

# Estudi dels efectes de sòl per a la microzonació sísmica a la cubeta d'Andorra la Vella / Escaldes-Engordany

*Albert Macau, Sara Figueras,  
Teresa Susagna i Xavier Goula*





Andorra és un país exposat a diferents perills naturals: esllavissades, inundacions, allaus... i també terratrèmols. Les característiques geomecàniques dels materials que formen el sòl de la cubeta d'Andorra la Vella / Escaldes-Engordany poden donar lloc a amplificacions de les ones sísmiques en cas que es produeixi un terratrèmol. Aquests dos factors justifiquen la realització d'un estudi de microzonació sísmica a la cubeta que tingui en compte els efectes de sòl, com el que s'ha dut a terme en aquest treball.

## Abstract

Andorra is a country that is exposed to a range of natural disasters: landslides, floods, avalanches... and also earthquakes. The geomechanic characteristics of the materials that make up the ground in the Andorra la Vella / Escaldes-Engordany basin could lead to amplifications in the seismic waves if there were to be an earthquake. These two factors justify carrying out a seismic microzonation study in the basin which takes into account the effects of the ground, such as that carried out in the following research.

Quan es produeix un sisme, el comportament del sòl pot ser molt diferent segons les característiques geomecàniques dels materials que el formen. En aquells casos en què el sòl està compost de materials tous i/o poc consolidats es poden produir amplificacions de les ones sísmiques. També s'han observat increments de l'amplitud i la durada del moviment del sòl quan les ones sísmiques es propaguen per determinades geometries del subsòl o en relleus topogràfics. En la majoria de terratrèmols destructius dels darrers anys (Michocán el 1985, Loma Prieta el 1989, Kobe el 1995, Turquia el 1999) s'ha pogut comprovar la importància de l'amplificació del moviment sísmic degut a efectes de sòl en la distribució dels danys.

Andorra és un país exposat a nombrosos riscos naturals: allaus, esllavissades, inundacions, terratrèmols... La sismicitat d'Andorra és moderada, això vol dir que el temps que transcorre entre un sisme intens i el següent és gran. Cal tenir en compte que Andorra pot patir també els efectes de terratrèmols forts amb epicentre en regions veïnes, tant de França com de Catalunya. L'any 1373 es va produir un sisme destructor a la zona de la Ribagorça amb una intensitat epicentral de VIII-IX. Entre el 1427 i el 1428 es va produir una sèrie sísmica al Pirineu oriental amb intensitats màximes de VIII i IX que va afectar la Selva, la Garrotxa i el Ripollès i va provocar danys importants i nombroses víctimes; aquests sismes també van afectar Andorra, però

amb menor intensitat (Olivera *et al.*, 2006). A Andorra, els dies 14 i 16 de març i el 5 d'abril de l'any 1970 hi va haver una important crisi sísmica, amb intensitats epicentrals de V-VI (Susagna i Goula, 1999).

D'altra banda, la cubeta d'Andorra la Vella / Escaldes-Engordany presenta unes condicions geològiques i geofísiques que poden afavorir les amplificacions de les ones sísmiques, tal com es dedueix dels estudis preliminars que s'han fet a la zona (Figueras *et al.*, 2003).

Tots aquests factors expliquen la necessitat de completar l'estudi ja realitzat dels efectes de sòl a la cubeta d'Andorra la Vella / Escaldes-Engordany, per tal de conèixer les amplificacions que es poden produir en el cas que hi hagi un sisme de magnitud important a poca distància d'Andorra. A partir dels resultats obtinguts en l'estudi dels efectes de sòl es podrà elaborar una microzonació sísmica de la cubeta d'Andorra la Vella / Escaldes-Engordany.

## Microzonació sísmica

La microzonació sísmica considera les particularitats topogràfiques, geològiques i geotècniques d'una zona determinada per estudiar els efectes locals caracteritzats per la funció de transferència dels diferents tipus de sòl que es troben en aquesta zona, és a dir, quina amplificació del moviment del sòl cal esperar en cada emplaçament en cas de sisme i a quina freqüència es produirà. Existeixen mètodes numèrics i experimentals que permeten caracteritzar la funció de transferència dels diferents tipus de sòls.

A la cubeta d'Andorra la Vella / Escaldes-Engordany s'ha fet la microzonació sísmica seguint dos mètodes diferents: el càlcul de la freqüència fonamental del sòl amb el mètode de Nakamura (Nakamura, 1989) i la simulació numèrica 1-D amb el programa ProShake. A partir dels resultats de cadascun d'aquests dos mètodes, s'ha elaborat una zonació de la cubeta i s'han obtingut diferents zones que agrupen aquells sòls que tenen un mateix comportament.

