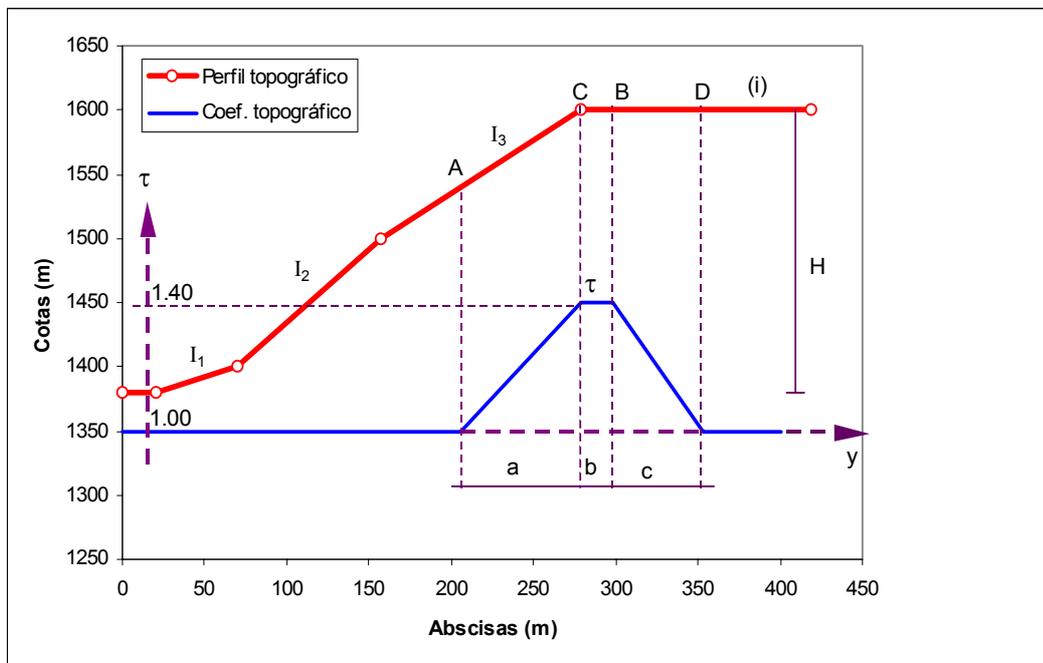


Figura 5.11. Esquema de cálculo del coeficiente de amplificación debido a la topografía.

5.2. Métodos numéricos: ProShake

5.2.1. Fundamentación teórica

El programa se fundamenta en el “Modelo Lineal Equivalente”, es decir en la concepción teórica no lineal, que busca una equivalencia energética de disipación en el modelo lineal a través de un proceso de linealización, que consiste en ajustar los valores de G y D (módulo de cizalla y factor de amortiguamiento respectivamente) de cada una de las capas del perfil estratigráfico analizado, para un nivel de deformación por corte media inducida en ésta por la excitación sísmica.

Las hipótesis sobre las cuales se sustenta son:

- ✓ Excitación armónica: Las ondas vienen dadas en forma discreta por valores de aceleración igualmente espaciados con un intervalo temporal de muestreo.
- ✓ Propagación: Se realiza en dirección vertical considerando las ondas de cizalla, únicamente provenientes de la formación rocosa subyacente, lo que implica que sólo se considera el movimiento de las partículas de suelo en la dirección horizontal.
- ✓ Sistema de capas:
 - Planas y paralelas de extensión horizontal infinita, existiendo únicamente como variable espacial la profundidad z .
 - Caracterizadas por: Espesor h , densidad ρ , módulo de cizalla G y factor de amortiguamiento D .
 - Semiespacio de profundidad infinita.
 - Medio homogéneo e isotrópico.

El Método Shake (Schnabel et al., 1972) considera la respuesta asociada a la propagación vertical de ondas de cizalla a través del sistema viscoelástico lineal que se muestra en la figura 5.12.

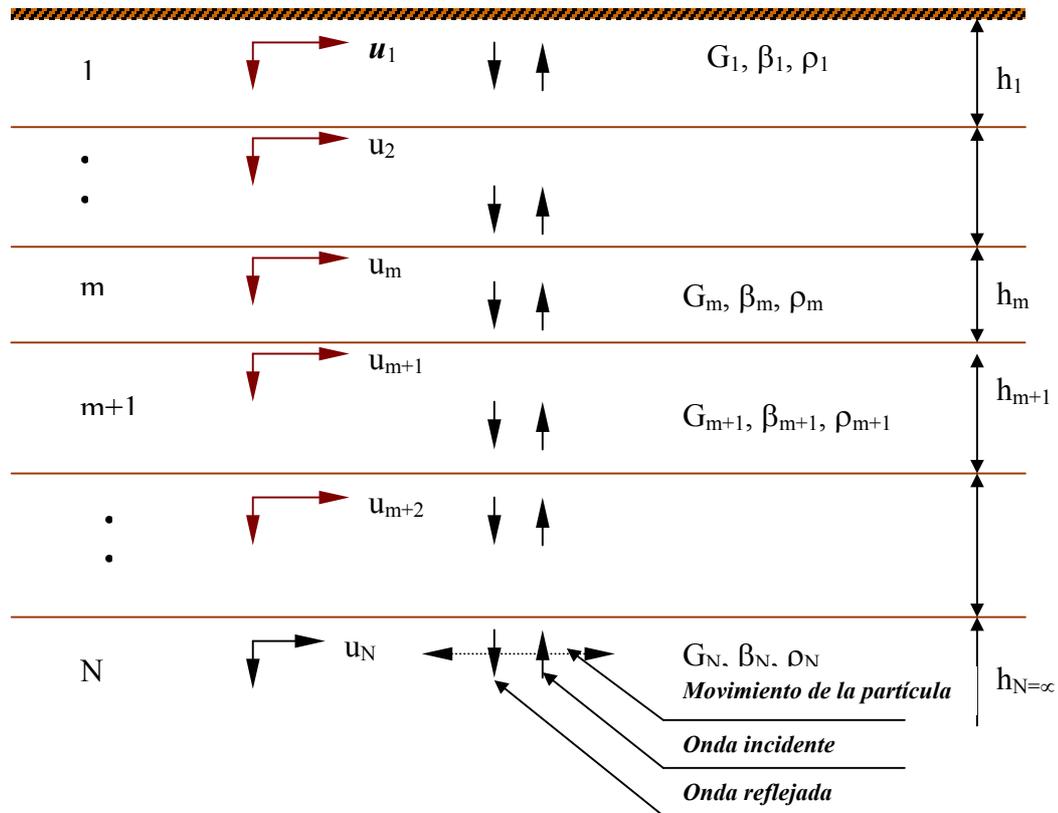


Figura 5.12. Propagación vertical de ondas de cizalla de un medio unidimensional semi-infinito estratificado en capas planas.

Las ondas de corte imprimen a una partícula de suelo a través de sus esfuerzos de corte τ , una deformación γ , y movimientos horizontales armónicos únicamente. En resumen se tienen dos variables de las cuales depende el movimiento de una partícula: una variable espacial x y una temporal t , debiendo satisfacer la ecuación de propagación de una onda amortiguada:

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta \cdot \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (5.12)$$

\leftarrow \rightarrow \leftarrow \rightarrow \leftarrow \rightarrow

Fuerza inercial Rigidez del medio Amortiguamiento del medio

donde,

u = Desplazamiento horizontal de la partícula
 t = Variable temporal

x = Variable espacial (profundidad)
 ρ = Densidad
 G = Módulo de corte
 η = Coeficiente de viscosidad

La solución de la ecuación diferencial expresada en complejos, desacoplando la componente espacial de la temporal es:

$$u(x,t) = U(x,t).e^{(iw2t)} \quad (5.13)$$

Derivando y remplazando en la ecuación de la onda 5.12, se tiene:

$$(G + iw\eta). \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho \cdot w^2 U \quad (5.14)$$

La componente espacial a su vez se puede expresar en complejos:

$$U(x) = E.e^{(ikx)} + F.e^{(-ikx)} \quad (5.15)$$

Siendo k el número de onda complejo,

$$k = \rho \cdot \frac{w^2}{G^*} \quad (5.16)$$

Donde G^* es el módulo de corte complejo, con lo cual el movimiento de una partícula será la composición de dos movimientos:

$$u(x,t) = E.e^{i(kx+wt)} + F.e^{-i(kx-wt)} \quad (5.17)$$

En donde el primer término representa la onda incidente, viajando en sentido ascendente y el segundo término representa la onda reflejada en sentido descendente.

El factor de amortiguamiento D , se relaciona con el coeficiente de viscosidad η por la expresión:

$$w \cdot \eta = 2.G.D \quad (5.18)$$

Diversos experimentos realizados han indicado que tanto G como D son casi constantes para los rangos de frecuencias analizados, por lo cual es conveniente expresar el módulo de corte complejo G^* en términos del factor de amortiguamiento D y no de la viscosidad η .

$$G^* = G + iw\eta = G(1 + 2iD) \quad (5.19)$$

Estimación de efectos locales en la zona de estudio

A la vez se pueden definir los valores de τ , γ y \ddot{u} asociados a esa profundidad x y tiempo t :

$$\tau(x,t) = G\gamma = G^* \frac{\partial u}{\partial t} = ikG^* (E \cdot e^{ikx} - F \cdot e^{-ikx}) \cdot e^{-i\omega t} \quad (5.20)$$

$$\gamma(x,t) = \frac{\partial u}{\partial x} = ik(E \cdot e^{i(kx+\omega t)} - F \cdot e^{-i(kx-\omega t)}) \quad (5.21)$$

$$u(x,t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 (E \cdot e^{i(kx+\omega t)} - F \cdot e^{-i(kx-\omega t)}) \quad (5.22)$$

Estas ecuaciones se aplican para cada capa mediante un sistema de coordenadas locales, calculando los valores de las interfases respectivas y teniendo en cuenta las condiciones de compatibilidad y equilibrio:

- ✓ $\tau(x=0)=0$
- ✓ Continuidad de deformaciones γ y esfuerzos τ para el resto de las interfases.

Se verifica que para la primera capa $E_1 = F_1$, mientras que una capa intermedia m del perfil del suelo tendrá su relación con la primera:

$$\begin{aligned} E_m &= e_m(\omega) \cdot E_1 \\ F_m &= f_m(\omega) \cdot F_1 = f_m(\omega) \cdot E_1 \end{aligned} \quad (5.23)$$

Siendo e_m y f_m las funciones de transferencia entre las capas (1) y cualquiera (m) (Fig.5.13).

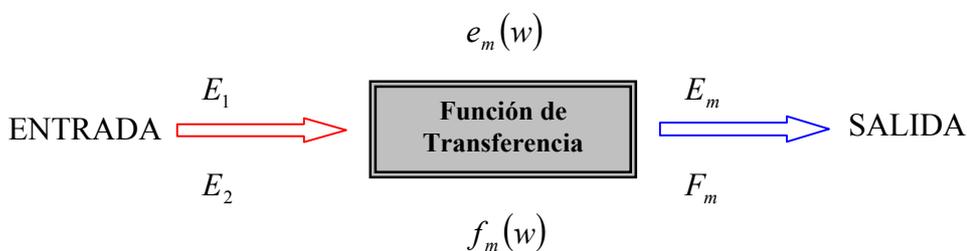


Figura 5.13. Funciones de transferencia unitarias.

Si se quiere hallar la función de amplificación que relaciona dos capas cualquiera:

$$A_{n,m}(w) = \frac{u_m(x,t)}{u_n(x,t)} = \frac{e_m(w) + f_m(w)}{e_n(w) + f_n(w)} \quad (5.24)$$

Siendo esta relación la más importante en el estudio de amplificación local en los suelos, pues ingresando un movimiento dado en la base de una capa n se puede ver los valores de amplificación o desamplificación, que se obtendrán en la superficie de la capa m . (Fig. 5.14.)

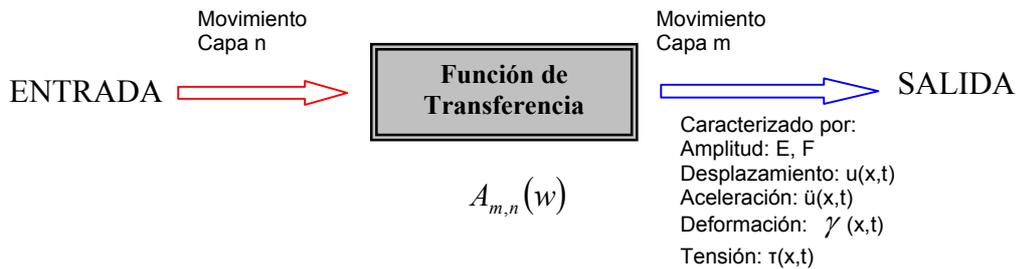


Figura 5.14. Función de transferencia entre dos capas cualquiera.

