Programme opérationnel Interreg IVA

France-Espagne-Andorre 2007 – 2013



<u>d'Info</u>

## SISPYR

Sistema de Información Sísmica del Pirineo

Système d'Information Sismique des Pyrénées

Sistema d'Informació Sísmica dels Pirineus

Microzonació sísmica de nivell avançat a l'àrea urbana de Girona.



## Índex

1	Res	um executiu	2
2	El p	rojecte SISPYR	4
3	Zon	a d'estudi	6
	3.1	Marc geogràfic de l'àrea de Girona	6
	3.2	Marc geològic	7
	3.3	Perillositat sísmica de la zona d'estudi	11
	3.4	Estudis previs	12
4	Treb	oall realitzat	15
	4.1	Treball de camp i processat	15
	4.2	Modelització de la resposta sísmica del sòl (ProShake 1D)	25
5	Res	ultats i interpretació	28
	5.1	Microzonació sísmica en termes de f <sub>o</sub>	28
	5.2	Funció de transferència del sòl	29
	5.3	Microzonació sísmica en termes de l'espectre de resposta (SA)	31
	5.4	Microzonació sísmica en termes de $\Delta I$	36
6	Con	clusions	39
7	Refe	erències	41
8	Ann	ex 1: Descripció dels mètodes geofísics utilitzats	43
	8.1	A-1. Tècnica del quocient espectral H/V de soroll sísmic	43
	8.2	A-2. Tècnica de mesura de soroll sísmic en array	45
	8.3	A-3 Tècnica sísmica d'ones superficials (MASW)	49
9	Ann	ex 2: Valors de la freqüència fonamental del sòl	52
10	Ann	ex 3: Perfils verticals de la velocitat de propagació de les ones de cisalla	57

## **1** Resum executiu

El treball que es presenta s'ha dut a terme a la Unitat de Tècniques Geofísiques de l'IGC com a suport al projecte SISPYR (Sistema d'Informació Sísmica dels Pirineus). El projecte SISPYR està finançat per un programa europeu Interreg IV-A 2007-2013 entre França-España-Andorra. Hi participen l'IGC (liderant el projecte), l'OMP (Observatoire Midi-Pyrenées) i el BRGM (Bureau de Récherches Geologiques et Minières) de França, l'IGN (Instituto Geográfico Nacional) i la UPC (Unitat Politècnica de Catalunya).

Un dels objectius del projecte és la avaluació del risc sísmic a la zona Pirinenca, a aquest efecte, s'ha plantejat una avaluació de la perillositat sísmica a escala local en dues zones pilot: la Val d'Aran i la ciutat de Girona. L'objectiu és analitzar la amplificació del moviment sísmic quan les ones es propaguen per sòls composats per materials tous i/o poc consolidats.

Es presenta l'estudi dut a terme per a la microzonació sísmica de nivell avançat de la ciutat de Girona. La metodologia utilitzada ha consistit en la combinació de tècniques experimentals i de simulació numèrica.

Les tècniques geofísiques basades en el registre de soroll sísmic ambiental en llocs puntuals i en arrays, junt amb el coneixement previ de la geologia i geotècnia de la ciutat han permès fer una microzonació en funció de la freqüència fonamental de la capa de sols, estimar la fondària del basament rocós i obtenir models de velocitat de propagació d'ones de cisalla en diferents tipus de sediments. Aquests models de velocitat s'han utilitzat per a definir columnes de sòl representatives i modelitzar la seva resposta sísmica.

Els principal resultat d'aquest estudi és el mapa de microzonació sísmica en termes de l'increment d'intensitat macrosísmica que s'aplica a la intensitat en roca per a tenir en compte l'amplificació del moviment sísmic per efecte de sòl.

També s'ha fet una classificació dels tipus de sòl de la ciutat de Girona segons l'Eurocodi EC8 i es presenta una proposta d'espectres SA representatius de les diferents zones identificades.

2

Són autors d'aquest informe Albert Macau, Beatriz Benjumea, Sara Figueras i Andreu Martí. Per a la realització dels treballs de camp s'ha comptat amb la col·laboració de Anna Gabàs, Fabian Bellmunt, Manuel Franceschelli, Ricard Puig, Miquel Peix, Oriol Tomasa i Yeimy Pinto.

## **2** El projecte SISPYR

El projecte SISPYR (Sistema d' Informació Sísmica dels Pirineus) forma part del programa europeu Interreg IVA 2007-2013 França-Espanya-Andorra. Està liderat per l'IGC (Institut Geològic de Catalunya) amb la participació de l'OMP (Observatoire Midi-Pyrénées), el BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) de França, l'IGN (Instituto Geográfico Nacional) i la UPC (Universitat Politècnica de Catalunya) de Espanya. El projecte sorgeix a partir de la necessitat de millorar la cobertura de la xarxa d'estacions sísmiques ubicada en els Pirineus i garantir la homogeneïtat en la qualitat de la informació. L'objectiu dels treballs relacionats amb el temps real consisteix en optimitzar els mitjans científics per a la gestió de crisis sísmiques a la zona pirinenca i millorar la cobertura de les xarxes sísmiques. Un altre objectiu del projecte és la caracterització del risc sísmic a les poblacions situades a la cadena pirenaica de França, Espanya i Andorra. S'han escollit dues zones pilot per a realitzar-hi estudis de risc sísmic a escala de detall: la Val d'Aran i Girona.

El projecte es divideix en 7 accions:

Acció 0: Organització general del programa. Tenir en compte les accions necessàries per a una bona execució tècnica i administrativa del programa des de la fase de muntatge, passant per la fase de realització, fins a l'avaluació.

Acció 1: Millora de la xarxa d'observació sísmica dels Pirineus en temps real: actualització d'equips i de noves instal·lacions.

Acció 2: Intercanvi de dades entre els participants del projecte. Intercanvi de formes d'ona de les estacions sísmiques i acceleromètriques per a la detecció d'events en temps real i per al processat automàtic dels events detectats en temps quasi-real.

Acció 3: Coneixement del fenomen sísmic i desenvolupament metodològic. Estudi de la font sísmica i obtenció del tensor de moment sísmic de forma automàtica així com l'avaluació del risc sísmic i la llei d'atenuació sísmica que caracteritza la zona.

Acció 4: Prevenció del risc sísmic. El treball que es presenta es desenvolupa dins d'aquesta acció amb l'objectiu de complir un dels objectius principals del projecte que està relacionat amb la prevenció del risc sísmic. Tots els mapes obtinguts serviran per fer una comparació amb els efectes observats en sismes reals. S'han seleccionat dues zones pilot per a les quals es proposaran escenaris de danys a partir de l'avaluació de la perillositat local i la vulnerabilitat sísmica dels edificis existents, tenint en compte els

coneixements adquirits en projectes anteriors (RISK-UE e ISARD). Aquestes zones són la Val d'Aran i l'àrea de Girona.

Acció 5: Prevenció del risc – viabilitat d'un Sistema d'alerta ràpida EWS (Early Warning System). Amb aquesta acció es pretén millorar la gestió de la crisi analitzant la viabilitat d'un sistema d'alerta sísmica precoç basada en l'aprofitament de la xarxa de vigilància sísmica existent.

Acció 6: Utilització compartida i difusió de la informació referent al projecte.

## **3** Zona d'estudi

## 3.1 Marc geogràfic de l'àrea de Girona

L'àrea d'estudi (Girona-Salt) es troba al nord-est de la costa mediterrània de la Península Ibèrica. Limita al nord amb Sant Julià de Ramis i Sarrià de Ter, a l'est amb Celrà, sud-est amb Quart, al sud-oest amb Fornells de la Selva, Vilablareix i Salt, i a l'oest amb Sant Gregori. La travessen els rius Ter, Güell, Galligans i Onyar i està a una alçada de 75m sobre el nivell del mar.

En termes generals, Girona comprèn un territori pla (el pla de Girona) que correspon als plans fluvials dels rius Ter i Onyar al seu pas per l'extrem nord de la depressió de la Selva. Aquest espai queda delimitat a l'est i a l'oest per dos sistemes muntanyosos d'alçades moderades: les Gavarres i les Guillaries, respectivament. Al nord, trobem un conjunt de turons que formen part de la serralada Transversal (Figura 1). L'àrea d'estudi ocupa una extensió d'uns 39 km2 i les dades del cens de l'any 2011 la població és d'uns 97000 habitants.



Figura 1. Mapa topogràfic de Girona (Extret de la pàgina web del Institut Cartogràfic de Catalunya, www.icc.cat, 03-2012).