## Mètode de Nakamura: càlcul de la freqüència fonamental del sòl

El mètode de Nakamura és un mètode experimental que permet obtenir la freqüència fonamental del sòl a partir del quocient espectral entre les components horitzontals i la component vertical (H/V) de mesures de soroll sísmic. A la figura 1 es mostra la representació del quocient espectral H/V en funció de la freqüència de dos emplaçaments diferents, un al sòl (blau) i l'altre a la roca (vermell). Es pot comprovar que el quocient espectral de l'emplaçament al sòl presenta un pic important al voltant d'1 Hz, mentre que el quocient espectral H/V de l'emplaçament a la roca no presenta cap pic, ja que en aquest punt no s'espera que s'amplifiquin les ones sísmiques.

Per què és important conèixer la freqüència fonamental del sòl?

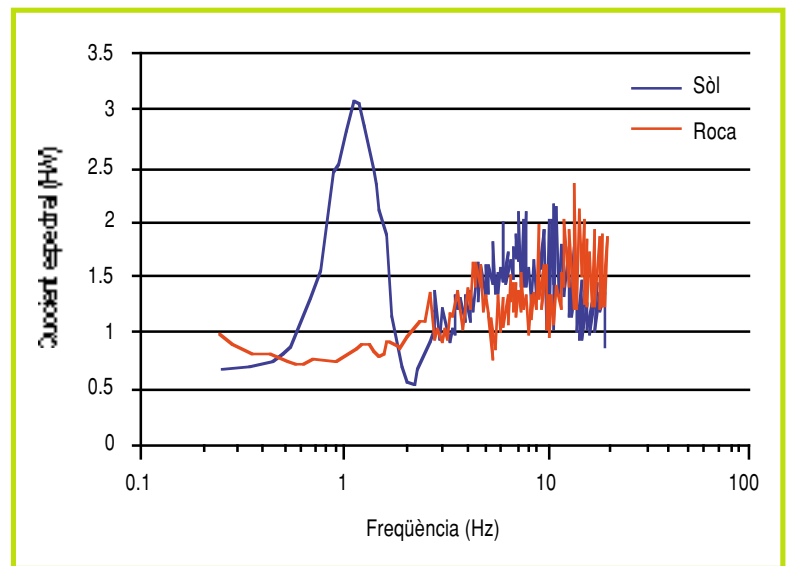
Quan es produeix un sísmic, l'energia alliberada es propaga en forma d'ones que fan oscil·lar el sòl amb una freqüència fonamental de vibració pròpia. Si aquesta freqüència coincideix amb la freqüència d'oscil·lació dels edificis que hi ha construïts al damunt, aquests edificis poden entrar en ressonància i patir danys molt greus. Coneixent la freqüència fonamental del sòl es poden dissenyar els edificis de manera que tinguin una freqüència d'oscil·lació diferent de la del sòl. Bàsicament, la freqüència d'oscil·lació pròpia dels edificis segueix la relació següent:

$$\nu = 1/(0.09 * N)$$

on  $\nu$  és la freqüència d'oscil·lació pròpia de l'edifici, i  
N és el nombre de plantes de l'edifici.

Durant el mes de juny de 2004 es va dur a terme una campanya de mesures de soroll sísmic a la cubeta d'Andorra la Vella / Escaldes-Engordany. A partir d'aquestes mesures s'ha pogut obtenir la freqüència fonamental del sòl de diferents emplaçaments de la cubeta. A la figura 2 es mostra el mapa de microzonació sísmica obtingut a la cubeta d'Andorra la Vella / Escaldes-Engordany considerant la freqüència fonamental del sòl.

Figura 1: Exemple de relacions espectrals sobre sòl i roca.



En el mapa es poden distingir cinc zones diferents, encara que algunes tenen un comportament semblant. La variació de la freqüència fonamental del sòl al llarg de la cubeta es pot relacionar amb la variació de la profunditat del basament rocós, ja que en una primera aproximació hi ha una relació directa entre la freqüència fonamental del sòl i el gruix de la capa de sòls. A més profunditat del basament rocós menys freqüència fonamental del sòl, i a menys profunditat del basament rocós més freqüència fonamental del sòl.