Por lo general, aunque puede darse en algunos casos una situación contraria, las amplitudes aumentan a medida que se avanza hacia la superficie.

La formulación planteada parte de la base de trabajar con una función de excitación continua y armónica, pero si se analiza un registro real de aceleración, se observa que es el de una función discreta no-armónica, constituida por n valores de aceleración equiespaciados en el intervalo temporal de muestreo T y además no-sinusoidal; por lo cual se tienen que expresar como una suma finita de series de frecuencias w_j en senos y cosenos para reproducir cualquier señal real (serie finita de Fourier).

$$\ddot{u}(k.T) = \sum_{j=0}^{n/2} (a_j e^{i w_j t} + b_j e^{-i w_j t}) \quad (5.25)$$

donde,

k : índice de la cantidad de puntos de aceleración $0, 1, 2, \dots, n$

j : índice de las series a tomar $0, 1, 2, \dots, n/2$

w_j : Pulsación de cada serie:

$$w_j = \frac{2\pi}{n.T} \cdot j \quad (5.26)$$

Siendo a_j, b_j los coeficientes de Fourier complejos.

$$a_j = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \ddot{u}(t) \cdot e^{-i w_j t} \quad ; \quad b_j = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \ddot{u}(t) e^{i w_j t} \quad (5.27)$$

La expresión 5.12, representa el movimiento de una capa cualquiera, pero si se quiere asociar este fenómeno entre dos capas relacionadas y teniendo en cuenta el factor de amplificación, se tiene:

$$\ddot{u}(kT) = \sum_{j=0}^{n/2} A_{m,n}(w_j) (a_{mj} e^{i w_j t} + b_{mj} e^{-i w_j t}) \quad (5.28)$$

De esta forma se corrige el error de trabajar con cualquier registro de aceleración que se tenga. El programa ProShake utiliza además la transformada discreta de Fourier rápida, mediante el algoritmo de Cooley y Tukey (1965) para lograr una convergencia mucho más rápida FFT que la clásica con un factor $(n/\log n)$, para calcular todos los coeficientes de Fourier a la vez, pero para ello n debe ser una potencia de 2.

Además es importante destacar que cuando el basamento rocoso subyacente se encuentra a gran profundidad es prácticamente imposible colocar allí un acelerógrafo para registrar el movimiento que se genera, por lo cual asumiendo la continuidad y la invariabilidad de la estructura del mismo, se busca el afloramiento rocoso de aquel que se encuentre más cercano y se utiliza el registro como si fuera en profundidad, en este caso el programa tiene en cuenta el factor de profundidad en el cálculo. Ver figura 5.15.

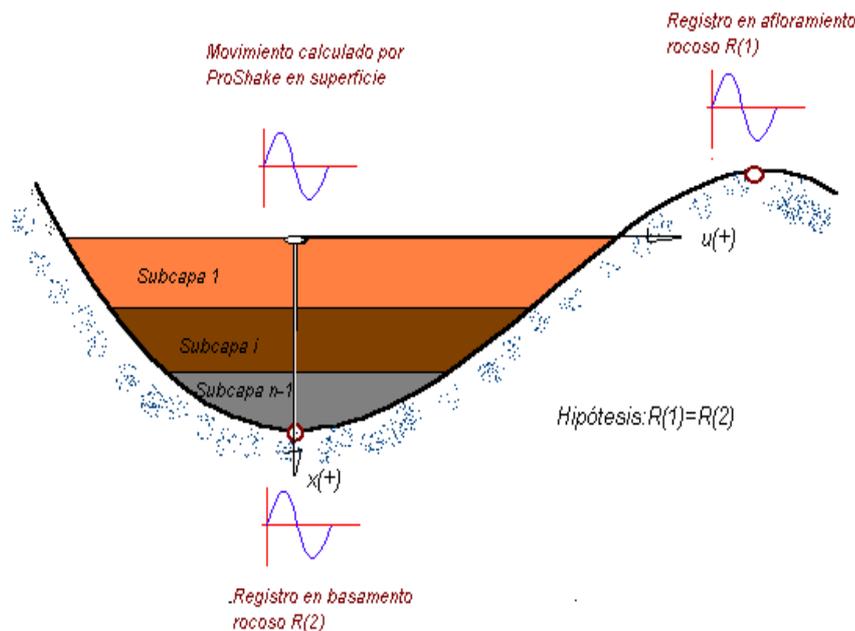


Figura 5.15. Representación esquemática del funcionamiento del programa ProShake

Para una mejor visualización del funcionamiento del programa ProShake, se muestra en la figura 5.16 el diagrama de flujo donde se indica su procedimiento.

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA PROSHAKE

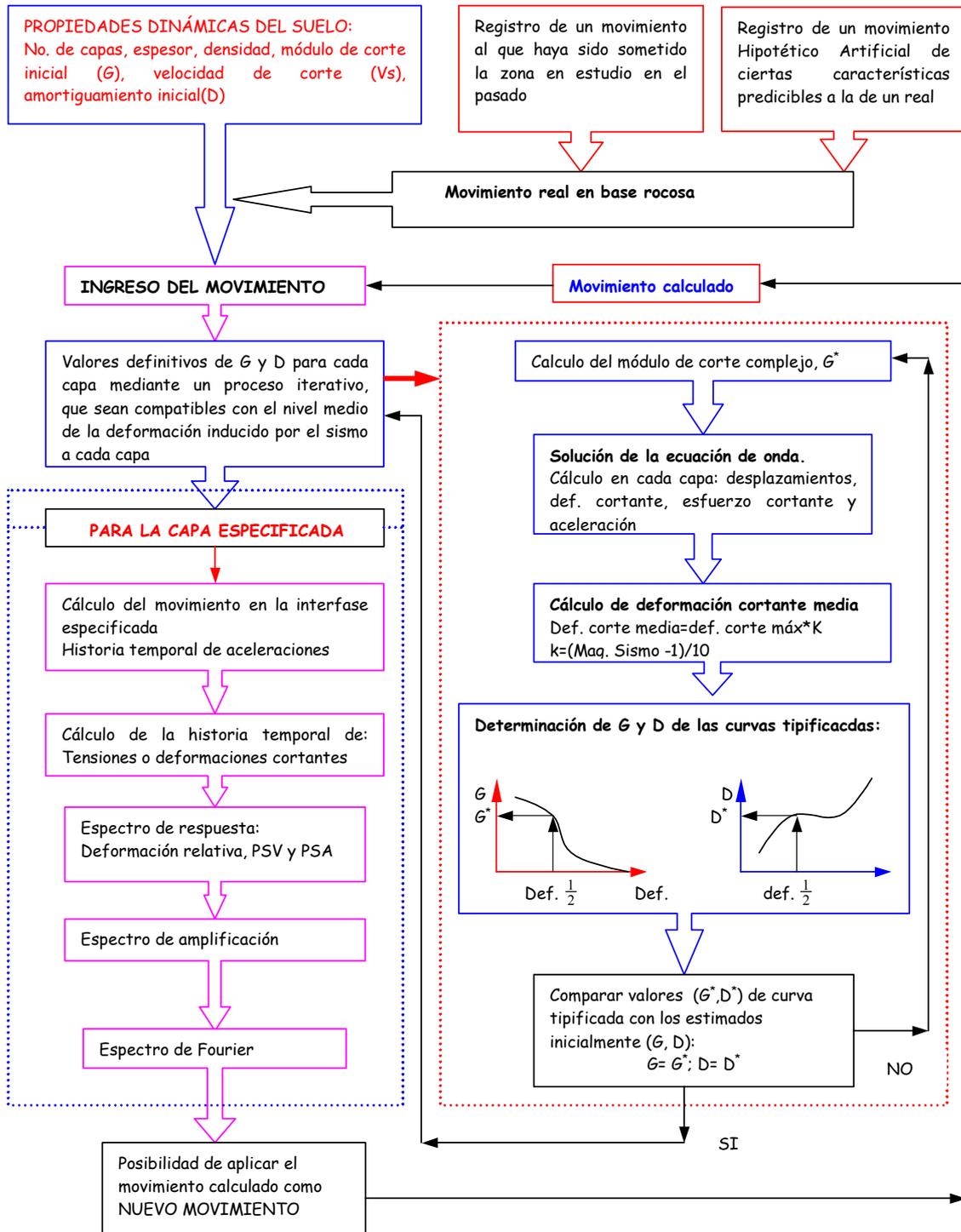


Figura 5.16. Diagrama de flujo donde se muestra el funcionamiento del programa ProShake.

5.2.2. Estructura del programa

El programa ProShake está diseñado para proporcionar una interfase que simplifica y agiliza el proceso de representación e interpretación de los resultados del análisis de respuesta del suelo. El programa está organizado en tres “Managers” con una secuencia de operaciones como se muestra en la figura 5.17, el “Report” puede estar asociado al “Input Manager” y al “Output Manager”.

La estructura del programa está diseñada para permitir una completa flexibilidad. Por ejemplo, los usuarios pueden saltarse una secuencia e ir directamente al “Output Manager” para un análisis previo de los resultados.

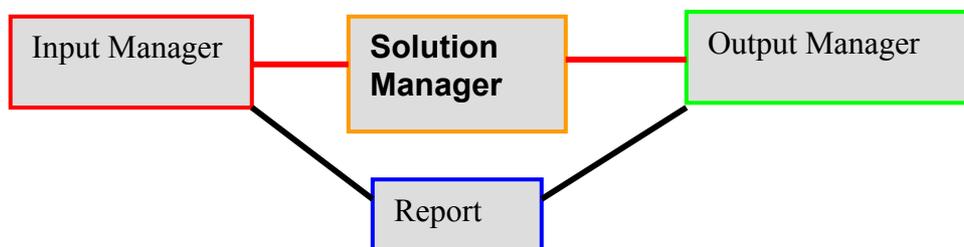


Figura 5.17. Organización del programa ProShake

La funciones básicas de los tres “Managers” y “Report” se describen a continuación.

- **Input Manager:**

Se usa para definir el perfil de suelo con sus propiedades dinámicas y todos los movimientos de entrada.

El perfil de suelo se ingresa haciendo clic en el cajón “Profile” del “Input Manager”. La información que se escribe es: título del perfil, número de capas, profundidad del nivel freático; para cada capa se introduce: el material, espesores, peso unitario, máximo esfuerzo cortante o velocidad de ondas de corte, curvas de reducción de módulos y curvas de amortiguamiento. Se obtiene una ventana como la que se muestra en la figura 5.18.

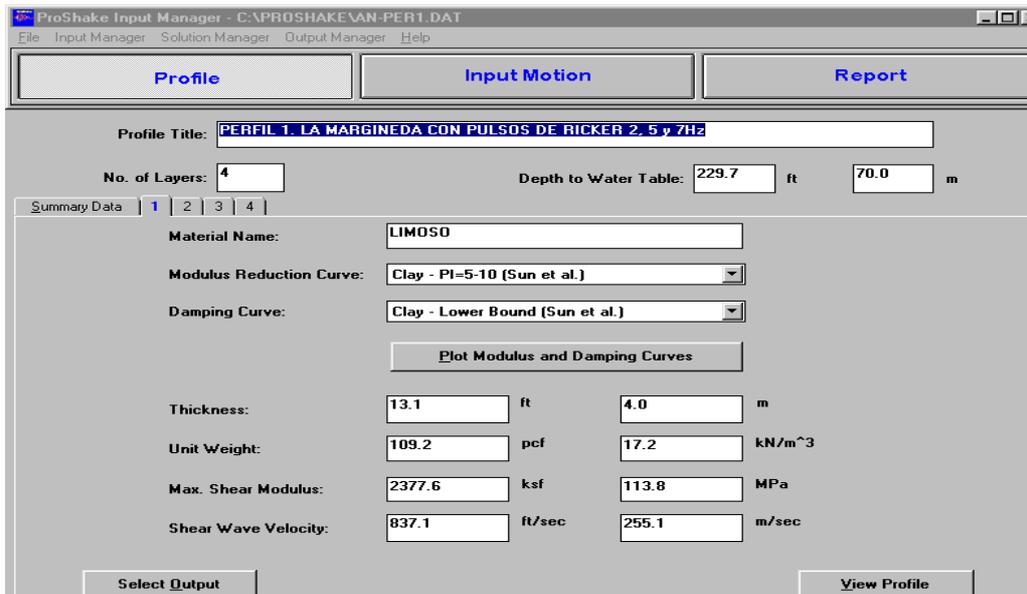


Figura 5.18. Ventana de ingreso de datos del perfil de suelo

Se puede obtener un resumen del perfil de suelo haciendo clic en “ Summary Data” como se muestra en la ventana de la figura 5.19.

