

# **Modelització analògica de l'efecte topogràfic: limitacions d'un estudi pilot i resultats**

**Autor: Octavi Gómez Novell**

**Tutora: Dra. María Ortuño Candela**

Màster de Recursos Minerals i Riscos Geològics

Especialitat de Riscos Geològics

Juliol 2016



UNIVERSITAT DE  
BARCELONA

**UAB**

Universitat Autònoma  
de Barcelona

# Modelització analògica de l'efecte topogràfic: limitacions d'un estudi pilot i resultats

Octavi Gómez Novell / Màster de Recursos Minerals i Riscos Geològics (UB-UAB)

## ABSTRACT

The topographic effect causes seismic wave amplification on the top of the mountains. This amplification reportedly produces more damage on the infrastructures of these parts of the reliefs and for this reason this effect has been widely studied using mainly numerical and experimental approximations. However, it has never been studied using analogue modelling. This study aims to start pointing out the main issues and results of carrying out this type of modelling. Two gelatin analogue models have been made in order to achieve a correct scaling of crust's elastic parameters and acoustic waves have been used in order to reproduce seismic P-wave propagation. Two experiments have been performed in the models allowing the observation of attenuation by geometrical spreading and topographic amplification in most of the acoustic signals. The experimental setup also affects the signals for some configurations producing anomalies in the attenuation and amplification tendencies. Measurements of the acceleration in the model's surface have also been performed, but these don't show any enhanced motions at the top of the relief. The amplification depends on the frequency of the acoustic waves, thus the waves with wavelengths more similar to the mountain's length are the most amplified (12% to 28% of maximum amplification), which is in agreement with most of the studies. Nevertheless, the limitations of this study must be taken into account when it comes to relating the processes in the model with the natural ones. The absence of shear waves in the experimental runs and scaling problems, especially for the acoustic wave frequencies, constitute the main limitations of this study. However, the fact that some processes identified in the model actually occur in the nature, ensure the validity of the method at least from a qualitative perspective. Several improvements must be applied in this method in order to obtain better results and get more useful clues for the natural hazard assessment in the future.

## 1. INTRODUCCIÓ

Un dels principals problemes als quals han de fer front els estudis de perillositat sísmica són els efectes locals i, en particular, els efectes de l'amplificació de les ones sísmiques a les parts altes dels relleus topogràfics (Geli *et al.*, 1988; Massa *et al.*, 2014). Per tal de resoldre la manca de coneixement sobre aquests efectes, la comunitat científica ha fet esforços en l'experimentació sísmica mitjançant models numèrics i estudis experimentals (Paolucci, 2002; Ma *et al.*, 2007; Buech *et al.*, 2010). En canvi, aquesta problemàtica mai s'ha estudiat mitjançant la modelització analògica, tot i constituir un mètode molt útil des del punt de vista qualitatiu, ja que permet reproduir i entendre fenòmens que a la naturalesa es produeixen a escales espacials i temporals difícils d'estudiar.

### 1.1. Objectius i motivació del treball

Els principals objectius d'aquest treball són:

- A) Determinar les limitacions d'estudiar l'efecte topogràfic en un model analògic de gelatina mitjançant ones acústiques.

- B) Portar a terme un seguit d'experiments de baix cost econòmic per poder reproduir l'atenuació i amplificació topogràfica de les ones.
- C) Valorar la validesa i significat geològic dels resultats obtinguts en els experiments, tenint en compte les limitacions.

L'estudi que aquí es presenta proposa una metodologia de treball que no ha estat utilitzada per estudiar l'efecte topogràfic. En aquest punt neix la motivació del treball, que s'ha pensat com un document que pot ser útil a l'hora de donar a conèixer les limitacions i problemes que hom es troba quan vol modelitzar analògicament aquest fenomen sismològic. En cap dels casos aquest treball pretén resoldre ni solucionar les qüestions poc clares o desconegudes sobre l'efecte topogràfic i cal dir que tampoc està dissenyat per a poder fer-ho. La seva intenció és valorar la viabilitat de la modelització proposada, el significat dels resultats obtinguts i a l'hora proposar una sèrie de recomanacions per a estudis futurs sobre aquesta problemàtica.

## 1.2. Antecedents

### 1.2.1. L'efecte topogràfic: resultats i mètodes d'estudi

L'efecte topogràfic és, juntament amb els efectes de sòl i els estratigràfics, un efecte d'amplificació sísmica local (Massa *et al.*, 2014). Dins d'aquests efectes locals, els estratigràfics i els de sòl han estat àmpliament documentats i estudiats per diversos autors al llarg dels últims quaranta anys (Sills, 1978; Griffiths & Bollinger, 1979; Bard & Tucker, 1985; Geli *et al.*, 1988; Chavez-Garcia *et al.*, 1996; LeBrun *et al.*, 1999; Paolucci *et al.*, 1999; Ferretti *et al.*, 2007, tots ells a Massa *et al.*, 2014). L'efecte topogràfic, en canvi, ha estat un dels fenòmens locals menys estudiats tot i les evidències que es tenen de la seva existència (Massa *et al.*, 2014).

L'efecte topogràfic és un fenomen que s'identifica en determinades zones quan es produeixen sismes importants. Després d'aquests sovint s'observa que, en zones amb relleus topogràfics pronunciats (turons, muntanyes, serralades), les infraestructures de les parts més altes pateixen danys més intensos que les que se situen a les parts més baixes, a la base dels relleus (Geli *et al.*, 1988). Això es deu a que les irregularitats topogràfiques d'una zona produeixen canvis en certes característiques físiques de les ones sísmiques quan s'hi propaguen, especialment en l'amplitud de moviment (Geli *et al.*, 1988; Buech *et al.*, 2010). Generalment, aquestes ones s'amplifiquen a les parts altes dels relleus, augmentant l'amplitud del moviment sísmic i, per tant, generant més danys en les infraestructures de la zona. A les parts basals d'aquests relleus no s'observa amplificació (Geli *et al.*, 1988; Pedersen *et al.*, 1994; Ashford & Sitar, 1997; Ma *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2009; Anggraeni, 2010; Buech *et al.*, 2010; Massa *et al.*, 2014). A part dels canvis físics en les ones sísmiques, els relleus topogràfics tendeixen a actuar com a focus d'atracció o concentració de les ones sísmiques (focalització), mentre que les valls tendeixen a actuar com a dispersors d'aquestes ones (dispersió). La focalització ("*focusing*") produeix amplificació de l'amplitud de les ones, mentre que la dispersió ("*defocusing*") pot arribar a produir des-amplificació (Anggraeni, 2010), és a dir, reducció de l'amplitud del moviment sísmic.

Els primers estudis sobre l'efecte topogràfic es basen en l'observació i descripció de moviments diferencials del terreny a les parts altes de les muntanyes respecte la base d'aquestes durant terratrèmols importants. Exemples d'aquestes observacions es poden trobar a Siro (1982) i Çelebi & Hanks (1986), a Geli *et al.* (1988). Les dades instrumentals en estacions sísmiques també mostren la influència de la topografia en el moviment del terreny. Estudis com els de Davis & West (1973), Rogers *et al.* (1974), Griffiths & Bollinger (1979) o Tucker *et al.* (1984)

en són exemples. Aquests estudis d'identificació de l'efecte topogràfic com a tal han estat seguits d'una sèrie d'estudis que no només pretenen descriure el fenomen, sinó que també caracteritzar-lo i entendre'l. Aquests s'han portat i se segueixen portant a terme mitjançant dues aproximacions o mètodes d'estudi principals, descrits a Geli *et al.* (1988):

- *Mètodes experimentals.* Es basen en dades experimentals obtingudes a partir de registres sísmics en estacions situades en els relleus que s'estudien. Els mètodes experimentals permeten estudiar l'efecte topogràfic mitjançant dades sísmiques reals, ja siguin a partir de terratrèmols naturals (Pedersen *et al.*, 1994; LeBrun *et al.*, 1999; Buech *et al.*, 2010; Massa *et al.*, 2014) o a partir de detonacions que indueixen la generació d'ones sísmiques (Davis & West, 1973).

A diferència dels estudis numèrics, els experimentals registren senyals d'ones amplificades com a conseqüència de la superposició de diversos efectes locals, de manera que la contribució de l'efecte topogràfic en aquestes amplificacions queda camuflada i és difícil de discernir (Geli *et al.*, 1988). S'ha constatat que la influència dels efectes estratigràfics i de la presència de formacions superficials als vessants d'un relleu genera major amplificació que la pròpia geometria del relleu (Geli *et al.*, 1988). Aquest fet dificulta l'estudi de l'efecte topogràfic de forma aïllada i ha fet que molts autors s'hagin inclinat per la modelització numèrica en l'estudi del fenomen.

-*Mètodes numèrics.* Es basen en la realització de models numèrics que permeten caracteritzar l'efecte topogràfic en una determinada regió que es modelitza o bé considerant un escenari ideal. Exemples d'aquesta metodologia es troben a Boore (1972), Geli *et al.* (1988), Ashford & Sitar (1997), Ashford *et al.* (1997), Paolucci (2002), Ma *et al.* (2007), Lee *et al.* (2009), Anggraeni (2010) i Massa *et al.* (2014).

La caracterització de l'efecte topogràfic mitjançant la modelització numèrica assumeix, en la majoria de casos, models topogràfics sobre-simplificats, cosa que esdevé la principal limitació d'aquest mètode. Geli *et al.* (2008), Paolucci (2002) i Massa *et al.* (2014) parlen d'aquesta sobre-simplificació dels models numèrics, en la qual s'acostuma a no considerar la complexitat morfològica dels relleus ni tampoc la complexitat geològica de la zona d'estudi, ja sigui estratigràfica (estratificació, formacions superficials, zones d'alteració) com tectònica (fractures i falles) (Massa *et al.*, 2014). Aquesta limitació, generalment, porta a uns resultats que subestimen l'amplificació que s'experimenta a la realitat i que es pot observar en els registres experimentals; els valors d'amplificació que s'obtenen dels estudis numèrics són gairebé sempre menors que els que s'observen a la realitat (Geli *et al.*, 1988; LeBrun *et al.*, 1999; Massa *et al.*, 2014). No obstant, el fet que s'assumeixin simplificacions en aquests models pot ser avantatjós respecte dels estudis experimentals, ja que permeten aïllar l'efecte topogràfic de la resta d'efectes locals. En certa manera, simplificant la geologia del model s'eliminen efectes com l'estratigràfic i es pot estudiar de manera aïllada la influència de la topografia en l'amplificació sísmica (Geli *et al.*, 1998; Anggraeni, 2010).

### 1.2.2. Modelització analògica; aplicacions en sismologia

El mètode de la modelització analògica per estudiar fenòmens geològics i processos geodinàmics ha estat utilitzat durant més de 200 anys i se segueix utilitzant avui en dia. Les aplicacions geològiques de la modelització analògica són molt diverses i inclouen camps que van des de la geologia estructural fins a la mineralogia o la petrologia (Schellart & Strak, acceptat). Alguns exemples de treballs recents que han utilitzat la modelització analògica són Geyer (2007) per estudiar fenòmens de col·lapse de calderes volcàniques, Ferrer (2012) per

estudiar tectònica salina i Chavez (2012) per estudiar intrusions de dics. D'altres autors com Corti *et al.* (2003), Graveleau *et al.* (2012) i Schellart & Strak (acceptat) parlen de gran varietat de materials anàlegs per modelitzar fenòmens geològics, entre els quals està la gelatina, que és d'interès en el present estudi.

La modelització analògica també ha estat sovint emprada per a estudiar fenòmens que tenen a veure amb els riscos geològics, especialment en l'àmbit dels moviments de vessant. Estudis com els de Bachmann *et al.* (2004; 2006; 2009) i Chemenda *et al.* (2005) caracteritzen la influència de la gravetat en el la generació de moviments de vessant. En aquests estudis es modelitzen relleus topogràfics que han servit d'inspiració alhora de dissenyar el model topogràfic que es presenta en aquest treball (veure apartat 2.3.2). D'altres autors han estudiat la relació que hi ha entre els terratrèmols i el desencadenament de moviments de vessant profunds, introduint així un enfocament més sismològic a aquest tipus d'estudis (Wartman *et al.*, 2003; 2005; Dafni & Wartman, 2014).

Malgrat l'àmplia trajectòria històrica de la modelització analògica, s'ha vist que en poques ocasions aquesta s'ha emprat per estudiar fenòmens sismològics. Tot i això, alguns autors han apostat per metodologies similars a les que es proposen en aquest treball, com és el cas de Mendoza *et al.* (2010) que estudien els senyals acústics que genera l'obertura d' hidrofractures per la intrusió d'un fluid en un model de gelatina i ho relacionen amb el "tremor" sísmic que es pot detectar durant intrusions magmàtiques. Lyons *et al.* (2013) estudien aquest mateix tremor a partir d'ones acústiques, però utilitzant gels enlloc de gelatina. En aquests treballs els autors tracten amb ones acústiques principalment en el rang freqüencial auditiu. Sherlock & Evans (2001) estudien l'escalatge i registre d'ones sísmiques en models analògics de sorra per aplicacions en la sísmica de reflexió i, conseqüentment, en la geologia dels hidrocarburs.

### 1.3. Mètode de treball

Les parts principals del flux de treball que s'ha seguit per portar a terme aquest estudi es presenten a l'esquema de la figura 1.

El mètode s'ha iniciat amb una recull bibliogràfic sobre els temes que es tracten en el treball, que ha servit posteriorment pel disseny dels models i dels experiments. Aquests experiments s'han portat a terme, obtenint unes dades que s'han analitzat i interpretat amb l'ajuda de les dades bibliogràfiques consultades.