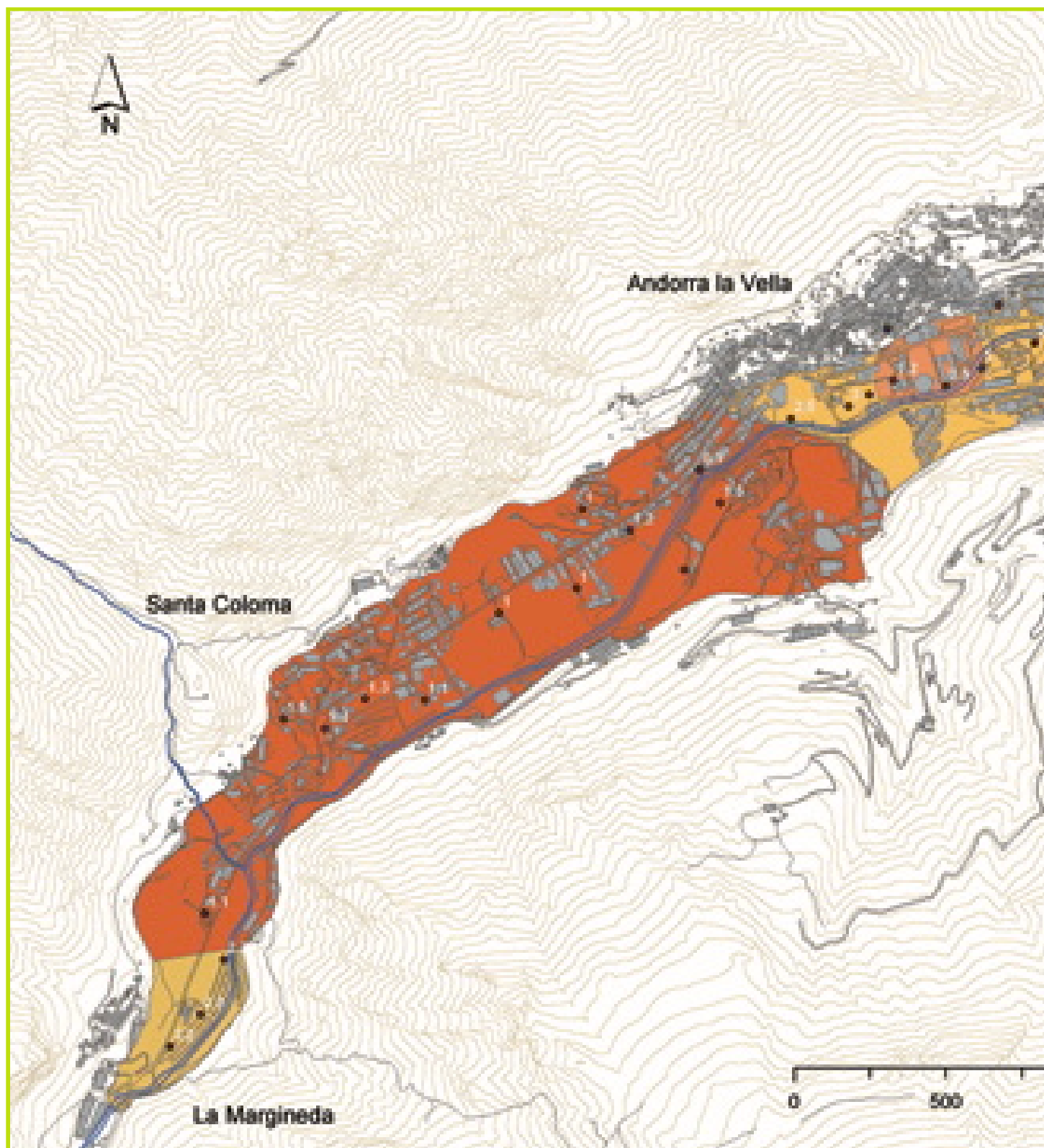
## Simulació numèrica 1-D

A l'apartat anterior hem vist com podem calcular la freqüència fonamental del sòl a partir de mesures de soroll sísmic. És un mètode força senzill, però no ens permet calcular l'amplificació del moviment del sòl, és a dir, l'augment de l'amplitud de les ones en travessar la capa de sòls. Per tal de conèixer aquests paràmetres, i ja que no es disposa de registres de terratrèmols reals en emplaçaments de sòl i roca, s'ha fet una modelització de la propagació de les ones sísmiques a través de les diferents capes de sòls aplicant un mètode de simulació numèrica lineal-equivalent unidimensional (programa ProShake).

El programa ProShake modelitza la propagació de les ones sísmiques a través de columnes de sòl. Com a pas previ a la



Figura 2: Microzonació sísmica de la cubeta d'Andorra la Vella / Escaldes-Engordany a partir de la freqüència fonamental del sòl obtinguda amb l'aplicació del mètode de Nakamura.