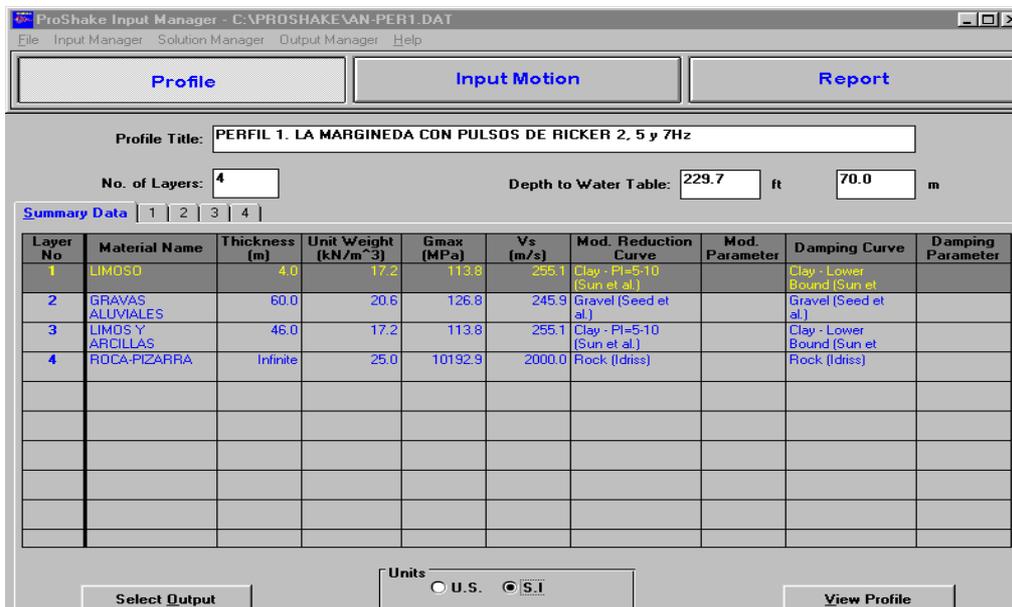


Figura 5.19. Ventada de resumen de la información de entrada

El programa ProShake, al ingresar los datos del perfil del suelo y movimientos genera un grafico que se puede observar en el “Report” con los parámetros asignados para cada uno de los materiales. Esta información es muy usual para detectar errores o problemas en el ingreso de datos. El gráfico de los parámetros se observa en la figura 5.20.

Estimación de efectos locales en la zona de estudio

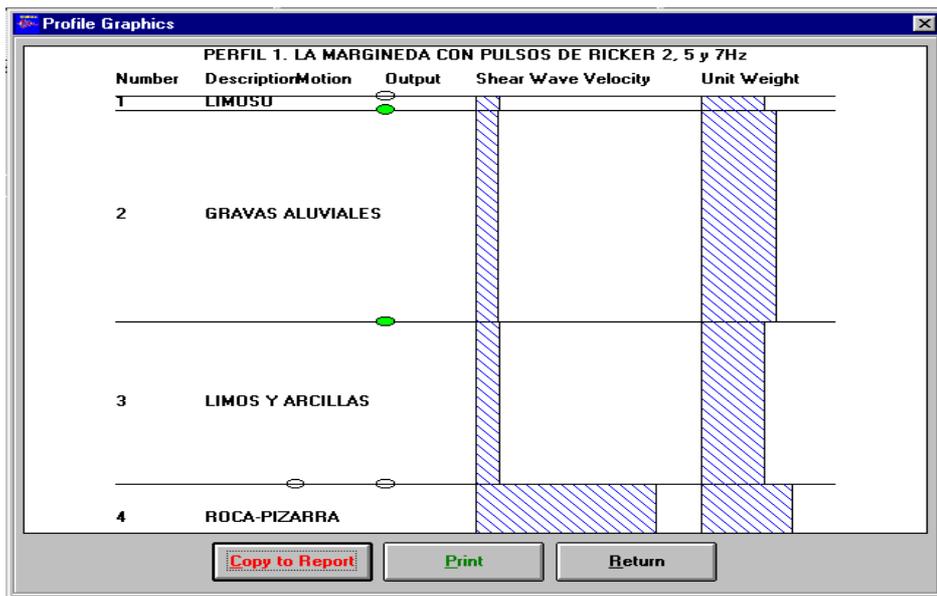


Figura 5.20. Ventana del perfil de suelo y sus características y solicitudes de resultados.

● **Input Motion**

El programa ProShake permite observar los diferentes movimientos de interés con sus propiedades, para seleccionar entre ellos los más apropiados en el análisis.

El número de movimientos no está limitado, está sujeto a la capacidad de memoria del computador, entendiendo que las señales sísmicas normalmente son grandes.

Una ventana de la información de los movimientos de entrada en roca se muestra en la figura 5.21.

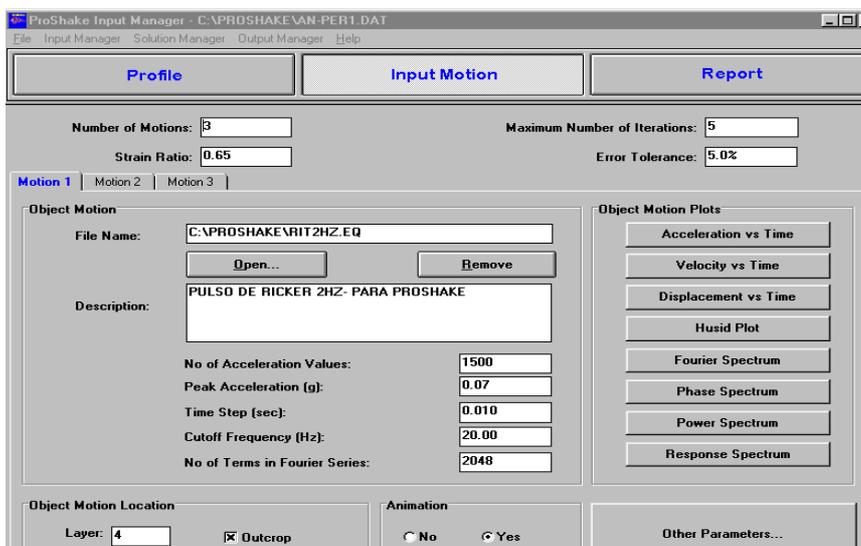


Figura 5.21. La ventana muestra las propiedades de las señales de entrada.

- **Solution Manager**

Esta instrucción sirve para ejecutar el análisis lineal equivalente del programa ProShake. La solución queda grabada en el “Output Manager”. Durante el proceso de la solución se muestran en pantalla tres gráficos para cada movimiento, el de la izquierda indica la variación del esfuerzo de corte efectivo en profundidad para cada iteración, el del centro y la derecha, ilustra la variación del error de los módulos y amortiguamiento repetidamente para cada iteración.

- **Output Manager**

Todos los resultados permiten ser mostrados gráficamente como: movimientos, esfuerzo-deformación, espectro de respuesta y gráficos de su comportamiento en profundidad. El “Output” también calcula otros parámetros como: aceleración pico, velocidad pico, desplazamiento pico, intensidad del espectro de respuesta, duración, etc. A continuación se presentan algunos ejemplos:

- ✓ Gráficos de movimientos

En las ventana de la figura 5.22 se presenta un ejemplo de la historia temporal de aceleraciones seleccionada en un cálculo.

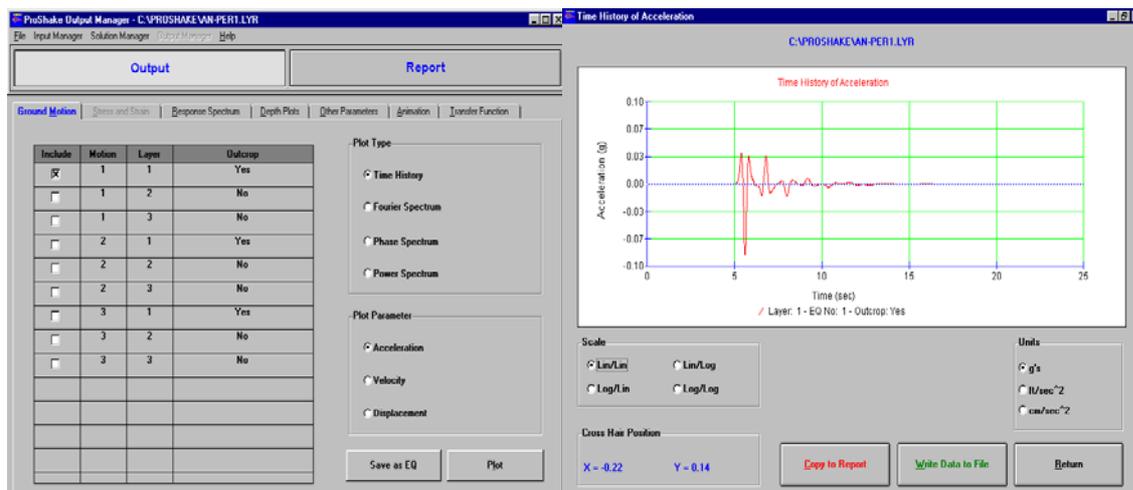


Figura 5.22. Historia de aceleraciones en superficie para un determinado estrato de suelo de uno de los perfiles analizados.

- ✓ Espectro de respuesta:

El espectro de respuesta puede ser dibujado a diferentes escalas, seleccionando los cajones que se incluyen en la ventana. En la figura 5.23 se muestra un ejemplo.

- ✓ Funciones de transferencia

La función de transferencia describe la relación entre dos movimientos en el dominio frecuencial.

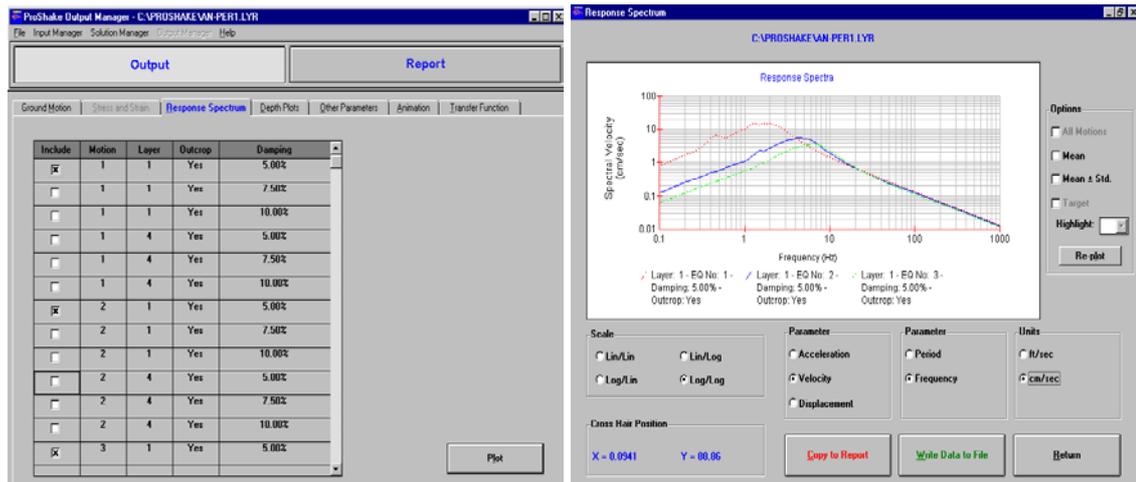


Figura 5.23. Se muestra un espectro de respuesta obtenido para un determinado estrato y amortiguamiento.

