

# Impressió 3D de Models Digitals d'Elevacions i de Superfície: Aplicacions amb dades de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya

**Joan-Cristian Padró Garcia**

*Doctor en Geografia*

*Àrea de Geoprocés. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya*

*Grup de recerca Grumets. Departament de Geografia.*

*Universitat Autònoma de Barcelona*

*joan.padro@icgc.cat*

*joancristian.padro@uab.cat*

## Resum

Aquest treball descriu el marc teòric i el mètode pràctic per imprimir en 3D un relleu de la superfície terrestre, dins el context de la modelització de la informació geogràfica. Es mostren exemples del mètode i dels resultats amb àrees d'estudi distribuïdes per Catalunya, de diferents morfologies i a diferents escales: àrees costaneres, àrees muntanyoses i àmbits urbans. En l'àmbit teòric i metodològic s'expliquen els conceptes relacionats amb les tècniques d'impressió 3D, fent èmfasi en el procés de conversió d'un fitxer georeferenciat habitual en entorns de Sistemes d'Informació Geogràfica (SIG) a un model a escala imprès amb una impressora 3D. El resultat és una guia per entendre el procés i la terminologia de la impressió 3D, de manera que el lector pugui materialitzar un relleu amb un cost relativament baix. Finalment es discuteixen les potencialitats i les limitacions de la tecnologia utilitzada, així com les perspectives de futur amb les properes innovacions.

**Paraules clau:** SIG, Modelització, MDT, Mapes de relleu, Impressió 3D, Mapes 3D, Catalunya.

## **Resumen:** *Impresión 3D de Modelos Digitales de Elevaciones o de Superficie: Aplicaciones con datos del Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya*

Este trabajo describe el marco teórico y el método práctico para imprimir en 3D un relieve de la superficie terrestre, dentro del contexto de la modelización de la información geográfica. Se muestran ejemplos del método y de los resultados con áreas de estudio distribuidas por Cataluña, de diferentes morfologías y en diferentes escalas: áreas costeras, áreas montañosas y ámbitos urbanos. En el ámbito teórico y metodológico se explican

los conceptos relacionados con las técnicas de impresión 3D, haciendo énfasis en el proceso de conversión de un archivo georeferenciado habitual en entornos de Sistemas de Información Geográfica (SIG) a un modelo a escala impreso con una impresora 3D. El resultado es una guía para entender el proceso y la terminología de la impresión 3D, de manera que el lector pueda materializar un relieve con un coste relativamente bajo. Por último, se discuten las potencialidades y las limitaciones de la tecnología utilizada, así como las perspectivas de futuro con las próximas innovaciones.

**Palabras clave:** SIG, Modelización, MDT, Mapas de relieve, Impresión 3D, Mapas 3D, Cataluña.

***Abstract: 3D printing of Digital Elevation Models or Surface. Applications with data from the Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya***

This work describes the theoretical framework and practical method for 3D printing a relief of the Earth's surface, within the context of geographic information modelling. Examples of the method and results are shown with study areas distributed throughout Catalonia, of different morphologies and at different scales: coastal areas, mountainous areas, and urban areas. In the theoretical and methodological field, the concepts related to 3D printing techniques are explained, emphasizing the process of converting a georeferenced file common in Geographic Information Systems (GIS) environments to a scale model printed with a 3D printer. The result is a guide to understanding the process and terminology of 3D printing, so that the reader can create a relief with a relatively low cost. Finally, the potential and limitations of the technology used are discussed, as well as future prospects with upcoming innovations.

**Keywords:** GIS, Modelling, DTM, Relief maps, 3D print, 3D maps, Catalonia.

\* \* \*

## 1. Introducció

Retornar a la cartografia en suport físic, tàctil, des de la cartografia digital, ha estat la motivació inicial d'aquesta recerca. L'objectiu principal del present article és fer difusió del marc teòric i el mètode pràctic per materialitzar amb una impressora 3D un relleu de la superfície terrestre, en el cas concret del territori català. Aquest propòsit s'emmarca en l'àmbit teòric i pràctic de la modelització de la informació geogràfica.

L'apartat introductorï aborda els antecedents en la modelització del relleu, fa un breu repàs a la tecnologia d'impressió 3D de relleus i la seva utilitat, i defineix els objectius i estructura de l'article.

## 1.1. Antecedents en la modelització del relleu

La modelització del relleu amb motius geogràfics, com a simbolització cartogràfica tridimensional en un suport sòlid, ens porta a pensar en les clàssiques maquetes o en mapes de relleu. Tradicionalment s'han fet modelitzacions de relleu a partir de tres tècniques (Venceslá i Ariza, 2015a):

- a) *A partir de tècniques subtractives*, actualment controlades per sistemes de Control Numèric Computeritzat (CNC), que erosionen —fresen— un volum de material (poliestirè, metall, fusta, guix,...) seguint unes coordenades XYZ en l'espai local de la màquina. Antigament aquesta operació mecanitzada era feta per un operari mitjançant un aparell anomenat pantògraf (Rabella i Panareda, 2011), en el qual, per una banda, es disposa d'un mapa topogràfic i, per l'altra, del volum de material a erosionar; la fresadora és solidària a les dues bandes i l'operador ressegueix les corbes de nivell, alçant o abaixant la fresa en funció de la cota de la corba de nivell, i així s'erosiona el volum de material segons el mapa topogràfic. Actualment els sistemes CNC reproduïxen fitxers digitals, que en el cas que ens ocupa corresponen a Models Digitals d'Elevacions (MDE), en un procés automatitzat que permet molta més sistematització.
- b) *A partir de tècniques additives*, en les quals es diposita material des de la base de la maqueta a la part superior, en successives capes, com si fossin corbes de nivell. Un exemple típic és l'exercici de manualitat que consisteix en retallar les corbes de nivell d'un mapa topogràfic en un material com ara el suro i, posteriorment, enganxar les peces una sobre l'altra per acabar obtenint un relleu. Actualment però, hi ha nombroses tècniques que automatitzen aquest procés, entre els que hi ha el laminat i la impressió 3D com s'explicarà més endavant.
- c) *Termoformats*. Si bé les anteriors tècniques s'utilitzen per fer models de baixa tirada productiva o motllos individualitzats, la tècnica més habitual per fer mapes de relleu comercials en sèrie és el termoformat. Aquesta tècnica consisteix en l'escalfament d'una làmina preimpresa de plàstic que s'estova amb la calor, de manera que es pot adaptar a un motlle, i un cop refredada la làmina se solidifica amb la forma del relleu. Les facilitats d'inclusió d'elements geogràfics (per exemple, rius, xarxa viària, topònims...) a la làmina fa que aquesta tècnica sigui la utilitzada per la majoria de mapes de relleu comercials amb finalitats geogràfiques (ICGC, 2011).

En totes tres tecnologies descrites, la qualitat i la precisió del relleu depèn de la qualitat, la precisió, i la resolució espacial del MDE de referència utilitzat, normalment relacionat amb l'escala de treball.

## 1.2. Tecnologia d'impressió 3D de relleus i la seva utilitat

Des de mitjans de la dècada de 2010 una nova tecnologia basada en impressores 3D permet la modelització del relleu d'una manera relativament senzilla i a l'abast de tothom qui hi estigui interessat, sobretot arran del projecte RepRap (RepRap, 2023), que consisteix en un projecte comunitari i en fer màquines autoreplicables disponibles gratuïtament per al benefici de tothom utilitzant la impressió 3D. D'entrada, cal dir que, amb la tecnologia actual, la modelització cartogràfica amb impressores 3D no arriba ni de bon tros al nivell de qualitat temàtica, cromàtica, ni d'informació toponímica que ofereixen els mapes de relleu termoformats, però sí que es poden obtenir relleus a escala que poden ser de certa utilitat (per exemple, en els camps de l'educació, la conservació del patrimoni, la cartografia per invident o la difusió cartogràfica) i ser d'interès per a geògrafs/es i cartògrafs/es. Per tant, aquest article se centra en la modelització física a escala del relleu en sí, entès com una variable contínua geogràfica, sense aspirar a reproduir altres elements topogràfics (carreteres, rius, poblacions,...).