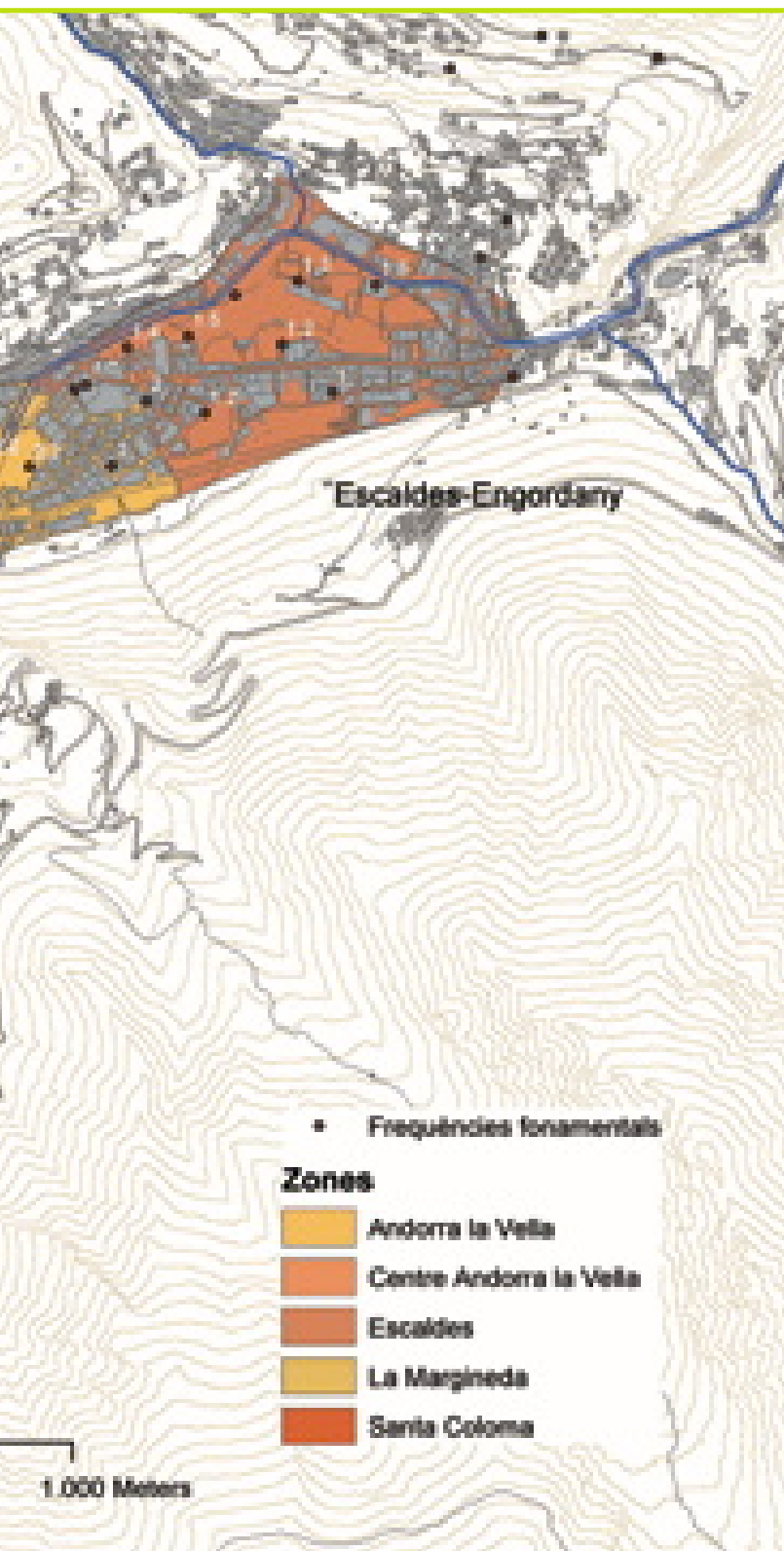
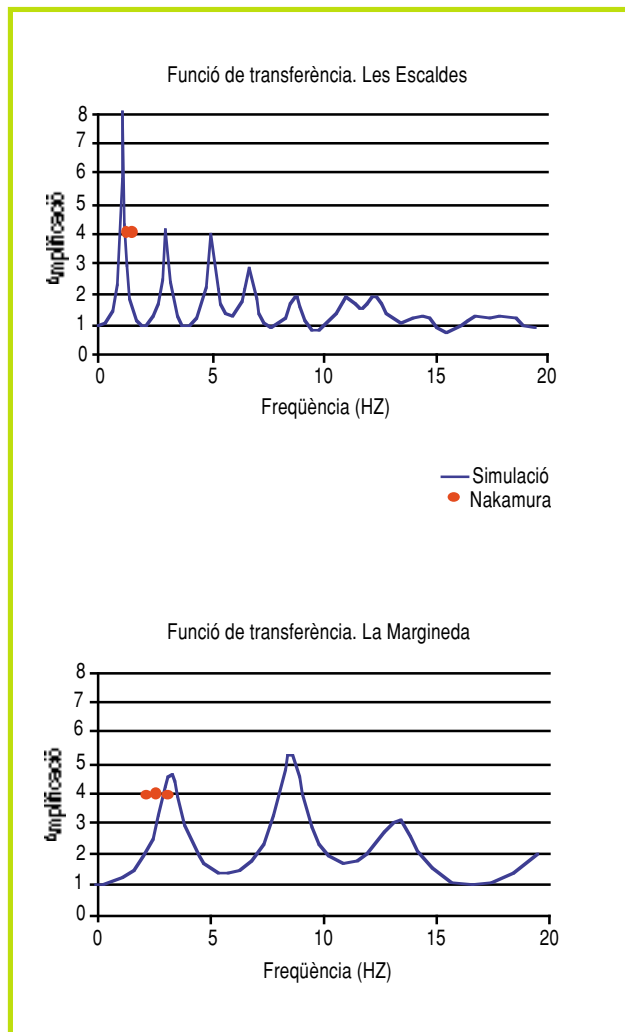