## 3.2 Marc geològic

El Pla de Girona està localitzat a la zona de contacte entre quatre unitats geològiques principals: el massís de les Guillaries, el massís de les Gavarres, la serralada Transversal i la depressió de la Selva (Figura 1). El massís de les Guillaries, unitat que conforma l'extrem nord de la serralada Prelitoral catalana, pertany als relleus muntanyosos de roques paleozoiques situades al sector oest de la zona estudiada. Principalment afloren

esquistos amb intercalacions de marbres i quarsites, i gneis datats del Cambro-Ordovicià i del Ordovícià superior. Localment aquests materials es troben afectats pel metamorfisme de contacte generat per l'emplaçament de masses granitoides tardihercinianes, les quals afloren extensament a la part sud del massís. Les muntanyes que delimiten el pla de Girona pel costat est pertanyen al massís de les Gavarres. En aquesta zona afloren roques paleozoiques, fonamentalment esquists amb intercalacions de marbres i quarsites del Cambro-Ordovicià i l'Ordovícià superior, així com petits retalls de pissarres i calcaries del Devonià. Els granitoides tardihercinians afloren a la part central del massís i ocupen bona part de la seva meitat meridional. El sistema Transversal pertany al conjunt d'elevacions suaus que s'interposen enmig dels massissos anteriors, el qual s'estén des del marge oest de les Gavarres, a banda i banda del riu Ter a l'alçada de la ciutat de Girona. S'observen afloraments de sediments del Paleògen de diferent naturalesa (lutites i conglomerats, calcàries, margues i gresos). La depressió de la Selva queda representada en aquesta zona pels reblerts de poca elevació que delimiten la conca de Girona al sud, formada per graves, sorres i abundant material lutític. Aquests mateixos materials són els que recobreixen els reblerts de roques paleògenes de la serralada transversal al nord del riu Ter, constituint una zona de transició entre ambdues unitats fisiogràfiques. La depressió de la Selva forma part del conjunt de grabens que presenten un enfonsament com a conseqüència de la tectònica distensiva que va afectar el marge occidental del Mediterrani des del començaments del Neogen i que dóna lloc a un conjunt de fosses que s'estén des del mar, al Nord de Catalunya, fins a la costa mediterrània meridional de la península Ibèrica. En aquesta àrea l'estructura està determinada pel moviment d'un conjunt de falles alineades NW-SE, responsable de l'enfonsament de la depressió de la Selva respecte al massís de les Guilleries. El pla de Girona, pròpiament dit, es troba emplaçat, parlant en termes geològics, sobre materials d'edat quaternària (Figura 2), estant la major part d'aquests sediments relacionats amb la dinàmica fluvial del riu Ter. En general corresponen a nivells de terrasses formades per sediments de naturalesa detrítica: graves amb matriu sorrenca, recobertes per un dipòsit lutític d'inundació. La figura 2 mostra el mapa geològic de Girona a escala 1:25.000 obtingut a partir de la unió del mapa geològic corresponent a la zona de Salt (Salt 333-2-1 (76-25)) amb el seu contigu, el mapa corresponent a la zona de Girona (Girona 334-1-1 (77-25), tots dos extrets de la pàgina web de l'Institut geològic de Catalunya (IGC, 2012).



480000 481000 482000 483000 484000 485000 486000 487000 488000 489000 490000 Figura 2. Mapa geològic de Girona, escala 1:25.000 (Extret de la pàgina web de l'Institut Geològic de Catalunya, www.igc.cat, 03-2012).

La figura 3 mostra la llegenda del mapa geològic de Girona. Es pot observar que la litologia de la zona d'estudi es caracteritza per la presència de graves heteromètriques a la base, que passen progresivament cap a la part superior a llims argilosos amb esporàdics nivells centimètrics de còdols rodats. La composició dels còdols és variada i es destaquen els basalts presents en el terciari. A la conca del Daró predominen les sorres brutes amb microconglomerats de roques paleozoiques. Aquesta composició es troba entre 7 i 12 m per sobre de la cota del terciari. El gruix màxim és de 8 m. S'interpreten com a dipòsits fluvials.

#### HOLOCÈ

Qac

Dipòsits al·luvials col·luvials. Graves amb matriu sorrenca i argilosa. Holocè.



Terrassa del Ter i afluents. Es situa entre 2 i 3 m sobre el nivell del riu. Holocè.



Llit actual, plana d'inundació ordinària i terrassa més baixa (0-2 m). Holocè recent

	PLEISTOCÈ - HOLOCÈ
Qvc-	Basanites constituïdes de colades. Plistocè - Holocè.
Qcd1	Ventall al·luvial correlacionable amb la terrassa 1. Arenas llim argiloses amb graves. Plistocè supHolocè.
Qtd	Lutites i graves. Terrassa fluvial degradada. Plistocè superior -Holocè.
T_Qt2	Terrassa del Ter i afluents. Es situa entre 5 i 10 m sobre el nivell del riu. Plistocè terminal - Holocè basal.
	PLEISTOCÈ
Qc	Crostes de calcàries. Plistocè.
Qg	Peu de muntanya (fàcies similars a les dels ventalls fluvials). Plistocè.
T_Qt	Terrassa de Ter i afluents. Es situa entre 35 i 40 m sobre el nivell del riu. Plistocè.
Qv2	Blocs, graves, sorres i argiles. Ventall fluvial correlacionable amb les terrasses fluvials Qt2. Plistocè superior.
PEcga	Conglomerats, argiles. Formació Bracons i Rupit. Lutecià inf Bartonià inf.
PEcn	Calcàries amb nummulits i calcàries amb gresos. Lutecià inferior.
Pegc	Gresos i conglomerats. Cuisià

Figura 3. Llegenda del mapa geològic de Girona (Extret de la pàgina web de l'Institut Geològic de Catalunya, www.igc.cat, 05-2012).

A partir dels resultats obtinguts en estudis previs realitzats per projecte de l'IGC "Geologia de zones urbanes de Catalunya", basat en la realització de diversos perfils geofísics i l'homogeneïtzació d'una base de dades de sondejos geotècnics i considerant el conjunt

de materials geològics que constitueixen el sòl i el subsòl del municipi de Girona, es poden classificar aquests mateixos "sòls" en cinc grans grups:

- a. Sediments del quaternari.
- b. Materials volcànics pliocens o quaternaris.
- c. Sediments detrítics neògens.
- d. Roques sedimentàries paleògenes.
- e. Roques paleozoiques.

## 3.3 Perillositat sísmica de la zona d'estudi

En el projecte ISARD (Interreg IIIA França – Espanya, 2004 – 2008) es van dur a terme estudis de perillositat sísmica a la zona pirinenca tenint en compte diferents escenaris deterministes i probabilistes. Com a resultat final es van obtenir mapes de perillositat en termes d'intensitats i d'acceleracions màximes per un període de retorn de 475 anys i proposar espectres de resposta representatius que es van comparar amb els de la norma de construcció sismoresistent espanyola (NCSE02) i l'Eurocodi 8 (EC-8).

A la figura 4 es presenta el mapa de perillositat sísmica per Catalunya en termes de acceleracions màximes (Secanell, 2008). La sismicitat de la zona és moderada. Considerant un període de retorn de 475 anys, a l'àrea de Girona se li assigna una acceleració màxima de 75-100 cm/s<sup>2</sup>, aquesta es relaciona amb valors d'intensitat macrosísmica en roca de VI-VII.

Els resultats d'aquest estudi de perillositat s'han tingut en compte a l'hora de buscar un registre de terratrèmol per a ser utilitzat com a registre d'entrada en roca en els estudis de simulació numèrica de la resposta sísmica del sòl, que es presenten a l'apartat 4.2. A Susagna i Goula, (2013) es presenta un informe del procés de selecció del registre en roca.



Figura 4. Mapa de la perillositat sísmica per Catalunya en termes de acceleracions màximes (PGA) per un període de retorn de 475 anys.

### 3.4 Estudis previs

Per al treball de microzonació sísmica de l'àrea de Girona que es presenta en aquest informe es disposava de la següent informació resultant d'estudis previs: Classificació dels sòls de Girona segons el coeficient C (Soler et al., 2012).

Per a aquest estudi es va considerar la informació de 1533 sondejos geotècnics dins l'àrea de Girona, 5082 assajos in situ, 376 assajos de laboratori. Es van definir 5721 nivells litològics a partir dels quals es van identificar 25 unitats litològiques.

La metodologia seguida per a caracteritzar el coeficient C va ser la següent:

- Per a cada unitat litològica es va determinar el coeficient C estadísticament considerant la informació disponible, tant in situ com de laboratori.
- Per a cada sondeig es va assignar una classe de sol a les diferents unitats litològiques considerant criteris basats en càlculs ponderats tenint en compte valors de C reals i estadístics.
- Càlcul del coeficient C<sub>30</sub> en 1327 sondejos.

A la figura 5 es mostra el mapa de microzonació sísmica de nivell bàsic basada en el coeficient C.



Figura 5. Microzonació de la ciutat de Girona en termes del coeficient C.

S'hi identifiquen dues zones principals, una al centre, sud i oest de la ciutat formada per materials quaternaris al·luvials i detrítics del Neogen amb valors entre 1.3 i 1.6 (sòl dur); i l'altra al nord i est amb predomini d'afloraments del Paleogen i del Paleozoic amb valors del coeficient C entre 1.0 i 1.3 (roca).

## **4** Treball realitzat

El treball s'ha desenvolupat en dues etapes: una experimental que ha consistit en la recollida de dades de camp i el seu processat, i una altra de modelització 1D de la resposta sísmica del sòl utilitzant les dades obtingudes en els treballs de camp per a la definició de les columnes de sol per on propagar el moviment sísmic.

### 4.1 Treball de camp i processat

El treball de camp ha consistit en l'aplicació de tècniques de sísmica passiva consistents en el registre de soroll sísmic ambiental en emplaçaments puntuals (mètode H/V) i en sensors distribuïts en geometria circular (tècnica d'array), també s'han aplicat mètodes sísmics basats en el registre d'ones superficials generades artificialment (mètode MASW). A l'annex 1 s'explica la teoria de cada un d'aquests mètodes i les tècniques de processat. Tot seguit s'exposen els diferents treballs de camp realitzats i els resultats obtinguts amb el processat de les dades.