La impressió 3D (en la seva vessant coneguda com a fabricació additiva o fabricació per capes), consisteix en la tècnica de fabricació d'objectes en tres dimensions en la qual el relleu dels elements s'obté per un procediment d'impressió que disposa successivament capes de material plàstic fos, les unes sobre les altres, segons un model digital dissenyat per ordinador (Termcat, 2023). S'utilitza aquesta tècnica per les més inaudites de les aplicacions i branques científiques; posant el focus en les que es basen en la component espacial —com la geografia—, la variabilitat comprèn des d'aquelles disciplines que utilitzen models impresos en 3D a gran escala com en l'àmbit de l'arquitectura (Teixeira *et al.*, 2023) fins a treballs a escala planetària en l'àmbit de les ciències de la terra i la geofísica (Ortiz-Gil i Brugué-Castell, 2021). Dins d'aquest rang d'escalas de treball hi ha espai perquè la geografia i la cartografia a Catalunya també puguin valdre's d'aquesta tecnologia, expressar-s'hi i transmetre informació. Actualment el vincle entre la impressió 3D i la geografia encara és baix però està en creixement, tal com demostren treballs focalitzats en mapes tàctils (Barviret *al.*, 2019) o webs que faciliten l'obtenció del MDE de qualsevol part del món per ser impresos amb 3D (CADMAPPER, 2023; Terrain2STL, 2023).

La principal característica dels mapes de relleu és, precisament, la capacitat de transmetre informació a través del tacte, a diferència de la cartografia convencional, que transmet la informació a través de la vista. En aquest sentit, la simplificació i la generalització que la cartografia fa de la realitat no pot ser interpretada amb claredat per les persones amb dificultats visuals, de manera que els mapes en 3D poden ser de gran utilitat per fer arribar a aquestes persones algunes característiques geogràfiques del territori, tal com es fa des d'àmbits didàctics relacionats amb la cartografia (Ungaret *al.*, 1997; Koch,



2011; Ludíkoá i Finková, 2012). Una iniciativa molt interessant és l'anomenada “*MAPTAC3D, cartografia al alcance de todos*” duta a terme per la ONCE (2017) en col·laboració amb la Comisión Braille Española i la Universidad de Jaén. Dos científics del Grup d'Investigació en Enginyeria Cartogràfica d'aquesta universitat, Francisco Javier Venceslá Simón y Francisco Javier Ariza López (Venceslá i Ariza, 2015a), van posar les bases teòriques i tècniques per tal de transformar MDEs en format SIG (per exemple, TIFF) a fitxers a escala en format de disseny 3D (com ara STL), que posteriorment es poden transformar en un format per ser imprès en una impressora 3D (format GCODE). En el seu treball de final de llicenciatura, Venceslá (2014) va dissenyar i posar en pràctica l'eina que permet fer aquesta transformació d'una manera pràctica, i posteriorment (Venceslá, 2015b), a través d'un programari SIG lliure (QGIS), permetent el seu accés a la comunitat educativa i professional avesada a utilitzar informació geogràfica.

### 1.3. Objectius i estructura de l'article

L'objectiu principal d'aquest article és transmetre un mètode pel qual, en base a aquestes eines ja existents, conjuntament amb dades de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), els/les lectors/es puguin entendre com es genera un mapa de relleu amb una impressora 3D i tinguin una referència dels passos a seguir per imprimir un relleu en particular, amb una qualitat cartogràfica acceptable.

Els objectius secundaris, però no menys importants, són: 1) posar de manifest que cal que el model físic vagi acompanyat dels elements informatius considerats elementals des de la geografia (escala, indicació del nord, llegenda, informació sobre la font de dades). En aquest sentit, un objectiu és experimentar amb la inclusió de textos en Braille acompanyant aquests caixetins informatius; 2) experimentar amb diferents colors de material per fer mapes hipsomètrics; i 3) tot i que la representació del relleu és l'objectiu principal, també s'experimenta amb la inclusió de textos per l'etiquetatge toponímic.

El cos del treball consisteix en cinc parts diferenciades:

- 1) Una revisió del marc conceptual i teòric relacionat amb les tècniques d'impressió 3D, amb un èmfasi especial en l'objecte d'estudi de la modelització del relleu terrestre.
- 2) Una descripció detallada dels materials utilitzats, la metodologia seguida, les fonts de dades de l'ICGC i la descripció dels àmbits d'estudi.
- 3) Una mostra dels resultats que es poden obtenir en diferents escales i àmbits geogràfics del territori català, des de l'escala 1:5.000 a la 1:50.000, i en zones urbanes, muntanyoses, costaneres i interiors del país (les illes Medes, la Plana de Lleida, Tarragona, Barcelona, Roques de Benet, el massís del Pedraforca i el massís de Montserrat).

- 4) Discussió del resultat, potencialitats i limitacions de la impressió 3D de relleus.
- 5) Les conclusions.

## 2. Marc conceptual i teòric

Per tal de materialitzar un relleu digital en una figura 3D a través d'una impressora convé, prèviament, tenir clars els conceptes relacionats amb els Models Digitals del Terreny i amb les impressores 3D en la seva modalitat de fabricació additiva.

### 2.1. Models Digitals del Terreny: Models Digitals d'Elevacions i derivats

Cal distingir entre els conceptes de Model Digital del Terreny (MDT), Model Digital d'Elevacions (MDE) i Model Digital de Superfícies (MDS). Tot i els nombrosos intents de diferents autors i institucions per estandarditzar la nomenclatura i la seva conceptualització, encara ara no hi ha una única postura oficial. En aquest document se seguirà la nomenclatura establerta per Pons i Arcalís (2012) en el seu Diccionari de Teledetecció, avalat pel TERM CAT:

- MDT. “És una estructura numèrica de dades que representa, informàticament i de manera més o menys simplificada, la distribució espacial d'una variable quantitativa contínua del terreny, com ara l'altitud (com en els MDE), el pendent topogràfic (com en els MDP), les variables climàtiques (com en els models digitals de temperatures), etcètera. [...] El model de dades més habitual per a contenir un MDT és el ràster, però també han estat emprades les xarxes irregulars de triangles o models mixtos...” (Pons i Arcalís, 2012). En síntesi, en la seva versió ràster, es tracta habitualment d'una malla de píxels organitzats en files i columnes en les que el valor registrat a cada píxel correspon a la magnitud d'una variable (altitud del terreny, altitud de la superfície, pendent, insolació, temperatura...), és a dir, pot ser l'altitud del terreny però pot ser qualsevol altra.
- MDE. Es tracta d'un tipus específic de “MDT en què la variable quantitativa contínua és l'altitud del terreny, o bé dades batimètriques, de manera que s'exclou la vegetació, els edificis, els ponts, etc. Les altituds recollides solen ser ortomètriques, no el·lipsoidals. Els MDE són necessaris per a la creació de models d'inundació o de drenatge, estudi d'usos del sòl, etc. Cal evitar l'ús de MDE com a sinònim de MDT, ja que el concepte de MDT és més ampli.” (Pons i Arcalís, 2012). En síntesi, en la seva versió ràster, un MDE és una d'una malla de píxels organitzats en files i columnes en les quals el valor registrat a cada píxel correspon, en concert, a la magnitud de la variable altura del terreny (del sòl).

- MDS. Es tracta d'un tipus específic de "MDT en què la variable quantitativa contínua és l'altitud de la superfície, de manera que considera la vegetació, els edificis, els ponts, etc. Un MDS pot ser útil per a la modelització del paisatge, de les ciutats o de les conques visuals, per a cobertura de telecomunicacions, o per a la generació d'ortoimatges veritables..." (Pons i Arcalís, 2012). En síntesi, en la seva versió ràster, un MDS és una d'una malla de píxels organitzats en files i columnes en les quals el valor registrat a cada píxel correspon, en concert, a la magnitud de la variable altura de la superfície (el sòl i tots els elements que s'hi sustenten (edificis, vegetació, ponts...)).

Els MDT se solen organitzar digitalment en dos tipus d'estructures de dades, o bé mitjançant una xarxa irregular de triangles (TIN) o bé en una estructura ràster:

- TIN. Parteixen d'un núvol de punts tridimensional (coordenades XYZ), habitualment distribuïts irregularment pel territori (e.g. cotes mesurades sobre el terreny, o punts determinats fotogramètricament); cada punt és el vèrtex d'un triangle, que està orientat en l'espai tridimensional definint una superfície (o faceta), generant-se així una estructura vectorial de triangles que forma un volum. En aquesta estructura TIN, a cada localització de la superfície d'un triangle se li pot assignar una altitud. Pel cas de la impressió 3D, cal fer notar que els TIN permeten la presència d'extraploms en el relleu, és a dir, es podrien imprimir voladissos si l'origen de les dades és un TIN.
- Ràster. En el cas del MDE i el MDS en format ràster, l'estructura es basa en una malla o quadrícula de cel·les (o píxels), ordenades de forma regular en files i columnes; els píxels tenen una dimensió planimètrica sobre el terreny (en l'espai de coordenades XY), coneguda com a resolució espacial o mida de píxel, i el valor digital enregistrat al propi píxel correspon a l'altitud de la variable en aquell píxel (coordenada Z en els cas dels MDT). Hi ha multitud de formats digitals per emmagatzemar dades ràstergeoreferenciades, però possiblement el més típic actualment és el TIFF (o en les seves variants BigTIFF, GeoTIFF i COG). Pel cas de la impressió 3D, cal fer notar que els ràsters no permeten la presència d'extraploms en el relleu, és a dir, no es podrien imprimir voladissos si l'origen de les dades és un ràster.