Les fases metodològiques més importants, que són el disseny experimental i l'execució dels experiments, s'expliquen detalladament a l'apartat 2. El disseny experimental inclou la selecció del material anàleg, les ones anàlogues i l'acotament de les condicions i paràmetres per a l'escalatge dels models analògics, així com el seu disseny (apartats 2.1 i 2.2). L'execució experimental (apartat 2.3) inclou l'explicació i justificació de les configuracions seleccionades per a cada un dels experiments, que han estat dissenyades per estudiar diversos fenòmens relacionats amb la propagació d'ones acústiques en els models. També es presenten les especificacions tècniques d'aquestes configuracions, dels mecanismes de generació d'ones i dels aparells de registre que s'han utilitzat per obtenir les dades sobre les quals s'ha treballat durant les fases d'anàlisi i interpretació.

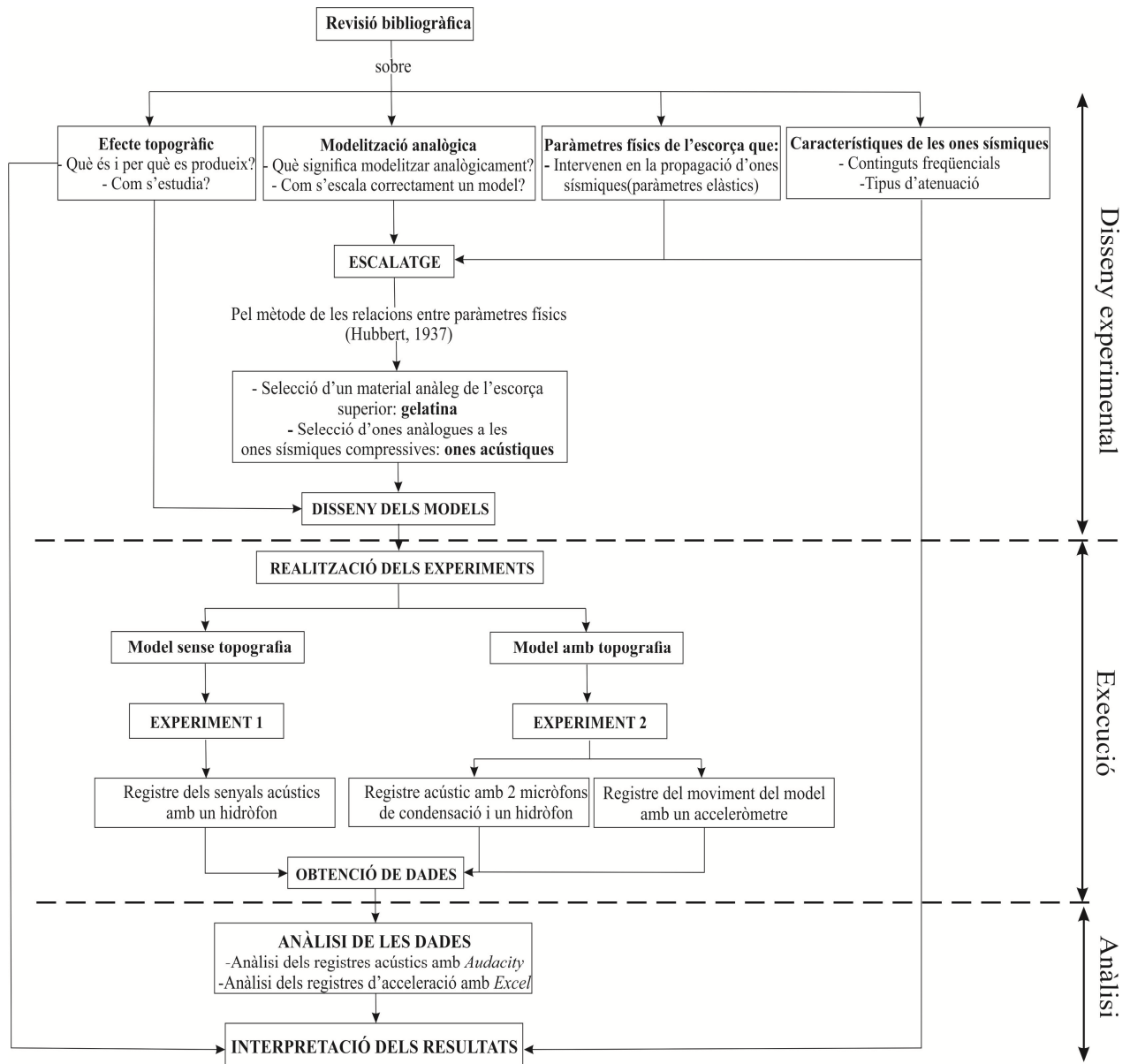


Fig. 1. Esquema de les principals fases del flux de treball que s'ha seguit en aquest estudi.

## 2. MODELITZACIÓ ANALÒGICA

### 2.1. Material anàleg i ones anàlogues

En la modelització analògica d'aquest treball es pretén reproduir la propagació d'ones sísmiques P per l'escorça superior, de manera que és vital disposar d'un material anàleg que reproduïxi el comportament elàstic de l'escorça i unes ones dinàmicament similars a les P.

#### 2.1.1. Material anàleg.

Per reproduir les condicions de l'escorça superior en els models analògics s'ha escollit la gelatina com a material anàleg, considerant la configuració cortical més simple: una secció d'escorça homogènia, isòtropa i amb comportament elàstic. La gelatina és un material amb un comportament ideal per modelitzar medis homogenis i isòtrops (Kavanagh *et al.*, 2013) i, com

l'escorça, presenta un comportament elàstic si es consideren deformacions de curta durada (Di Giuseppe *et al.*, 2009; Kavanagh *et al.*, 2013) com la propagació d'ones. S'ha seleccionat la gelatina neutra d'origen porcí, ja que és considerada com un bon anàleg a l'escorça superior segons Di Giuseppe *et al.* (2009) i Kavanagh *et al.* (2013). La concentració de la gelatina utilitzada és del 6.5%–6.7% en pes, ja que és la que garanteix unes propietats elàstiques de la gelatina més escalades per a l'escorça (apartat 2.2).

La Taula 1 presenta els principals paràmetres elàstics de la gelatina a la concentració emprada. La majoria no s'han pogut mesurar directament per falta de la instrumentació necessària, de manera que s'ha recorregut a dades bibliogràfiques, entre les quals hi ha certes variacions.

| Paràmetres                       | Gelatina (6,5%–6,7% de concentració en pes)                                              |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Densitat ( $\rho$ )              | 1164 kg/m <sup>3</sup>                                                                   |
| Mòdul de rigidesa ( $\mu$ )      | 14,6 kPa (Czerner <i>et al.</i> , 2013)<br>18 kPa–28 kPa (Markidou <i>et al.</i> , 2005) |
| Mòdul de Young (E)               | ~60 kPa ( Markidou <i>et al.</i> , 2005; Kavanagh <i>et al.</i> , 2013)                  |
| Coefficient de Poisson ( $\nu$ ) | 0,4–0,5 (Kavanagh <i>et al.</i> , 2013)                                                  |

**Taula 1.** Taula dels principals paràmetres elàstics de la gelatina que intervenen en la propagació de les ones elàstiques.

### 2.1.2. Ones anàlogues

La modelització analògica de les ones sísmiques no és una tasca fàcil, ja que hi ha diversos tipus d'ones sísmiques i cadascuna té diverses implicacions dinàmiques. En aquest estudi s'ha centrat l'atenció únicament a les ones internes compressives o P, que s'han reproduït mitjançant ones acústiques en el model. S'ha decidit fer la simulació només d'ones P per dos motius:

- Són ones compressives que tenen un anàleg directe clar: les ones acústiques (Lay & Wallace, 1995). Aquestes es poden generar i registrar fàcilment i es poden analitzar amb aparells i *softwares* dels que es disposa. En aquest cas s'ha fet servir el *software* d'enregistrament i anàlisi de so *Audacity*.
- Les ones internes de cisalla (S) i les superficials (Rayleigh i Love) generen moviments complexos del medi en diverses components, cosa que no ocorre amb les ones P, que mouen les partícules únicament en la direcció de propagació (Lay & Wallace, 1995). La major facilitat d'interpretar aquestes dinàmiques ha fet que s'hagi optat per aquestes ones.

## 2.2. Escalatge dels paràmetres del model

### 2.2.1. Principis bàsics de l'escalatge

L'escalatge constitueix un dels punts més importants i difícils d'assolir a l'hora de realitzar un model analògic. Tots els models analògics han de complir tres requisits principals per tal de que estiguin correctament escalats (Hubbert, 1937):

-Similitud geomètrica: totes les longituds del model guarden la mateixa proporcionalitat respecte la natura i tots els angles es conserven.

-Similitud cinemàtica: la durada requerida pel procés que es representa en el model és proporcional a la durada d'aquest procés a la natura.

-Similitud dinàmica: les forces que actuen en un determinat element d'aquest model són tals que el moviment que generen és geomètricament i dinàmicament similar al que es produeix en un element a la naturalesa.

### 2.2.2. Condicions d'escalatge

L'escalatge dels models es pot dur a terme a partir de diversos mètodes. El que es considera en aquest estudi és el de les relacions entre els paràmetres físics, proposat per Hubbert (1937). Suposant un paràmetre  $X$ , el quocient ( $X^*$ ) entre aquest paràmetre al model ( $X_{\text{model}}$ ) i a la realitat ( $X_{\text{realitat}}$ ), permet comprovar que es compleixen els requisits de l'escalatge en les diferents variables (Eq. 1):

$$X^* = X_{\text{model}} / X_{\text{realitat}} \quad [\text{Eq. 1}]$$

D'aquesta manera, multiplicant  $X_{\text{realitat}}$  per  $X^*$  s'obté el valor teòric de  $X$  que hauria de presentar el model per estar ben escalat. Aquest valor de  $X_{\text{model}}$  teòric i el valor real ( $X_{\text{model}}$ ) han de coincidir per tal de que l'escalatge d'aquest paràmetre sigui correcte. Qualsevol altre paràmetre  $Y$  que intervingui en el model i que tingui les mateixes unitats que  $X$ , ha de tenir un factor  $Y^*$  ( $Y_{\text{model}} / Y_{\text{realitat}}$ ) amb el mateix valor que  $X^*$  ( $Y^* = X^*$ ) per estar ben escalat. Per últim, aquells paràmetres que depenguin o estiguin definits per altres paràmetres del model, per exemple  $Z = X/Y$ , han de tenir un factor  $Z^* = X^*/Y^*$  per garantir un correcte escalatge.

Per què el model d'aquest treball estigui escalat respecte l'escorça elàstica i les ones sísmiques s'han de considerar 10 paràmetres del model: 6 paràmetres de la gelatina (longitud ( $L$ ), densitat ( $\rho$ ), esforços ( $\sigma$ ), mòdul de rigidesa ( $\mu$ ), mòdul de Young ( $E$ ), coeficient de Poisson ( $\nu$ )), 3 paràmetres físics de les ones acústiques en gelatina (durada ( $t$ ), velocitat de propagació ( $c$ ) i rangs freqüencials) i 1 paràmetre extern al model (gravetat ( $g$ )).  $L$ ,  $\rho$  i  $g$  són independents.

#### a) Factors d'escalatge dels paràmetres independents

**$L^*$ .** El factor  $L^*$  ve determinat per les dimensions de l'experiment i per l'escala que s'ha decidit donar-li als models. En aquest cas s'ha considerat una escala 1:50000, ja que és la que garanteix un millor escalatge dels esforços i dels paràmetres elàstics corticals i permet reproduir, amb un baix cost econòmic, una regió representativa de l'escorça i un relleu de dimensions realistes. Per tant, el model està geomètricament ben escalat.  $L^* = 2 \cdot 10^{-5}$  (1 cm model / 50000 cm realitat).

**$\rho^*$ .** El quocient  $\rho^*$  depèn de la densitat de la gelatina, que alhora depèn de la concentració que s'hagi seleccionat. En el cas que es tracta, la gelatina al 6,5%–6,7% de concentració en pes té una densitat de 1164 kg/m<sup>3</sup>. L'escorça superior té una densitat mitjana de 2700 kg/m<sup>3</sup> (Zhu, 2010), de manera que el quocient  $\rho^*$  és 0,43

**$g^*$ .** El quocient de gravetat  $g^*$  és 1 ja que el model es desenvolupa sota el camp gravitatori terrestre.

#### b) Factors d'escalatge dels paràmetres dependents

**$\sigma^*$ .** Els esforços depenen de  $L$ ,  $g$  i  $\rho$ . D'aquesta manera, el factor d'esforços ( $\sigma^*$ ) respon a  $\sigma^* = L^* \cdot g^* \cdot \rho^* = 8,6 \cdot 10^{-6}$ .  $L^*$  i  $\sigma^*$  només varien un ordre de magnitud, llavors segons Smit (2005), els esforços estan ben esclats en el model i, per tant, està dinàmicament ben escalat.



$\mu^*$ . La rigidesa de l'escorça superior oscil·la de 0,4 GPa a 10 GPa (Di Giuseppe *et al.*, 2009; Zhu, 2010). Com que  $\mu$  és un paràmetre amb unitats d'esforç,  $\mu^* = \sigma^* = 8,6 \cdot 10^{-6}$ . D'aquesta manera, s'obté que la rigidesa de la gelatina hauria de ser d'entre 3,4 kPa i 86 kPa per estar ben escalada. Czerner *et al.* (2013) determinen en 14,6 kPa la rigidesa de la gelatina porcina, cosa que reproduïx una escorça de rigidesa 1,7 GPa, que està dins el rang dels valors naturals per l'escorça, tot i que és baix. Markidou *et al.* (2005) donen valors de  $\mu$  per la gelatina d'entre 18 kPa i 24 kPa, que escalen una escorça de rigidesa 2,1 GPa–2,8 GPa, també en el rang natural.