## 4.1.1 Mètode del quocient espectral H/V de soroll sísmic

S'han fet mesures puntuals de soroll sísmic en uns 100 emplaçaments, el sistema d'adquisició està format per un sismòmetre triaxial Lennartz de 5s i un digitalitzador CityShark (LEAS). A la figura 6 es mostra una fotografia presa durant el registre puntual de soroll sísmic.



Figura 6: Fotografies de diferents emplaçaments on s'ha mesurat el soroll sísmic amb el mètode H/V.

El processat de les dades amb el programa Geopsy ha permès determinar la freqüència fonamental del sòl en tots els emplaçaments de mesura. A la figura 7 es mostren alguns exemples del quocient espectral H/V en funció de la freqüència obtinguts en diferents emplaçaments de la ciutat de Girona. Les figures 7a i 7b mostren, respectivament, un exemple d'un emplaçament amb un valor alt de la freqüència fonamental del sòl (6.5Hz) i un altre amb un valor baix (0.5Hz). La figura 7c mostra un quocient espectral d'un punt sobre roca, no s'aprecia cap pic significatiu ja que no hi ha amplificació. Per últim, a la figura 7d es mostra el resultat del quocient H/V d'una mesura situada sobre les Basanites (nord de la ciutat). Aquest punt té un comportament singular, ja que a altes freqüències (>4Hz) el quocient espectral té valors per sota 1, fet que pot comportar una desamplificació del moviment del sòl, és a dir, una disminució de l'amplitud del moviment del sòl en aquest rang de freqüències. Aquest comportament s'haurà de confirmar utilitzant la simulació numèrica 1D.



Figura 7: Exemples de relacions espectrals H/V obtingudes en diferents emplaçaments de la ciutat de Girona. En color es representen els quocients espectrals per a cada finestra de càlcul, i en negre la mitjana de totes les finestres junt amb les seves bades d'error (en discontinu). Les bandes grises verticals mostren l'error en la posició del pic.

La figura 8 mostra un mapa amb els valors de f<sub>0</sub> obtinguts a la ciutat de Girona. La freqüència fonamental del sòl varia entre 0.4 i 15.6 Hz. A la major part de la ciutat i rodalies, on trobem una conca Neògena de centenars de metres de profunditat, els valors oscil·len entre 0.4 i 0.5 Hz. Els valors alts de la freqüència fonamental es troben a prop dels afloraments rocosos, a l'est i al nord de la ciutat, on s'espera que l'espessor dels sediments tous sigui de l'ordre de desenes de metres. A l'annex 2 es mostra una taula

amb els valors de la freqüència fonamental del sòl obtinguts en els emplaçaments de la ciutat de Girona on s'ha mesurat el soroll sísmic amb el mètode H/V.



482000 482500 483000 483500 484000 484500 485000 485500 486000 486500 487000 487500 488000 Figura 8: Valors de la freqüència fonamental del sòl obtinguts a la ciutat de Girona utilitzant el mètode H/V.

A partir dels valors de la freqüència fonamental del sòl calculats, junt amb els mapes geològics i les observacions sobre el terreny dels afloraments rocosos, s'ha fet un mapa de contorn de la freqüència fonamental del sòl per la ciutat de Girona (figura 9), de manera que es poden veure representades les corbes de nivell de la freqüència i delimitar zones semblants que podran ser útils de cara a la microzonació final. Per generar aquest mapa s'han utilitzat condicions de contorn que permetin representar el relleu real de la topografia local.



Figura 9: Mapa de la ciutat de Girona amb la interpolació de la freqüència fonamental del sòl.

## 4.1.2 Mètode de l'array sísmic

S'han realitzat mesures de soroll sísmic amb la tècnica d'array en 9 emplaçaments (figura 12). A la taula 1 s'indiquen les coordenades UTM del centre d'aquests emplaçaments junt amb el radi d'obertura màxim de cada array.

X <sub>UTM</sub> (m)	Y <sub>UTM</sub> (m)	Radi major (m)
483452	4645570	40
484871	4645733	45
485707	4647472	37
484408	4644898	20
484553	4648864	100
486014	4646367	30
485214	4648700	50
483787	4646527	100
482523	4647973	500
	X <sub>UTM</sub> (m) 483452 484871 485707 484408 484553 486014 485214 483787 482523	XUTM (m)YUTM (m)483452464557048487146457334857074647472484408464489848455346488644860144646367485214464870048378746465274825234647973

Taula 1: Coordenades UTM del sensor central i radi major dels arrays realitzats a la ciutat de Girona.

A la figura 10 es mostra la disposició dels sensors utilitzats en els arrays realitzats a Girona. Els sensors es disposen formant cercles concèntrics al voltant d'un sensor central (S001), de manera que el radi del cercle exterior és el doble del radi del cercle interior. La longitud dels radis de l'array (taula 1) depèn de les dimensions de l'emplaçament on es fan les mesures i de l'espessor esperat de la capa de sediments a estudiar.

Les mesures de soroll sísmic dels arrays 1 a 4 s'han realitzat amb un equip format per 11 sensors Mark L4C 1Hz i un digitalitzador Summit de 48 canals (DMT). A la resta d'arrays s'han utilitzat 6 sismòmetres triaxial Lennartz de 5 segons i digitalitzadors SARA SL06. Aquest darrer equip, sense cables que uneixin els sensors entre sí, permet treballar amb arrays amb qualsevol radi, no hi ha limitacions degudes a la llargada dels cables, com és el cas de l'equip utilitzat en els primers arrays.

El processat de les dades i la inversió amb el programa Geopsy ha permès obtenir el model del perfil vertical de la velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) de tots els emplaçaments de mesura. A la figura 11 es mostren els exemples dels resultats obtinguts en dos arrays realitzats a la ciutat de Girona. La corba de color vermell és la que presenta menor error (Misfit value). El model del perfil vertical de Vs de l'array 3 (figura 11 esquerra) mostra dues capes, una primera de 14 metres amb una velocitat de 370 m/s (Quaternari) i una segona capa amb una velocitat de 1500 m/s (basament rocós). El model del perfil vertical de Vs de l'array 9 (figura 11 dreta) mostra una estructura més complexa, formada per 4 capes. Una primera capa de 5 metres amb una velocitat de 200

19

m/s, probablement Quaternari, seguida de dues capes de Neogen amb gruixos de 45m i 390m i velocitats de 475 m/s i 790 m/s respectivament. Finalment trobem el basament rocós amb una velocitat de 2500 m/s. A l'annex 3 es mostren els perfils verticals de la velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) obtinguts en els emplaçaments de la ciutat de Girona on s'ha mesurat el soroll sísmic amb la tècnica d'array.



Figura 10: Ortofotomapa (1:5000; ICC,2012) on es representen els punts de mesura (blau) i la geometria de l'array 10 (5 cercles de colors).



Figura 11: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) resultant de la inversió de la corba de dispersió obtinguda a l'array 3 (esquerra) i de l'array 9 (dreta).

## 4.1.3 Mètode de les ones superficials (MASW)

S'han realitzat mesures d'ones superficials amb el mètode MASW (anàlisi multicanal de les ones superficials) en 4 emplaçaments (figura12). En dos casos, SW2 i SW3, s'ha utilitzat aquesta tècnica per completar, respectivament, els resultats obtinguts en els arrays 2 i 3. En els altres dos casos, SW7 i SW11, s'ha fet servir aquesta tècnica per obtenir la velocitat de propagació de les ones de cisalla en emplaçaments amb dimensions reduïdes, on no era possible aplicar la tècnica d'array. La instrumentació utilitzada per registrar ones superficials consta d'un digitalitzador DMT de 24 canals i 24 geòfons de component vertical de 4.5Hz. Tots els perfils han tingut una longitud de 115 metres i una distància entre geòfons de 5 metres. Per generar les ones superficials s'ha utilitzat un mall sobre placa. A l'annex 3 es mostren els perfils verticals de la velocitat de propagació de les ones de cisalla en superficials consta de giona on s'han mesurat les ones superficials amb el mètode MASW.



Figura 12: Situació de les mesures realitzades amb la tècnica d'array i amb el mètode MASW a la ciutat de Girona.

La freqüència fonamental del sòl es pot relacionar amb la profunditat del basament rocós utilitzant l'expressió (Bard, 1985): H=Vs/(4·f<sub>0</sub>)

On  $f_0$  és la freqüència fonamental del sòl (Hz), H la profunditat del basament rocós (m) i Vs la velocitat de propagació de les ones de cisalla (m/s). Amb aquesta expressió es pot

calcular la profunditat del basament rocós si es coneix el valor de la freqüència fonamental de sòl i la velocitat de propagació de les ones de cisalla. Per a la ciutat de Girona es coneix el perfil de Vs en pocs emplaçaments, per tant, si es vol calcular la profunditat del basament rocós s'ha de recórrer a relacions empíriques del tipus  $H=a\cdot f_0^{b}$ . A la bibliografia es poden trobar diferents expressions d'aquest tipus (Ibs-von Seht i Wohlenberg, 1999; Parolai et al., 2002; Delgado et al., 2000; Benjumea et al., 2011). A la figura 13 es comparen aquestes expressions amb els resultats dels arrays realitzats a la ciutat de Girona que han arribat fins el basament rocós. S'observa que la relació que millor s'ajusta entre el gruix de sediments i la freqüència fonamental del sòl és la llei empírica S/R proposada per Ibs-von Seht i Wohlenberg (1999), que funciona particularment bé quan aquest gruix és molt gran. A la figura 14 es presenta un mapa de la profunditat del basament rocós calculada utilitzant aquesta relació empírica.