Les fonts de dades amb què es generen els MDE i MDS varien segons l'escala, però generalment utilitzen tècniques de teledetecció, fotogrametria i/o aixecaments topogràfics (Nunes, 2013). Per exemple, hi ha models globals com el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) elaborats a partir de dades radar, amb les quals s'obtenen MDEs amb una resolució espacial entre 30 i els 100 metres (Farr i Kobrick, 2000). A nivell regional i local la producció de MDE es pot aconseguir mitjançant la restitució fotogramètrica, a partir de parells estereoscòpics d'imatges de fotografia aèria vertical (actualment s'em-

pren tècniques d'estereocorrelació digital). També s'utilitzen, cada cop mes, dades obtingudes amb sensors Lidar aerotransportats, que emeten polsos de llum des d'una aeronau i segons el que tarda el pols en retornar es pot estimar l'altitud del terreny. La tecnologia lidar ofereix una gran densitat de punts de mostreig en forma de núvol de punts tridimensionals (típicament en format LAS) que després s'han d'interpol·lar per obtenir una malla regular de cel·les en format ràster. Els punts del núvol tenen informació associada a part de la cota, entre la que destaca el tipus de superfície en la que ha impactat el pols, fet que permet discriminar entre sòl, vegetació, edificis i altres categories estandarditzades (ASPRS, 2008) i, per tant, són dades que permeten generar tant MDE com MDS. Tradicionalment, a gran escala i quan es necessiten resultats molt acurats, s'utilitzen dades d'aixecaments topogràfics que es capten per mitjà de diversos dispositius com estacions totals o receptors de posicionament global (GNSS) de precisió. Recentment, a aquesta escala de molt detall, també s'utilitzen tècniques Lidar i d'estereocorrelació fotogràfica a partir de dades captades amb drons, amb les quals s'obtenen núvols de punts de gran densitat i permeten assolir MDE i MDS de molt alta resolució espacial, inferior als 10 cm (Padró *et al.*, 2019, Russell *et al.*, 2023).

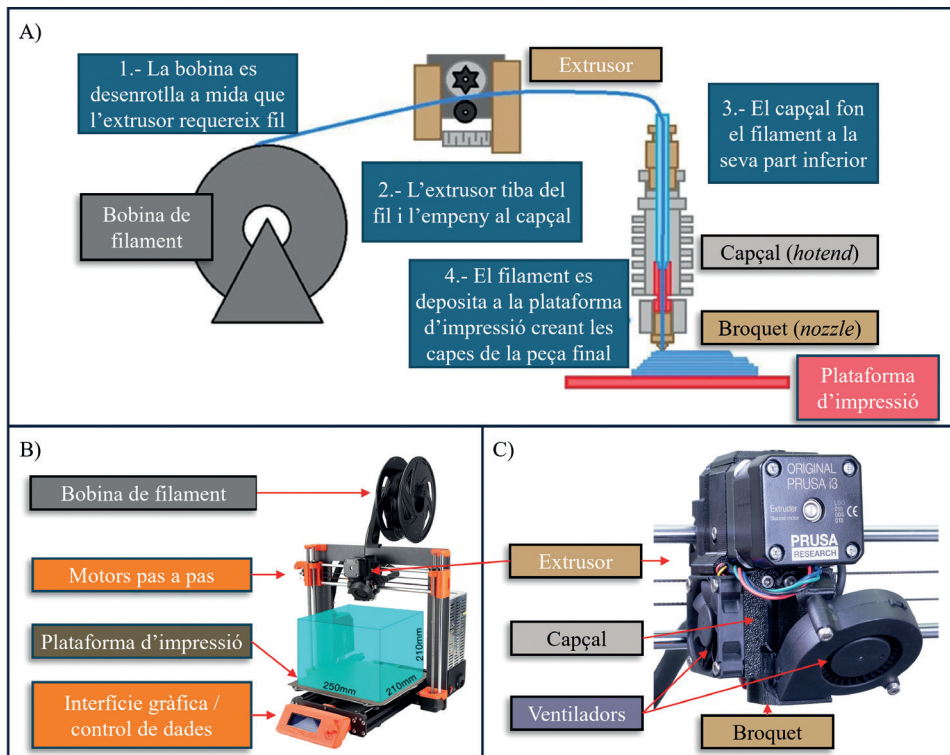
## **2.2. La impressió 3D en la modalitat *fabricació additiva***

### **2.2.1. Funcionament de la impressora**

En termes d'enginyeria, les impressores 3D en la modalitat de fabricació additiva parteixen del concepte tècnic del CNC o eines de fabricació assistida per ordinador. La impressora es nodreix d'una bobina de filament, que aporta el material cap a l'extrusor. A l'extrusor hi ha un capçal (en anglès *hotend*) que està a una temperatura suficient per fondre el filament, extrudeix material fos a través del broquet (en anglès *nozzle*), i el diposita en capes que són afegides una sobre l'altre, en una plataforma d'impressió (fig. 1), on se solidifica. En el cas dels mapes de relleu, cada capa té la forma perimetral d'una corba de nivell, i l'àrea és emplenada per poder suportar la següent capa. Per tant, la impressora es basa en un espai definit per tres eixos (XYZ) i uns motors pas a pas que desplacen l'extrusor dins d'aquest espai per anar-lo portant a cada punt on ha d'extrudir.

D'aquesta manera, en el cas de la impressió d'un MDE, l'extrusor va dipositant material a cada "corba de nivell" en el sentit geogràfic, de manera molt similar a com faríem una maqueta manualment pel mètode de retallar les corbes d'un mapa topogràfic i enganxant-les una sobre l'altre. Tècnicament, en l'argot de l'enginyeria i les impressions 3D, cada capa s'anomena "làmina". Habitualment les làmines dipositades tenen un gruix d'entre 0,15 i 0,3 mm, i aquesta és la resolució vertical a la que es defineixen els objectes. Horitzontalment, la definició ve donada pel diàmetre del broquet (habitualment de 0,4 mm, però substituïble), i el solapament vertical entre capes superposades.

**Figura 1.** A) Funcionament bàsic d'una impressora 3D de tipus fabricació additiva i els seus components principals. B) Exemple concret de la disposició dels components en la impressora utilitzada en aquest estudi de cas (Prusa i3 MK3). C) Detall dels components a l'extrusor de material (Prusa i3 MK3).



Font: Elaboració pròpia a partir de les dades de: PrusaKnowledge Base (<<https://help.prusa3d.com/tag/mk3s-2>>).

El material utilitzat pot variar (poliàcid làctic (PLA), acrílonitril butadiè estirè (ABS),...), però el procediment comú és que l'extrusor escalfa el material fins al seu punt de fusió (generalment entre 200 i 250°C) per poder-lo dipositar a la plataforma, i al dipositar-se se solidifica al baixar de nou a temperatura ambient. Aquest material, se sol adquirir en bobines que en faciliten la càrrega a la impressora i la seva digestió per part de l'extrusor. Hi ha materials de gran varietat de colors, i segons el model d'impressora s'ha de canviar la bobina manualment o ho gestiona la pròpia impressora. El PLA, un bioplàstic, és el material més emprat, ja que teòricament és respectuós amb el medi ambient i és biodegradable (Liu *et al.*, 2005). Per aquest estudi de cas s'ha utilitzat una impressora Original Prusa i3 MK3 (Prusa, 2023), que té una capacitat volumètrica d'impressió de 250 mil·límetres en l'eix X, 210 en l'eix de les Y i 210 en l'eix Z, i s'ha utilitzat amb una configuració estàndard. El filament emprat ha estat PLA d'1,75 mil·límetres de gruix, en concret diferents bobines de colors blanc seda, blau seda, gris, negre carbó, verd-gris, verd, vermell, daurat i marró clar.

### 2.2.2. Tipologies de fitxers, canvis de formats i parametrització

La impressió en 3D d'un relleu implica generalment tres formats informàtics de dades: el format de dades ràstergoeferenciades amb el MDT (e.g. TIFF), el format de dades de l'objecte tridimensional (e.g. STereoLithography(STL)), i el format de dades del laminat de l'objecte que conté les instruccions de control numèric per computador (per exemple, GCODE) (fig. 2).