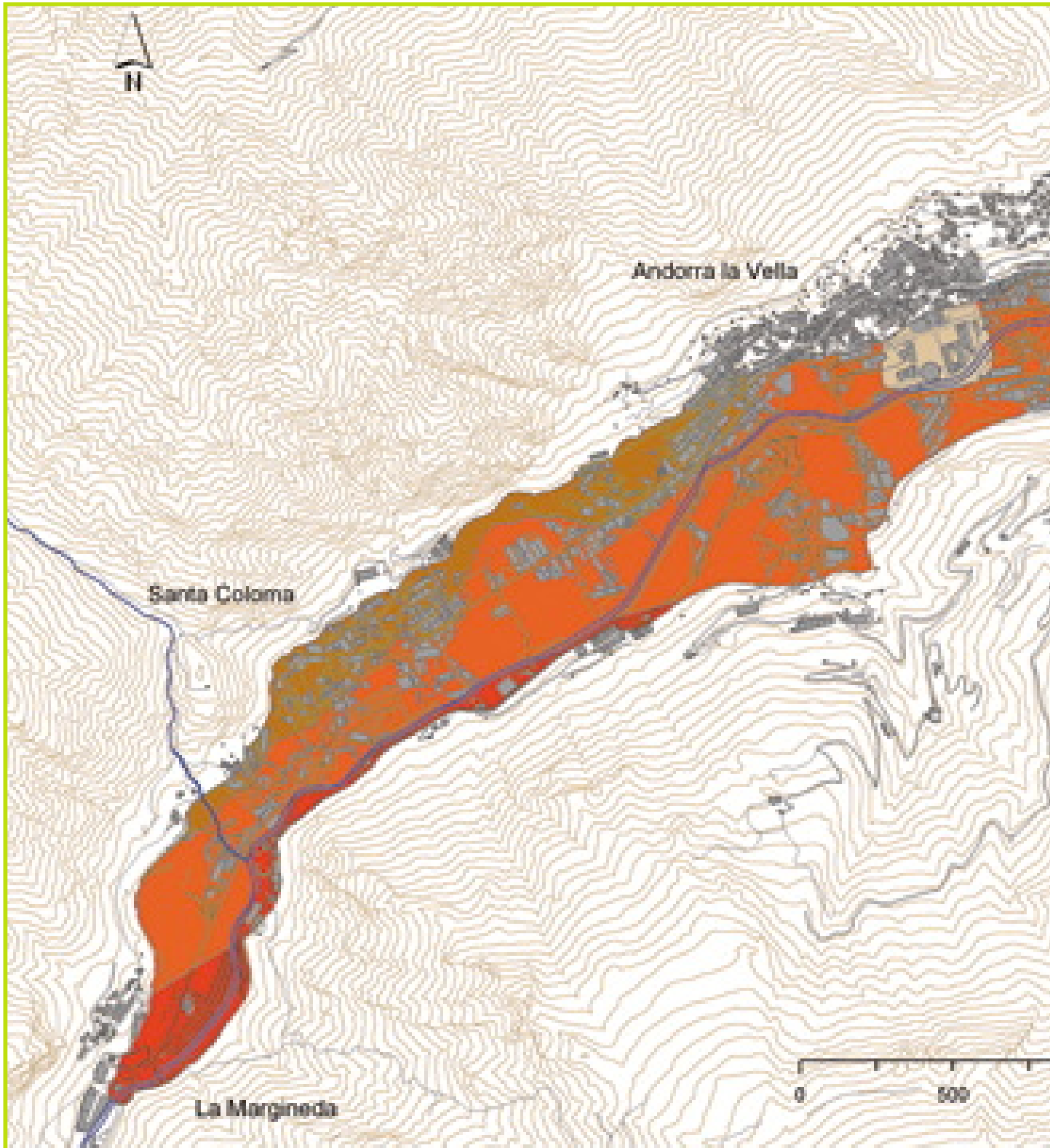
Figura 3: Funció de transferència del sòl obtinguda en dos emplaçaments diferents: Escaldes i la Margineda. El punt vermell representa la freqüència fonamental obtinguda amb el mètode de Nakamura en emplaçaments propers a les columnes de sòl.