$E^*$ . El mòdul de Young per l'escorça pot oscil·lar entre 1 GPa i 10 GPa (Kavanagh *et al.*, 2013). Considerant que  $E$  és un paràmetre amb unitats d'esforç,  $E^* = \sigma^* = 8,6 \cdot 10^{-6}$ . Per tant, el mòdul de Young de la gelatina hauria d'estar entorn de 8,6 kPa–86 kPa per estar ben escalat. La gelatina té mòduls de Young al voltant dels 60 kPa per a les concentracions utilitzades (Markidou *et al.*, 2005; Kavanagh *et al.*, 2013), que simulen una escorça amb un mòdul de Young d'uns 7 GPa, que està dins del rang dels valors naturals.

$\nu^*$ . El coeficient de Poisson de les roques és 0,2–0,3 (Zhu, 2010). Els paràmetres adimensionals han de tenir el mateix ordre de magnitud en el model que en la realitat (Hubbert, 1937). Com que la gelatina té un  $\nu$  de 0,4–0,5 (Markidou *et al.*, 2005), el paràmetre està ben escalat.

$t^*$ . La durada depèn de  $L$  i  $g$ , segons l'equació de la gravetat ( $t = \sqrt{L/g}$ ). D'aquesta manera, el factor  $t^*$  respon a  $t^* = \sqrt{L^*/g^*} = 4,5 \cdot 10^{-3}$ . Considerant que la durada d'alguns terratrèmols, els de gran magnitud, pot ser superior als 3 minuts (Lee Marsh & Gianotti, 1994), multiplicant aquesta durada per  $t^*$  s'obté que en el model la propagació acústica hauria de tenir durades de fins a 1s. Sabent que els registres acústics en els experiments duren al voltant d'1 s, el fenomen de propagació d'ones acústiques en el model és cinemàticament similar als terratrèmols reals.

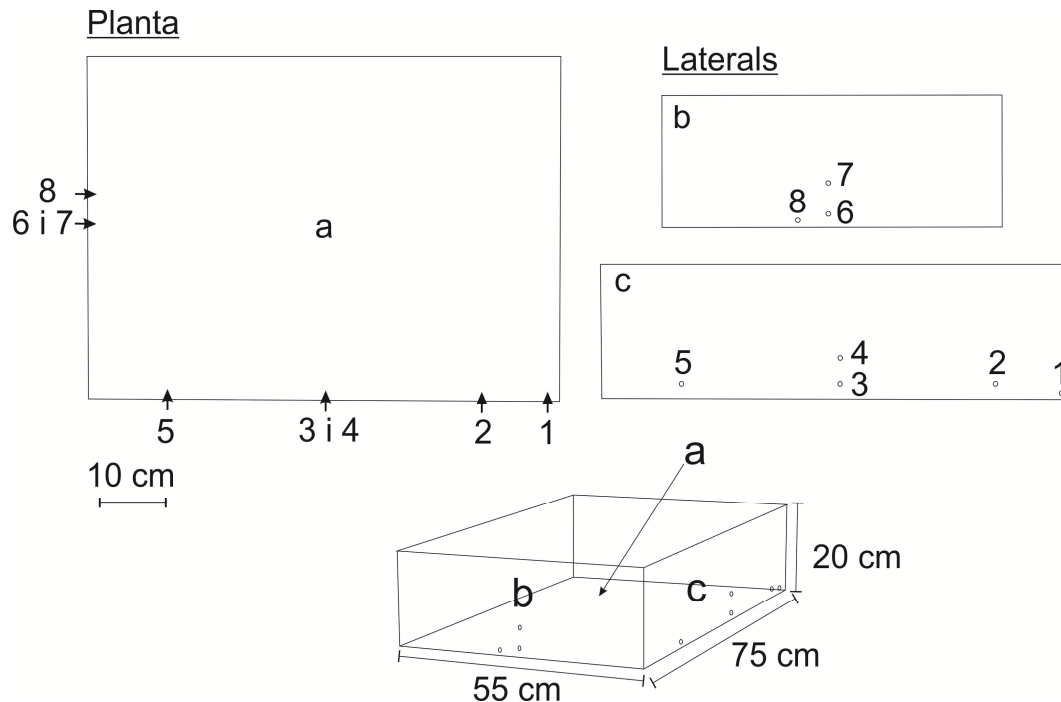
$c^*$ . La velocitat de les ones no s'ha pogut escalar correctament. Les ones P tenen velocitats entre 5700 m/s i 6400 m/s (Artemieva, 2002) en roca no alterada i homogènia com la que s'ha volgut simular en aquest treball. Considerant que  $c^* = L^*/t^* = 4,4 \cdot 10^{-3}$ , les ones acústiques en el model haurien de tenir velocitats de 25–28 m/s, que no s'ajusten a la velocitat real. En gelatines al 6.5%–6.7% en pes, la velocitat de propagació del so és de 2300 m/s (Parker & Povey, 2012).

**Rangs freqüencials (longituds d'ona).** Les ones P tenen freqüències majoritàries que oscil·len entre 1 Hz fins a menys de 20 Hz (USGS, 2016). Considerant velocitats de propagació de 5700 m/s–6400 m/s (Artemieva, 2002) i que la longitud d'ona és el quocient entre la velocitat ( $c$ ) i la freqüència, les seves longituds d'ona varien de 285 m a 6400 m. Aplicant  $L^*$  ( $2 \cdot 10^{-5}$ ), les longituds d'ona de les ones acústiques en el model haurien de ser de 0,6 cm–13 cm, que corresponen a freqüències d'entre 17,7 kHz i 383 kHz i que en la seva major part queden fora del rang auditiu (20 Hz–20 kHz) i de detecció dels aparells que es disposa (veure apartat 2.3). Els senyals acústics utilitzats en els experiments tenen continguts freqüencials de 1 kHz a 22 kHz (apartat 3), de manera que només les altes freqüències dels registres (17,7 kHz–22 kHz) s'ajusten a l'escalatge de les ones P i en reproduïxen les freqüències més baixes (1 Hz–1,2 Hz).

### 2.3. Configuració dels experiments i procediment

En aquest treball s'han portat a terme dos experiments que s'han executat en dues configuracions experimentals amb models analògics diferents. En ambdós casos els experiments s'han portat a terme en un recipient rectangular transparent de policarbonat de dimensions 75 cm x 55 cm x 20 cm i amb 8 orificis circulars de 2 mm de diàmetre distribuïts al llarg de les

parets laterals del recipient (Fig. 2). Els orificis, que és per on s'emeten les ones acústiques al model, s'han situat a diferents nivells per observar la variació dels senyals acústics amb la profunditat i possibles reflexions de les ones a les vores del recipient. Aquestes dimensions de l'experiment són les que permeten reproduir una secció d'escorça més representativa i un relleu topogràfic de dimensions més realistes considerant una escala 1:50000. La gelatina que ha conformat els models s'ha preparat a temperatura ambient (20°C–21°C) i s'ha deixat reposar 24 h a aquesta mateixa temperatura abans de portar a terme cadascun dels experiments.

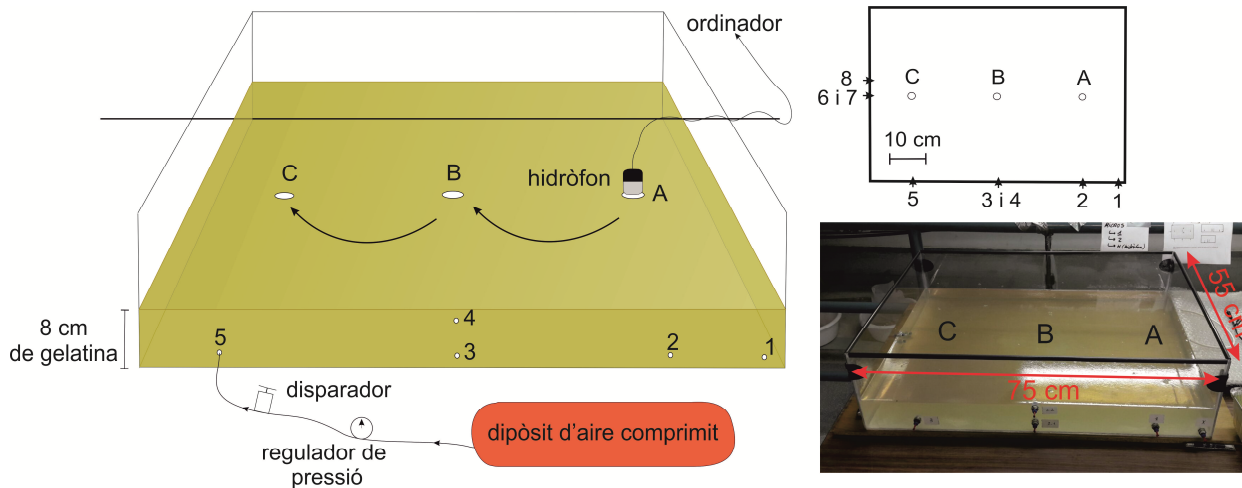


**Fig. 2.** Esquema del recipient dins el qual s'han portat a terme els dos experiments amb gelatina. S'il·lustren les visions en planta (a) i dues de les parets laterals (b i c) on hi ha els 8 orificis d'entrada amb la numeració corresponent.

### 2.3.1. Experiment 1

L'objectiu d'aquest experiment és el de verificar l'atenuació de les ones acústiques en el model i comprovar que la configuració experimental i la font d'ones són adequades per aquest mètode. El model consisteix en una sola capa uniforme de 8 cm de gruix de gelatina (6,5%–6,7% de concentració en pes) dins del recipient esmentat (Fig. 3). L'experiment emula una porció de l'escorça superior de 4 km de gruix i 37,5 km x 27,5 km de costats.

La generació d'ones acústiques s'ha fet a partir de tirs d'aire comprimit des d'un calderí a pressió (8 bars) fins la gelatina a través dels 8 diferents orificis del recipient (Fig. 3). Els tirs d'aire, realitzats amb un disparador manual, són puntuals en el temps (~0,1 s de durada) i a pressió controlada mitjançant un regulador de pressió de 0,5 bars de precisió. S'han repetit diversos tirs a 1 i 2 bars, que és el rang de pressions que menys danya la integritat de la gelatina. Els senyals acústics dels diversos tirs d'aire comprimit s'han enregistrat en tres punts al llarg del model a una freqüència de mostreig de 44000 Hz (44000 mostres/s). Cada tir des de cadascuna de les 8 posicions de tir s'ha enregistrat dues vegades des de cadascuna de les posicions de registre amb un hidròfon (Fig. 3).



**Fig. 3.** Esquema de la configuració del model de l'experiment 1. A l'esquema s'hi poden observar les posicions de mesura de l'hidròfon (A, B i C) i el mecanisme (esquemàtic) d'emissió de tirs d'aire comprimit, amb el dipòsit d'aire comprimit a 8 bars, el regulador de pressió i el disparador de tirs d'aire. L'hidròfon s'ha desplaçat al llarg de l'experiment seguint les fletxes. A la part superior dreta de la figura es presenta un esquema en planta del model i a la part inferior dreta es mostra una fotografia del model en aquest experiment. Fotografies de l'experiment i vídeos disponibles a l'annex 1 (veure pàg. 26).

L'hidròfon té una sensibilitat de  $\pm 4$  dB i un rang de detecció freqüencial de  $<10$  Hz a  $>100$  KHz. Aquestes són les propietats de l'hidròfon en aigua, tot i que s'ha observat que també són vàlides per la gelatina, ja que té un 93.3%–93.5% en pes d'aigua. L'aparell s'ha subjectat d'una barra metàl·lica de manera que el seu pes (105 g) no repercuteixi sobre el model. Com que es tracta d'un dispositiu omnidireccional, s'ha submergit 2 cm dins la gelatina en cada punt de registre per tal de detectar les ones acústiques que es propaguen pel seu interior. S'ha comprovat que l'hidròfon no registra en l'aire i, per tant, els sons de l'exterior no influeixen en el senyal. Els senyals acústics s'han obtingut i analitzat amb el programa d'àudio *Audacity*.

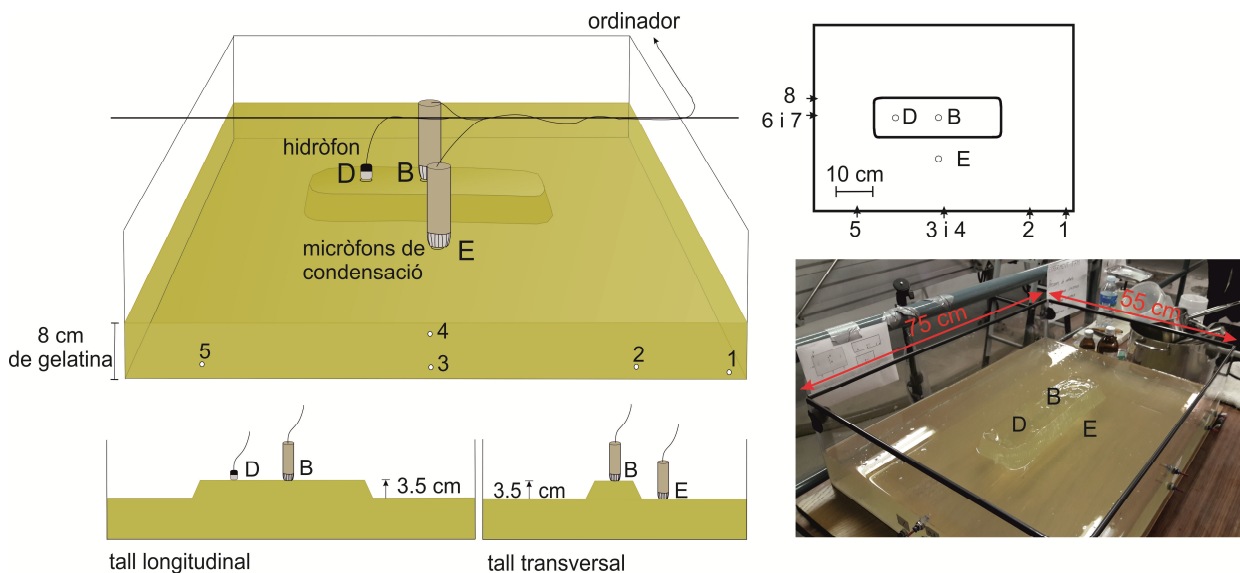
### 2.3.2. Experiment 2

L'objectiu d'aquest experiment és el de caracteritzar l'efecte de la topografia en a) la propagació d'ones acústiques i b) en l'acceleració del model. El model d'aquest experiment consisteix en una capa uniforme de 8 cm de gruix de gelatina (6,5%–6,7% en pes) que té incorporat un relleu topogràfic simètric conformat de la mateixa gelatina. Per assegurar la continuïtat i uniformitat entre el relleu topogràfic i la resta del model, el relleu s'ha solidificat prèviament en un motlle, s'ha col·locat a l'interior del recipient del model i aquest s'ha reomplert amb gelatina líquida fins als 8 cm, fent que així solidifiquin de forma conjunta.