**Figura 2.** Formats de dades habituals per passar d'un MDT en el format típic de SIG a una figura impresa per control numèric



Font: Elaboració pròpia.

**TIFF a STL:** Tal com s'ha explicat prèviament, en el cas de relleus de la superfície terrestre el model de dades més habitual és un ràster (per exemple, TIFF), tot i que un núvol de punts o un TIN fàcilment es convertirien en un fitxer STL. En el pas de ràster a STL implica la definició de certs paràmetres, que essencialment són:

- a) *Àmbit geogràfic a materialitzar:* una condició indispensable és, evidentment, definir l'àmbit geogràfic que es desitja imprimir. La majoria de convertidors de TIFF a STL requereixen que el ràster tingui definit un sistema de referència en coordenades mètriques.
- b) *Escala:* l'escala numèrica a la que es materialitzarà el model, i per tant quin factor d'escalat s'ha d'aplicar a les files i columnes del ràster per assolir la relació desitjada entre les dimensions planimètriques del model físic i la realitat geogràfica. L'escala comporta definir la grandària que té el model físicament en les dimensions planimètriques (X i Y).
- c) *Gruix de cada capa a laminar:* habitualment les impressores de PLA treballen amb capes de 0,2 o 0,15 mil·límetres per aconseguir un detall acceptable en els models. Aquest paràmetre està relacionat amb l'escala vertical (Z) que tindrà el model físic resultant. Per exemple, a una escala 1:10000 i un gruix de capa de 0,2 mm, cada capa de material dipositat (que es visualitza materialment com una isolínia) correspon a 2 metres d'altitud.
- d) *Exageració vertical:* aquest paràmetre consisteix en aplicar un factor d'escalat als valors de la coordenada Z sense aplicar-lo a les coordenades X i Y. És força habitual que, en terrenys generalitzadament plans i sense massa accidents geogràfics, el rang de valors altimètrics sigui molt baix respecte les dimensions planimètriques de l'àmbit a modelitzar. En aquests escenaris el relleu gairebé no s'aprecia, i és necessari exagerar els valors de la coordenada Z amb un factor multiplicador.



e) *Cota base*: es refereix a la cota mínima en la que es desitja imprimir el model. Quan el relleu a imprimir té com a cota mínima el nivell del mar (per exemple, illes Medes), lògicament aquest valor serà 0 m. Altres vegades però, potser és interessant que la cota base sigui la cota mínima local del model (per exemple, pel Pedraforca el valor pot ser 1000 m) i així no sobredimensionar una base que pot no tenir sentit geogràfic. A part, també es pot donar una base extra per donar solidesa al model.

Cal informar degudament a les persones lectores del mapa sobre els paràmetres introduïts per generar el model, ja sigui mitjançant caixetins informatius, una orla al voltant del model, o en metadades adjuntes.

**STL a GCODE.** Prèviament, l'objecte a laminar es representa un format de tipus TIN que permeti la representació tridimensional de volums i superfícies, com els OBJ (WavefrontOBJect), STL (STereoLithography) o PLY (Polygon File Format). En el món de les impressores 3D s'utilitza el format STL (Sustainability of Digital Formats, 2023), que conté la geometria de l'objecte a imprimir. Els paràmetres essencials que s'han de definir en el STL, són:

- a) *Impressora utilitzada*: cal seleccionar la impressora per establir-ne els límits mecànics (velocitats, acceleracions, mides...), però la principal és definir el volum imprimible.
- b) *Material utilitzat*: cada material necessita que la impressora assoleixi una temperatura de fusió a l'extrusor i una temperatura a la plataforma d'impressió per tal d'assegurar un bon arrapament de la peça. Per PLA els valors solen ser de 210°C i 60°C, respectivament. També és important definir el gruix del filament utilitzat.
- c) *Velocitat d'impressió*: els rangs de valors de velocitat del capçal solen anar entre els 20 i els 100 mil·límetres per segon, segons si la part de la peça necessita més o menys detall. Per exemple, la part interna de rebliment no necessita detall i es pot fer a alta velocitat, però la part externa i més visible, així com la capa base del model, són molt delicades i cal que estiguin molt ben fetes (a baixa velocitat).
- d) *Altura de les capes*: el gruix de la capa determina la resolució del model, la finesa i el detall de les seves formes. Normalment es dona més altura a les capes inferiors del model per donar-li solidesa, o se'n fan de dobles. Per exemple, per un relleu amb bon detall es solen definir les capes amb una altura de 0,15 mil·límetres i la primera capa de 0,2 mil·límetres. Si es dona més altura el model es construirà més ràpidament però la transició altitudinal serà més esgraonada (mes grollera).
- e) *Rebliment*: la part interior dels models és essencial per tal que s'aguantin les capes a mida que es construeix verticalment la figura i s'arribi a la part superficial. Encara que no és visible, el rebliment intern té una forma i una



densitat. Per models de relleu terrestre, que no solen tenir voladissos, un rebliment del 15% és suficient. El patró no és problemàtic pel cas del relleu, essent el triangular una bona solució segons l'experiència de l'autor.

**GCODE i model materialitzat:** El format de fitxer informàtic que conté les instruccions de moviments i extrusions que ha de fer una impressora 3D, és el GCODE (Kramer, 2000). Aquest format informàtic és una estàndard de la indústria del control numèric per computador, que en essència conté la laminació d'un objecte en diverses capes en funció del gruix definit, i la comanda de moviments que han de fer els motors per portar el capçal extrusor a cada punt XYZ de l'espai local de la plataforma d'impressió per anar construint cada capa o làmina. El model es va construint capa a capa, i finalment s'obté una peça que generalment cal polir i eliminar-ne petites imperfeccions.

### 3. Materials i metodologia

#### 3.1. Materials

##### 3.1.1. Models Digitals del Terreny de Catalunya disponibles a l'ICGC

La política de dades públiques de l'ICGC permet l'accés a diversos MDT a través de la web <<https://www.icgc.cat/ca/Descarregues/Elevacions>>, a través de serveis Web Map Service (WMS) (<[https://geoserveis.icgc.cat/icgc\\_mdt2m/wms/service?>](https://geoserveis.icgc.cat/icgc_mdt2m/wms/service?>)>), i a través de l'aplicació de descàrregues (<<http://www.icgc.cat/appdownloads/>>). Per mitjà d'aquests diferents canals es pot accedir als següents productes, amb els quals es poden generar models de relleu de la superfície de Catalunya:

- **Model Digital d'Elevacions 5×5:** És un MDE tipus ràster format per una malla regular de cel·les de 5 m de costat. Conté altituds ortomètriques, amb una exactitud altimètrica estimada (arrel quadrada de la mitjana del quadrat dels errors, RMSE) inferior a 1 metre (RMSE ≤ 0,9 metres). Per la seva generació es fa servir la informació altimètrica de la Base topogràfica de Catalunya a escala 1:5000 versió 2 (BT-5M v2.0), que inclou perfils, cotes altimètriques, línies de trencament del pendent i corbes de nivell, tots ells recollits sobre el terreny (ICGC, 2013). La primera versió es va publicar al 2013 amb dades recollides des de 2009, i s'ha anat actualitzant fins a la darrera revisió amb dades del 2018 (ICGC, 2018). Es distribueix en fulls 1:50000 del Mapa Topogràfic Nacional (MTN), però també es pot definir un àmbit propi a partir d'un polígon.
- **Model Digital d'Elevacions 2×2:** Tot i que a l'ICGC s'hi refereix com un MDE, es tracta més aviat d'un MDS ja que té en compte les edificacions. Es distribueix en format ASCII GRID format per una malla regular de cel·les de 2 m de costat i és fàcilment convertible a un fitxer de tipus ràster. Conté

altituds ortomètriques, amb una exactitud altimètrica estimada inferior a 1 metre ( $RMSE \leq 0,15$  m). Per la seva generació es fa servir la informació altimètrica dels vols de la primera cobertura Lidar (V1), realitzats entre el 2008 i el 2011 (ICGC, 2016); a nivell d'unitat de distribució es poden consultar les dades dels vols Lidar, a partir dels quals s'ha generat el MET, mitjançant l'arxiu "MET2-Tall5m\_LiDARCAT-DataVol" que es pot descarregar de la pàgina web de l'ICGC (ICGC, 2023). Es distribueix en fulls 1:5.000 de la Base topogràfica de Catalunya 1:5.000 (BT-5M) v2.0, però també es pot definir un àmbit propi a partir d'un polígon. A partir d'una generalització d'aquest producte, es genera i distribueix també una versió amb mida de píxel de 15 metres.