Si consideramos dos movimientos A y B con series de Fourier $A(f)$ y $B(f)$, respectivamente, la función de transferencia se escribe como la relación: (Fig. 5.24).

$$H(f) = A(f) / B(f) \quad (5.29)$$

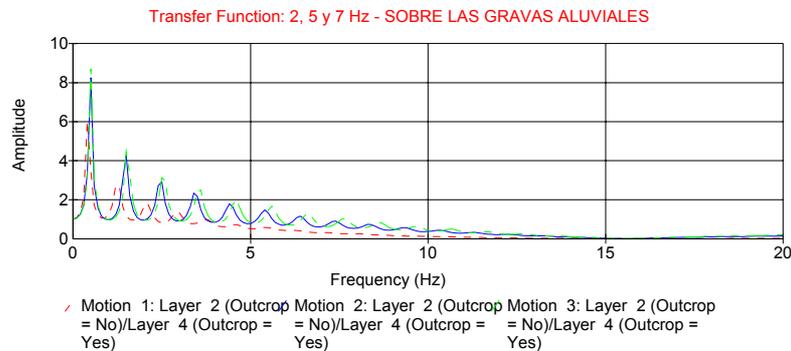


Figura 5.24. Función de transferencia suelo/roca para uno de los perfiles analizados.

5.2.3. Mejoras implementadas respecto de las versiones anteriores

Básicamente estas mejoras se pueden resumir en los siguientes puntos:

- ✓ El programa ProShake usa iteraciones lógicas que son más avanzadas que las usadas en las versiones anteriores de SHAKE; como resultado, converge más rápidamente que las versiones previas. Perfiles de suelo muy blandos o relaciones de alta impedancia, sin embargo, pueden converger despacio, tal comportamiento a menudo es indicado como error en la entrada.

- ✓ Para el análisis de estratigrafías horizontales, el programa ProShake facilita la entrada de datos y realiza un análisis más rápido e interpretación de los resultados más fácil y eficiente que las versiones anteriores (SHAKE85 Y SHAKE91).
- ✓ Comparando numéricamente los resultados con las versiones anteriores del Programa Shake aplicadas a un mismo problema se observan las siguientes diferencias:
 - ProShake usa 32 bit y SHAKE91 usa 16 bit.
 - ProSkake usa una rutina diferente para el cálculo de la transformada de Fourier.
 - ProShake usa un procedimiento más eficiente en la iteración. La última iteración requerida para reducir el error del módulo y amortiguamiento bajo la tolerancia del error especificado en ProShake produce errores finales más pequeños que la última iteración para la misma tolerancia de error del programa SHAKE91.
 - El programa SHAKE91 aplica el corte de frecuencias después de escalar el movimiento de entrada hacia una aceleración pico especificada como resultado, de esta manera la actual aceleración pico usada en el análisis puede ser diferente que la aceleración pico deseada.
 - El programa ProShake aplica el corte de frecuencias antes del escalonamiento requerido, la aceleración que está actualmente usando como entrada en el análisis es igual que la aceleración deseada. La diferencia entre este acercamiento es razonablemente pequeña para el corte de altas frecuencias, pero este acercamiento tomado en ProShake es considerado mas apropiado.
- ✓ En general los resultados con respecto a las versiones anteriores son muy similares en tiempo y frecuencias.

5.2.4. Caracterización del movimiento del suelo en la zona del fondo del valle: aplicación del programa ProShake

Una vez caracterizados los 5 perfiles estimativos de la zona en estudio con sus propiedades físico-mecánicas y dinámicas, se aplicó el programa 1D ProShake.

Inicialmente se procedió a simular y estimar los efectos sísmicos locales en el valle de Andorra usando como señal de entrada pulsos de Ricker de frecuencias predominantes 2, 5 y 7 Hz. Posteriormente se adaptan acelerogramas a partir de los espectros correspondientes al estudio de peligrosidad sísmica realizado en el ICC a escala de todo el Pirineo.

5.2.4.1. Resultados obtenidos de la aplicación del programa ProShake con pulsos de Ricker

Los pulsos tienen una duración de 2 segundos y una aceleración pico de 0.07g (Ver figura 5.25) y se definen con las ecuaciones:

$$f(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} (a - 0.5)e^{-a} \quad \text{con} \quad (5.30)$$

$$a = \left| \frac{\pi(t - t_s)}{t_p} \right|^2 \quad (5.31)$$

donde,

t_p = Período y t_s = Tiempo para el cual se obtiene la máxima aceleración

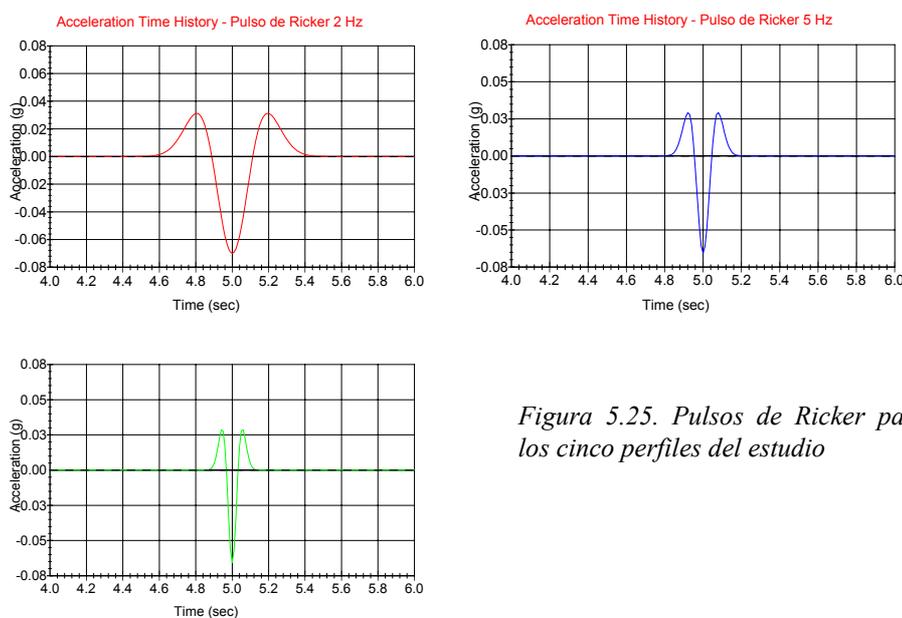


Figura 5.25. Pulsos de Ricker para los cinco perfiles del estudio

Dada la gran cantidad de información que reporta el programa, se procedió a seleccionar aquellos parámetros de interés para el presente estudio, y para tal efecto se seleccionaron:

- ✓ Reporte de los diferentes perfiles con sus características y el perfil de suelo con la información suministrada y solicitada. Se muestra un ejemplo en la tabla 5.4 y figura 5.26 y los restantes en el anexo 9.2.
- ✓ Las curvas de módulos de corte normalizado y factor de amortiguamiento para cada material de cada uno de los perfiles, tal como se muestra en la figura 5.27.
- ✓ Un ejemplo de los registros de aceleraciones calculados en la parte superior de los estratos de los diferentes perfiles, se indica en la figura 5.28 y los restantes en

el anexo 9.2. Como registro de entrada en roca se han considerado pulsos de Ricker de 2 Hz (curva roja), 5 Hz (curva azul) y 7 Hz (curva verde).

- ✓ Los espectros de respuesta en superficie y en roca de los diferentes perfiles se muestran en las figura 5.29.
- ✓ De las funciones de transferencia en superficie y sitios de interés de los cinco perfiles se muestra un ejemplo en las figura 5.30 y en anexo 9.2.

ProShake Report

Data File: C:\PROSHAKE\AN-PER1.DAT

Soil Profile-1

Profile Name: PERFIL 1. LA MARGINEDA CON PULSOS DE RICKER 2, 5 y 7Hz

Water Table: 229.66 ft

Number of Layers: 4

Layer Number	Material Name	Thickness (ft)	Unit Weight (pcf)	Gmax (ksf)	Vs (ft/sec)	Modulus Curve	Damping Curve	Mod. Parameter	Damp. Parameter
1	LIMOSO	13.12	109.17	2,377.59	837.07	Clay - PI=5-10 (Sun et al.)	Clay - Lower Bound (Sun et al.)		
2	GRAVAS ALUVIALES	196.85	131.01	2,649.12	806.59	Gravel (Seed et al.)	Gravel (Seed et al.)		
3	LIMOS Y ARCILLAS	150.92	109.17	2,377.59	837.07	Clay - PI=5-10 (Sun et al.)	Clay - Lower Bound (Sun et al.)		
4	ROCA-PIZARRA	Infinite	159.08	212.883.87	6,561.68	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)		

Input Motion

Number of Motions: 3 Number of Iterations: 5 Strain Ratio: 0.65 Tolerance: 5.00%

File Name	No of Acc. Values	Max. Acc. (g)	Time Step (sec)	Cutoff Freq. (Hz)	No of Fourier Terms	Layer	Outcrop
C:\PROSHAKE\REPORT2H.EQ	1500	0.070	0.010	20.00	2048	4	Yes
C:\PROSHAKE\REPORT5H.EQ	1500	0.070	0.010	20.00	2048	4	Yes
C:\PROSHAKE\REPORT7H.EQ	1500	0.070	0.010	20.00	2048	4	Yes

Output Locations

Layer No	Depth (ft)	Outcrop
1	0.00	Yes
2	13.12	No
3	209.97	No
4	360.89	Yes

Tabla 5.4. Reporte del perfil 1.

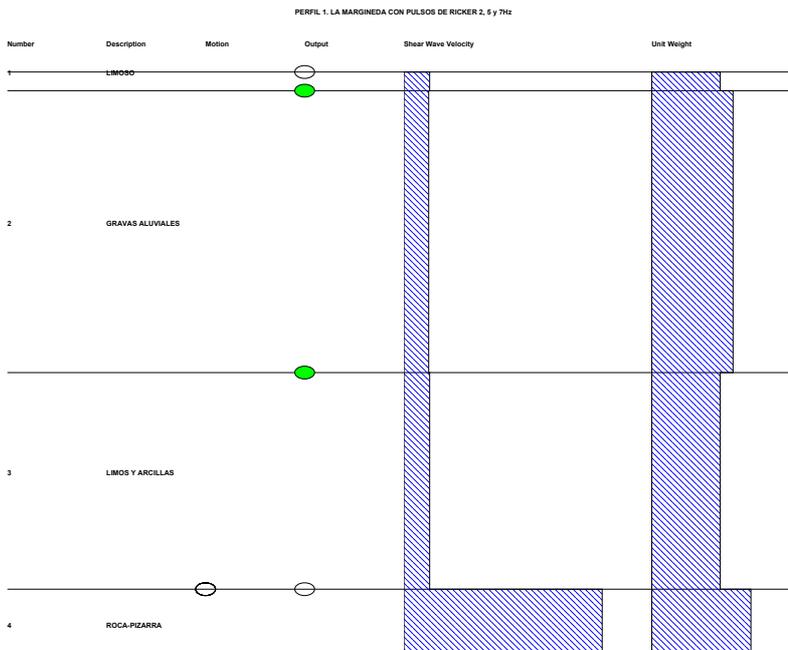


Figura 5.26. Perfil 1 con la información suministrada y solicitada.