Figura 13: Comparació entre el gruix de la capa de sediments i la freqüència fonamental del sòl obtinguts en els arrays realitzats a la ciutat de Girona (punts negres) i la profunditat del basament rocós calculada amb relacions empíriques ajustades en altres regions (corbes de colors).



Figura 14: Mapa de la profunditat del basament rocós de la ciutat de Girona obtingut a partir de la freqüència fonamental del sòl (Mètode H/V) i la relació empírica S/R proposada per Ibs-von Seht i Wohlenberg (1999).

S'hi identifiquen dues zones molt diferenciades, separades per una línia en direcció nordoest – sud-est, que presenta un pendent molt pronunciat. A l'est trobem les Gavarres que arriben fins a la part nord, on el basament rocós és molt somer, aflorant en algunes parts de Montjuïc. En canvi, a la part sud la profunditat del basament rocós és molt gran en una àmplia zona, arribant als 500m al sud-oest de la ciutat. Si ens dirigim més cap a l'oest, ens allunyem de valors molt profunds a mida que ens anem apropant a les Guilleries.

### 4.2 Modelització de la resposta sísmica del sòl (ProShake 1D)

El programa ProShake calcula la resposta d'ones de cisalla propagant-se verticalment per un sistema unidimensional de capes horitzontals homogènies, viscoelàstiques i infinites. El programa es basa en la solució continua de l'equació d'ona adaptada per considerar moviments transitoris a partir de l'algorisme de la transformada de Fourier. La no linealitat del mòdul de cisalla i l'esmorteïment es considera utilitzant la propietat lineal-equivalent del sòl i mitjançant un procés iteratiu per obtenir valors del mòdul de cisalla i l'esmorteïment compatibles amb les deformacions efectives induïdes a cada capa (Figueras, 1994). Per tant, són necessàries les dades que defineixen les columnes de sòl, com ara el nombre de capes, gruixos, densitat, velocitats de propagació de les ones de cisalla i les corbes de la variació del mòdul de cisalla i l'esmorteïment amb la deformació. Per a la modelització de la propagació de les ones sísmiques amb aquest programa també és necessari un sisme d'entrada en el basament rocós.

### 4.2.1 Definició de la columna de sòl

S'ha definit una columna de sòl en cada un dels emplaçaments on s'han realitzat mesures amb la tècnica d'array i/o el mètode MASW. Les dades necessàries per a definir les capes d'aquestes columnes (litologia, gruix, Vs,...) s'han extret dels mapes geològics, sondeigs, estudis geotècnics i resultats dels arrays (taula 2).

Array	Material	Gruix (m)	Densitat (kN/m <sup>3</sup> )	V <sub>s</sub> (m/s)
	Argila	28	17.6	385
A1	Graves i sorres	375	19.6	680
	Gresos	∞	24.5	1850
	Argila	78	17.6	600
A2	Graves i sorres	460	19.6	1020
	Marga	∞	22	1850
A3	Argila	14	17.6	370
	Marga	∞	22	1500
A4	Graves i sorres	15	19.6	330
	Argiles i llims	264	17.6	530

Taula 2: Principals característiques de les columnes de sòl definides a la ciutat de Girona.

25

	Gresos	∞	24.5	1850
	Graves i sorres	9	19.6	310
45	Sorra argilosa	7	18.36	340
73	Graves i sorres	60	19.6	590
	Margues	×	22	1300
	Argila	14	17.6	330
A6	Graves i sorres	28	19.6	510
	Calcàries	×	26.1	1600
SW/7	Sorra argilosa	7	18.5	220
0007	Roca esquists	×	26.5	2000
48	Graves i sorres	49	19.6	530
70	Marga	×	20.6	2000
	Argila	10	17.6	250
	Grava	6	20.6	300
A9	Argila	30	17.6	740
	Marga argilosa	370	22.0	820
	Calcària	∞	26.1	1800
	Sorra	11	19.6	300
A10	Sorra argilosa	5	18.5	480
///0	Argila	344	17.6	820
	Roca esquists	×	26.5	2000
	Basanita	10	24.0	1500
SW11	Sorra argilosa	96	18.5	480
	Roca esquists	∞	26.5	2500

## 4.2.2 Sisme d'entrada

Per a seleccionar el sisme d'entrada en roca s'ha consultat la base de dades d'accelerogrames creada en el projecte NERIES (Network of Research Infrastructure for European Seismology, 2006 – 2010). En el procés de selecció s'ha tingut en compte l'estudi de perillositat sísmica (mètode probabilista) en termes de l'acceleració espectral (SA) obtingut per Secanell (2008), considerant els valors corresponents a un període de retorn de 475 anys. Inicialment es fa una selecció de registres per a sismes de magnituds entre 5 i 6, i distàncies menors de 30 km, que, segons un estudi estadístic realitzat amb

els registres de la base de dades (Gassol, 2011), estan associats a espectres de rangs semblants a l'espectre proposat. Successivament es passa a una selecció més estricta, on només s'han tingut en compte els valors espectrals per a freqüències mitges i per a valors de PGA semblants a l'espectre proposat. En aquest procés s'obtenen 6 sismes (figura 15) que tenen un espectre de resposta promig semblant a l'espectre proposat per Secanell (2008).



Figura 15: Espectres de resposta en termes d'acceleració dels sismes seleccionats de la base de dades del projecte NERIES.

## **5** Resultats i interpretació

#### 5.1 Microzonació sísmica en termes de fo

S'ha realitzat una microzonació sísmica de la ciutat de Girona a partir del valor de la freqüència fonamental del sòl i la forma de l'espectre del quocient espectral H/V. S'han diferenciat 4 zones, es mostren a la figura 16 junt amb quocients espectrals característics d'aquestes zones. Al nord i a l'est de la ciutat, on aflora el basament rocós (zona taronja), no s'aprecia cap pic significatiu en el quocient espectral H/V ja que no hi ha amplificació. Al voltant del riu Onyar i la seva desembocadura amb el riu Ter (zona vermella) s'observen valors alts de la freqüència fonamental del sòl (>1Hz) i a la major part del centre de la ciutat i de Salt (zona groga) s'obtenen valors baixos (<1Hz). Al nord de la ciutat, situada sobre Basanites (zona blava), el quocient espectral H/V té valors per sota 1 a altes freqüències (>4Hz), fet que pot comportar una desamplificació del moviment del sòl en aquest rang de freqüències.



Figura 16: Microzonació de la ciutat de Girona en termes de la freqüència fonamental del sòl i de la forma de l'espectre del quocient espectral H/V.

## 5.2 Funció de transferència del sòl

Una vegada s'han seleccionat els acelerogrames d'entrada, s'ha calculat la funció de transferència per a cada una de les columnes de sòl definides als emplaçaments on s'ha aplicat la tècnica d'array o el mètode MASW. Les funcions de transferència s'han obtingut per a cada un dels sis accelerogrames seleccionats com a registre d'entrada en roca (figura 15). A les figures 17 a 22 es representen les funcions de transferència calculades a cada columna de sòl. A cada gràfica s'indica el valor de la freqüència fonamental del sòl obtingut amb el mètode del quocient espectral H/V en el centre de cada array o perfil. Només es representen els resultats per un dels accelerogrames (earthquake 4), ja que no s'aprecien diferències importants entre els càlculs amb els diferents accelerogrames.



Figura 17: Comparació entre la funció de transferència obtinguda mitjançant l'aplicació del mètode lineal equivalent a l'array 1 (esquerra) i a l'array 2 (dreta), i el valor de la freqüència fonamental del sòl obtinguda aplicant el mètode del quocient espectral H/V.



Figura 18: Comparació entre la funció de transferència obtinguda mitjançant l'aplicació del mètode lineal equivalent a l'array 3 (esquerra) i a l'array 4 (dreta), i el valor de la freqüència fonamental del sòl obtinguda aplicant el mètode del quocient espectral H/V.



Figura 19: Comparació entre la funció de transferència obtinguda mitjançant l'aplicació del mètode lineal equivalent a l'array 5 (esquerra) i a l'array 6 (dreta), i el valor de la freqüència fonamental del sòl obtinguda aplicant el mètode del quocient espectral H/V.



Figura 20: Comparació entre la funció de transferència obtinguda mitjançant l'aplicació del mètode lineal equivalent al perfil SW7 (esquerra) i a l'array 8 (dreta), i el valor de la freqüència fonamental del sòl obtinguda aplicant el mètode del quocient espectral H/V.



Figura 21: Comparació entre la funció de transferència obtinguda mitjançant l'aplicació del mètode lineal equivalent a l'array 9 (esquerra) i a l'array 10 (dreta), i el valor de la freqüència fonamental del sòl obtinguda aplicant el mètode del quocient espectral H/V.



Figura 22: Comparació entre la funció de transferència obtinguda mitjançant l'aplicació del mètode lineal equivalent al perfil SW11 i el valor de la freqüència fonamental del sòl obtinguda aplicant el mètode del quocient espectral H/V.