- **Dades Lidar:** És un núvol de punts tridimensional, amb una densitat mínima de  $0,5$  punts/m<sup>2</sup>. Interpolant aquests punts o triangulant-los es pot generar un model continu en format ràster o en format TIN respectivament. Conté altituds ortomètriques, amb una exactitud altimètrica estimada inferior a 1 metre ( $RMSE \leq 0,9$  metres). Per la seva generació es fa servir un sensor Lidar, calibrat i ajustat amb àrees de control topogràfic, per tal d'obtenir una exactitud altimètrica amb un error mitjà quadràtic d'uns 6 cm en àrees planes amb poca vegetació. Posteriorment, el núvol de punts ha estat classificat automàticament i, en la 1a cobertura, a més, s'han editat manualment el terreny, els punts alts i baixos, i les torres i línies elèctriques (ICGC, 2013). La primera versió (Lidar V1) es va publicar al 2013 amb dades recollides des de 2008 a 2011, la segona versió (Lidar V2) es va publicar al 2018 amb dades recollides des de 2016 a 2017, i està previst que al 2024 es publiqui una tercera versió amb molta més densitat de punts per metre quadrat. Les dades es distribueixen per blocs de 2 km x 2 km, en format LAS 1.2 comprimit (ICGC, 2023).

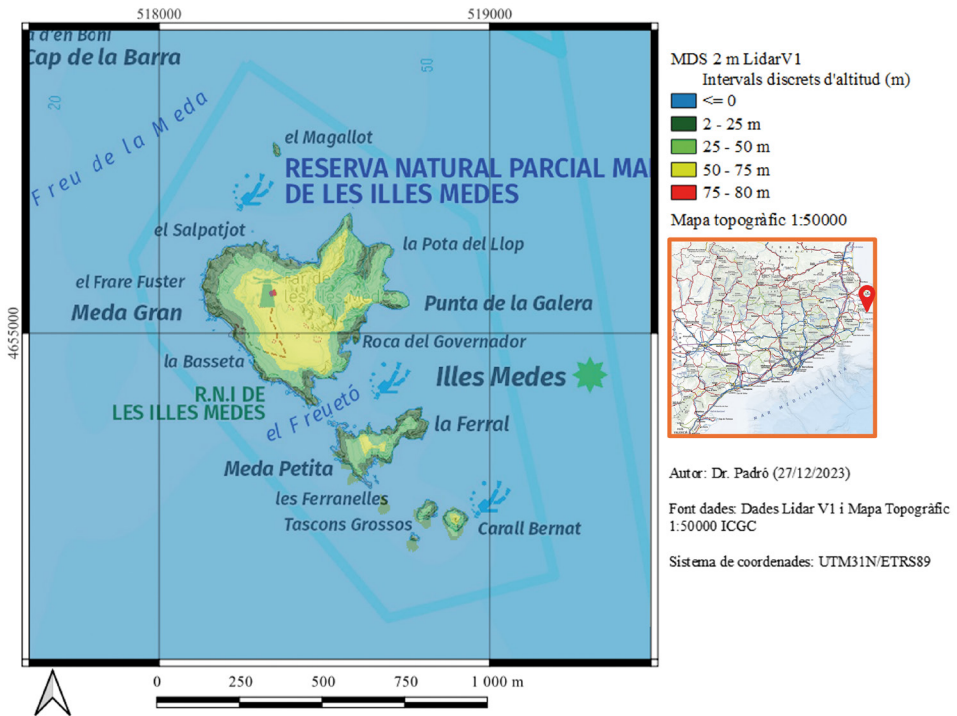
En tots els casos, el sistema de referència geodèsic és el ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989), constituït per l'el·lipsoide GRS80 (Geodetic Reference System 1980) fixat a la part estable de la placa continental eurasiàtica i consistent amb l'ITRS (International Terrestrial Reference System) a l'època 1989.0. El sistema de referència es materialitza sobre el territori amb la Xarxa Geodèsica Utilitària de Catalunya. El sistema de representació plana és la projecció conforme Universal Transversa de Mercator (UTM). Aquesta projecció és coincident amb l'establerta com a reglamentària pel Reial Decret 1071/2007, que per a Catalunya és la projecció conforme ETRSTM31 (EPSG:25831). El sistema de referència altimètric és el definit pel Decret 1071/2007 corresponent als registres del nivell mig del mar a Alacant, és a dir, es tracta d'altituds optomètriques (ICGC, 2013). El geoide emprat és l'EGM08D595 (ICGC, 2016).

### 3.1.2. Models Digitals del Terreny utilitzats en els casos estudiats

En l'estudi de cas que es descriu en aquest article, s'han utilitzat les següents dades altimètriques de les illes Medes, les zones urbanes de Barcelona, Lleida i Tarragona, i de les zones muntanyoses de les roques de Benet, el massís del Pedraforca i la muntanya de Montserrat:

a) *Illes Medes*: Dades Lidar V1 del full 581654, corresponents a l'àrea de les illes Medes. En aquest cas s'ha utilitzat la V1 enlloc de la V2 donada la millor qualitat del núvol de punts en aquesta zona concreta. L'àrea impresa forma un rectangle que té unes dimensions de 935 metres per 1.150 metres de costat (s'ha ajustat a l'àrea amb dades Lidar), i un rang d'altituds entre els 0 i els 80 metres (fig. 3).

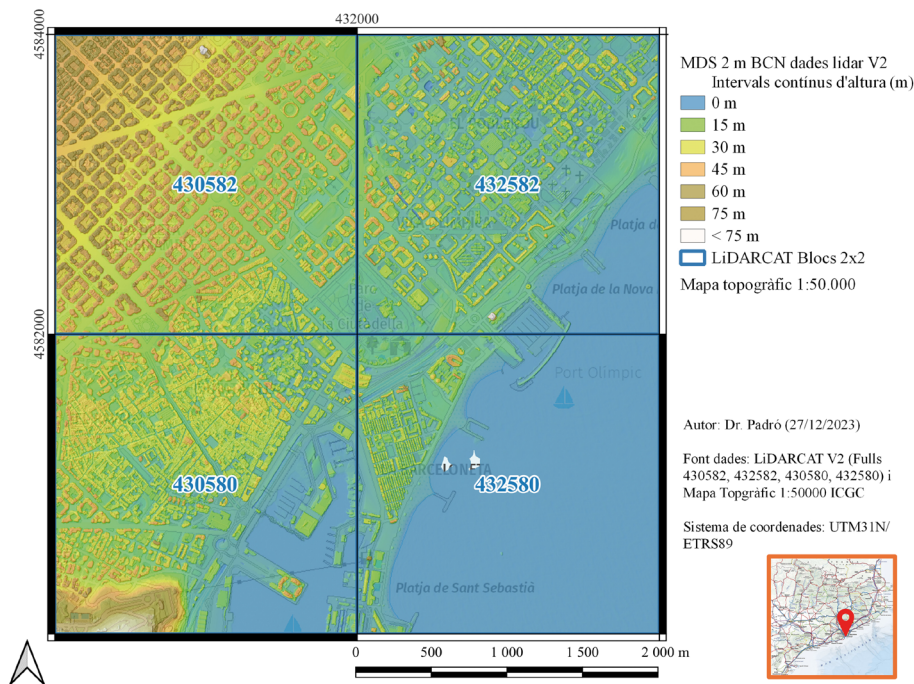
**Figura 3.** Àrea impresa en 3D en l'àmbit d'estudi de les illes Medes



**Font:** Elaboració pròpia a partir de les dades de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (LiDARCAT V1 full 518654 i Mapa Topogràfic 1:50000).

b) *Barcelona*: Dades Lidar V2 dels fulls 430580, 430582, 432580 i 432582, corresponents a l'àrea de Barcelona (Port Vell, Ciutat Vella, Poblenou, part de l'Eixample). L'àrea impresa forma un quadrat de 4.000 metres cada costat, i un rang d'altituds entre els 0 i els 115 metres (fig. 4).

**Figura 4.** Àrea impresa en 3D en l'àmbit d'estudi de l'Eixample de Barcelona



Font: Elaboració pròpia a partir de les dades de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (LiDARCAT V2 fulls 430580, 430582, 432580 i 432582 i Mapa Topogràfic 1:50000).

c) *Tarragona*: Dades Lidar V2 dels fulls 352552 i 354552, corresponents a l'àrea del centre de la ciutat de Tarragona (Serrallo, Miracle, Catedral i Eixample). L'àrea impresa forma un rectangle que té unes dimensions de 2.000 metres per 4.000 metres de costat, i un rang d'altituds entre els 0 i els 100 metres (fig. 5).