Estimación de efectos locales en la zona de estudio

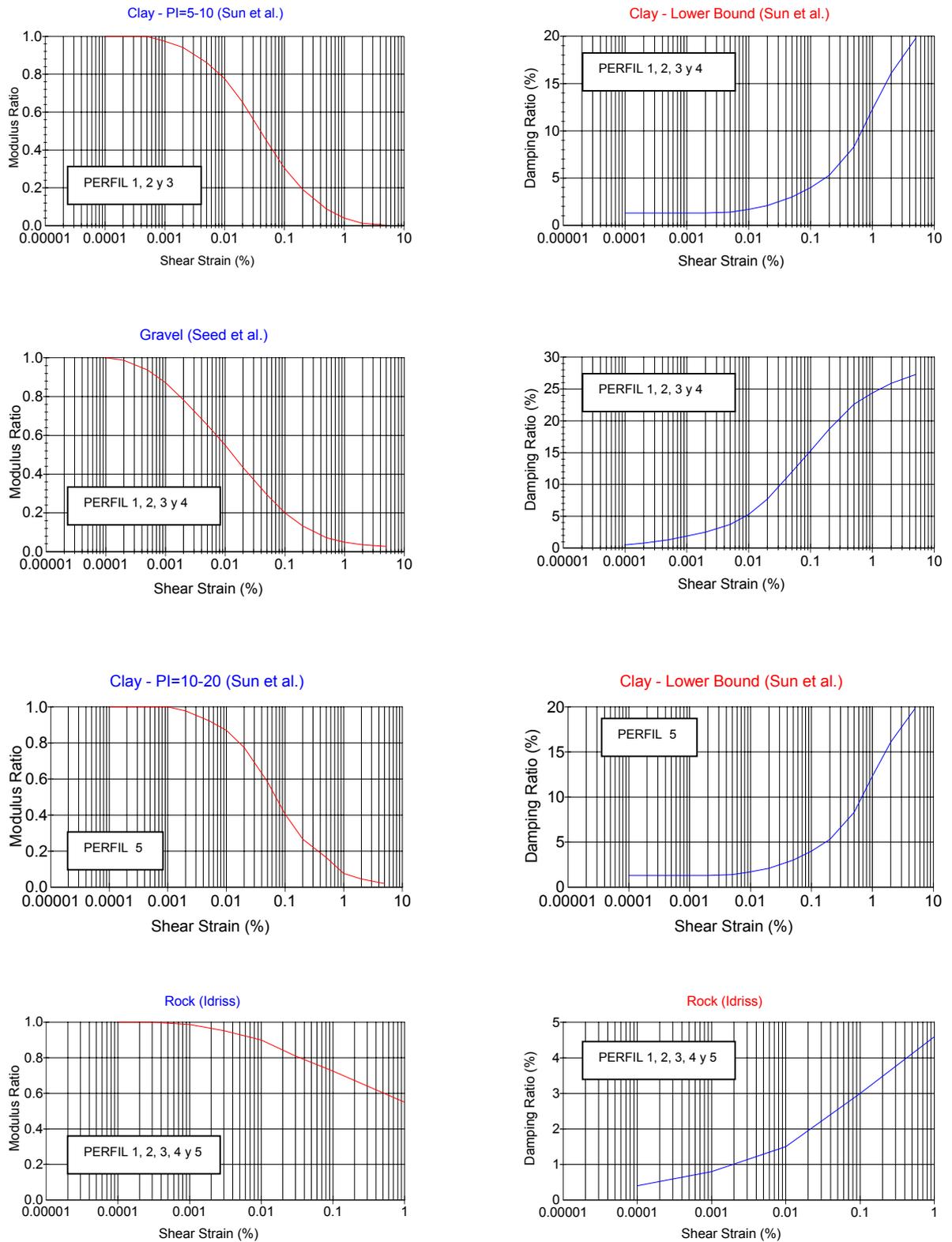


Figura 5.27. Gráficas de variación de módulos de cizalla y factores de amortiguamientos con la deformación consideradas en los cálculos para los diferentes perfiles.

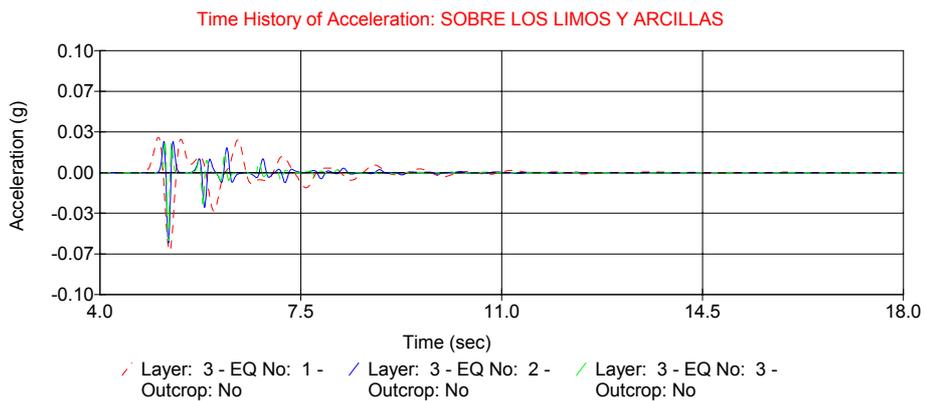
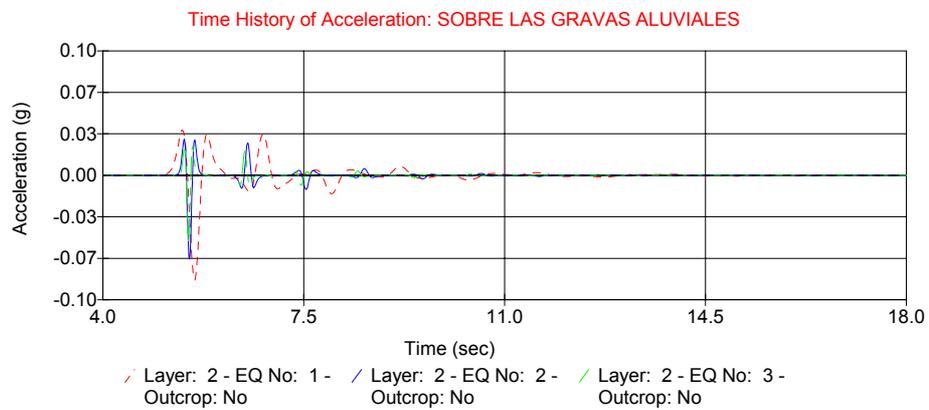
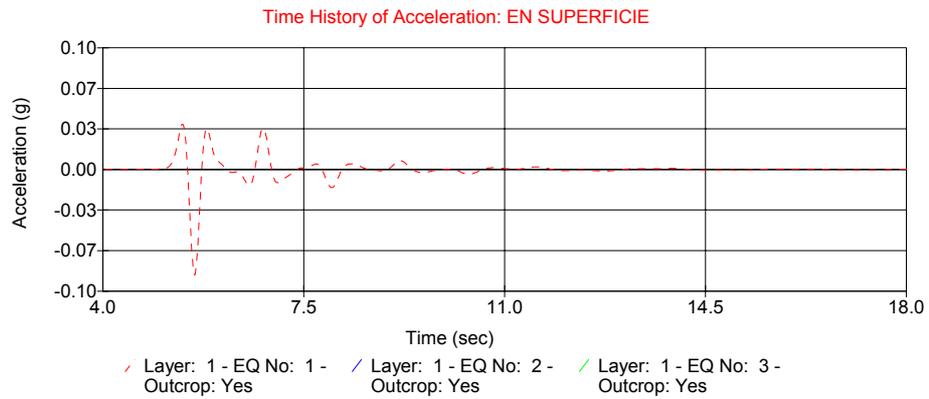


Figura 5.28. Registros de aceleración obtenidos en la capa superior del perfil 1, considerando como registro de entrada en roca pulsos de Ricker de 2 Hz (curva roja), 5 Hz (curva azul) y 7 Hz (curva verde).

Estimación de efectos locales en la zona de estudio

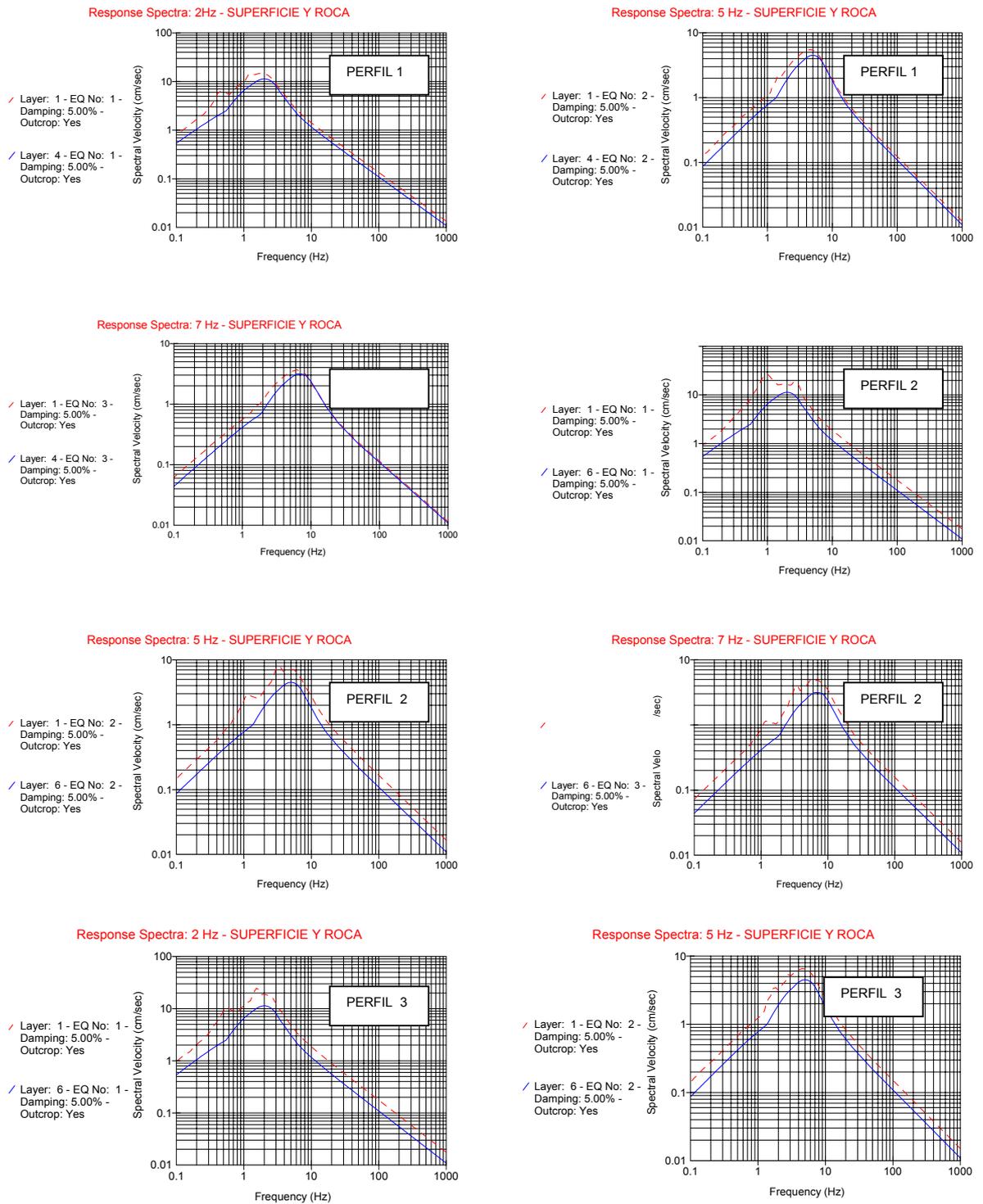
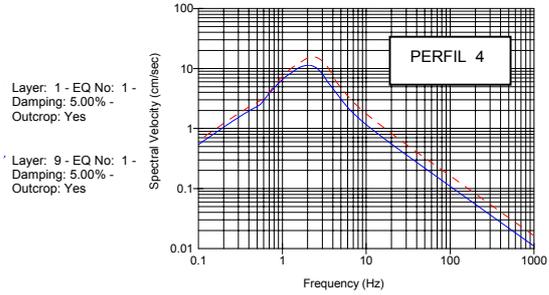
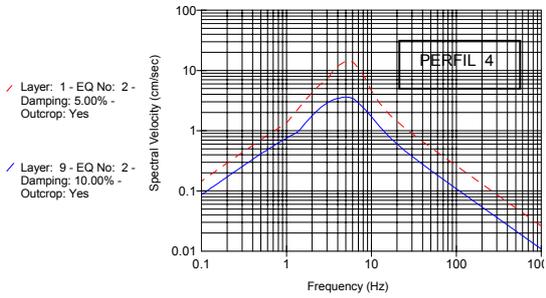


Figura 5.29. Espectros de respuesta (PSV) calculados en superficie y roca en los diferentes perfiles.