El relleu és allargat en la direcció del costat llarg del recipient en que es duu a terme l'experiment, té unes dimensions de 36,5 cm x 11,5 cm x 3,5 cm i la part superior plana (Fig. 4). Els vessants tenen un pendent d'uns  $60^\circ$  i reproduïx un relleu altiplanat d'uns 18 km de llarg i 6 km d'ample amb una altura d'uns 1750 m d'altura. La forma allargada del relleu permet estudiar la influència de la seva orientació respecte de les ones incidents en l'amplificació topogràfica (Massa *et al.*, 2014). Els pendents abruptes ( $> 60^\circ$ ) són els que imposen unes millors condicions per a l'amplificació topogràfica (Geli *et al.*, 1998; Ashford *et al.*, 1997; Paolucci, 2002; Massa *et al.*, 2014) i per això s'han considerat en aquest model.

a) *Registre d'ones acústiques*

La generació d'ones acústiques s'ha realitzat de la mateixa manera que a l'experiment 1 i en les mateixes condicions. El registre d'aquestes s'ha fet a partir de dos micròfons de condensació ubicats un a la part superior i l'altre a la base de la topografia i un hidròfon situat sobre la topografia (Fig. 4). La freqüència de mostreig és la mateixa que en l'experiment 1; 44000 Hz (44000 mostres/s). S'han registrat cadascun dels tirs de forma simultània amb els tres aparells a 1 bar i a 2 bars i les mesures s'han repetit dues vegades per cada valor de pressió.



**Fig. 4.** Esquema de la configuració del model de l'experiment 2. S'hi pot reconèixer el relleu topogràfic i l'ubicació dels diferents aparells de registre a les posicions B, D i E. A les posicions B i E s'hi ubiquen els micròfons de condensació i a la posició D l'hidròfon. Tots tres aparells registren de forma simultània els diferents senyals acústics de cada punt de tir. A la part inferior esquerra de la figura es presenten dos tallats en les seccions perpendicular i paral·lela al relleu i a la part superior dreta un esquema en planta del model. També es mostra una fotografia del model en l'experiment a l'extrem inferior dret de la figura. Fotografies de l'experiment disponibles a l'annex 1 (veure pàg. 26).

Els micròfons tenen una sensibilitat de +/-2 dB i un rang freqüencial de 20 Hz a 22 kHz. Aquest rang freqüencial és menor que el de l'hidròfon, però la seva sensibilitat és major, cosa que els permet detectar millor que l'hidròfon les freqüències menys predominants (les més altes) del rang auditiu en els senyals. En aquest cas, els aparells no s'han submergit en la gelatina, sinó que s'han col·locat a la superfície, ja que interessa conèixer el comportament de les ones que arriben fins a la superfície del model i no dins la gelatina. Com en l'experiment 1, s'ha utilitzat el programa *Audacity* per obtenir i analitzar els registres acústics.

b) *Registre de l'acceleració de la superfície del model*

Els tirs d'aire comprimit generen moviments en les partícules del model que s'han mesurat a la superfície d'aquest amb un acceleròmetre (Analog Devices ADXL346). La freqüència de mostreig de l'aparell és de 100 mostres/s per cada eix X, Y i Z del moviment, el rang de mesura és de +/- 2 g i la resolució de 10 bits. Els tirs s'han realitzat a 8 bars per tal que el moviment del model fos suficient com per a ser detectat. Les mesures s'han fet a sobre i a la base de la

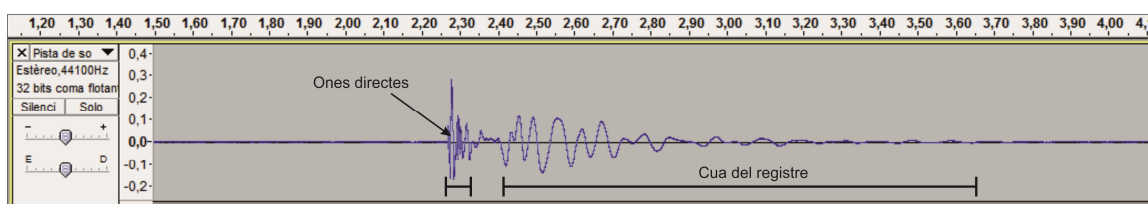
topografia en les mateixes posicions que els micròfons de condensació (B i E) (Fig. 4), però no simultàniament ja que només es disposava d'un aparell.

### 3. RESULTATS

Totes les dades que han permès fer aquest apartat estan disponibles als annexos 2 i 3 (pàg. 26).

#### 3.1. Resultats de l'experiment 1

Els registres acústics obtinguts d'aquest experiment han permès observar clarament el fenomen d'atenuació de les ones acústiques al llarg del model. Tots aquests registres presenten un patró morfològic com el que es mostra a la figura 5.

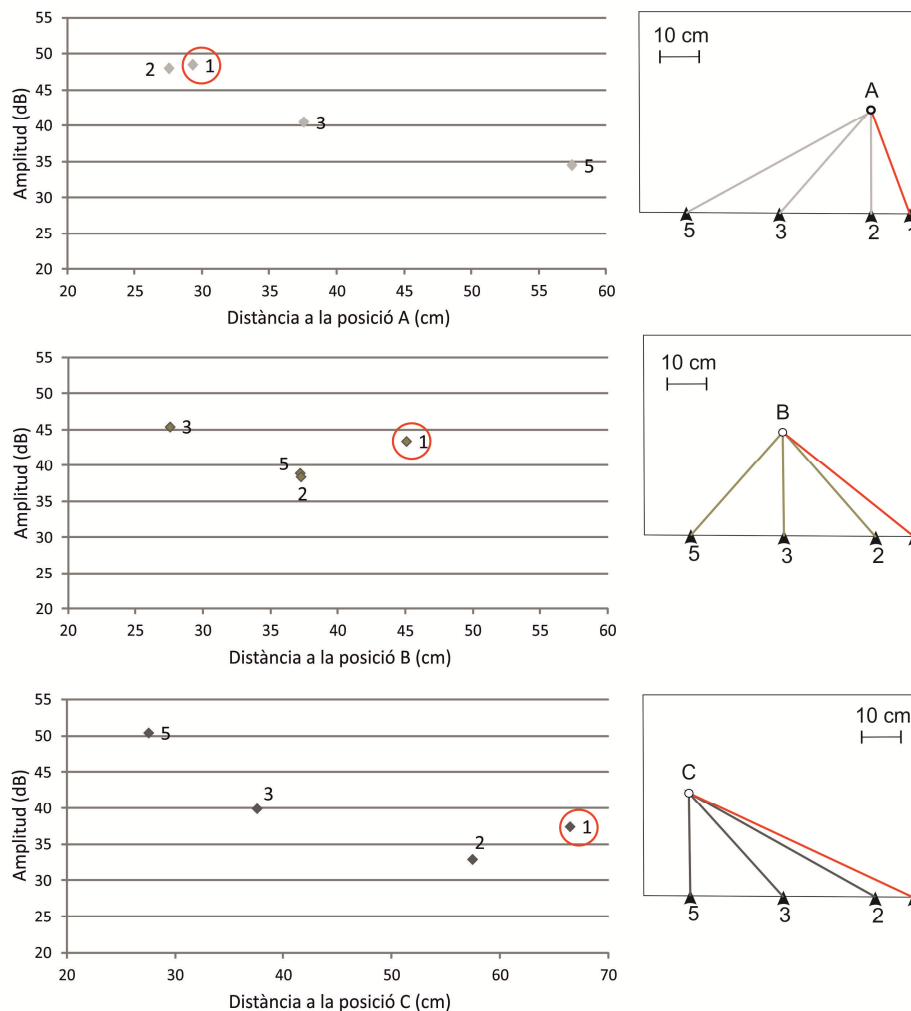


**Fig. 5.** Imatge d'un dels registres acústics que representa l'amplitud del senyal acústic (eix vertical) en funció del temps en segons (eix horitzontal). L'amplitud s'expressa en una escala pròpia del programa Audacity que va de -1 a 1, rang que equival a 120 dB (-1 a 0= 60 dB; 0 a 1= 60 dB). S'identifiquen dues parts diferents en el registre: un conjunt d'ones d'alta freqüència que corresponen a les ones que viatgen directament des del focus a l'hidròfon i una cua del registre, de menor freqüència i menor amplitud, que correspon als conjunts d'ones superficials i reflexions a les parets del recipient de l'experiment.

Per estudiar l'atenuació, cal centrar l'atenció en les amplituds màximes de les primeres arribades (ones directes a la figura 5) que són les que viatgen directament per la gelatina des del focus a l'aparell de registre. Les ones de la cua del registre no s'han considerat en aquest experiment, ja que no aporten informació clara de l'atenuació en el medi.

En general, es pot establir que l'amplitud màxima de les primeres arribades de les ones acústiques disminueix en funció de la distància que hi ha entre el focus emissor de les ones i el receptor (hidròfon) (Fig. 6). Aquesta disminució no és lineal, sinó que té forma de corba invertida i no depèn de la direcció de propagació de les ones acústiques (Fig. 6), de manera que es pot dir que el medi de propagació és isòtrop, esperable en la gelatina. Tampoc depèn de la freqüència, ja que el contingut freqüencial majoritari dels diferents registres mesurats en diferents posicions i a diferents distàncies dels focus, és pràcticament el mateix (veure taula A1, annex 3): entre 2 kHz i 14 kHz (de 10 Hz a 2 kHz és soroll de fons). Això indica que es tracta d'atenuació per difusió geomètrica o "*geometrical spreading*", que únicament depèn de la distància. Com que el focus de les ones acústiques és puntual, es genera un front d'ones esfèric que s'expandeix al propagar-se per la gelatina. A major distància del focus, l'àrea en la qual s'ha de repartir l'energia del front d'ones és major i, en conseqüència, l'amplitud disminueix; el front d'ones s'atenua (Bugeja, 2011). Aquesta atenuació és la típica de medis elàstics isòtrops, en els quals no hi ha canvis en les característiques ni propietats del material i, per tant, no es produeixen fenòmens d'absorció (atenuació intrínseca) com descriu Bugeja (2011).

Únicament s'ha vist atenuació de forma clara quan la font d'ones (punts de tir d'aire comprimit) se situa a la mateixa profunditat en tots els casos (a 5.5 cm de la superfície) (Fig. 6). Els focus situats en profunditats menors (punts de tir 4 i 7; veure Fig. 2) no han donat un senyal acústic prou important degut a que la gelatina ha trencat en superfície deixant escapar la major part del so; així doncs no s'han considerat. D'altra banda, els focus que se situen a les vores del model i a major profunditat (punts de tir 1 i 8) han permès observar d'altres efectes (apartat 3.1.1).



**Fig. 6.** Gràfiques que mostren l'amplitud màxima de les ones directes (experiment 1) en funció de la distància des del punt de tir (1, 2, 3 i 5) a la posició de registre (A, B i C), a 2 bars. Cada punt de la gràfica s'ha obtingut fent la mitjana dels valors màxims d'amplitud de diferents registres de la mateixa posició i punt de tir. Al costat de cada gràfica es presenta l'esquema en planta de la configuració de l'experiment que ha donat lloc als punts representats. 2, 3 i 5 són punts de tir situats a la mateixa profunditat (a 5.5 cm de la superfície de la gelatina) i el punt 1 està situat a major profunditat (a 7 cm de la superfície) (Fig. 2). El cercle vermell indica aquelles dades que no segueixen la pauta d'atenuació.

### 3.1.1. Efectes observats

#### a) Efectes de vora

Els registres del punt de tir 1 trenquen aquesta tendència clara d'atenuació i presenten majors amplituds que d'altres punts que estan més propers, cosa que s'ha atribuït a l'efecte de

les reflexions de les ones acústiques a la vora o cantonada inferior dreta del model (Fig. 6). La proximitat entre el punt 1 (focus) i aquesta vora fa que els les reflexions ràpidament interfereixin amb la senyal directa provocant una amplificació d'aquesta i, per tant, menor atenuació. Observant la configuració de l'experiment i considerant l'elevada velocitat de propagació de les ones acústiques en el model (2300 m/s), cal pensar que l'efecte de vora pot estar present per tots els punts, ja que ràpidament les ones es reflecteixen amb els límits del model i poden interferir en el senyal de les primeres arribades. No obstant, el patró d'atenuació només es veu alterat per aquells punts que se situen més propers a les vores del model (punt 1), que és on la interferència de les reflexions amb les primeres arribades es produeix més ràpid.