**Figura 5.** Àrea impresa en 3D en l'àmbit d'estudi de Tarragona

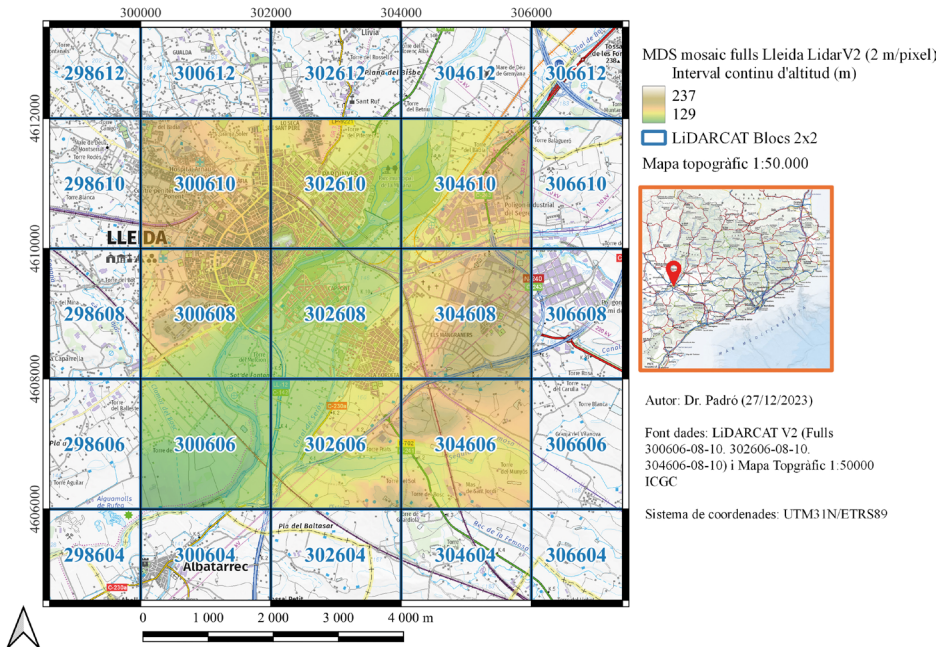


Font: Elaboració pròpia a partir de les dades de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (LiDARCAT V2 fulls 352552 i 354552 i Mapa Topogràfic 1:50000).



d) *Lleida*: Dades Lidar V2 dels fulls 300606, 300608, 300610, 302606, 302608, 302610, 304606, 304608 i 304610, corresponents a l'àrea la plana de Lleida, centrat a la pròpia ciutat de Lleida. L'àrea impresa forma un quadrat que té unes dimensions de 6.000 metres per 6.000 metres de costat, i un rang d'altituds entre els 129 i els 236 metres (fig. 6).

**Figura 6.** Àrea impresa en 3D en l'àmbit d'estudi de Lleida

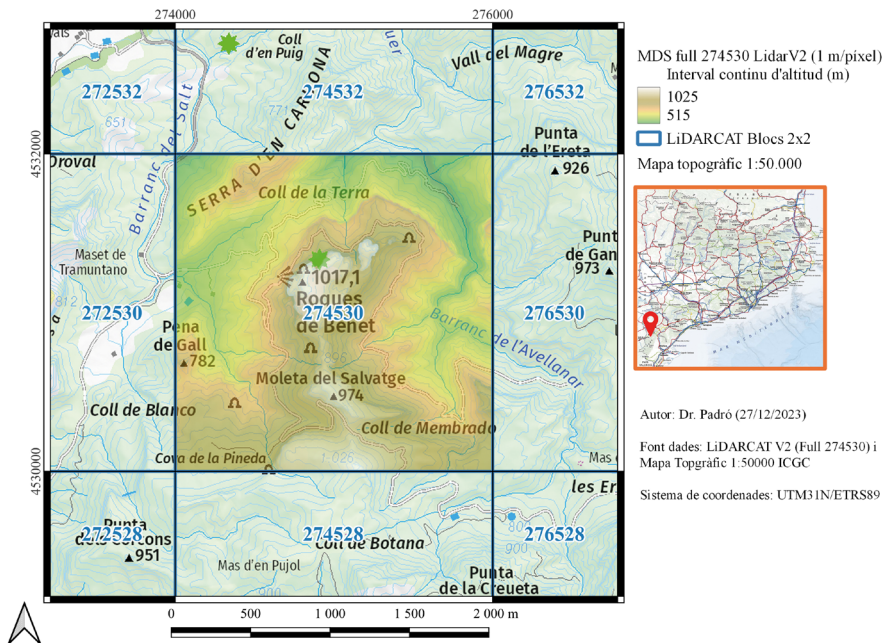


Font: Elaboració pròpia a partir de les dades de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (LiDARCAT V2 fulls 300606, 300608, 300610, 302606, 302608, 302610, 304606, 304608 i 304610 i Mapa Topogràfic 1:50000).

e) *Roques de Benet*: Dades Lidar V2 del full 274530, corresponent a l'àrea de les Roques de Benet (Terra Alta). Aquestes dades han estat descarregades directament de l'ICGC en format TXT i convertides a format TIFF. L'àrea impresa forma un quadrat de 2.000 metres cada costat, i un rang d'altituds entre els 515 i els 1.025 metres (fig. 7).

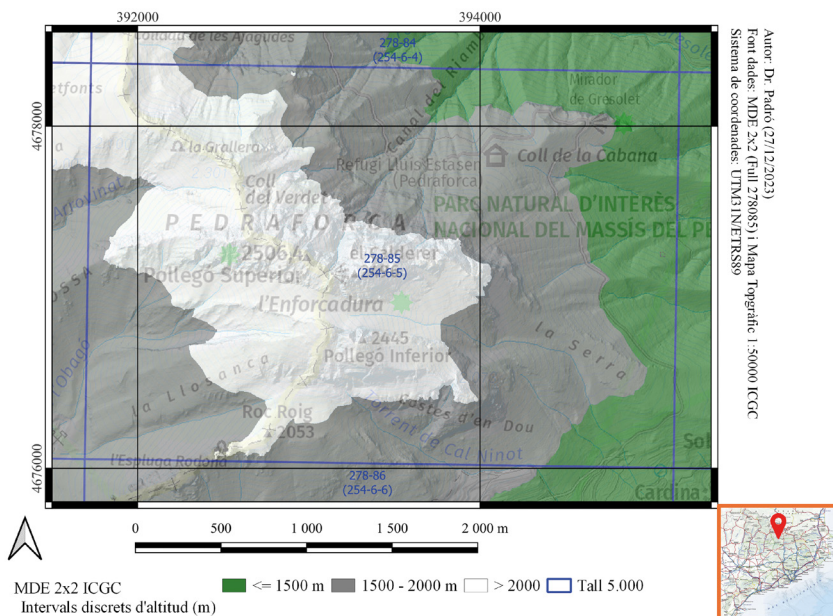
f) *Pedraforca*: Model Digital d'Elevacions 2x2, full 278085, corresponent a l'àrea del massís del Pedraforca. Aquestes dades han estat descarregades directament de l'ICGC en format TXT i convertides a format TIFF. L'àrea impresa forma un rectangle que té unes dimensions de 3.438 metres per 2.313 metres de costat, i un rang d'altituds entre els 1.061 i els 2.501 metres (fig. 8).

**Figura 7.** Àrea impresa en 3D en l'àmbit d'estudi de les roques de Benet



Font: Elaboració pròpia a partir de les dades de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (LiDARCAT V2 full 274530 i Mapa Topogràfic 1:50000).

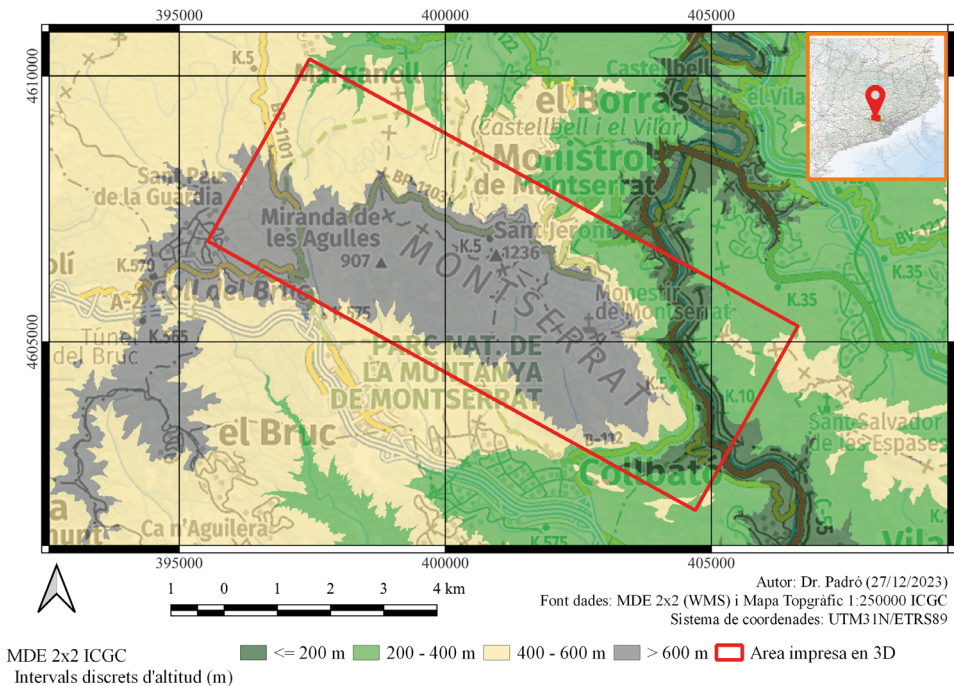
**Figura 8.** Àrea impresa en 3D en l'àmbit d'estudi del massís del Pedraforca