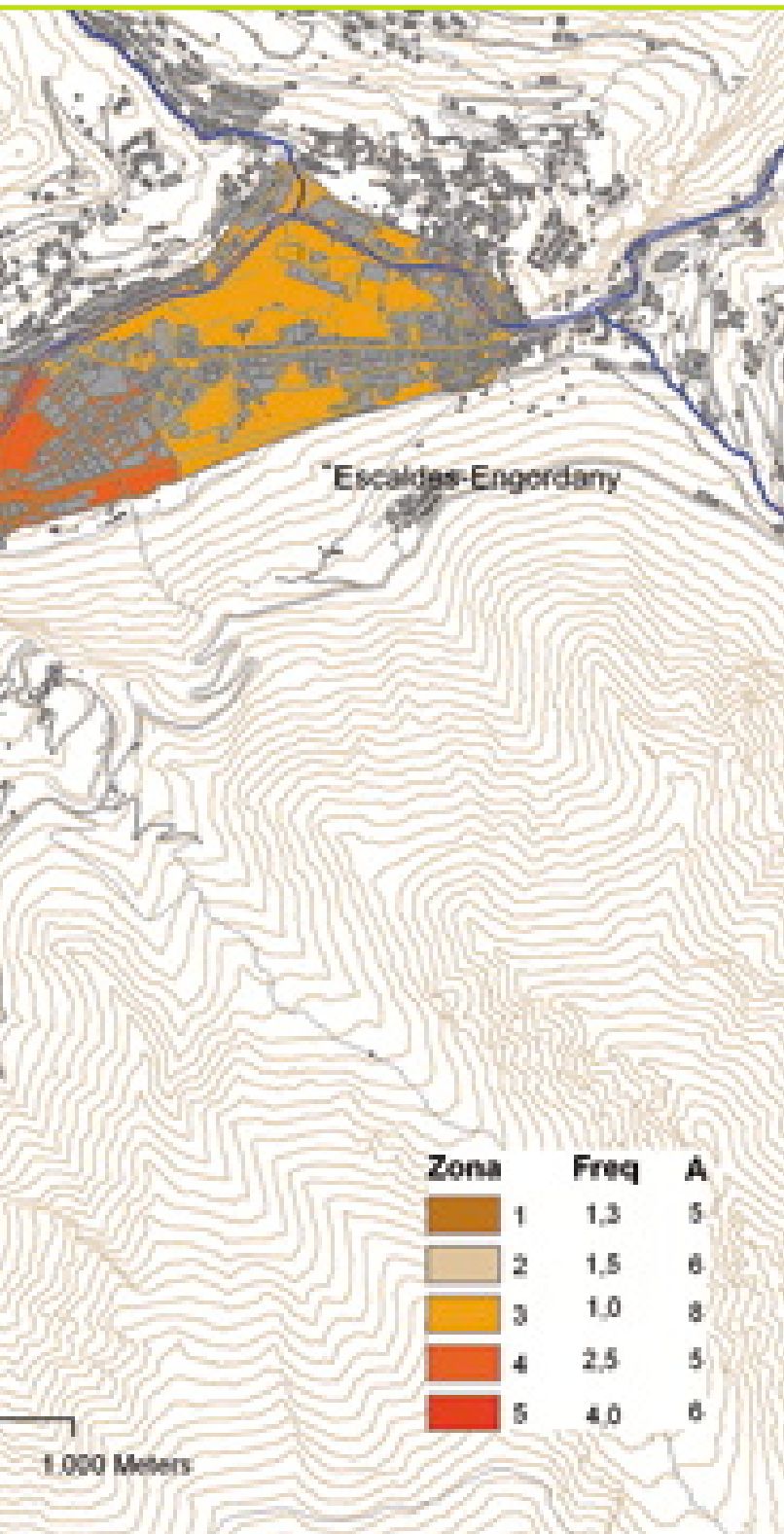


Taula 1. Increment de la intensitat macrosísmica ( $\Delta I$ ) obtinguda a la cubeta d'Andorra la Vella / Escaldes-Engordany.

Zona sòl	$\Delta I$
1	+0.0
2	+0.5
3	+1.0
4	+1.0
5	+1.5

Figura 4: Microzonació sísmica de la cubeta d'Andorra la Vella / Escaldes-Engordany basada en la funció de transferència calculada en cada columna de sòl, on «Freq» és la freqüència fonamental de la funció de transferència i «A» l'amplificació del sòl.





## Mapes de microzonació

Els mapes de microzonació es poden utilitzar per planificar la construcció i el desenvolupament urbà, orientar el disseny resistent als terratrèmols dels edificis nous, i reforçar els edificis i les instal·lacions existents d'acord amb les reglamentacions antisísmiques vigents.

## Freqüència fonamental

La freqüència fonamental és característica d'una capa de sòls sobre un basament rocós i està determinada per les propietats geomecàniques i el gruix dels materials que la formen. Quan una ona sísmica travessa aquesta capa de sòls, es produeixen amplificacions en les freqüències properes a la freqüència fonamental del sòl.