*b) Efecte de la pressió*

La pressió dels tirs d'aire comprimit (1 i 2 bars) s'ha vist que no té pràcticament influència en el senyal acústic, tot i que seria esperable que amb canvis de pressió hi hagués variacions en l'amplitud de les ones, que evidenciarien canvis en la intensitat del so. Aquest fet s'atribueix al petit rang de pressions aplicades i a la dificultat de controlar la pressió de tir amb el regulador del qual es disposa, que té una precisió baixa de 0.5 bar. És fàcil que la pressió de sortida es controli poc amb un rang de pressions petit (1 bar–2 bar) i un regulador tan poc precís.

*c) Efecte de la fracturació en la gelatina*

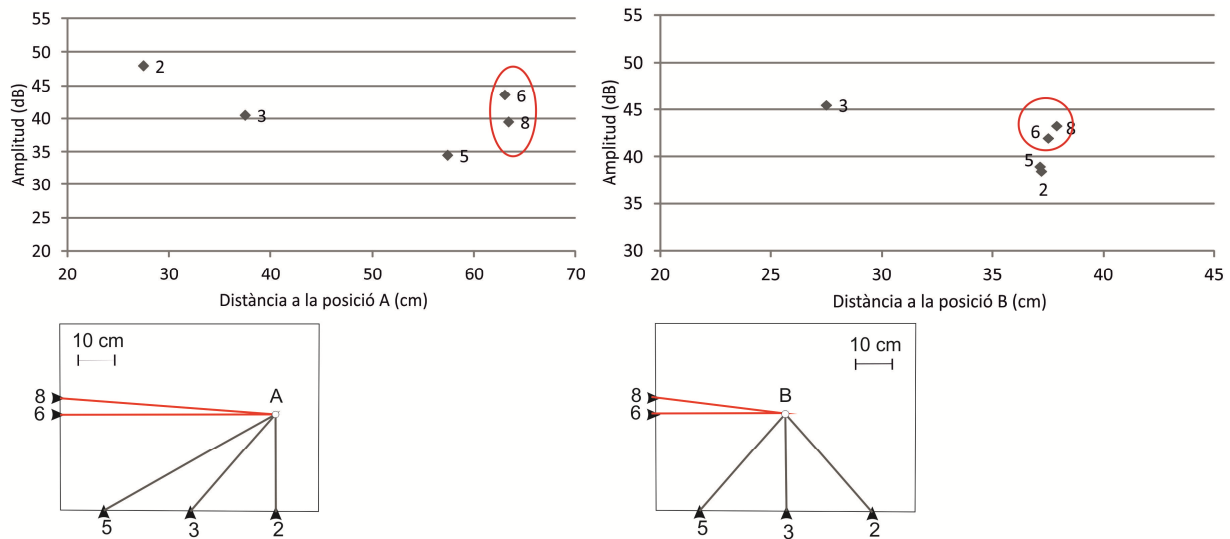
Els tirs d'aire comprimit dins del model generen fracturació en la gelatina prop dels punts de tir. El cost energètic de la generació d'aquestes fractures implica pèrdues de part de l'energia de la pressió d'injecció, cosa que pot fer variar la quantitat d'energia acústica que es transmet i propaga per la gelatina en cada tir i explicaria perquè dos tirs fets a la mateixa distància de la posició de registre tenen amplituds que varien lleugerament (Fig. 6). També cal tenir en compte que una major pressió d'injecció genera major fracturació i, per tant, majors pèrdues energètiques. Aquest fet podria explicar perquè no s'observen efectes clars dels augments de pressió en l'amplitud dels senyals, considerant el rang de pressions emprat (1 bar–2 bars).

*d) Efectes indeterminats*

Els senyals acústics dels punts de tir 6 i 8 trenquen amb el patró d'atenuació i presenten amplituds més grans que els registres d'altres punts de tir més propers (2, 3 i 5) (Fig. 7). El punt 8, tot i que no se situa a la vora del model, està a la mateixa profunditat que el punt 1 (Fig. 2), de manera que les reflexions de les ones amb el fons del model podrien explicar l'amplificació dels registres d'aquest punt (Fig. 7).

El punt 6 està a la mateixa profunditat que els punts 2, 3 i 5 i presenta una amplitud anòmala per la tendència que s'observa (Fig.7). Considerant la gelatina com un medi isòtrop, tal i com corroboren les dades de l'atenuació (Fig. 6), el punt 6 hauria de presentar l'amplitud més baixa de totes, ja que és el més allunyat de les posicions de mesura. Tot i la dificultat per atribuir aquesta observació a un efecte dels que s'han tractat, si s'observa la configuració de l'experiment (Fig. 7) es pot veure que el punt 6 es troba en el costat més curt del rectangle que conforma el model, mentre que la resta de punts (1, 2, 3 i 5) se situen al costat llarg. D'aquesta manera, el punt 6 té dues vores properes i a la mateixa distància (Fig. 7), cosa que no passa amb els punts del costat llarg, que únicament tenen una vora propera (p.e. punts 2 i 5). Considerant que tots els punts presenten un cert efecte de vora, pel punt 6 aquest efecte vindria donat per ambdues vores que, al ser dues, podrien influir més en el senyal de la primera arribada que els

altres punts que només tenen una vora propera. Així doncs, aquest efecte de vora esmentat anteriorment podria explicar aquestes amplituds que trenquen la tendència d'atenuació.



**Fig. 7.** Gràfiques que mostren l'amplitud màxima de les ones directes registrades en l'experiment 1 en funció de la distància dels punts de tir (2, 3, 5, 6 i 8) a les posicions de mesura (A i B), a 2 bars. Cada punt de la gràfica s'ha obtingut fent la mitjana dels valors d'amplitud màxima de diferents registres de la mateixa posició i punt de tir. Amb un cercle s'indiquen els valors que no segueixen el patró d'atenuació.

## 3.2. Resultats de l'experiment 2

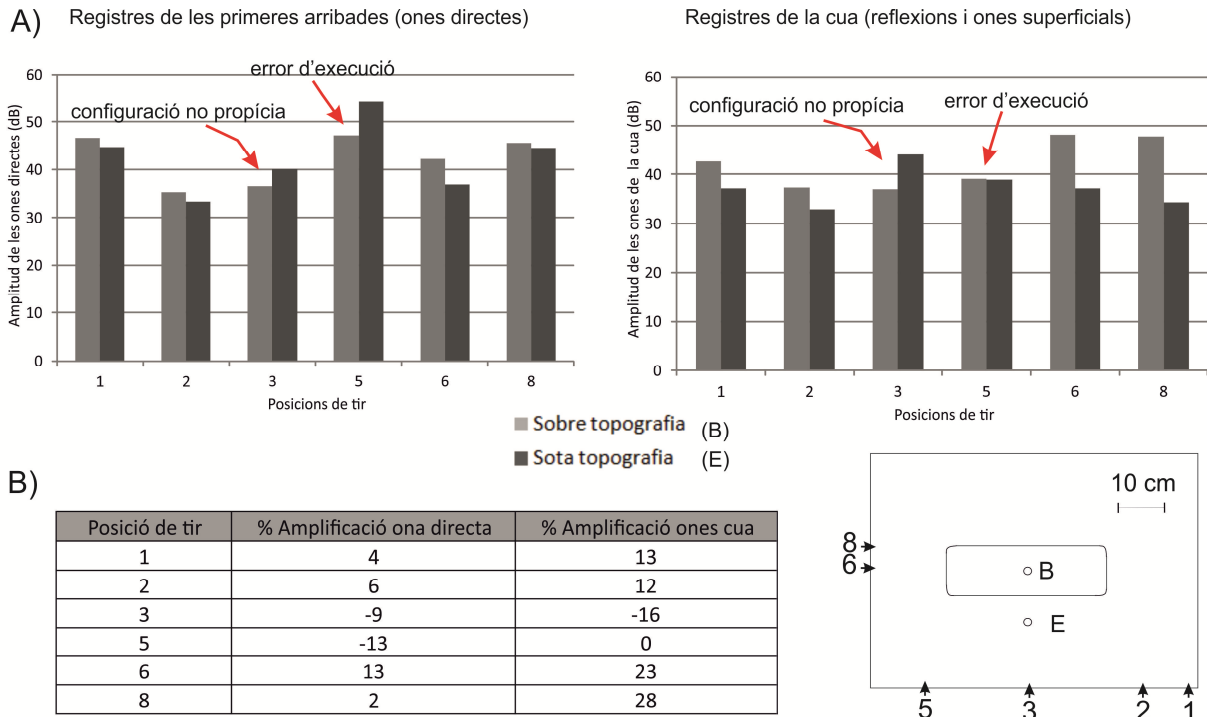
### 3.2.1. Registres acústics

Els registres acústics d'aquest experiment es poden dividir en les mateixes parts morfològiques que les que es presenten en la figura 5 de l'experiment 1. En aquest cas interessa estudiar les dues parts del registre, ja que tant les primeres arribades com les ones de la cua, que inclouen les reflexions i les ones que viatgen en superfície, donen informació de la influència de la topografia en l'amplitud del senyal acústic i la seva amplificació (Fig. 8).

Per l'anàlisi únicament s'han considerat els registres dels micròfons de condensació, ja que han permès detectar freqüències més altes que l'hidròfon dins del rang auditiu, cosa que permet estudiar millor les causes de l'amplificació relacionades amb aquestes freqüències, discutides a l'apartat 4.1. Els micròfons de condensació estan més preparats per enregistrar senyals acústics en el rang freqüencial auditiu (20Hz–22kHz), per això permeten detectar amb major sensibilitat aquestes freqüències. A més, utilitzar dos aparells de les mateixes característiques permet fer comparacions més vàlides entre els diferents registres de cadascun. El contingut freqüencial dels registres és de 1 kHz a 22 kHz per les primeres arribades i 1 kHz a 10 kHz per les reflexions i ones superficials (veure taula A2, annex 3). El soroll de fons és de 20 Hz a 1 kHz.

El fenomen d'amplificació de les ones acústiques a la part alta de la topografia del model s'ha pogut observar en diversos registres de l'experiment (Fig. 8), cosa que permet dir que la topografia del model té influència en les variacions de l'amplitud de les ones acústiques que s'hi propaguen. Ara bé, aquesta amplificació no és la mateixa per tots els registres ni per totes les parts d'un mateix registre (Fig. 8).





**Fig. 8. A)** Gràfiques de barres dels valors d'amplitud màxima dels senyals acústics (experiment 2) en funció de la posició de tir (1, 2, 3, 5, 6 i 8) i de la de registre (B i E), a 2 bars. S'ha fet tan pels registres de les primeres arribades com pels de la cua (reflexions i ones superficials). Les fletxes indiquen les dades sense amplificació, ja sigui perquè la configuració de l'experiment no ho propicia o bé perquè hi ha hagut una execució experimental errònia. No s'han considerat els punts de tir 4 i 7, ja que al ser massa superficials no han donat senyals prou importants, com en l'experiment 1. **B)** Taula de dades en la qual es representa el % d'amplificació de cadascuna de les parts del registre a la part alta de la topografia (B) respecte de la baixa (E). Les dades de la figura s'han obtingut fent la mitjana dels valors d'amplitud màxima de diferents registres de la mateixa posició i punt de tir.

La majoria dels registres mesurats a sobre de la topografia (posició B) presenten major amplitud que els registres a la base d'aquesta (posició E), tot i estar a major distància dels punts de tir la primera, cosa que evidencia amplificació del senyal acústic (Fig. 8A). El percentatge d'amplificació és, en tots els casos, considerablement major per les ones de la cua dels registres (12%–28%) que per les ones directes (2%–13%) (Fig. 8B). Tenint en compte que les ones de la cua són de menor freqüència que les directes, es pot identificar una dependència de la freqüència en l'amplificació topogràfica, que es discuteix en l'apartat 4.1.

*a) Configuracions propícies i no propícies a l'amplificació*

Els registres dels tirs fets des dels punts de tir 6 i 8 presenten un major percentatge d'amplificació que la resta (superior al 20%), especialment per les ones de reflexió i superficials. Aquests tirs estan orientats paral·lels al relleu topogràfic, a diferència de la resta (1, 2 i 5) que s'orienten amb un angle oblic a aquest, així que es pot identificar influència de la orientació del tir respecte el relleu en l'amplificació, que es discuteix a l'apartat 4.1. Mirant l'esquema en planta de la figura 8 es pot veure que la posició de registre de sobre la topografia (B) està més propera als punts 6 i 8 que la de sota la topografia (E), cosa que podria fer pensar que la major amplitud és deguda a la menor distància. No obstant, cal considerar que el punt B

està més elevat respecte l'E i que, per tant, en realitat les distàncies són pràcticament les mateixes.

Les amplificacions més evidents es produeixen quan les distàncies dels dos punts de mesura a sobre i a baix de la topografia respecte un punt de tir no són gaire diferents. Quan aquestes difereixen molt, sempre hi ha un aparell de registre molt més proper al punt de tir i, per tant, l'atenuació és el fenomen més evident. És el cas que s'ha observat per els tirs des del punt 3 (Fig. 8A), que està molt més proper a la posició de registre E que a B i, per tant, la configuració no és propícia a l'amplificació topogràfica. Els percentatges d'amplificació negatius (Fig. 8.B) responen precisament a aquest domini de l'atenuació per sobre de l'amplificació.