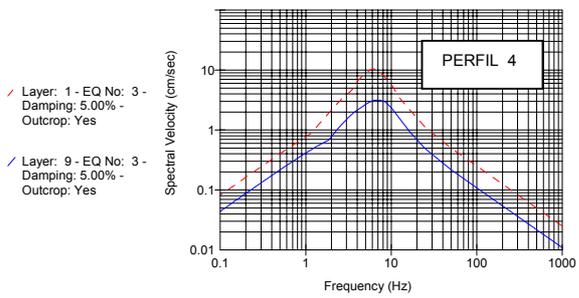
Response Spectra: 2 Hz - SUPERFICIE Y ROCA



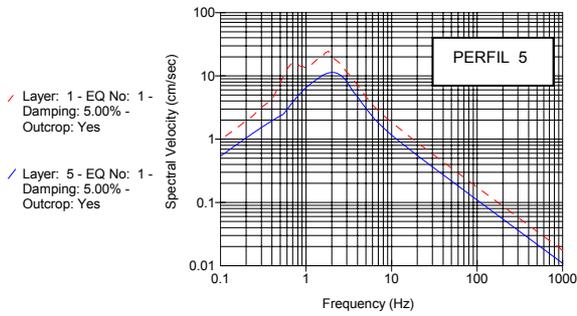
Response Spectra: 5 Hz - SUPERFICIE Y ROCA



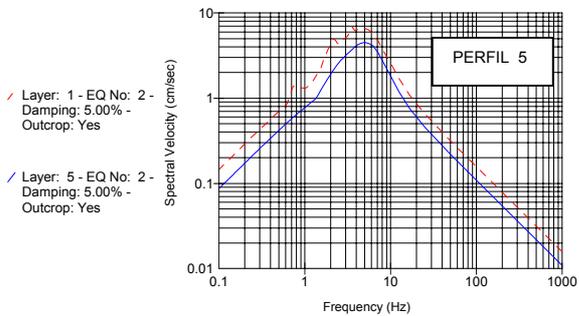
E Y ROCA



Response Spectra: 2 Hz - SUPERFICIE Y ROCA



Response Spectra: 5 Hz - SUPERFICIE Y ROCA



Response Spectra: 7 Hz - SUPERFICIE Y ROCA

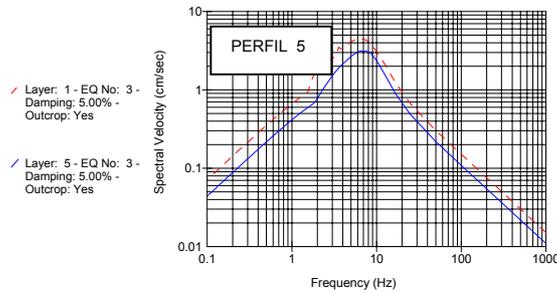


Figura 5.29. (Continuación). Espectros de respuesta (PSV) calculados en superficie y roca en los diferentes perfiles.

Estimación de efectos locales en la zona de estudio

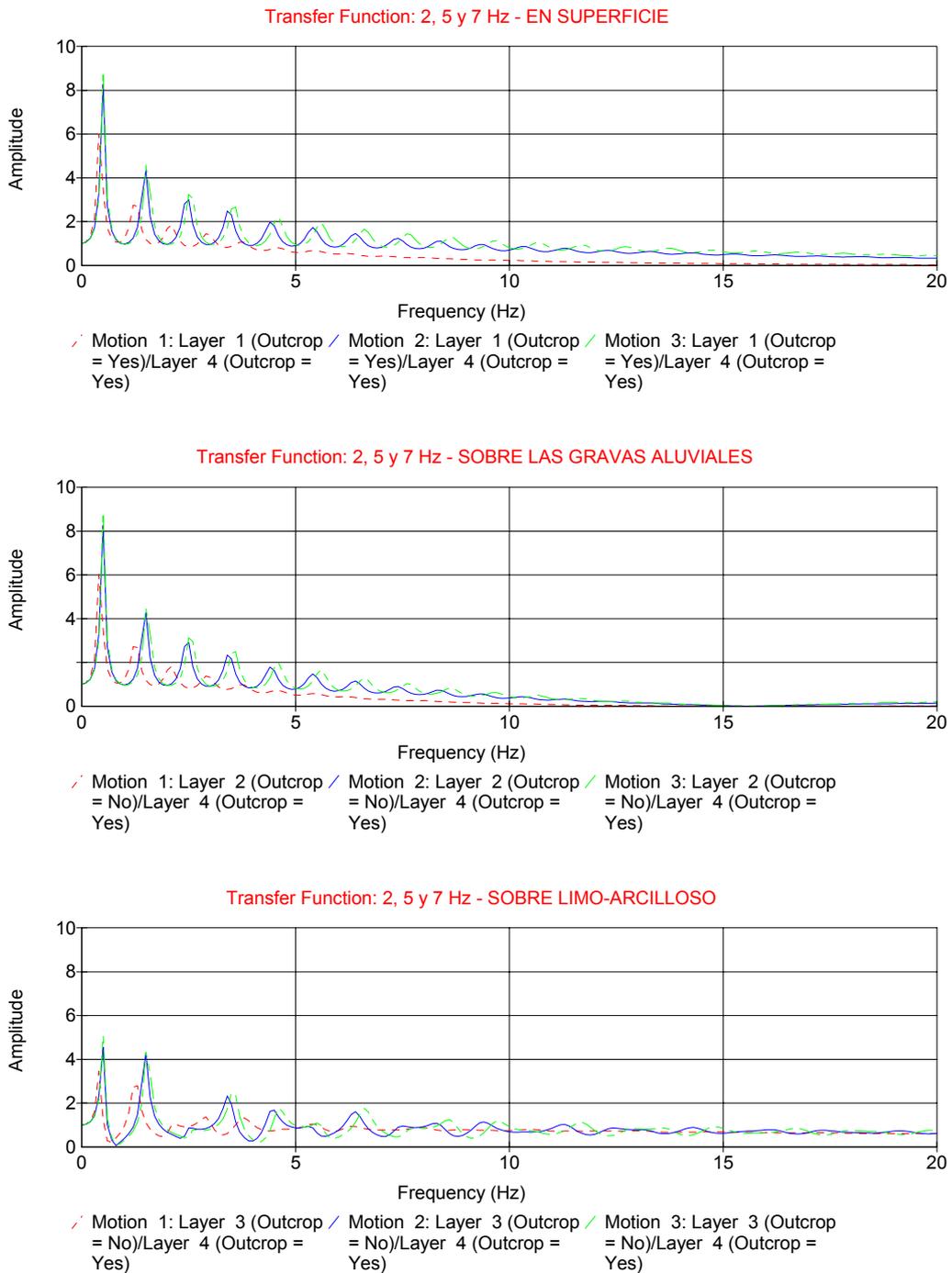


Figura 5.30. Funciones de transferencia en superficie y sitios de interés del perfil 1.

En la tabla 5.5 se muestra un resumen de los resultados obtenidos, a partir de la cual se realizan las siguientes anotaciones:

PERFIL No.	SEÑAL DE ENTRADA	Max PGA (g)	DURACIÓN TRIFUNAC (s)	INT. ESPECTRO DE RESP.(g ²)	FREC. FUNDAMENTAL (Hz)	AMPLITUD PICO
1	2 Hz	0.086	1.71	0.548	0.41	6.06
	5 Hz	0.080	1.19	0.111	0.51	8.25
	7 Hz	0.074	1.07	0.058	0.51	8.76
2	2 Hz	0.113	2.86	0.948	0.90	8.35
	5 Hz	0.107	1.48	0.160	1.09	9.38
	7 Hz	0.101	1.39	0.077	1.09	9.29
3	2 Hz	0.113	3.89	0.741	0.51	7.63
	5 Hz	0.097	1.87	0.130	0.60	7.59
	7 Hz	0.090	1.77	0.067	0.61	8.56
4	2 Hz	0.104	0.40	0.444	6.47	3.96
	5 Hz	0.168	0.23	0.185	6.08	3.96
	7 Hz	0.160	0.21	0.109	6.41	4.08
5	2 Hz	0.112	2.61	0.867	0.70	8.15
	5 Hz	0.101	2.10	0.138	0.70	7.67
	7 Hz	0.097	1.45	0.071	0.70	6.97

Tabla 5.5. Resultados obtenidos en superficie de aplicar ProShake a los 5 perfiles estratigráficos de la zona en estudio.

- ✓ El pulso de Ricker de entrada con frecuencia de 5 Hz tiene una aceleración máxima de 0.07g. Es en el perfil 4 donde se presenta un mayor aumento de la aceleración con un valor máximo de 0.168g lo que significa un aumento alrededor de 2.4 veces. La frecuencia fundamental de este perfil tiene un valor de 6 Hz aproximadamente, siendo ésta cercana a la de la señal de entrada.
- ✓ La duración Trifunac (1975) se define como el intervalo de tiempo entre los puntos para los cuales se ha liberado del 5% al 95% de la energía. Numéricamente, corresponde al tiempo comprendido entre el 5% y el 95% del diagrama de Husid, que muestra como está distribuida la energía de un movimiento. Matemáticamente, es un gráfico de la aceleración al cuadrado normalizada y acumulada vs el tiempo:

$$H(t) = \frac{\int_0^t a(t)^2 dt}{\int_0^\infty a(t)^2 dt} \quad (5.32)$$

Se observa que para cada perfil, esta duración disminuye al aumentar la frecuencia del pulso de Ricker de entrada.

- ✓ La intensidad de espectro de respuesta, se define como:

$$SI(\xi) = \int_{0.1}^{2.5} PSV(\xi) dT \quad (5.33)$$

Este parámetro caracteriza el contenido frecuencial y la amplitud del espectro de respuesta en pseudo velocidad (PSV) entre 10 Hz y 0.4 Hz (0.1s – 2.5s de período) para un 5% de amortiguamiento, rango de frecuencia de máximo interés en el campo de la ingeniería sísmica. En general para todos los perfiles la intensidad de espectro de respuesta disminuye a medida que aumenta la frecuencia del pulso de Ricker de entrada. El mayor valor se obtiene en el perfil 2 para la frecuencia de 2 Hz del pulso de Ricker ya que es en este perfil donde la frecuencia fundamental de la función de transferencia (1 Hz) se aproxima más a la del pulso de entrada.

- ✓ En el perfil 4, la frecuencia fundamental se obtiene en torno a 6 Hz, para los pulsos de Ricker de 5 y 7 Hz se obtiene una intensidad de espectro de respuesta superior a los otros perfiles donde la frecuencia fundamental está entre 0.5 y 1 Hz.
- ✓ Referente a la frecuencia fundamental y amplitud, a partir de la función de transferencia obtenidas en cada perfil y analizando las respectivas frecuencias fundamentales se obtiene 2 posibles zonas:
 - **Zona 1:** Con frecuencia predominante entre 0.5 y 1 Hz con amplitud pico entre 6 y 9 que corresponde a los perfiles estratigráficos 1, 2, 3 y 5.
 - **Zona 2:** Con frecuencia predominante en torno a 6 Hz con amplitud pico cercana a 4 que corresponde al perfil estratigráfico 4. El valor máximo de aceleración se amplifica un factor de 2.

5.2.4.2. Resultados obtenidos de la aplicación del programa ProShake con acelerogramas adaptados a la zona de estudio

Del estudio de peligrosidad sísmica realizado por el ICC y GEOTER (Secanell et al., 2002) a escala de todo el Pirineo, se ha tomado el espectro de respuesta correspondiente a Andorra para un período de retorno de 475 años y un amortiguamiento del 5% (ver figura 5.31) Este espectro hace parte básica para el presente análisis de sismicidad.

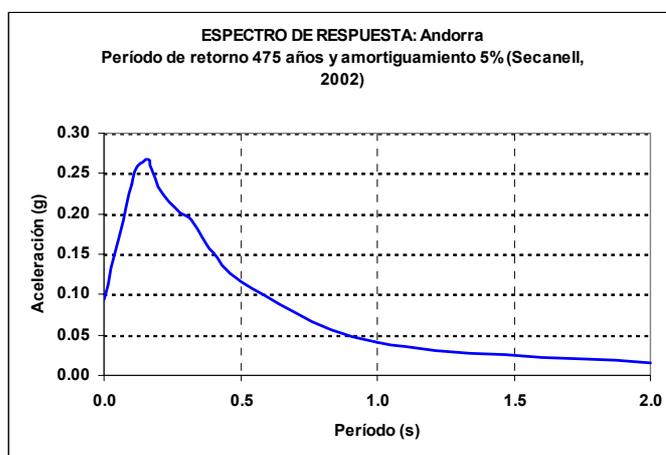


Figura 5.31. Espectro de respuesta correspondiente a Andorra (Secanell et al., 2002)

Posteriormente y teniendo como referencia el espectro anotado, se realizó una selección de espectros de respuesta a partir de la base de datos de movimientos sísmicos europeos (European Strong-Motion Database, 2000) para un período de registro comprendido entre 1971 y 1999.