Font: Elaboració pròpia a partir de les dades de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (MDE 2x2 full 278085 i Mapa Topogràfic 1:50000).

g) *Montserrat*: Model Digital d'Elevacions 2x2 corresponent a l'àrea del massís de Montserrat. Aquestes dades han estat descarregades directament del servei WMS l'ICGC en format TIFF (fig. 9). L'àrea impresa forma un rectangle que té unes dimensions de 10.500 metres per 4.325 metres de costat, i un rang d'altituds entre els 75 i els 1.235 metres.

**Figura 9.** Àrea impresa en 3D en l'àmbit d'estudi de Montserrat



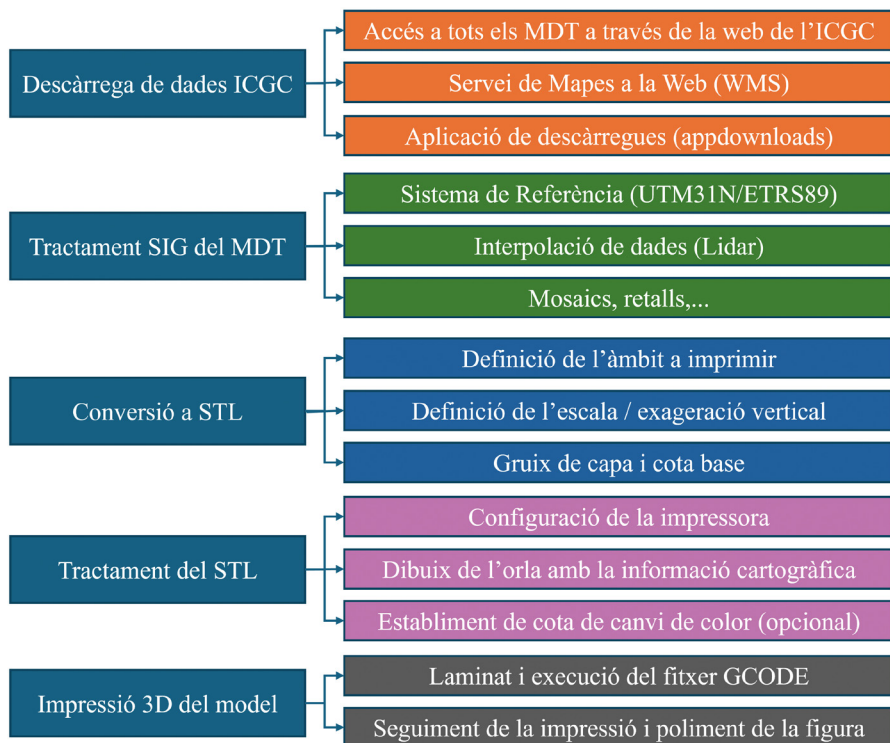
Font: Elaboració pròpia a partir de les dades de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (MDE 2x2 i Mapa Topogràfic 1:250000).

## 3.2. Metodologia

El flux metodològic consisteix en 5 nivells ben diferenciats (fig. 10): 1) Descàrrega de dades oficials de l'ICGC; 2) Tractament SIG del MDT; 3) Conversió del MDT des d'un format ràster típic en SIG (per exemple, TIFF), a un format de disseny d'objectes tridimensionals (i.e. STL); 4) Edició del fitxer STL per preparar-lo per la correcta impressió a nivell tècnic i cartogràfic; 5) execució del fitxer GCODE a la impressora 3D.



**Figura 10.** Flux metodològic per imprimir un MDT descarregat de l'ICGC



Font: Elaboració pròpia

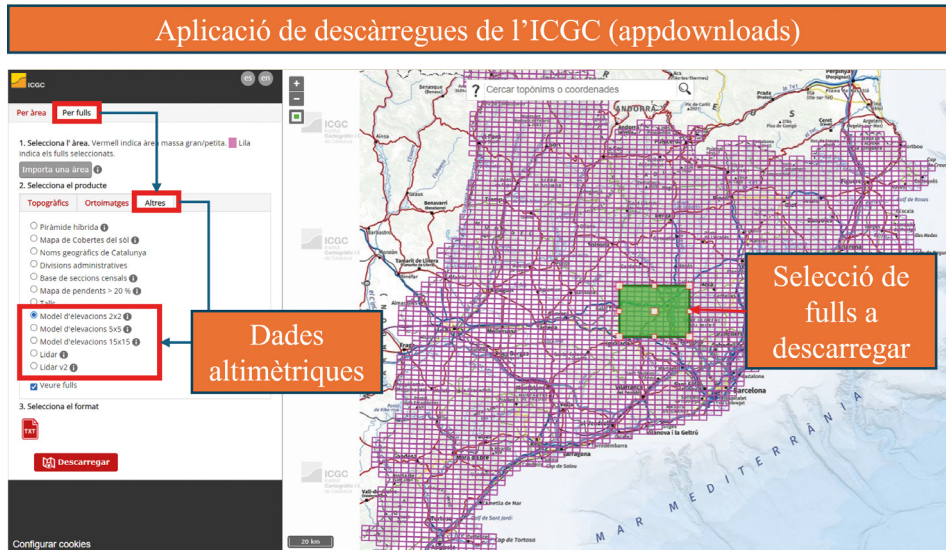
### 3.2.1. Descàrrega de dades

La descàrrega de dades és el pas més senzill, simplement cal connectar-se per internet a alguna de les adreces de descàrrega que ofereix l'ICGC.

- Web de l'ICGC:* La URL és <https://www.icgc.cat/ca/Descarregues/Elevacions> i aquí la persona usuària hi troba tota la informació de l'Institut referent al catàleg de productes del terreny, com dades Lidar, models digitals d'elevacions i els seus models derivats (com ara els mapes de pendents). Clicant a cada una de les seccions de la web es pot accedir a la informació detallada del procés d'elaboració de cada producte, i també a la direcció de descàrrega de dades.
- Aplicació de descàrregues:* La URL és <http://www.icgc.cat/appdownloads/> i aquí la persona usuària hi troba l'accés a la descàrrega de tots els productes que ofereix l'ICGC (mapes topogràfics, ortofotos, mapes de cobertes del sòl... no només de models del terreny). Per accedir a la descàrrega de models digitals del terreny i dades lidar, cal anar a la pestanya "Per Fulls" i a la subpestanya "Altres", i allà hi ha l'accés a els MDT 15x15, 5x5, 2x2 i les dades Lidar V1 i V2 (fig. 11).

**Figura 11.** Web de descàrrega de geoinformació de l'ICGC.

Les dades altimètriques es troben a la pestanya “Per fulls” i a la subpestanya “altres”



Font: Elaboració pròpia a partir de la web <<http://www.icc.cat/appdownloads/>> de l'ICGC.

c) *Serveis Web Map Service (WMS)*: La URL és <[https://geoserveis.icgc.cat/icgc\\_md12m/wms/service?](https://geoserveis.icgc.cat/icgc_md12m/wms/service?)> i a través d'ella la persona usuària es pot connectar, a través d'un programari SIG (per exemple, MiraMon, QGIS, ArcGIS) als mapes disponibles. Cada un dels programaris SIG ofereix les seves pròpies estratègies de connexió i descàrrega, però especialment aconsellables són les Col·leccions Preferides de MiraMon (Pons, 2004b) i el complement Open ICGC de QGIS (ICGC, 2022).

### 3.2.2. Tractament SIG

El tractament SIG de les dades és lleugerament diferenciat per dades ja en format ràster, o bé per dades en format núvol de punts Lidar.