#### *b) Execució experimental errònia*

En desacord amb les observacions d'amplificació esmentades per la resta de configuracions experimentals, es pot veure que els registres del punt de tir 5 presenten major amplitud a la part baixa del relleu (E) que a la part alta (B) per les ones directes (-13% d'amplificació) (Fig. 8), mentre que per les ones de la cua l'amplitud és igual en ambdues posicions (0% d'amplificació) (Fig. 8). Aquest resultat no és esperable per aquesta posició de tir, ja que considerant un medi isòtrop com la gelatina, s'hauria d'observar una amplificació similar a la del punt 2, que està a la mateixa distància i a una orientació respecte del relleu equivalent al punt 5 (Fig. 8). El resultat que s'ha obtingut per aquesta configuració s'atribueix a un mal funcionament del regulador de pressió que hauria deixat sortir una pressió massa elevada, per sobre del rang de l'experiment (> 2 bars) durant diversos tirs en la mateixa posició. Aquest error instrumental hauria generat un senyal acústic massa intens, que hauria camuflat l'amplificació i explicaria perquè les amplituds de les primeres arribades d'aquest punt són 10 dB–20 dB majors que les del punt 2 (Fig. 8A).

#### *c) Altres observacions*

L'efecte de vora explicat anteriorment també és present en aquest experiment. Els registres del punt 1 són els més clars, on l'amplitud de les primeres arribades és major que la d'altres posicions més properes als micròfons, com la 2 o la 3.

#### *3.2.2. Registres d'acceleració*

Els tirs d'aire comprimit generen un moviment del conjunt de la gelatina dins del model. Aquest moviment és el que s'ha mesurat amb els acceleròmetres, donant com a resultat uns valors de l'acceleració pic de dos punts diferents de la superfície del model per cada punt de tir (Fig. 9). Cal tenir en compte que els moviments que es registren en aquest experiment no són ones acústiques, sinó ones d'impacte que es generen per l'entrada d'aire a pressió en el model i la fracturació de la gelatina.

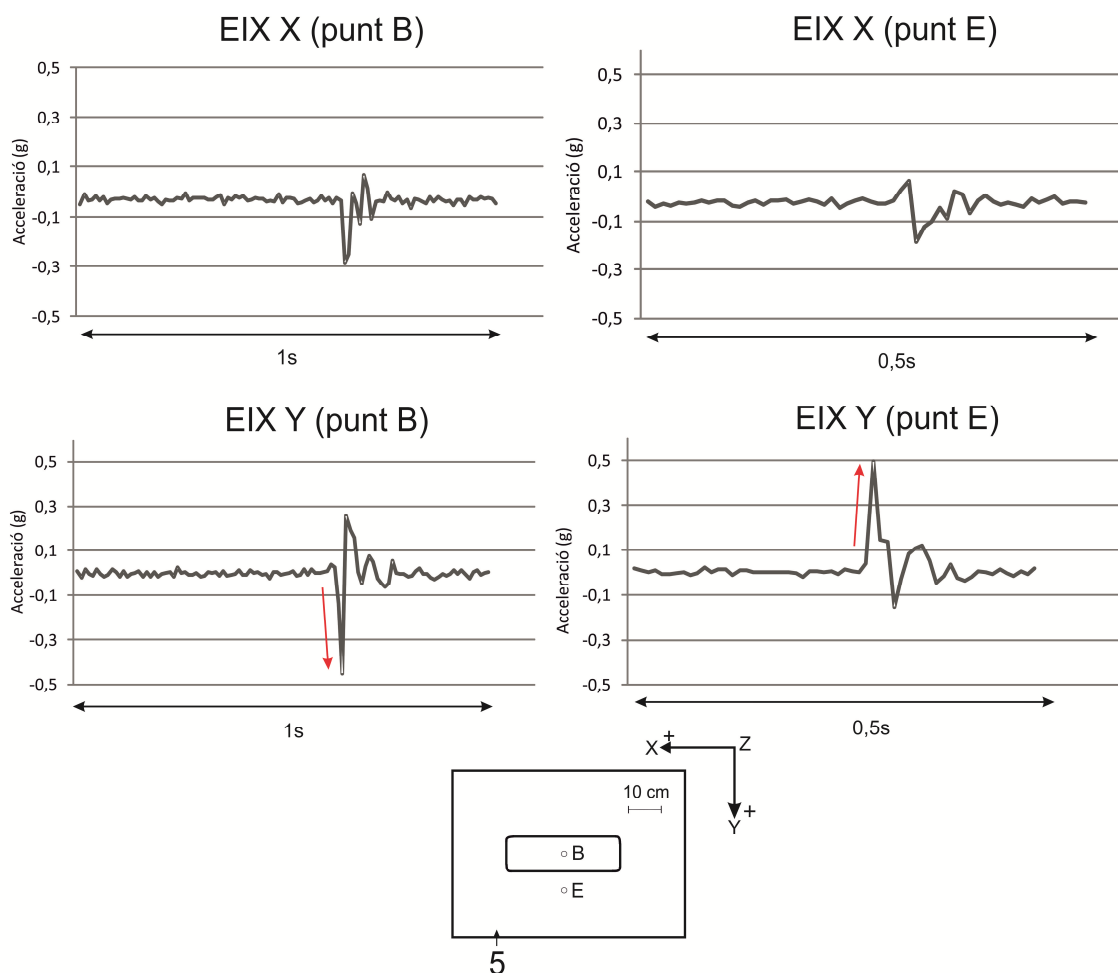
Els registres no permeten observar un patró d'amplificació del moviment a la part alta del relleu respecte de la part baixa, degut a la poca freqüència de mostreig de l'acceleròmetre (100 mostres/s) respecte la del micròfon (44000 mostres/s). Aquesta baixa taxa de mostreig respecte la dels micròfons i considerant la poca durada dels moviments del model (~1 s), fa que hi hagi estadis d'aquest moviment que no quedin registrats, entre els quals pot haver-hi pics d'acceleració que podrien indicar amplificació topogràfica. Tot i això s'ha pogut observar que:

a) Els eixos que estan orientats en la direcció dels tirs d'aire comprimit són els que major acceleració pic presenten. Així doncs un tir que es dispara des de les posicions de la 1 a la 5, presenta la màxima acceleració en l'eix Y (Fig. 9 i taules B i E de l'annex 3).

b) El relleu topogràfic es mou diferencialment a la seva base en el primer moviment; en la mateixa direcció, però en sentit oposat. Aquest fet s'atribueix al moviment de tracció que la base del relleu fa respecte aquest i és visible, ja que els pics d'acceleració tenen signes diferents a dalt i a baix del relleu (Fig. 9 i taules B i E de l'annex 3).

c) El moviment del model es pot descriure com una vibració resultat de les nombroses reflexions de les ones amb les parets del recipient en el que es porta a terme l'experiment. Al tractar-se d'un experiment tancat amb parets rígides, és plausible pensar que aquestes ones de reflexió poden interferir entre elles i entrar en fase, desencadenant un moviment estacionari com el descrit a French (1995), que no simularia un fenomen de propagació d'ones com el que s'estudia.

d) El rang d'acceleracions pic mesurades oscil·la de 0,1 g a 0,8 g (taules B i E de l'annex 3). Aquests valors són els que es poden experimentar en un terratrèmol real d'intensitat VI–IX segons les dades de Wald *et al.* (1999), cosa que significa que el moviment del model no és realista, sinó desproporcionat i ni molt menys està escalat. Aquest fet dificulta i posa en dubte la validesa dels resultats d'aquest experiment, que es discuteix a l'apartat 4.



**Fig. 9.** Gràfiques d'acceleració de la superfície del model en funció del temps a la part alta i baixa del relleu topogràfic (B i E respectivament) pels eixos X i Y (experiment 2). El tir que s'exemplifica s'ha fet des de la posició 5, indicada a l'esquema en planta de la part inferior de la figura. L'acceleració pic més alta es dona en la direcció de l'eix Y, que és en la qual dispara el punt 5. També es pot observar que el primer moviment del relleu és de sentit oposat al de la seva base, cosa que fa que les acceleracions pic tinguin signes diferents. Les fletxes vermelles indiquen el sentit d'aquest primer moviment. A l'esquema en planta, X és positiva cap a l'esquerra, Y cap a baix i Z dins del pla de la pàgina.

## 4. DISCUSSIONS

### 4.1. Interpretacions i discussions sobre els resultats

Els resultats que s'han obtingut a partir dels diferents experiments tenen validesa pel model on s'han observat. Per això, cal ser prudent alhora de relacionar-los amb els fenòmens que s'observen a la natura. Aquesta relació, en tot cas s'ha de fer des d'un punt de vista qualitatiu, ja que cal considerar que diversos paràmetres i condicions del model tenen problemes d'escalatge i que únicament s'està estudiant l'efecte topogràfic d'un tipus d'ones, les ones compressives (P), quan les ones de cisalla hi tenen una influència tan o més important (Geli *et al.*, 1988).

L'atenuació del senyal acústic per difusió geomètrica que s'ha observat en l'experiment 1 és un fenomen que forma part de l'atenuació de les ones sísmiques en terratrèmols reals, tot i que per si sol no permet explicar tota l'atenuació que pateixen aquestes ones sísmiques durant la seva propagació, tal com es descriu a Bugeja (2011). La tendència de corba invertida d'aquesta atenuació també està en acord amb el que constata Bugeja (2011) pels terratrèmols reals. Pel que fa als fenòmens de vora, aquests evidencien la influència de les discontinuïtats en l'amplitud del senyal acústic, efecte identificat diverses vegades als terratrèmols. La presència de discontinuïtats afavoreix els fenòmens de reflexió de les ones, que interfereixen en el senyal sísmic i poden acabar amplificant-lo (Geli *et al.*, 1988).

Pel que fa a l'amplificació topogràfica que s'ha observat en el model, cal acotar les interpretacions amb algunes reflexions addicionals. En el model s'han imposat les condicions òptimes citades en la literatura per a que es produís l'efecte topogràfic, segons expliquen Geli *et al.* (1988) i Massa *et al.* (2014); vessants inclinats al voltant dels 60°, relleu elongat en una direcció, dimensions similars a les longituds d'ona, etc. i els resultats obtinguts han fet palès aquest efecte. L'amplificació topogràfica en l'experiment s'ha vist que depèn de la distància entre el focus i els receptors, de les ones (directes o de reflexió) i de la seva freqüència:

a) Quan les distàncies entre el focus d'ones acústiques (punt de tir) i els dos receptors (micròfons) situats a dalt i a baix de la topografia són similars, és quan l'amplificació topogràfica és més evident. Com que l'atenuació en el model només depèn de la distància, si les distàncies són similars aquesta atenuació és negligible i, per tant, s'observa l'amplificació.

b) La dependència de la freqüència en l'amplificació sísmica està demostrada, essent les freqüències de longitud d'ona més similar a la longitud del relleu en la direcció de propagació, les que més s'amplifiquen (Massa *et al.*, 2014). S'ha pogut observar que les ones de la cua dels registres, que són les de més baixa freqüència (1 kHz–10 kHz), s'amplifiquen més sobretot quan els tirs es fan en la direcció paral·lela a la llargada del relleu (tirs 6 i 8; Fig. 8). Aquestes ones tenen longituds d'ona d'entre 23 cm i 230 cm que, en part, es corresponen amb la llargada del relleu (36,5 cm), fet que explicaria perquè l'amplificació és més important en aquesta direcció. En la direcció perpendicular al relleu les amplifiquacions són menors, ja que l'amplada del relleu (11,5 cm) no s'ajusta a les longituds d'ona esmentades. Pel que fa a les ones directes, aquestes tenen un major contingut en freqüències altes (fins a 22 kHz), cosa que implica longituds d'ona més curtes que les pròpies longituds del relleu i que, per tant, no s'ajusten. Això explicaria perquè les amplifiquacions d'aquestes ones directes són considerablement menors que les de les ones reflectides i les superficials (cua del registre). D'altra banda, cal observar que les amplifiquacions més importants es produeixen en les freqüències (1 kHz i 10 kHz) que no estan escalades a les freqüències de les ones P. Les que s'ajusten a l'escalatge (17,7 kHz–22 kHz; apartat 2.2.2) són les menys amplifiquades.

Els percentatges d'amplificació màxims observats en el model estan aproximadament entre el 12% i el 28%. Tot i que, com ja s'ha dit, les valoracions quantitatives no són indicades per un estudi com aquest, cal dir que aquests valors d'amplificació estan, en bona part, dins del rang de 15%–25% d'amplificació topogràfica determinat per Ashford *et al.* (1997).

Pel que fa als registres d'acceleració, cal tenir en compte que les ones d'impacte que es propaguen pel model generen moviments exagerats i, per tant, no se'ls pot donar validesa. A més, cal considerar que els moviments estacionaris que segurament es produeixen en el model, reproduïxen un fenomen que no és correcte ni adequat pel cas que s'estudia, ja que els moviments sísmics responen a una propagació d'ones i no pas a un estat estacionari.

## 4.2. Importància de l'escalatge del model i valoració sobre la validesa del mètode

La metodologia d'estudi que s'ha plantejat en aquest treball està basada en l'escalatge de les variables físiques del model que intervenen en el funcionament del fenomen que es vol modelitzar. En el cas que es tracta en aquest treball, com en moltes d'altres casos, no ha estat possible escalar correctament tots els paràmetres que intervenen en el fenomen que es modelitza, i, per tant, constitueixen limitacions del mètode que cal tenir clares.

### 4.2.1. Limitacions en la modelització de l'escorça

La primera limitació ve determinada per la gran simplificació que s'ha fet considerant una escorça homogènia i isòtropa pel model. L'escorça és heterogènia i amb discontinuïtats, cosa que influeix de forma important en la propagació de les ones sísmiques (Geli *et al.*, 1988). No obstant això, cal tenir en compte que la modelització requereix un bon control dels paràmetres que hi intervenen i, per tant, fer una primera aproximació simple permet controlar més quantitat de variables del model i valorar la validesa del mètode, que és el que es pretén. La configuració del relleu topogràfic que es presenta en el model analògic també té certes carències ja que considera uns vessants amb un pendent abrupte i constant ( $\sim 60^\circ$ ), cosa que és massa simple i no del tot realista, sobretot considerant que es modelitza un relleu elevat ( $\sim 1750$  m). D'altra banda, aquesta configuració ha estat favorable ja que ha permès observar amplificació topogràfica.