S'observa que alguns emplaçaments presenten funcions de transferència semblants, tant pel que fa a la freqüència fonamental del sòl com en el valor de l'amplificació màxima. Per tant, es poden agrupar els punts que tenen un comportament similar. A la taula 3 es mostra un resum del comportament de la funció de transferència en cada punt on s'ha definit la columna de sòl. Aquest resultat serà molt útil de cara a realitzar la microzonació sísmica de la ciutat de Girona en termes de l'acceleració espectral (apartat 5.3).

Taula 3: Valor de la freqüència fonamental del sòl (f0) i de l'amplificació per a cada columna de sòl.

Array/Perfil	f0 (Hz)	Amplificació			
Array 1, 2, 4, 9 i 10	< 1	Baixa (2) a moderada (4)			
Array 5, 6 i 8	2-3	Moderada (2 a 4)			
Array 3 i SW 7	> 5	Moderada (4) a alta (9)			
SW 11	1	Alta (6) a altres freqüències, desamplificació a partir de 5 Hz			

## 5.3 Microzonació sísmica en termes de l'espectre de resposta (SA)

Amb el programa ProShake s'ha calculat l'espectre de resposta en termes d'acceleració (SA) a partir dels accelerogrames obtinguts a la part superior de la columna de sòl. A les figures 23 a 28 es representa la mitjana dels espectres de resposta d'entrada calculats en roca i a la part superior de la columna de sòl dels sis simes d'entrada seleccionats per a cada una de les columnes de sòl.



Figura 23: Espectres de resposta (esmorteïment 5%) en roca i calculats en sòl a l'extrem superior de la columna definida a l'array 1 (esquerra) i a l'array 2 (dreta).



Figura 24: Espectres de resposta (esmorteïment 5%) en roca i calculats en sòl a l'extrem superior de la columna definida a l'array 3 (esquerra) i a l'array 4 (dreta).



Figura 25: Espectres de resposta (esmorteïment 5%) en roca i calculats en sòl a l'extrem superior de la columna definida a l'array 5 (esquerra) i a l'array 6 (dreta).



Figura 26: Espectres de resposta (esmorteïment 5%) en roca i calculats en sòl a l'extrem superior de la columna definida al perfil SW7 (esquerra) i a l'array 8 (dreta).



Figura 27: Espectres de resposta (esmorteïment 5%) en roca i calculats en sòl a l'extrem superior de la columna definida a l'array 9 (esquerra) i a l'array 10 (dreta).



Figura 28: Espectres de resposta (esmorteïment 5%) en roca i calculats en sòl a l'extrem superior de la columna definida al perfil SW11.

S'observa que, com s'ha notat en el cas de la funció de transferència del sòl, alguns emplaçaments presenten espectres de resposta similars, amb igual amplificació en el mateix rang de l'acceleració espectral. A partir d'aquests resultats, junt amb la distribució dels valors de la freqüència fonamental del sòl obtinguda amb el mètode del quocient espectral H/V, s'ha realitzat una microzonació sísmica de la ciutat de Girona en funció de l'espectre de resposta en termes d'acceleració (figures 29 i 30).



Figura 29: Microzonació sísmica de la ciutat de Girona en funció dels espectres de resposta en termes d'acceleració.



Figura 30: Espectres de resposta en termes d'acceleració (esmorteïment 5%) calculats en cada una de les zones definides a la figura 29.

La zona 1 està formada per la regió on aflora el basament rocós, sense amplificació del moviment del sòl. També s'hi inclou la colada de basanita (SW11), que presenta amplificació en un rang de freqüències i desamplificació a la resta. La zona 2, situada al quadrant sud-oest de la ciutat, presenta amplificacions baixes (0.28g a 0.14 segons) a la major part de l'espectre de resposta, entre 0.1 i 2.0 segons. La zona 3, que inclou majoritàriament el centre de la ciutat, mostra amplificacions moderades entre 0 i 1 segon (0.37g a 0.24 segons). Finalment la zona 4, que s'estén al voltant del riu Onyar i la part baixa del riu Ter, té amplificacions importants en un curt rang de períodes (0.85g a 0.16 segons), compresos entre 0 i 0.5 segons.

#### 5.4 Microzonació sísmica en termes de ∆l

Per a considerar l'amplificació del moviment del sòl en termes de l'increment d'intensitat macrosísmica ( $\Delta I$ ) s'ha seguit una metodologia basada en la Intensitat d'Arias (Macau, 2008). La Intensitat d'Arias (AI) és una intensitat instrumental que es defineix com:

$$AI = \frac{\pi}{2 \cdot g} \int a_i^2(t) dt$$

on a<sub>i</sub>(t) és l'accelerograma de cada una de las components del moviment del sòl. Es pot relacionar la Intensitat d'Arias amb la Intensitat macrosísmica amb la relació empírica proposada per Cabañas et al. (1997) per a la zona del Mediterrani:

 $Ln(AI) = 1.50 \cdot I_{L} - 6.42$ 

on AI és la Intensitat d'Arias (en cm/s) i  $I_L$  és la intensitat local MSK. Les Intensitats d'Arias dels accelerogrames en roca i en sòl permeten obtenir, per a cada columna, el valor de l'increment d'intensitat macrosísmica ( $\Delta I$ )

 $\Delta I = 0.66 \cdot Ln(AI_S/AI_R)$ 

on  $\Delta I$  és l'increment d'intensitat per a la columna de sòl,  $AI_s$  és la Intensitat d'Arias del registre al cim de la columna de sòl i  $AI_R$  és la Intensitat d'Arias en roca. A la taula 4 es mostra l'increment d'intensitat macrosísmica ( $\Delta I$ ) produït per l'amplificació del moviment del sòl en funció del valor del quocient entre la Intensitat d'Arias calculada al cim de la columna de sòl i en roca ( $AI_s/AI_R$ ).

Taula 4:	Valors	de	l'increment	d'Intensitat	Macrosísmica	en	funció	del	quocient	entre	la	Intensitat	d'Arias
calculada	a en sòl	i en	roca.										

AI <sub>S</sub> /AI <sub>R</sub>	Δl
1.0 – 1.4	0.0
1.5 – 2.9	0.5
3.0 - 6.6	1.0

6.7 – 14.0	1.5
14.1 – 34.0	2.0

El mètode de càlcul de l'amplificació del moviment del sòl en termes de la intensitat macrosísmica s'ha aplicat als registres obtinguts amb la simulació numèrica al cim de les columnes de sòl definides als emplaçaments on s'ha aplicat la tècnica d'array o el mètode MASW. A partir d'aquests resultats, junt amb el patró observat en els espectres de resposta en termes d'acceleració, s'ha realitzat una microzonació sísmica de la ciutat de Girona en termes de l'increment d'intensitat macrosísmica (figura 31).



Figura 31: Microzonació sísmica de la ciutat de Girona en funció de l'increment macrosísmica (ΔI).

S'identifiquen tres zones, dues d'elles amb increment d'intensitat. Les àrees on aflora el basament rocós i la colada de basanita, que no presenten amplificació del moviment del sòl, no tenen increment d'intensitat. La zona situada al quadrant sud-oest de la ciutat, on el basament rocós és més profund, té un increment d'intensitat de mig grau. Per al centre de la ciutat i la part baixa del riu Ter, on el basament rocós és més somer, s'obté un increment d'intensitat d'un grau.

## 6 Conclusions

L'objectiu d'aquest estudi ha estat l'avaluació de la resposta sísmica local de la ciutat de Girona, que és una zona pilot del projecte Sispyr, i l'elaboració dels mapes de microzonació sísmica.

Per a dur a terme aquest treball s'ha aplicat una metodologia de nivell avançat que ha consistit en la utilització de mètodes experimentals i de simulació numèrica per a l'avaluació de l'amplificació del moviment del sòl per efecte de lloc.

Gràcies a l'aplicació de la tècnica d'array i el mètode MASW s'han obtingut els perfils verticals de V<sub>s</sub> en diferents punts de la ciutat de Girona, cosa que ha permès definir columnes de sòl representatives de cada geologia.

La combinació dels valors de la freqüència fonamental del sòl obtinguts amb el mètode del quocient espectral H/V i els perfils verticals de Vs ha permès obtenir un mapa del gruix de sediments (Quaternari + Neogen) de la ciutat de Girona. El gruix de sediments augmenta progressivament cap al sud de la ciutat, s'obtenen valors de 400 metres en una àmplia zona de la ciutat, fins arribar als 500 metres a l'extrem sud-oest.

S'ha obtingut una millora significativa de la microzonació sísmica de la ciutat de Girona en funció de la freqüència fonamental del sòl, l'espectre de resposta en termes de l'acceleració i l'increment d'intensitat macrosísmica (figura 32 i taula 5). El resultat mostra un mapa de microzonació sísmica en detall on s'identifiquen quatre zones. Les àrees on aflora el basament rocós (Paleogen i Paleozoic) i la colada de basanita no presenten amplificació del moviment del sòl. El sector situat al sud-oest de la ciutat, on trobem dipòsits Neògens de centenars de metres d'espessor, mostra amplificacions baixes, tant en el valor de l'increment d'intensitat com en la funció de transferència. L'amplificació del moviment del sòl va augmentant a mesura que ens acostem als afloraments rocosos situats a l'est del centre de la ciutat, on trobem dipòsits quaternaris més recents i el basament rocós és més somer. La zona que presenta les majors amplificacions és el sector situat al voltant del riu Onyar i la part baixa del riu Ter.