## Ressonància

Quan un objecte oscil·la pot entrar en ressonància, és a dir, que es poden produir interferències constructives en la seva estructura. Aquestes interferències poden fer augmentar l'amplitud de les oscil·lacions fins arribar al punt de destruir l'objecte.



modelització, cal fer una feina important de recopilació d'informació geològica, geofísica i geotècnica per poder definir les columnes de sòl característiques de la nostra zona d'estudi. Les dades de què es disposa per a la cubeta d'Andorra la Vella / Escaldes-Engordany provenen de diferents estudis:

- Campanya de prospecció sísmica a la cubeta d'Andorra la Vella / Escaldes-Engordany (Teixidó *et al.*, 2003).
- Campanya de mesures de velocitat d'ones superficials a la cubeta d'Andorra la Vella / Escaldes-Engordany (Bitri *et al.*, 2004).
- Base de Dades Geotècniques d'Andorra (CRECIT, 2001).

D'altra banda, per poder treballar amb el programa ProShake, hem de disposar d'un accelerograma d'entrada al basament rocós. Aquest accelerograma s'escull

a partir dels estudis recents de perillositat sísmica per a Andorra (Secanell *et al.*, 2006).

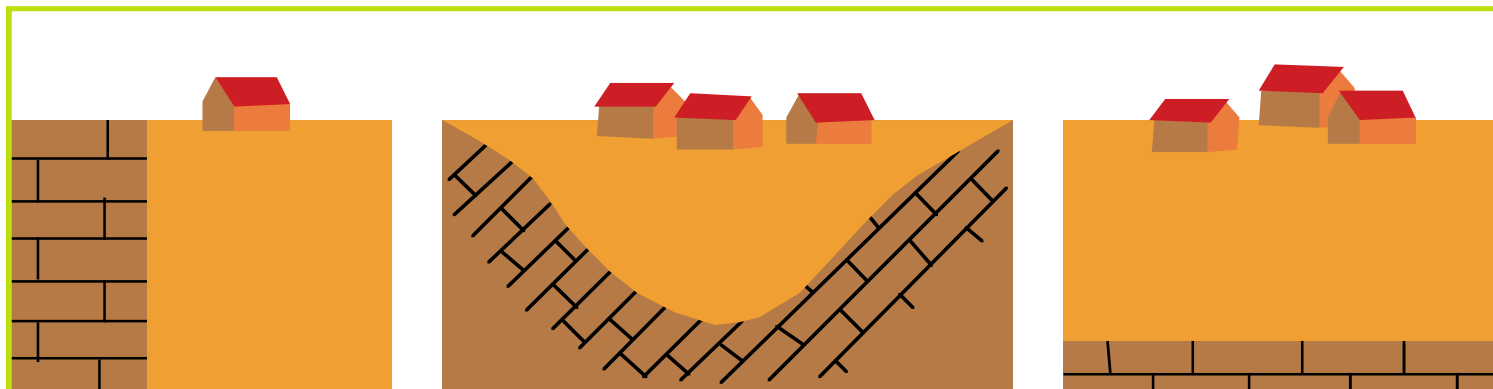
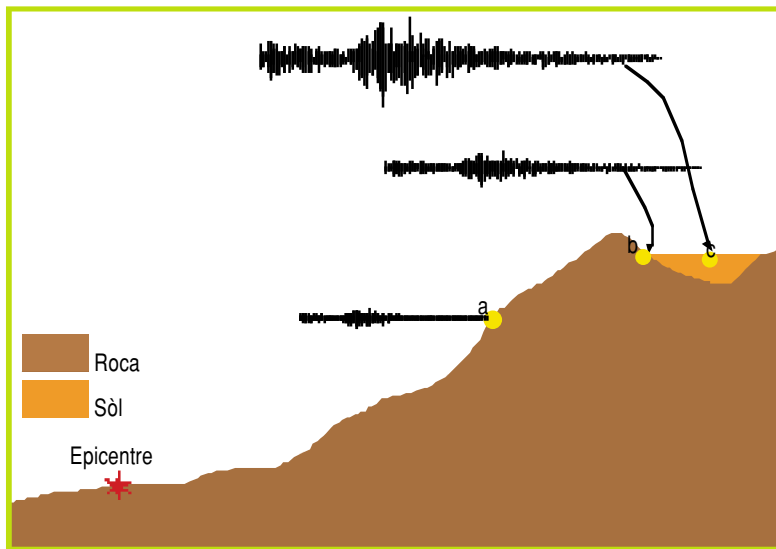
Un cop definits l'accelerograma d'entrada a la roca i les columnes de sòl amb les seves propietats físicomecàniques, s'ha aplicat el programa de modelització unidimensional ProShake. D'aquest càlcul s'obté la funció de transferència i el moviment del sòl a la superfície per a cada una de les columnes de sòl definides. A la figura 3 es mostren les funcions de transferència obtingudes en dues columnes de sòl definides en dos emplaçaments diferents: Escaldes i la Margineda.