La segona limitació important està condicionada al propi disseny del model i dels experiments. La selecció de la gelatina com un anàleg a l'escorça garanteix unes característiques elàstiques similars a les de l'escorça superior en l'escala que s'ha treballat, però alguns dels seus paràmetres estan al límit d'un escalatge correcte. Generalment, la gelatina que s'ha emprat té valors del mòdul de rigidesa ( $\mu$ ) que reproduïxen una escorça realista, tot i que són baixos per una escorça "normal". No obstant, el fet que d'altres autors (Di Giuseppe *et al.*, 2009; Kavanagh *et al.*, 2013) hagin considerat la gelatina com un bon anàleg a l'escorça per simular fenòmens elàstics, reforça la validesa d'utilitzar aquest material.

### 4.2.2. Limitacions en la reproducció d'ones P

La utilització d'ones acústiques com a ones anàlogues a les ones P constitueix una limitació més important que la pròpia gelatina, pel cas que es tracta. Tot i que siguin ones equivalents a les P (Lay & Wallace, 1995), tenen velocitats de propagació i freqüències que no s'ajusten a l'escalatge del model. En primer lloc, les ones acústiques en gelatina es propaguen a velocitats de 2300 m/s, de l'ordre de les ones P a l'escorça superior (5700 m/s–6400 m/s). Aquestes velocitats determinen que les ones acústiques han de tenir freqüències majoritàriament ultrasòniques (17,7 kHz–383 kHz) per reproduir les ones P en el model. Els senyals acústics

dels experiments tenen freqüències dominants entre 1 kHz i 22 kHz, de manera que únicament les ones acústiques de més alta freqüència (17,7 kHz–22 kHz), que són les menys presents en els continguts freqüencials dels registres, reproduïxen correctament les ones P en el model. Aquesta limitació fa que hi hagi poc marge alhora de treballar amb els senyals acústics, ja que estan des-escalats en la major part de les seves freqüències.

#### 4.2.3. Limitacions experimentals i instrumentals

Una altra limitació important té a veure amb la metodologia de l'execució experimental. Per una banda, la generació d'ones acústiques a partir de tirs d'aire comprimit fa que hi hagi cert grau d'incertesa en el control de la pressió de sortida, la qual va lligada al grau de precisió i efectivitat de l'aparell regulador de pressió (p.e. punt de tir 5, experiment 2; Fig. 8). A aquesta incertesa cal sumar-li la fracturació de la gelatina que, com s'ha vist, també influeix en la variabilitat dels senyals acústics que es registren. D'aquesta manera, si s'estudiés com escalar el focus sísmic en el model amb el mètode de generació d'ones acústiques que es proposa, aquest estaria des-escalat, ja que la quantitat d'energia que s'allibera en cada tir d'aire comprimit és massa elevada per reproduir un focus sísmic realista; així ho indiquen els moviments exagerats del model que s'han constatat a partir dels registres d'acceleració.

L'última limitació important té a veure amb els aparells de registre. L'hidròfon i els micròfons tenen unes dimensions que fan que les seves àrees de mesura en el model siguin d'uns 5 cm<sup>2</sup> i 10 cm<sup>2</sup> respectivament. Considerant l'escala dels models (1:50000), significaria que es tracta d'aparells amb 1,25 km<sup>2</sup> i 2,5 km<sup>2</sup> d'àrea de registre a la realitat, totalment inversemblants. Pel que fa a l'acceleròmetre, el seu sensor és puntual, però l'aparell s'ha ubicat sobre el model per fer les mesures, de manera que el seu pes afecta al moviment i als registres que s'obtenen. En el cas dels aparells acústics això ocorre ja que estan subjectats amb un cable (Figs. 3 i 4).

Amb totes aquestes limitacions s'han portat a terme els experiments i s'han obtingut uns resultats que permeten concloure que és possible reproduir l'efecte topogràfic a escala de laboratori. Aquests resultats presenten, com ja s'ha vist, diversos punts en els quals la interpretació és difícil, però d'altra banda han permès fer observacions en el model de fenòmens que tenen un sentit físic clar i que es poden relacionar de forma qualitativa amb alguns fenòmens que s'observen en la naturalesa. Això posa el tema de la importància de l'escalatge dels models analògics sobre la taula, tal i com alguns autors han fet (p.e. Paola *et al.*, 2009). En molts models analògics, el fet que hi hagi paràmetres des-escalats no impedeix fer observacions i extreure uns resultats vàlids. Paola *et al.* (2009) plantegen que hi ha fenòmens que es produeixen independentment de l'escala de treball i, tot i que els models presentin defectes d'escalatge, aquests fenòmens tenen cinemàtiques i estructures comparables amb les que s'observen a la naturalesa. Si bé no està clar que els fenòmens que s'estudien en aquest treball siguin independents de l'escala, reflexions com les que fan Paola *et al.* (2009) donen valor a la modelització analògica que s'ha portat a terme.

Pel cas d'aquest treball i tenint en compte els resultats que s'han obtingut, malgrat les mancances de l'escalatge, es pot dir que el mètode que és proposa és vàlid per estudiar els fenòmens sismològics que es plantegen. Aquesta validesa només té sentit si es considera que es tracta d'un estudi pilot sobre un mètode al qual caldrà aplicar millores fins obtenir uns resultats que realment contribueixin a la comunitat científica en el coneixement de l'efecte topogràfic i d'altres fenòmens que afecten al risc sísmic.

### 4.3. Futur del camp d'estudi i recomanacions

El mètode que es presenta en aquest estudi, tal i com s'ha vist en l'apartat anterior, presenta tota una sèrie de limitacions que repercuteixen en la seva validesa i en la dels resultats que s'han obtingut. Així doncs, el futur d'aquest camp d'investigació hauria d'estar enfocat a intentar solucionar les limitacions més importants que s'han anat plantejant. En primer lloc, caldria posar esforços en millorar l'escalatge dels models analògics, des del material anàleg a les ones i a la configuració dels experiments. La gelatina funciona bé com a anàleg a l'escorça considerant un model cortical molt simple, no obstant alguns dels seus paràmetres elàstics estan al límit d'un correcte escalatge (p.e.  $\mu$ ). Augmentant les concentracions de la gelatina probablement s'assolirien els valors desitjats, tot i que és recomanable fer mesures pròpies dels paràmetres elàstics, ja que permetria conèixer al màxim les condicions de l'experiment que es porta a terme. D'altra banda, no cal descartar l'ús d'altres materials anàlegs més especialitzats i dissenyats a mida en laboratoris que, per contra, augmentarien el cost de l'estudi.

Per posar solucions a les limitacions de les ones acústiques es recomana treballar amb freqüències ultrasòniques que, com ja s'ha vist, garanteixen un correcte escalatge de les ones P en la configuració dels models considerada. Per fer-ho, seria correcte no utilitzar tirs d'aire comprimit ja que, a part de no generar les freqüències més òptimes, introdueixen aire al model provocant fracturació de la gelatina i induint efectes que afecten el senyal acústic i dificulten l'estudi dels fenòmens d'interès. Caldria treballar amb fonts no invasives que emetessin sons a diverses freqüències conegudes. D'altra banda, cal tenir en compte que les ones S són més susceptibles a presentar amplificació topogràfica que les ones P (Boore, 1972; Geli et al., 1988), de manera que caldria considerar l'opció de reproduir ones de cisalla en els models.

Per últim, es recomana treballar amb més varietat de models i configuracions topogràfiques, ja que així es podria estudiar millor l'efecte de les característiques de la topografia en les ones i establir millor les causes i condicions de l'amplificació observada. També seria important fer models amb major gruix de gelatina per poder estudiar millor els efectes de la profunditat i de les vores, així com augmentar el nombre de punts de registre seguint una malla, per tal d'obtenir més dades amb les que treballar. No es recomana estudiar l'acceleració del model amb un mètode com aquest, ja que els fenòmens que s'han observat manquen de validesa i sentit des del punt de vista físic i geològic.

## 5. CONCLUSIONS

En aquest treball es presenten els resultats i les limitacions d'estudiar l'efecte topogràfic a partir de dos models analògics de gelatina i amb ones acústiques. Els principals resultats mostren que:

a) Els senyals acústics s'atenuen en funció de la distància entre el focus i l'aparell de registre. Es tracta d'una atenuació per difusió geomètrica, ja que no depèn de la freqüència ni de la direcció de propagació de les ones. Aquest tipus d'atenuació és la que s'observa en terratrèmols quan les ones sísmiques es propaguen per un medi homogeni i sense discontinuïtats, com el que es modelitza.

b) La configuració experimental té influència en el senyal acústic. Les reflexions de les ones acústiques a les vores i parets de l'experiment interfereixen en l'amplitud dels senyals i trenquen amb el patró d'atenuació, especialment per aquells punts més propers a aquestes vores.

D'altra banda, la fracturació de la gelatina en cada tir d'aire comprimit provoca variacions en l'amplitud dels senyals generats des de la mateixa distància entre el focus i l'aparell de registre.

c) La topografia influeix en les ones acústiques fent que la seva amplitud sigui més alta a la part alta del relleu. Aquesta amplificació es dona únicament quan les distàncies entre el focus i els dos receptors situats a dalt i a baix de la topografia són similars. Quan aquestes difereixen de forma significativa l'atenuació és el fenomen que predomina.

d) Les ones de la cua dels registres, que inclouen reflexions i ones superficials, són les que presenten major amplificació (12%–28% d'amplificació) i especialment quan els tirs es fan en la direcció paral·lela al relleu, que és quan la llargada d'aquest relleu és més similar a les longituds d'ona de les ones acústiques. Aquest fenomen està en acord amb diversos estudis.

e) Els tirs d'aire comprimit en el model generen moviments d'aquest que tenen acceleracions pic d'entre 0.1 g i 0.8 g, de l'ordre de les dels terratrèmols reals i, per tant, desescalades en el model. Durant aquest moviment, el relleu i la seva base vibren i ho fan en sentits de moviment oposats, resultat de la tracció d'un amb l'altre.

Amb tot això, cal tenir en compte les limitacions del treball, que bàsicament estan en l'escalatge dels models. Si bé per una banda l'ús de la gelatina com a material anèleg garanteix un escalatge correcte de l'escorça per la propagació d'ones elàstiques, les ones acústiques emprades tenen freqüències massa baixes pel correcte escalatge de tot el rang freqüencial de les ones P. D'altra banda, el mètode de generació de les ones acústiques amb aire comprimit i la configuració dels experiments en un recipient tancat també són una limitació important, ja que afavoreixen el trencament de la gelatina i la generació de múltiples reflexions de les ones, respectivament. Aquests fenòmens afecten als senyals acústics que es registren i dificulten estudiar adequadament els fenòmens objectiu del treball. Aquestes limitacions repercuteixen en la capacitat de relacionar el que s'observa en el model amb el que s'observa a la naturalesa i, en tot cas, aquestes relacions s'han d'establir qualitativament. No obstant, el fet que els resultats obtinguts hagin permès observar amplificació topogràfica i es puguin relacionar amb certs fenòmens sismològics naturals, dona validesa al mètode que s'ha utilitzat en aquest treball.

Per concloure, cal dir que aquesta línia de recerca pot portar a resultats més significatius sempre i quan se sobrepassin les limitacions més rellevants que s'han identificat en aquest estudi. D'aquesta manera, es podrà contribuir al coneixement i caracterització de l'efecte topogràfic i, per tant, de la seva perillositat com a fenomen sísmic.

**AGRAÏMENTS.** Vull agrair el suport professional i moral a la Maria Ortuño (UB), que ha estat qui m'ha donat l'oportunitat de fer aquest treball i n'ha constituït una peça clau. També a la Marian Molina per l'ajuda indispensable en la realització dels experiments, al Xavi Vilajosana i al Pere Tuset (ambdós de la UOC) pel suport tècnic amb els acceleròmetres i per les idees aportades, al Joao Maria pels micròfons i a l'Emma Suriñach (UB) i l'Anna Martí (UB) per l'ajuda durant l'interpretació dels resultats .

## REFERÈNCIES

- Angraeni, D. (2010). Modelling the impact of topography on seismic amplification at regional scale. Master thesis, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands, 60 p.
- Artemieva, I. M. (2002). Continental Crust, in Geophysics and Geochemistry, II, 10 p. In Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO. EOLSS Publishers, Paris, France.