![](_page_41_Figure_2.jpeg)

Figura 32: Microzonació sísmica de la ciutat de Girona.

Taula 5: Valors de l'increment d'intensitat macrosísmica, freqüència fonamental del sòl i amplificació màxima de la funció de transferència de cada una de les zones definides en la microzonació de la ciutat de Girona.

Zona	Δl	F <sub>0</sub>	Amplificació
1	+0.0	Roca	0
2	+0.5	<1Hz	2-3
3	+1.0	1 – 5Hz	4-5
4	+1.0	>5Hz	5-9

## **7** Referències

Bard, P.-Y. (1985) "Les effets de site d'origine structurale: principaux résultats experimentaux et théoriques ", A: Genie Parasismique. Ed: Victor Davidovici. Paris, pp 223-238.

Benjumea B, Macau A, Gabàs A, Bellmunt F, Figueras S and Cirés J (2011) Integrated geophysical profiles and H/V microtremor measurements for subsoil characterization. Near Surface Geophysics 9:n<sup>o</sup>5: 413-425.

Cabañas, L., Benito, B., Herraiz, M. (1997) "An approach to the measurement of the potencial structural damage of earthquake ground motions", Earthquake Enginnering and Structural Dy-namics, Vol. 26, pp. 79-92.

Delgado J, López Casado C, Estévez A, Giner J, Cuenca A, Molina S (2000a) Mapping soft soils in the Segura river valley (SE Spain): a case study of microtremors as an exploration tool. Journal of Applied Geophysics 45:19-32.

Figueras, S. (1994). Simulació numèrica del moviment del sòl produït per terratrèmols. Aplicació a moviments febles i forts. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. 279 pp.

Gassol, G. (2011) Anàlisi i validació dels paràmetres d'accelerogrames de la base dades europea (NERIES Distributed Database) calculats homogèniament. Master Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 372pp.

Ibs-Von Seht M and Wohlenberg J (1999) Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. Bull. seism. Soc. Am., 89:250–259.

Macau, A. (2008) "Microzonación sísmica. Contribución a los estudios de peligrosidad sísmica a escala local en zonas rurales y urbanas", Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Ca-talunya (UPC).

Nakamura, Y. (1989) A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute 30 (1): 25-33.

Parolai S, Bormann P and Milkereit C (2002) New relationships between Vs, thickness of sediments and resonance frequency calculated by the H/V ratio of seismic noise for the Cologne area (Germany). Bulletin of Seismological Society of America 92:2521-2527.

Secanell, R. (2008) "Càlcul probabilista de la perillositat sísmica a Catalunya en acceleracions espectrals", Institut Geològic de Catalunya, GTB/IGC/0508-001.

Software PROSHAKE 1D (2001) "User's manual version 1.1 EduPro Civil System", Inc. Red-mond, Washington.

Soler, D., Brusi, D., Zamorano, M., Goula, X., Figueras, S., Macau, A., Martí, A. i Vilà, M. (2012) "Seismic microzonation of the Girona Area (NE Spain) from statistical analysis of geotechnical data", Universitat de Girona. EUROGEO, Bologna, Itàlia.

Susagna, T. i Goula, X. (2013) "Selección de registros para el análisis de amplificación de suelos en las dos zonas piloto. Zona1, región Val d'Aran, Luchon y St. Beat y Zona 2, Girona ciudad.", Informe R11. Projecte SISPYR. Interreg IVA.

## 8 Annex 1: Descripció dels mètodes geofísics utilitzats

## 8.1 A-1. Tècnica del quocient espectral H/V de soroll sísmic

Els sòls composats per materials tous i/o poc consolidats poden produir amplificacions de les ones sísmiques, però cal tenir en compte que l'amplificació del moviment del sòl no es produeix per igual en tot el rang de freqüències. La funció de transferència, definida com el quocient espectral entre el registre del moviment del sòl en superfície i el registre en el basament rocós, informa del valor de l'amplificació del moviment del sòl assignat a cada freqüència. La freqüència fonamental de la funció de transferència es defineix com la freqüència més baixa on es produeix amplificació de l'ona sísmica, i habitualment coincideix amb la freqüència on es produeix la màxima amplificació del moviment del sòl.

La tècnica del quocient espectral H/V de soroll sísmic és un mètode experimental que permet obtenir la freqüència fonamental a partir del quocient espectral entre les components horitzontals (H) i la component vertical (V) de mesures de soroll sísmic en superfície (Nakamura, 1989). La funció de transferència de les capes superficials ( $S_T$ ) es defineix com el quocient dels espectres d'amplitud de Fourier de les components horitzontals del moviment en superfície ( $S_{HS}$ ) i del moviment incident en el basament rocós ( $S_{HB}$ ). Considerant que el soroll sísmic està format principalment d'ones superficials, s'obté que la funció de transferència de la capa de sòls es pot estimar com el quocient espectral entre la component horitzontal ( $S_{HS}$ ) i la component vertical ( $S_{VS}$ ) del registre de soroll sísmic en superfície:

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \rightarrow S_T \cong \frac{S_{HS}}{S_{VS}}$$

D'aquesta manera es pot determinar la funció de transferència, i per tant la freqüència fonamental, de les capes de sòl a partir d'una sola mesura del moviment del sòl en superfície.

Per obtenir el quocient espectral H/V s'ha utilitzat el programa Geopsy. El càlcul s'ha realitzat seguint la metodologia següent:

$$\frac{H}{V} = \frac{S_{NS} + S_{EW}}{2 \cdot S_V}$$

 $S_{NS}$ : Mòdul de l'espectre de Fourier suavitzat de la component N-S.  $S_{EW}$ : Mòdul de l'espectre de Fourier suavitzat de la component E-W.  $S_V$ : Mòdul de l'espectre de Fourier suavitzat de la component vertical, V.

El suavitzat dels mòduls de Fourier s'ha realitzat dividint el registre de soroll sísmic en finestres i solapant-les un 50% entre elles. La longitud de les finestres és un paràmetre que es pot modificar, habitualment es treballa amb finestres d'una longitud que varia entre 30 i 40 segons.

A la Figura A1 es mostra un exemple de la representació del quocient espectral H/V en funció de la freqüència de dos emplaçaments diferents, un sobre sòl (esquerra) i l'altre sobre roca (dreta). Es pot observar com el quocient espectral de l'emplaçament en sòl presenta un pic important al voltant de 3.5Hz, que correspon a la freqüència fonamental del sòl, mentre que el quocient espectral H/V de l'emplaçament en roca no mostra cap pic, ja que en aquest punt no s'espera que es produeixi amplificació de les ones sísmigues.

![](_page_45_Figure_6.jpeg)

Figura A1. Exemple de relacions espectrals H/V obtingudes en emplaçaments en sòl (esquerra) i roca (dreta). En color es representen els quocients espectrals per a cada finestra de càlcul, i en negre la mitjana de totes les finestres junt amb les seves bandes d'error (en discontinu).

Si el basament rocós està cobert per una capa de sòl tou podem relacionar la freqüència fonamental del sòl ( $\upsilon$ ), el gruix de la capa de sòls (H) i la velocitat mitjana de les ones de cisalla de la capa de sòls ( $\overline{Vs}$ ) amb l'expressió següent (Bard, 1985):

$$\upsilon = \frac{\overline{V}_s}{4 \cdot H}$$

Per tant, en aquells emplaçaments on s'obtinguin valors elevats de la freqüència fonamental del sòl, s'espera que el basament rocós sigui somer i, en canvi, quan s'obtinguin valors baixos de la freqüència fonamental del sòl s'espera un basament rocós més profund. D'aquesta manera, coneixent la velocitat de les ones de cisalla de la capa de sòls i la seva freqüència fonamental, es pot obtenir la profunditat del basament rocós.

### 8.2 A-2. Tècnica de mesura de soroll sísmic en array

Les tècniques d'array sísmic es basen en l'adquisició a través de diferents sensors de les vibracions ambientals (soroll sísmic) durant una finestra temporal determinada. El soroll sísmic es defineix com el moviment de fons de la terra generat per fonts no sísmiques (sismogenètiques) distingint-los dels microsismes. Les fonts que produeixen aquest soroll sísmic poden trobar-se en diferents rangs de freqüència:

- Freqüències baixes (< 0.3-0.5 Hz): ones oceàniques que es produeixen a grans distàncies.
- Freqüències mitges (entre 0.3-0.5 Hz i 1 Hz): ones de mar de costes properes.
- Freqüències altes (> 1 Hz): fonts lligades a activitat humana (trànsit, maquinària pesada).

Aquestes tècniques es coneixen també amb el nom de sísmica passiva ja que no requereixen de cap font sísmica activa. A més a més, no cal tenir informació de la localització i el nombre de fonts que generen el soroll sísmic enregistrat. Les principals suposicions requerides per l'aplicació de les tècniques d'array són:

- Les vibracions ambientals consisteixen principalment en ones superficials incloent modes fonamentals i harmònics.
- El medi és estratificat.

En aquest tipus de medi (estratificat) les ones superficials són dispersives, per tant, mostren variació de la velocitat aparent amb la freqüència, la qual cosa permet obtenir un perfil de velocitat d'ones S, V<sub>s</sub>, amb la fondària (model 1D). Els modes Love i Rayleigh coexisteixen en les components horitzontals mentre que les components verticals només es veuen afectades per les ones superficials Rayleigh.