La selección de los espectros se hizo teniendo en cuenta que sus puntos estén dentro de una banda de confianza de $\pm 20\%$ del espectro adoptado para Andorra. Como resultado de esta selección se obtuvieron 3 espectros, cuyos acelerogramas serán, junto con los 5 perfiles geotécnicos ya descritos, los datos de entrada al programa ProShake para su análisis. Las curvas de módulos de corte normalizado y el factor de amortiguamiento para cada material de cada uno de los perfiles, serán los mismos que los usados en el análisis con pulsos de Ricker. (apartado 5.2.4.1).

La información general de los sismos seleccionados se indica en la tabla 5.6 y los espectros de respuesta en aceleración incluyendo el correspondiente a Andorra, se muestran en la figura 5.32.

No	Sismo corregido	Año	M_L	$A_{m\acute{a}x}$ (m/s ²)	Componente
1	0207va	1979	4.3	1.174	E-W
3	0428za	1988	5.3	0.747	VERT.
4	0549ya	1992	5.5	0.801	TRAN.

Tabla 5.6. Información general de los sismos seleccionados para la zona en estudio

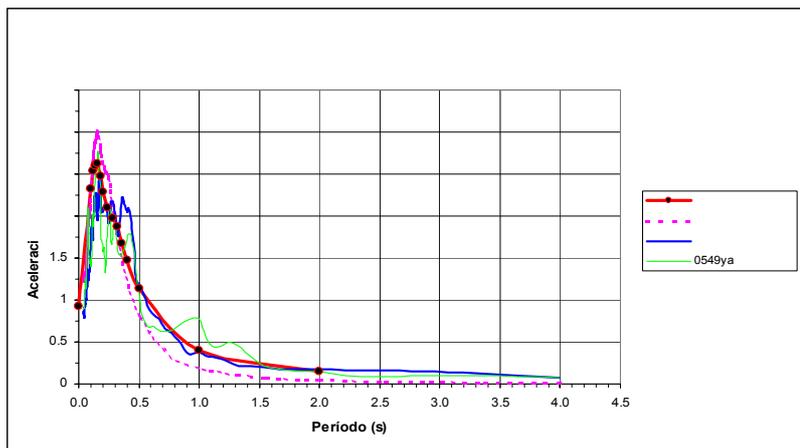


Figura 5.32. Espectros de respuesta seleccionados incluyendo el asociado a Andorra según estudio ICC, 2002.

Una vez obtenidos los resultados de la aplicación del programa, se seleccionaron, para los 5 perfiles estratigráficos, aquellos parámetros de interés para el presente estudio que se anotan a continuación:

- ✓ Registro de aceleraciones en el basamento rocoso y en la parte superior de los estratos.

Estimación de efectos locales en la zona de estudio

- ✓ Espectros de respuesta en roca y en superficie.
- ✓ Funciones de transferencia en superficie.
- ✓ De los espectros de respuesta obtenidos en superficie en cada perfil, se obtuvo un espectro de respuesta promedio.
- ✓ Relaciones espectrales entre el espectro promedio de cada perfil estratigráfico y el espectro en roca (Secanell et al., 2002).
- ✓ De los resultados de aceleraciones en roca y superficie, espectros de respuesta en roca y superficie se muestra en la figura 5.33 un ejemplo de el acelerograma 0207ya para el perfil 2, los restantes se muestran en el anexo 9.2. Las funciones de transferencia se indican en la figura 5.34. Los espectros de respuesta promedios con sus correspondientes seleccionados para cada perfil estratigráfico se indican en la figura 5.35 y las relaciones espectrales entre el promedio de cada perfil estratigráfico con respecto al espectro adoptado en roca para Andorra (Secanell et al., 2002) en la figura 5.36.

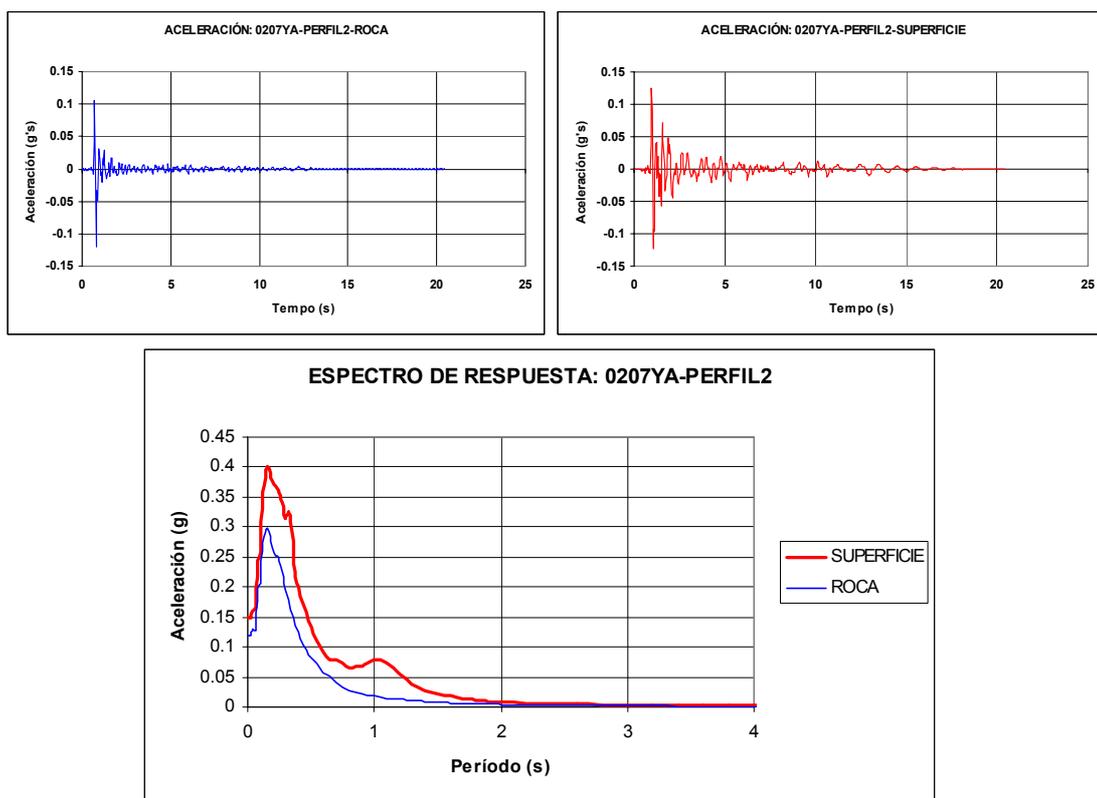


Figura 5.33. Resultado obtenido de la aplicación del programa ProShake para el acelerograma 0207ya y el perfil 2 de la zona en estudio.

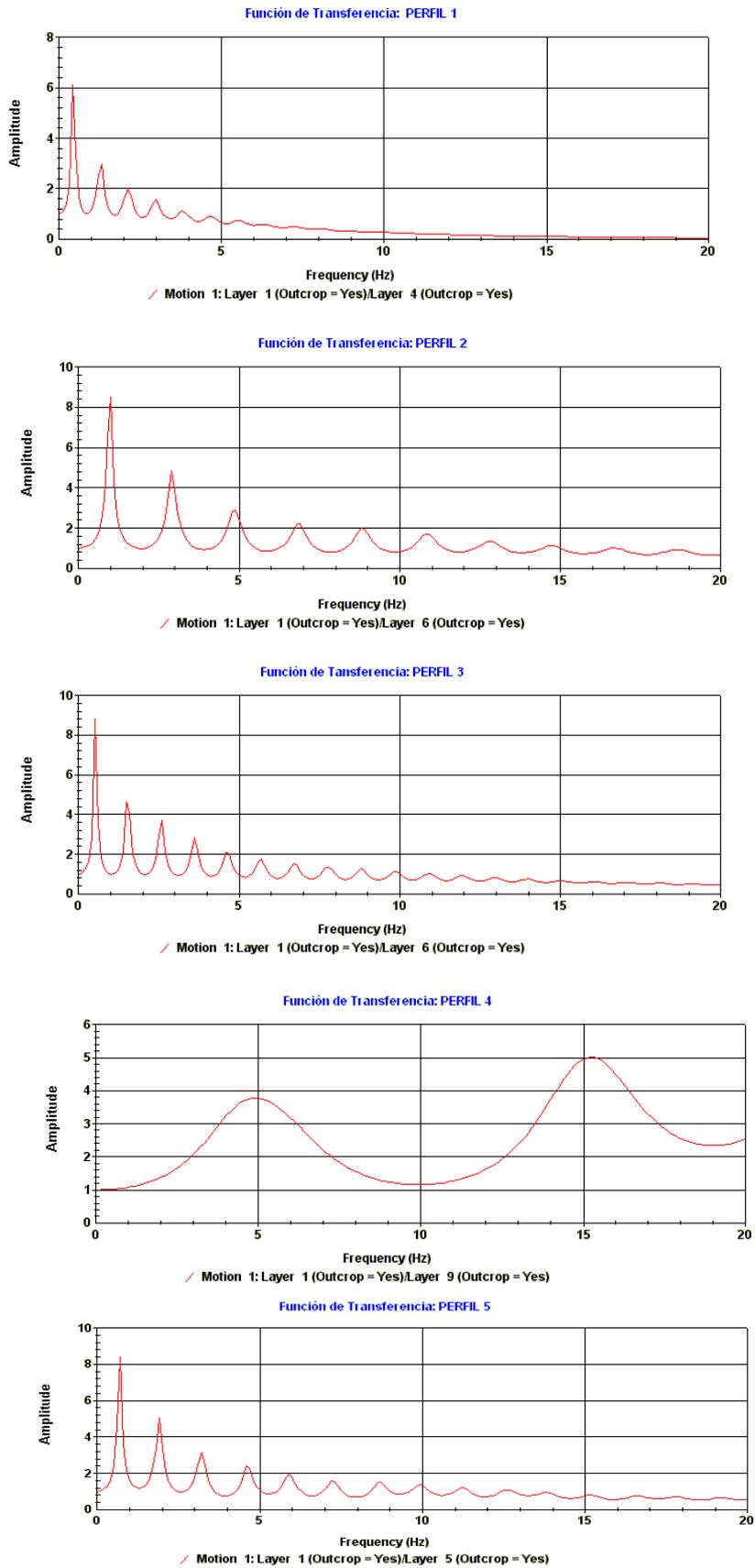


Figura 5.34. Funciones de transferencia para los 5 perfiles de la zona en estudio.