- Ashford, S. A. & Sitar, N. (1997). Analysis of topographic amplification of inclined shear waves in a steep coastal bluff. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87 (3), 692–700.
- Ashford, S. A., Sitar, N., Lysmer, J. & Deng, N. (1997). Topographic effects on the seismic response of steep slopes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87 (3), 701–709.
- Bachmann, D., Bouissou, S., & Chemenda, A. (2004). Influence of weathering and pre-existing large scale fractures on gravitational slope failure: insights from 3-D physical modelling. *Natural Hazards and Earth System Science*, 4 (5/6), 711–717.
- Bachmann, D., Bouissou, S. & Chemenda, A. (2006). Influence of large scale topography on gravitational rock mass movements: New insights from physical modeling. *Geophysical Research Letters*, 33 (21), 4 p.
- Bachmann, D., Bouissou, S. & Chemenda, A. (2009). Analysis of massif fracturing during Deep-Seated Gravitational Slope Deformation by physical and numerical modeling. *Geomorphology*, 103(1), 130–135.
- Bard, P.Y. & Tucker, B.E. (1985). Underground and ridge site effects: a comparison of observation and theory. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 905– 922.
- Boore, D. (1972). A note on the effect of simple topography on seismic SH waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 62 (1), 275–284.
- Buech, F., Davies, T. R. & Pettinga, J. R. (2010). The little red hill seismic experimental study: Topographic effects on ground motion at a bedrock-dominated mountain edifice. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100 (5 A), 2219–2229.
- Bugeja, R. (2011). Crustal Attenuation in the region of the Maltese Islands using Coda Wave Decay Statement of Authenticity. Bachelor thesis, University of Malta, Malta, 141 p.
- Chavez, M. J. (2012). Condiciones físicas de emplazamiento del enjambre de diques de Nanchititla, sur de México: estudio mediante modelos analógicos. Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 161p.
- Chavez-Garcia, F., Sanchez, L.R. & Hatzfeld, D. (1996). Topographic site effects and HVSR. A comparison between observation and theory. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86 (5), 1559–1573.
- Chemenda, A., Bouissou, S. & Bachmann, D. (2005). Three-dimensional physical modeling of deep-seated landslides: New technique and first results. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 110 (4), 1–8.
- Corti, G., Bonini, M., Conticelli, S., Innocenti, F., Manetti, P. & Sokoutis, D. (2003). Analogue modelling of continental extension: a review focused on the relations between the patterns of deformation and the presence of magma. *Earth-Science Reviews*, 63, 169-247.
- Czerner, M., Martucci, J., Fasce, L. A., Ruseckaite, R. & Frontini, P. M. (2013). Mechanical and Fracture Behavior of Gelatin Gels. 13th International Conference on Fracture, Beijing, China, June 16-21, 2013, 1–10.
- Çelebi, M. & Hanks, T. (1986). Unique site response conditions of two major earthquakes of 1985: Chile and Mexico. *Proceedings of the International Symposium of Engineering Geology Problems in Seismic Areas*, Bari, Italy, April 1986, Vol. IV.
- Dafni, J. & Wartman, J. (2014). Centrifuge modeling of dynamic response in slopes. *Proceedings of the 8th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, Perth, Australia, January 14-17, 2014, 1227–1232.
- Davis, L. L. & West, L. R. (1973). Observed effects of topography on ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 63 (1), 283–298.
- Di Giuseppe, E., Funicello, F., Corbi, F., Ranalli, G. & Mojoli, G. (2009). Gelatins as rock analogs: A systematic study of their rheological and physical properties. *Tectonophysics*, 473 (3-4), 391–403.
- Ferrer, O. (2012). Salt Tectonics in the Parentis Basin (easter Bay of Biscay): Origin and kinematics of salt structures in a hyperextended margin affected by subsequent contractional deformation. PhD thesis, Universitat de Barcelona, Spain, 291 p.
- Ferretti, G., Massa, M., Isella, L. & Eva, C. (2007). Site amplification effects based on teleseismic wave analysis: the case of Pellice Valley (Piedmont, Italy). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97, 605–613.
- French, A.P. (1995). *Vibrations and waves (MIT Introductory Physics)*. Chapman & Hall, London, UK, 356 p.
- Geli, L., Bard, P. & Jullien, B. (1988). The effect of topography on earthquake ground motion: a review and new results. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78 (1), 42–63.
- Geyer, A. (2007). Dynamics and structural evolution of collapse calderas: A comparison between field evidence, analogue and mathematical models. PhD thesis, Universitat de Barcelona, Spain, 438p.
- Graveleau, F., Malavieille, J. & Dominguez, S. (2012). Experimental modelling of orogenic wedges: A review. *Tectonophysics*, 538-540, 1-66.
- Griffiths, D.W. & Bollinger, G.A. (1979). The effect of Appalachian Mountain topography on seismic waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 69, 1081–1105.
- Hubbert, M. K. (1937). Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. *Geological Society of America Bulletin*, 48 (10), 1459–1520.

- Kavanagh, J. L., Menand, T. & Daniels, K. A. (2013). Gelatine as a crustal analogue: Determining elastic properties for modelling magmatic intrusions. *Tectonophysics*, 582, 101–111.
- Lay, T. & Wallace, T. C. (1995). *Global Modern Seismology*. Academic Press, San Diego, USA, 521 p.
- LeBrun, B., Hatzfeld, D., Bard, P.Y. & Bouchon, M. (1999). Experimental Study of 3D Separation on a Large Scale Model. *Journal of Seismology*, 33 (11), 1–15.
- Lee, S. J., Chan, Y. C., Komatitsch, D., Huang, B. S. & Tromp, J. (2009). Effects of realistic surface topography on seismic ground motion in the Yangminshan region of Taiwan based upon the spectral-element method and LiDAR DTM. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99 (2 A), 681–693.
- Lee Marsh, M. & Gianotti, C. M. (1994). Structural response to long-duration earthquakes. Technical Report, Washington State Transportation Center (TRAC), Washington State University, USA, 192 p.
- Lyons, J. J., Ichihara, M., Kurokawa, A. & Lees, J. M. (2013). Switching between seismic and seismo-acoustic harmonic tremor simulated in the laboratory: Insights into the role of open degassing channels and magma viscosity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118 (1), 277–289.
- Ma, S., Archuleta, R. J. & Page, M. T. (2007). Effects of large-scale surface topography on ground motions, as demonstrated by a study of the San Gabriel Mountains, Los Angeles, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97 (6), 2066–2079.
- Markidou, A., Shih, W. Y. & Shih, W. H. (2005). Soft-materials elastic and shear moduli measurement using piezoelectric cantilevers. *Review of Scientific Instruments*, 76 (6), 1–7.
- Massa, M., Barani, S. & Lovati, S. (2014). Overview of topographic effects based on experimental observations: Meaning, causes and possible interpretations. *Geophysical Journal International*, 197 (3), 1537–1550.
- Mendoza, A., Rojas, A., Cerca, M. & Zúñiga, R.F. (2010). Experimentos de señales acústicas producidas por una hidrofractura en gelatina a una presión constante. Proyecto final: Mecánica de Sólidos, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 5 p.
- Paola, C., Straub, K., Mohrig, D. & Reinhardt, L. (2009). The “unreasonable effectiveness” of stratigraphic and geomorphic experiments. *Earth-Science Reviews*, 97 (1-4), 1–43.
- Paolucci, R., Faccioli, E. & Maggio, F. (1999). 3D Response analysis of an instrumented hill at Matsuzaki, Japan, by a spectral method. *Journal of Seismology*, 3, 191–209.
- Paolucci, R. (2002). Amplification of earthquake ground motion by steep topographic irregularities. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31 (10), 1831–1853.
- Parker, N. G. & Povey, M. J. W. (2012). Ultrasonic study of the gelation of gelatin: Phase diagram, hysteresis and kinetics. *Food Hydrocolloids*, 26 (1), 99–107.
- Pedersen, H., LeBrun, B., Hatzfeld, D., Campillo, M., & Bard, P. Y. (1994). Ground-motion amplitude across ridges. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84 (6), 1786–1800.
- Rogers, A.M., Katz, L.J. & Benett, T.J. (1974). Topographic effect on ground motion for incident P waves: a model study. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64, 437-456.
- Schellart, W. P. & Strak, V. (accepted). A review of analogue modelling of geodynamic processes: Approaches, scaling, materials and quantification, with an application to subduction experiments. *Journal of Geodynamics*, 74 p.
- Sherlock, D. H. & Evans, B. J. (2001). The development of seismic reflection sandbox modeling. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 85 (9), 1645–1659.
- Sills, L. (1978). Scattering of horizontally polarised shear waves by surface irregularities. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 54, 319–348.
- Siro, L. (1982). Southern Italy November 23 1980 Earthquake. Proceedings of the 7th European Conference on Earthquake Engineering, Athens, Greece, September 20-25, 1982.
- Smit, J. H.W. (2005). Brittle-Ductile Coupling in thrust wedges and Continental transform. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, 115 p.
- Tucker, B. E., King, J. L., Hatzfeld, D. & Nersesov, I. L. (1984). Observations of hard rock site effects. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74, 121-136.
- USGS (2016). Earthquake hazards program (Earthquake facts) [en línia]. [Consultat el 8/5/2016]. Disponible a: <http://earthquake.usgs.gov/learn/facts.php>
- Wald, D.J., Quitoriano, V., Heaton, T.H. & Kanamori, H. (1999). Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified Mercalli intensity in California. *Earthquake Spectra*, 15 (3), 557-564.
- Wartman, J., Bray, J. D. & Seed, R. B. (2003). Inclined Plane Studies of the Newmark Sliding Block Procedure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129 (8), 673–684.
- Wartman, J., Seed, R. B. & Bray, J. D. (2005). Shaking Table Modeling of Seismically Induced Deformations in Slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131 (5), 610–622.
- Zhu, T. (2010). Some Useful Numbers on the Engineering Properties of Materials (Geologic or Otherwise). GEOL 615, Jackson School of Geosciences, University of Texas, USA [en línia]. [Consultat el 26/3/2016]. Disponible a: [www.jsg.utexas.edu/tyzhu/files/Some-Useful-Numbers.pdf](http://www.jsg.utexas.edu/tyzhu/files/Some-Useful-Numbers.pdf)

## ANNEXOS

Els annexos d'aquest treball s'adjunten en un llapis de memòria (USB) a la pàgina 27 i estan dividits en tres carpetes.

**ANNEX 1.** Conté dues carpetes en les quals es presenten arxius d'imatge i vídeo que mostren la configuració dels experiments d'aquest treball.

- *Imatges.* Aquesta carpeta conté 2 fotografies del model en l'experiment 1 i 2 fotografies del model en l'experiment 2. També conté 1 fotografia del mecanisme de generació d'ones acústiques a partir de tirs d'aire comprimit, que s'ha emprat en aquest treball. El format de les imatges és JPG.

- *Vídeos.* Aquesta carpeta conté 5 arxius de vídeo en format MOV en els que es mostren alguns dels tir portats a terme en el model de l'experiment 1. Els vídeos 1 i 2 mostren tirs fets des de la posició 2, els vídeos 3 i 4 mostren tirs fets des de la posició 5 i el vídeo 5 mostra un tir fet des de la posició 6 (Fig. 3). En tots els casos l'hidròfon registra en la posició A (Fig. 3).

**ANNEX 2.** Conté les dades que es van obtenir dels diferents experiments. S'estructuren en diferents carpetes per cada experiment:

- *Experiment 1.* Conté els fitxers d'àudio obtinguts durant els experiments. S'ordenen en carpetes en funció de la pressió a la qual es van obtenir (1 o 2 bars) i dins de la pressió, segons la posició de mesura (A, B i C). Per cada posició es troben els arxius d'àudio obtinguts, que s'anomenen pel punt de tir en el qual s'ha generat el senyal acústic (1-8). Si el tir es va repetir des d'una mateixa posició s'indica la vegada en que ha estat repetit, per exemple: 8(2), 8(3), etc. Els arxius es troben en format d'*Audacity* i cada un d'ells té una carpeta associada amb el mateix nom que permet la visualització d'aquests arxius. Si es volen moure d'ubicació els arxius d'*Audacity*, cal fer-ho juntament amb les carpetes. Amb tots aquests arxius hi ha una carpeta (AUDIOS (WAV)), que conté fitxers d'àudio en format WAV dels registres més representatius de cada posició i els que s'han utilitzat per aquest treball. Aquests fitxers WAV es poden obrir amb *Audacity* amb l'opció de File>Import>Audio. Enllaç de descàrrega d'*Audacity*: <http://www.audacityteam.org/>.

- *Experiment 2.* Aquesta carpeta conté dues carpetes:

- *Registres acceleròmetres.* Conté les dades obtingudes amb els acceleròmetres, en format TXT. S'ordenen en carpetes en funció de la posició de mesura (B, sobre la topografia; E, a la base de la topografia). Cada arxiu rep el nom del punt de tir en el qual es va generar el moviment. Els registres repetits, porten entre parèntesi el número de la repetició.

- *Registres acústics.* Conté les dades acústiques obtingudes dels micròfons de condensació. El criteri d'ordenació és primer en funció de la pressió (1 o 2 bars) i després en funció de la posició de mesura (B i E). La nomenclatura dels arxius és igual que pel cas anterior. Els arxius només es presenten en format d'àudio WAV, que es poden obrir amb *Audacity*.

**ANNEX 3.** Conté 3 arxius *Excel* en els quals es presenten tabulades les diferents característiques dels registres acústics de cada experiment i dels registres d'acceleració de l'experiment 2.

- *Taula A.* Es tracta d'un arxiu *Excel* en el qual es tabulen les característiques dels registres acústics més representatius (amplituds màximes, continguts freqüencials, etc.) per cada experiment. Cada experiment està en una pestanya diferent de l'arxiu i va acompanyat de l'esquema en planta de la configuració del model corresponent. La pestanya 1 correspon a l'experiment 1 i la 2 a l'experiment 2. En el text del treball se cita la taula com a A1 si es fa

referència als continguts de l'experiment 1 (pestanya 1) o com a A2 si es fa referència als de l'experiment 2 (pestanya 2).

- *Taula B.* Arxiu Excel en el que es presenten tabulades i graficades, per cada eix (X, Y i Z), les dades d'acceleració (en g) més representatives mesurades a dalt de la topografia (posició B) en l'experiment 2. L'*Excel* està dividit en 6 pestanyes que es numeren pels punts de tir en els quals s'han generat les dades (1,2,3,5,6 i 8).

- *Taula E.* Equivalent a la Taula B, però les dades que conté són les mesurades en la posició E, a baix de la topografia.

LLÀPIS DE MEMÒRIA (USB) AMB  
ELS ANNEXOS