Els mètodes més utilitzats per l'anàlisi de soroll sísmic adquirit en un array sísmic són el mètode espectral FK (freqüència - nombre d'ona) i el mètode SPAC (Spatial

Autocorrelation). El processat amb tots dos mètodes presenta dos passos comuns per obtenir el perfil de  $V_s$ :

- Derivar la corba espectral característica de les ones que es propaguen (corba de dispersió pel mètode FK i corbes d'autocorrelació pel mètode SPAC).
- Invertir aquesta corba per obtenir la estructura del subsòl.

La resolució està intrínsecament relacionada amb les amplituds espectrals del camp d'ones i amb les característiques de l'array.

El processat de les dades es farà amb el software Sesarray desenvolupat per Marc Wathelet (<u>http://www.geopsy.org/</u>). Es presenten, tot seguit, les nocions bàsiques de cadascun dels mètodes i la seva implementació en aquest software.

### 8.2.1 Mètode FK (Lacoss et al., 1969; Horike, 1985)

Aquest mètode suposa que les ones que s'enregistren a l'array són planes. Suposant una direcció i una velocitat de propagació per una ona de freqüència f (o els paràmetres  $k_x$  i  $k_y$ ) es calculen els temps d'arribada relatius a cadascun dels sensors de l'array i els registres es desplacen segons aquests temps. La direcció, la velocitat de propagació i la freqüència es canvien en un procés iteratiu dins d'un rang i amb un increment determinats. La sortida de l'array o espectre de potència del feix (*beam power*) s'obté a partir de la suma dels senyals desplaçats en el domini de la freqüència per cada direcció i la velocitat i l'azimut de les ones enregistrades. A la pràctica, la cerca es realitza en un *grid* en el domini del nombre d'ona ( $k_x - k_y$ ) o en el de lentitud ( $s_x - s_y$ ) per una banda estreta de freqüència i una finestra temporal (Figura A2).

![](_page_48_Figure_2.jpeg)

Figura A2: Esquema de la tècnica grid per obtenir la corba de dispersió. a) Senyals enregistrades amb quatre finestres temporals marcades. b) Espectre de potència del feix en el domini de la lentitud per una freqüència determinada. c) Representació de la lentitud on es troba el màxim de l'espectre per cada freqüència. (Figura de Matthias Ohrnberger – Curs de Ambient Vibrations).

## 8.2.2 Mètode d'autocorrelació espacial SPAC (Aki, 1957; Ohori et al., 2002; Roberts i Asten, 2004)

Una altra possibilitat per analitzar els senyals enregistrats és el mètode d'autocorrelació espacial que suposa que la distribució de fonts del camp d'ones del soroll sísmic és aleatòria en el temps i en l'espai. Aki (1957) demostrà que els quocients d'autocorrelació dels senyals enregistrats en dos sensors són funcions de les velocitats de fase i de l'obertura de l'array. A la pràctica, s'utilitza la mitjana dels quocients d'autocorrelació per parelles de sensors separats una distància r per a tots els azimuts ( $\overline{\rho}(r, \omega)$ ) (Figura A3). Així:

$$\overline{\rho}(r,\omega) = J_o\left(\frac{\omega r}{c(\omega)}\right)$$

On J<sub>o</sub> és la funció de Bessel d'ordre zero.  $c(\omega)$  és la velocitat de fase per una determinada freqüència  $\tilde{\omega}$ . Aki proposà l'ús de configuracions circulars d'arrays per calcular els coeficients  $\overline{\rho}(r,\omega)$  per diferents radis i freqüències determinades i d'aquesta manera obtenir  $c(\omega)$ .

Bettig et al. (2001) va presentar una modificació de l'idea original del mètode SPAC que permet aplicar aquest mètode per configuracions d'array menys ideals que les proposades per Aki. Per qualsevol geometria, els coeficients d'autocorrelació es calculen a partir de parelles d'estacions amb separacions r entre  $r_1 \le r \le r_2$  en comptes d'un radi fix r. L'avantatge d'aplicar aquesta modificació és que una mateixa configuració d'array és adient tant pel mètode FK com pel de SPAC.

![](_page_49_Figure_3.jpeg)

Figura A3: a) Diagrama representant distància – azimut entre dues estacions. Cada punt representa una parella d'estacions. Les parelles de cercles amb el mateix to grisenc representen els límits seleccionats pels diferents anells. b) Exemple de corba d'autocorrelació corresponent a l'anell definit pels radis 64 a 65 m (punts amb barra d'error). La línia contínua correspon a la funció de Bessel. c) Diagrama representant la densitat de punts de solucions de la corba de dispersió obtinguts a partir de les corbes d'autocorrelació i la relació mostrada a la figura i introduïda en el text.

### 8.2.3 Inversió

La inversió de les corbes espectrals (corba de dispersió o d'autocorrelació) es realitza a partir de l'algorisme del veí més proper (Nearest Neighbor Algorithm) desenvolupat per Wathelet et al. (2004). Les corbes d'autocorrelació normalment es transformen a corba de dispersió com a pas previ per la inversió. Tanmateix, Wathelet et al. (2005) presenten una

adaptació del procés d'inversió per obtenir el perfil V<sub>s</sub> directament de les corbes d'autocorrelació.

## 8.3 A-3 Tècnica sísmica d'ones superficials (MASW)

El mètode MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) permet determinar el perfil vertical de la velocitat de les ones de cisalla (Vs) de les capes superficials a partir de l'estudi de les ones superficials. D'aquest tipus d'ones, les més utilitzades en aquesta tècnica són les ones Rayleigh ja que gran part de l'energia sísmica generada es transmet com aquest tipus d'ona. A més a més, la detecció es pot realitzar amb sensors estàndards d'una sola component (verticals). Les ones Rayleigh es propaguen a prop de la superfície amb una fondària que depèn de la longitud d'ona ( $\lambda$ ). Aquesta relació fondària -  $\lambda$  no és lineal en un medi verticalment heterogeni. Tenint en compte que la fondària de propagació depèn de  $\lambda$ , les altes freqüències ( $\lambda$  petites) es propaguen per les capes primes més superficials i la seva velocitat depèn de les propietats mecàniques del subsòl més som. Per la seva banda, les freqüències més baixes ( $\lambda$  grans) viatgen per capes amb més potència i la seva velocitat es veu també influenciada per les propietats de les capes més fondes. Aquest comportament es denomina dispersió geomètrica que descriu la dependència de la velocitat de fase amb la freqüència (Figura A4).

![](_page_50_Figure_5.jpeg)

Figura A4: Propagació de les ones superficials en fondària en funció de la seva longitud d'ona ( $\lambda$ ). A major  $\lambda$  les ones superficials viatgen per capes més profundes.

Les velocitats d'ones Rayleigh ( $V_R$ ) són aproximadament igual a les velocitats d'ones de cisalla ( $V_S$ ), per la qual cosa l'anàlisi de la variació de  $V_R$  amb la freqüència permet establir el perfil vertical de velocitat  $V_S$ . Les ones superficials es caracteritzen, a més a

més, per diferents modes de propagació (fonamental i superiors). En general, es considera que l'energia analitzada procedeix del mode fonamental d'ones superficials.

El primer pas per l'aplicació de MASW consisteix en el registre del camp d'ones sísmiques generat per una font d'impulsos i detectat per un conjunt de geòfons de component vertical situats a la superfície i en línia amb la font (registre multicanal). Es recomana localitzar la font a tots dos costats del perfil per controlar canvis laterals sota la línia de geòfons. Els paràmetres òptims d'adquisició quedarien definits tenint en compte les següents consideracions:

Distància font – primer geòfon mínima (*offset* mínim- $x_1$ ): aquest paràmetre ve limitat per l'efecte del camp proper on les ones no es poden considerar planes. Com a regla general es considera que  $x_1 \ge \lambda_{max}/2$  on  $x_1$  és la distància a partir de la qual l'ona es pot considerar plana i  $\lambda_{max}$  és la longitud d'ona màxima que es vol mesurar.

Distància font – últim geòfon màxim (*offset* màxim): aquesta distància es defineix com la màxima a partir de la qual el camp es considera llunyà. En aquesta zona, les altes freqüències de les ones superficials es veuen fortament atenuades i per tant, l'energia prové d'ones internes i altres modes superiors contaminant la corba de dispersió (V<sub>R</sub>-freqüència). Aquest efecte limita la freqüència màxima a la que es pot identificar la corba de dispersió.

Distància entre geòfons: La separació entre geòfons no pot ser inferior a la meitat de la longitud d'ona mínima que es vulgui mesurar per evitar efectes d'*aliasing* espaial.

Longitud de la línia de geòfons: establir aquest paràmetre suposa un compromís entre una línia prou llarga com per poder separar els diferents modes de les ones superficials amb facilitat i al mateix temps, prou curta com per millorar la relació senyal/soroll i evitar així els efectes de discontinuïtats laterals localitzades sota la línia.

L'anàlisi del caràcter dispersiu de les ones Rayleigh segons el mètode MASW (Park et al., 1999) es realitza a partir de la transformació del registre del camp d'ones sísmiques en el espai temps-distància a un espai que permeti identificar la corba de dispersió (V<sub>R</sub>-freqüència) (Figura A5). En aquest estudi, utilitzarem la transformació del camp d'ones a

l'espai freqüència - nombre d'ona (F-K) proposat per Nolet i Panza (1976) i implementat en el software Geopsy (<u>http://www.geopsy.org/</u>).