Les variacions de la freqüència fonamental del sòl que s'han observat estan associades amb les variacions de la profunditat del basament rocós. El valor de l'amplificació està relacionat amb el contrast de les propietats físicomecàniques entre els materials que formen la columna de sòl i el basament rocós. La freqüència fonamental obtinguda amb el mètode de Nakamura en emplaçaments propers a les columnes de sòl s'ajusta bé a la freqüència fonamental de la funció de transferència.

Partint dels resultats obtinguts en el càlcul de la funció de transferència per a cada una de les columnes de sòl definides al llarg de la cubeta d'Andorra la Vella / Escaldes-Engordany s'ha fet una microzonació sísmica de la cubeta agrupant aquelles zones que tenen un comportament semblant. A la figura 4 es mostra el resultat d'aquesta zonació.

**Origen dels efectes de sòl.**  
D'esquerra a dreta: fortes discontinuïtats laterals, materials superficials tous i presència de relleus convexos.

Esquema de variació de la senyal sísmica en diferents emplaçaments (modificat de Selebi, M. *et al.*, 1987).



S'han caracteritzat cinc zones. A les zones 1, 2 i 3, les amplificacions es donen en les baixes freqüències (<2 Hz), mentre que a les zones 4 i 5 les amplificacions es produeixen en les altes freqüències (>2 Hz).

D'altra banda, partint del moviment del sòl calculat a la superfície, s'ha caracteritzat l'amplificació en termes de l'increment de la intensitat macrosísmica produïda per efectes de sòl. La taula 1 mostra l'increment de la intensitat macrosísmica que caldria aplicar a les cinc zones definides a la cubeta d'Andorra la Vella / Escaldes-Engordany d'acord amb la funció de transferència del sòl.

D'aquesta manera, la microzonació sísmica de la cubeta d'Andorra la Vella / Escaldes-Engordany s'ha caracteritzat d'acord amb l'increment de la intensitat macrosísmica, i s'han obtingut quatre zones amb un increment de +0.5 a +1.5, i una zona sense increment. En l'avaluació de la perillositat sísmica de la regió, per tal de considerar l'efecte de sòl, caldrà incrementar la intensitat macrosísmica assignada tenint en compte aquests valors.

## Conclusions

Aplicant el mètode de simulació numèrica lineal-equivalent unidimensional (programa ProShake) s'ha obtingut la funció de transferència i el moviment del sòl a la superfície per a cadascuna de les columnes de sòl. Partint del moviment del sòl a la superfície s'ha caracteritzat l'amplificació en termes de l'increment de la intensitat macrosísmica per a cada zona.

S'ha calculat la freqüència fonamental del sòl aplicant el mètode de Nakamura i s'ha comprovat que els valors obtinguts

s'ajusten als valors de la freqüència fonamental de la funció de transferència calculats amb el programa ProShake.

Partint dels resultats obtinguts amb cada una d'aquestes metodologies s'ha fet una microzonació sísmica de la cubeta d'Andorra la Vella / Escaldes-Engordany. Els resultats d'aquest estudi es tindran en compte, juntament amb l'avaluació de la vulnerabilitat dels edificis, en l'estimació del risc sísmic a la cubeta d'Andorra la Vella.

■ **Albert Macau, Sara Figueras, Teresa Susagna, Xavier Goula**  
Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC)

## Bibliografia

- BITRI, A.; CHARDON, A.; RICHLET, G. (2004). *Micro Zonage sismique de la vallée de la Cerdagne et de la principauté d'Andorre. Évaluation de répartition en profondeur de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement par la méthode SASW*. Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Report.
- FIGUERAS, S.; CORAL, H.; GOULA, X. (2003). «Estudis de risc sísmic a Andorra: utilització de mètodes experimentals i de simulació numèrica per a la microzonació sísmica d'àrees urbanitzades». *Horitzó*, núm. 4, p. 36-41.
- CRECIT (2001). *Base de Dades Geotècniques d'Andorra*. Andorra: Institut d'Estudis Andorrans.
- 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, p. 25-33.
- OLIVERA, C.; REDONDO, E.; LAMBERT, J.; RIERA MELIS, A.; ROCA, A. (2006). *Els terratrèmols dels segles XIV i XV a Catalunya*. Barcelona: Institut Cartogràfic de Catalunya.
- SECANELL, R.; MARTIN, C.; GOULA, X.; SUSAGNA, T.; TAPIA, M.; BERTIL, D.; DOMINIQUE, P.; FLETA, J. (2006). Probabilistic seismic hazard assessment of the Pyrenean region. *Journal of Seismology* (Submitted).
- SUSAGNA, T.; GOULA, X. (1999). *Catàleg de sismicitat. Atlas sísmic de Catalunya*. Barcelona: Institut Cartogràfic de Catalunya.
- TEIXIDÓ, T.; PALOMERAS, I.; VALLS, P.; MARTÍNEZ, P. (2003). «Prospecció sísmica a la cubeta d'Andorra la Vella / Escaldes-Engordany». *Horitzó*, núm. 4, p. 3-25