Estimación de efectos locales en la zona de estudio

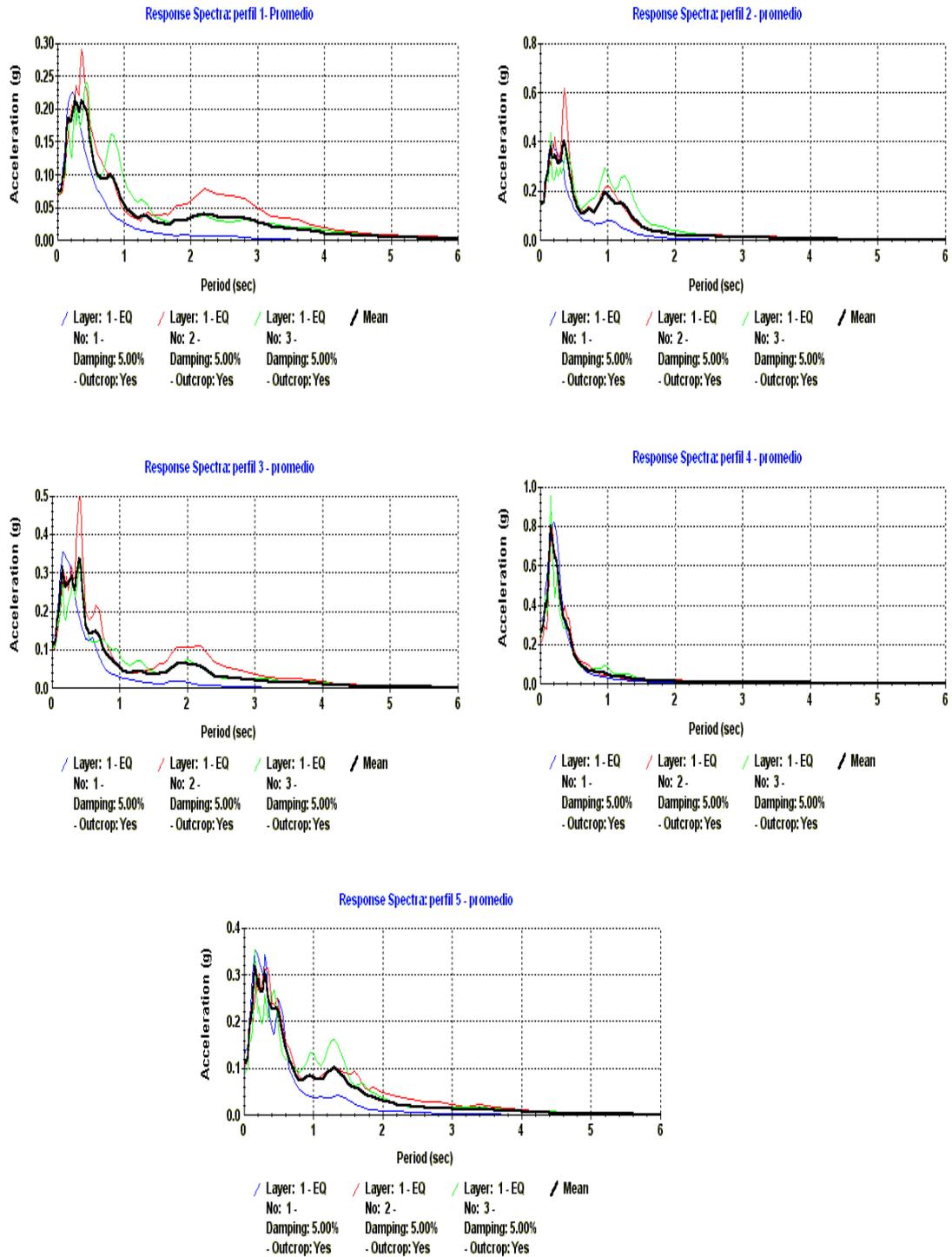


Figura 5.35. Espectros de respuesta promedio con sus correspondientes seleccionados.

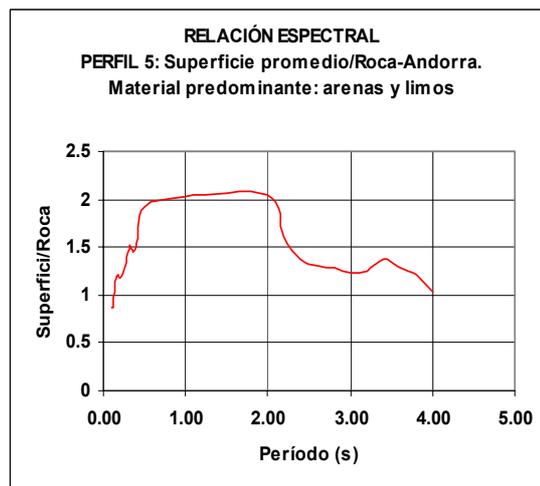
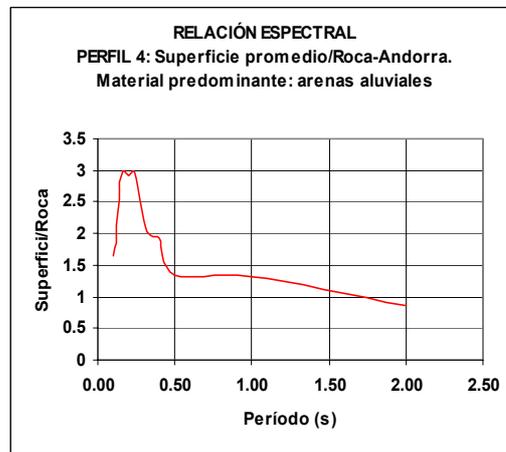
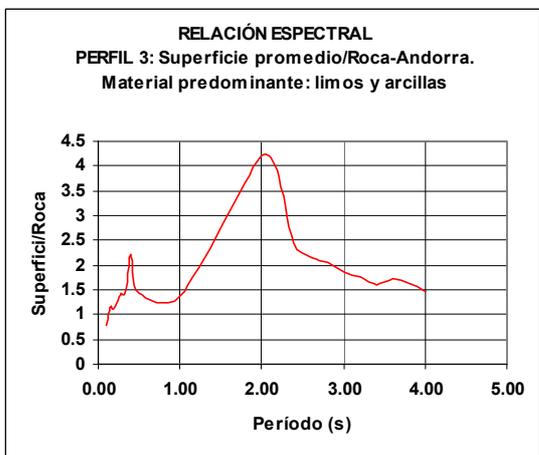
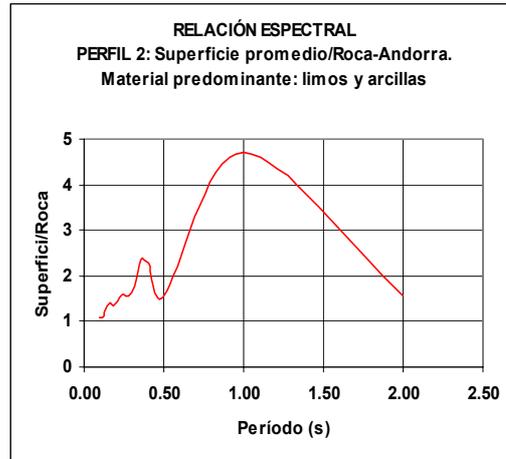
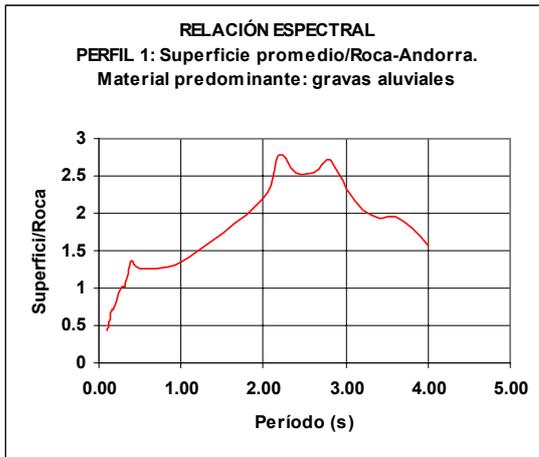


Figura 5.36. Relaciones espectrales promedios de cada uno de los perfiles estratigráficos con su material predominante respecto al espectro en roca conjuntamente al espectro probabilístico del análisis de Secanell et al., 2002.

Estimación de efectos locales en la zona de estudio

En la tabla 5.6 se indican algunos los parámetros obtenidos en superficie al aplicar el programa ProShake a los 5 perfiles estratigráficos.

PERFIL No.	SEÑAL DE ENTRADA	Máx PGA (g)	DURACIÓN TRIFUNAC (s)	INT. ESPECTRO DE RESP.(g ²)	FRECUENCIA FUNDAMENTAL (Hz)	AMPLITUD PICO	INTENSIDAD DE ARIAS (I _a)
1	0207ya	0.082	4.45	0.288	0.41	6.15	0.062
	0428za	0.069	23.22	0.655	0.41	7.30	0.266
	0549ya	0.071	12.68	0.680	0.41	6.27	0.229
2	0207ya	0.149	4.49	0.518	1.00	8.56	0.208
	0428za	0.149	14.96	1.096	0.92	7.51	0.832
	0549ya	0.144	10.69	1.487	0.90	8.72	0.757
3	0207ya	0.131	5.00	0.404	0.51	8.81	0.168
	0428za	0.099	18.25	0.982	0.51	8.97	0.691
	0549ya	0.107	14.88	0.821	0.51	8.56	0.478
4	0207ya	0.321	1.41	0.474	4.89	3.80	0.537
	0428za	0.217	12.68	0.586	5.73	3.86	1.278
	0549ya	0.245	8.38	0.623	5.76	3.90	1.502
5	0207ya	0.135	3.49	0.516	0.70	8.46	0.207
	0428za	0.106	22.35	0.972	0.70	7.76	0.462
	0549ya	0.090	12.85	1.043	0.73	6.29	0.448

Tabla 5.6. Parámetros sísmicos obtenidos en superficie al aplicar Proshake a los 5 perfiles estratigráficos de la zona de estudio.

En la tabla 5.7 se observan algunos parámetros sísmicos en el basamento rocoso, que sirven de orientación para el análisis.

SEÑAL DE ENTRADA	Máx PGA (g)	DURACIÓN TRIFUNAC (s)	INTENSIDAD DE ARIAS (I _a)
0207ya	0.1197	1.93	0.076
0428za	0.076	14.08	0.230
0549ya	0.082	9.08	0.231

Tabla 5.7. Principales parámetros sísmicos en el basamento rocoso.

Como resultado de éste análisis se pueden citar los siguientes comentarios:

- ✓ Observando las tres señales de entrada con aceleraciones máximas en superficie y en roca indicadas en las tablas 5.6 y 5.7 respectivamente; es en el perfil 4 donde se presenta un factor de amplificación de aceleración con un valor máximo de 0.32g, lo que significa una amplificación de alrededor de 3 veces. La frecuencia fundamental de éste perfil tiene en promedio un valor de 5.5 Hz.

- ✓ La duración de Trifunac, en todas las señales, disminuye al aumentar la frecuencia fundamental y se incrementa al aumentar la amplitud pico.
- ✓ Observando las señales temporales superficiales de los cinco perfiles estratigráficos, se puede apreciar que se presenta un incremento importante de la duración de la señal con respecto a la duración del registro en roca.
- ✓ El mayor valor de la intensidad del espectro de respuesta se obtiene en el perfil 2, donde la frecuencia fundamental de la función de transferencia es de 0.9 Hz. Es importante anotar que para la interpretación de la intensidad espectral hay que señalar que el espectro de respuesta de cada período de vibración se puede asociar a una altura determinada de un edificio, por lo que se puede determinar que vibraciones pueden hacer entrar en resonancia a una estructura en especial. Por lo tanto, la intensidad espectral se utiliza como un parámetro que mide el daño medio que sufren las estructuras. (Carreño, 1999).
- ✓ Es importante resaltar que los cambios fundamentales que sufre la señal al ser filtrada a través del suelo dependen de las características físicas, mecánicas y dinámicas de los materiales, así los perfiles estratigráficos 2, 3 y 5 donde predominan los limos y arcillas, tienen un comportamiento espectral parecido y no así el perfil estratigráfico 1 y 4 donde predominan las gravas y arenas respectivamente. Esto permite concluir, que en una buena medida, cuanto mejor sea el conocimiento de los parámetros característicos del suelo, más se ajustará un modelo a la realidad.
- ✓ La intensidad de Arias obtenida en superficie, se aumenta con respecto a la del basamento rocoso. Para los perfiles 2, 3 y 5 el aumento está entre 2 y 3 veces, mientras que para el perfil 4 está alrededor de 6 veces. En general la Intensidad de Arias se aumenta en la medida que se aumenta la aceleración en superficie. En el perfil 1 se observa que no es significativo aumento debido a la poca variación del pico de aceleración en superficie con respecto al valor pico de la aceleración en roca.
- ✓ Referente a la frecuencia fundamental y amplitud, a partir de las funciones de transferencia obtenidas en cada perfil y analizando las respectivas frecuencias fundamentales se obtienen tres zonas:

Zona 1: con frecuencia predominante entre 0.5 y 1.0 Hz con amplitud pico entre 6 y 9 que corresponde a los perfiles estratigráficos 1, 2, 3 y 5. La amplificación de la aceleración máxima está entorno a 1.5 veces.

Zona 2: con frecuencia predominante entre 4.5 y 6.0 Hz con amplitud pico cercano a 4 que corresponde al perfil estratigráfico 4. La amplificación de la aceleración máxima está en torno a 3 veces.
- ✓ Comparando con los resultados de los pulsos de Ricker con el espectro a los resultados con el espectro adoptado (Secanell et al., 2002), se obtienen las mismas zonas y caracterizadas tanto en frecuencias predominantes como en

Estimación de efectos locales en la zona de estudio

amplitudes pico similares. Las aceleraciones máximas se amplifican un poco más con el espectro de Andorra, llegando a amplificarse hasta 3 veces y con los pulsos de Ricker entorno a 2.4 veces.

- ✓ Las frecuencias fundamentales de las funciones de transferencia coinciden con las obtenidas en las relaciones espectrales entre los espectros promedios de cada perfil con respecto al espectro adoptado para Andorra, mientras que en los pulsos de Ricker .