![](_page_52_Figure_3.jpeg)

*Figura A5:* Registres de les ones sísmiques en l'espai temps - distància (esquerra) i en l'espai VR – freqüència on es pot identificar la corba de dispersió (dreta).

La inversió de la corba de dispersió és l'últim pas del mètode MASW que permet passar de  $V_R$  - freqüència al perfil vertical de velocitats de les ones de cisalla ( $V_s$ ). En aquest treball, aquesta inversió es realitza a partir de l'algorisme del veí més proper (Nearest Neighbor Algorithm) desenvolupat per Wathelet et al. (2004).

## 9 Annex 2: Valors de la freqüència fonamental del sòl

Taula A1: Coordenades UTM i valor de la freqüència fonamental del sòl ( $F_0$ ) dels emplaçaments de mesura de soroll sísmic amb la tècnica del quocient espectral H/V a la ciutat de Girona.

Emplaçament	X <sub>UTM</sub> (m)	Y <sub>UTM</sub> (m)	$F_0$ (Hz)
1	485713	4651225	13.7
2	485766	4651476	10.5
3	485685	4650897	7.5
4	485572	4650544	13.4
5	485517	4650310	13.1
6	485423	4651120	6.6
7	485345	4650656	15.6
8	484794	4649024	3.2
9	484823	4649227	9.6
10	484420	4649322	3.6
11	484000	4649670	5.3
12	484157	4649672	roca
13	483728	4649654	2.9
14	483520	4649316	1.9
15	483893	4649218	1.7
16	485440	4646892	0.75
17	485404	4646259	0.67
18	485250	4645888	0.6
19	485077	4646337	0.59
20	484764	4646111	0.49
21	484930	4645861	0.52
22	484519	4645312	0.52
23	484760	4645627	0.56
24	485392	4645497	0.69
25	485556	4645735	0.57
26	485954	4646381	N.I.
27	485788	4646846	4.2
28	483572	4645502	0.44
29	484027	4645222	0.43

30	483238	4645075	0.45
31	483771	4646084	0.47
32	484472	4646841	0.49
33	483990	4646665	0.43
34	484242	4646382	0.46
35	484189	4645798	0.46
36	484593	4646567	0.52
37	485025	4646702	0.56
38	484984	4646977	0.56
39	484059	4646958	0.47
40	483931	4647156	0.46
41	484485	4647266	0.48
42	484389	4647104	0.49
43	484270	4647980	0.51
44	483937	4647609	0.48
45	484658	4647989	1.28
46	484523	4648448	1.31
47	484851	4648614	1.85
48	485291	4648721	3.96
49	485460	4648429	4.56
50	485716	4648519	6.07
51	485658	4648407	8.61
52	485502	4648139	2.66
53	485428	4647973	3.09
54	485254	4647886	1.93
55	485205	4648182	2
56	485701	4647405	6.3
57	485502	4647229	N.I.
58	486065	4646384	3.6
59	483452	4645570	0.4
60	485707	4647472	6.8
61	484408	4644898	0.47
62	484553	4648864	1.7
63	484557	4648781	1.5
64	484466	4648826	1.5
65	484502	4648931	1.6
66	484647	4648842	2

67	486014	4646367	3
68	486017	4646395	3.2
69	485214	4648700	2.7
70	485189	4648652	2.5
71	483787	4646527	0.47
72	485286	4650897	9.5
73	485303	4650947	8.9
74	485311	4650994	8.1
75	485318	4651030	7.2
76	482277	4649836	1.09
77	482282	4649811	1.27
78	482283	4649785	1.09
79	482285	4649761	1.07
80	482288	4649736	1.17
81	482289	4649711	1.24
82	482291	4649688	1.1
83	482293	4649663	1.13
84	482295	4649638	1.03
85	482298	4649626	1.02
86	483766	4646442	0.46
87	483705	4646509	0.46
88	483739	4646613	0.47
89	483851	4646613	0.47
90	483874	4646489	0.46
91	482525	4647977	0.56
92	482531	4648094	0.54
93	482623	4648017	0.56
94	482583	4647893	0.54
95	482506	4647890	0.5
96	482429	4648010	0.55
97	482421	4648159	0.55
98	482748	4648167	0.57
99	482773	4647887	0.53
100	482494	4647722	0.43
101	482298	4647944	0.44
102	482449	4648485	0.62
103	482898	4648339	0.62

104	482977	4647779	0.56
105	482463	4647499	0.43
106	482040	4647895	0.44
107	482827	4648239	0.57
108	483187	4648224	0.49
109	482998	4645611	0.44
110	483194	4645593	0.48
111	483200	4646292	0.48
112	483036	4646350	0.43
113	482144	4650240	1
114	482687	4649587	1.11
115	482769	4649280	1.03
116	482762	4649229	1
117	482792	4648830	0.64
118	482806	4648771	0.6
119	482565	4648469	0.55
120	482499	4648102	0.5
121	482598	4647701	0.45
122	482636	4647449	0.43
123	482647	4647390	0.44
124	482773	4646759	0.41
125	482780	4646038	0.45
126	482705	4645292	0.46
127	482679	4644913	0.46
128	482641	4644444	0.58
129	482635	4644031	0.6
130	482524	4643740	0.7
131	482232	4643179	1.01
132	481457	4642435	2.26
133	486799	4645521	7.96
134	486749	4645524	9.45
135	486491	4645620	roca
136	486196	4645609	2.14
137	485900	4645299	1.38
138	485465	4645125	0.71
139	485027	4645002	0.52
140	484393	4644865	0.57

14	1	484157	4644635	0.48
14	2	483629	4644417	0.49
14	3	482866	4644071	0.58
14	4	482635	4644031	0.6
14	-5	482223	4643648	0.8
14	6	481627	4643644	3.12
14	7	480988	4643342	roca
14	8	481630	4642389	2.8
14	9	481708	4642894	1.31
15	60	482286	4642990	1.01
15	51	482839	4643777	0.66
15	52	483711	4643874	0.5
15	3	484317	4644035	0.53
15	54	485173	4644310	0.59
15	5	482288	4648019	0.4
15	6	482397	4648077	0.42
15	57	482473	4648114	0.43
15	8	482586	4648144	0.53
15	9	482647	4648206	0.42
16	60	480925	4647761	0.42
16	51	481010	4647841	0.43
16	52	481056	4647903	0.44
16	53	481483	4647978	0.44
16	64	481742	4647978	0.46
16	5	481250	4647959	0.45
16	6	480970	4647746	0.46
16	57	482126	4648027	0.44
16	8	483228	4647983	0.56
16	9	481245	4647702	0.45
17	0	480082	4647647	0.5
17	'1	482073	4647893	0.54
17	'2	481606	4648350	0.5
17	'3	482105	4647483	0.44
17	'4	483182	4644217	0.55

\*N.I: No interpretable

# **10** Annex 3: Perfils verticals de la velocitat de propagació de les ones de cisalla

A l'annex 3 es mostren els perfils verticals de la velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) obtinguts en els emplaçaments de la ciutat de Girona on s'ha mesurat el soroll sísmic amb la tècnica d'array.

![](_page_58_Figure_4.jpeg)

Figura A6: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) resultant de la inversió de la corba de dispersió obtinguda a l'emplaçament de l'array 1 de Girona (misfit < 0.62).

![](_page_59_Figure_2.jpeg)

Figura A7: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) resultant de la inversió de la corba de dispersió obtinguda als emplaçaments de l'array 2 i SW2 de Girona (misfit < 0.55).

![](_page_60_Figure_2.jpeg)

Figura A8: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) resultant de la inversió de la corba d'autocorrelació obtinguda a l'emplaçament de l'array 3 de Girona (misfit < 0.76).

![](_page_61_Figure_2.jpeg)

Figura A9: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) resultant de la inversió de la corba d'autocorrelació obtinguda a l'emplaçament de l'array 4 de Girona (misfit < 0.48).

![](_page_62_Figure_2.jpeg)

Figura A10: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) resultant de la inversió de la corba de dispersió obtinguda a l'emplaçament de l'array 5 de Girona (misfit < 3.75).

![](_page_63_Figure_2.jpeg)

Figura A11: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) resultant de la inversió de la corba de dispersió obtinguda a l'emplaçament de l'array 6 de Girona (misfit < 3.78).

![](_page_64_Figure_2.jpeg)

Figura A12: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) resultant de la inversió de la corba de dispersió obtinguda a l'emplaçament SW7 de Girona (misfit < 0.32).

![](_page_65_Figure_2.jpeg)

Figura A13: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) resultant de la inversió de la corba de dispersió obtinguda a l'emplaçament de l'array 8 de Girona (misfit < 0.4).

![](_page_66_Figure_2.jpeg)

Figura A14: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) resultant de la inversió de la corba d'autocorrelació obtinguda a l'emplaçament de l'array 9 de Girona (misfit < 3.65).

![](_page_67_Figure_2.jpeg)

Figura A15: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) resultant de la inversió de la corba de dispersió obtinguda a l'emplaçament de l'array 10 de Girona (misfit < 0.42).

![](_page_68_Figure_2.jpeg)

Figura A16: Model del perfil vertical de velocitat de propagació de les ones de cisalla (Vs) resultant de la inversió de la corba de dispersió obtinguda a l'emplaçament SW11 de Girona (misfit < 0.2).