Les dades ràster de l'ICGC solen descarregar-se en format TXT, amb una capçalera que conté el número de columnes (NCOLS), el número de files (NROWS), la coordenada central en X de la cel·la inferior esquerra (XLLCENTER), la coordenada central en Y de la cel·la inferior esquerra (YLLCENTER), la mida de cada cel·la del ràster (CELLSIZE), el valor de les cel·les sense dades (NODATA\_VALUE), i tot seguit, tot el rengle de valors que conté cada cel·la. Amb aquesta informació, el programari SIG és capaç de construir el ràster per l'àmbit i la mida de cel·la desitjats, però calen dos passos per acabar-lo de tenir georeferenciat i amb el format digital que posteriorment permetrà passar-lo a STL: 1) definir el sistema de referència UTM31N/ETRS89 (EPSG:25831); 2) exportar-lo en format TIFF (aquest nou fitxer és amb el que es seguirà treballant).

Les dades Lidar de l'ICGC solen descarregar-se en format LAZ per cada full de distribució. El primer que convé és convertir el LAZ a LAS, pas que es pot fer amb programaris com MiraMon o LasTools (Isenburg, 2022). En aquest estudi s'han utilitzat les dades lidar per generar MDS de zones urbanes, buscant capturar informació altimètrica relativa al sòl i a les edificacions; per tant, s'han seleccionat els punts amb categoria sòl i edificacions (2 i 6 segons l'estàndard internacional definit per l'American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) (ASPRS, 2019) utilitzat per l'ICGC). Per tal de convertir el núvol de punts (distribuïts irregularment en el territori) en un ràster continu i regular de dades, s'ha interpolat el valor d'altitud de cada punt, registrat com a coordenada Z. Per aquest procés d'interpolació s'ha emprat el programari MiraMon donades les opcions de parametrització que permet (Pons, 2004); la configuració utilitzada ha estat una interpolació mitjançant el mètode d'invers a la distància (exponent 2, un màxim de 10 punts i una distància màxima de 50 metres), obtenint així un MDS que posteriorment s'ha convertit a format TIFF. En tots els casos d'ús de dades lidar d'aquest treball l'àmbit d'estudi implica més d'un full Lidar, així que s'han *mosaicat* les dades.

### **3.2.3. Conversió del MDE o MDS des d'un format ràster típic en SIG (TFF), a un format de disseny 3D (STL)**

En aquesta conversió l'usuari surt de l'àmbit estricte de la informació geogràfica (caracteritzada per la georeferenciació de les dades) i entra a l'àmbit del disseny 3D (on la informació deixa d'estar georeferenciada).

En aquesta conversió és clau que es mantingui la forma i l'escala del model digital del terreny, ja sigui un MDE o un MDS, tot i que es perdi la seva georeferenciació. Per fer-ho, s'ha utilitzat un complement de QGIS que anomenat DEMto3D (Ureña Camara *et al.*, 2018) i que ha estat fonamental en aquest treball. Aquest complement permet definir l'envolupant (coordenades X màxima, X mínima, Y màxima, Y mínima) de l'àmbit a imprimir, l'escala a la que es vol imprimir aquest àmbit, l'exageració vertical, el gruix de la base, la cota mínima i el gruix de capa del model resultant. La majoria de paràmetres simplement requereixen de factors multiplicatius (escalars) o additius per convertir els píxels organitzats en un ràster TIFF georeferenciat (en el sistema de coordenades UTM31N/ETRS89), a un conjunt de punts amb coordenada XYZ (dins un sistema de referència local) que posteriorment es triangulen en un fitxer vectorial STL que conté el volum i la superfície del relleu a imprimir.

### **3.2.4. Edició del fitxer STL**

El fitxer STL per sí sol conté només el MDS o el MDE, cap més informació (ni textual ni gràfica). Per tant, cal editar el fitxer STL per la inclusió de textos amb caixetins informatius, toponímia, o la opcional definició d'interval de colors si es desitja un model hipsomètric.

a) *Caixetins informatius*: Per preparar una correcta impressió a nivell tècnic i cartogràfic, s'hi ha d'afegir informació elemental com l'escala gràfica, l'escala numèrica, l'escala altimètrica dels colors (en el cas de mapes hipsomètrics), la exageració vertical (si és el cas), la indicació del nord, la font de les dades i l'autoria del mapa, així com, opcionalment, els mètodes emprats, coordenades envolupants i sistema de referència en el que estan. La informació es disposa a partir de les dades SIG, però de moment no està continguda en el fitxer STL com a tal. És per això que cal editar el fitxer STL amb un programa adient (en aquest treball s'ha utilitzat el laminador de la impressora, PrusaSlic3r) per escriure aquesta informació i localitzar-la en el lloc adient del model a imprimir, per tal que l'usuari la pugui consultar i que no obstaculitzi la interpretació del relleu. En els casos mostrats en aquest treball s'han utilitzat dues estratègies per la localització dels caixetins amb la informació:

- 1) imprimir una orla al voltant del model, que conté els caixetins d'escala (numèrica, gràfica, altimètrica), exageració vertical, indicació de nord, autoria, font de dades, i altres com cota màxima i cota mínima (veure model de Montserrat o del Pedraforca).
- 2) imprimir els caixetins de manera independent, i enganxar-los posteriorment al revers del model, o bé en una zona sense informació rellevant a l'anvers del model (e.g. a una zona de mar, veure model de l'Eixample de Barcelona o el de les illes Medes).

Per tal de aprofitar la capacitat *textural* que ofereixen les impressions 3D, s'ha testejat l'ús de tipus de lletra Braille. La instal·lació s'ha fet descarregant el paquet Braille per Windows des de la web de la ONCE (2024), que el laminador PrusaSlic3r interpreta correctament. Per a la escriptura dels caixetins en Braille s'han seguit les indicacions del document tècnic "Parámetros dimensionales del Braille" (ONCE, 2014) on s'indiquen les dimensions dels caràcters i els espais entre ells (veure model del Pedraforca).

b) *Toponímia*: Els topònims són una de les principals dificultats de la impressió 3D en relleus. Si bé tècnicament es poden afegir textos sobre la superfície, necessiten una mínima mida per tal que quedin correctament impresos i aquest fet sovint és incompatible amb la correcta representació del relleu. És per això que pràcticament no s'inclou toponímia en zones terrestres i la que s'ha inclòs ha estat en zones marines (veure model de les illes Medes).

c) *Model hipsomètric*: En la fase de laminat del fitxer STL per convertir-lo a GCODE, es pot programar la impressora perquè faci pausa a capa (làmina) concreta mitjançant el codi M601. Quan la impressió és en pausa es pot canviar la bobina de filament a una d'un altre color, i així fer models amb un color diferent en determinats intervals de cota d'altitud. Cal haver calculat prèviament, en funció de l'escala (i de l'exageració vertical, si n'hi ha), la relació entre cada capa de material i l'altitud real a la que correspon,

per tal de determinar a quina capa hi ha el límit d'interval. Per exemple, si una capa de material té un guix de 0,15 mm al model, i el model és a escala 1:50000, cada capa correspon a 7,5 metres de la realitat; en cas de que l'exageració sigui  $\times 2$ , cada capa correspon a 3,75 metres. Aquests càlculs cal tenir-los en compte tant per definir amb exactitud la capa de canvi de color, com per definir la llegenda o escala de color que marca la cota de canvi de color (veure model del Pedraforca o el de Montserrat).

d) *Modificació de la dimensió i escala del model:* En aquest fase d'edició, també es podria modificar l'escala del model, tant en planimetria com en altimetria donant-li exageració. Si això es fa des del programa editor de STL, cal reflectir-ho a les metadades del model i, evidentment, a la informació que es proporciona a l'usuari de la cartografia.

### **3.2.5. Execució del fitxer GCODE a la impressora 3D, i poliment del model.**

El fitxer STL edita es desa en format GCODE en una targeta SD, que s'introdueix a la impressora. El GCODE conté les ordres que ha d'executar el maquinari de la impressora per anar extrudint la quantitat justa de material a cada coordenada del seu espai de treball, la plataforma d'impressió. Seguint les instruccions del maquinari, convé no deixar sola la màquina i estar pendent per si hi ha algun error de procés (mala extrusió, mala adherència del material, exhauriment del filament...). En el cas dels models hipsomètrics, l'operador ha d'estar alerta de canviar la bobina de filament quan hi ha un canvi de color. Un cop imprès el model, és habitual que hi apareguin imperfeccions que s'han de polir, especialment eliminant filets encordats (*stringing* en anglès) que romanen entre els caràcters dels textos o elements punxeguts separats per poc espai (e.g. les agulles de Montserrat, o entre edificis a la trama urbana).

## **4. Resultats**

En aquesta secció es mostren els resultats qualitius i quantitius obtinguts en 7 models impresos en 3D a diferents escales i en diversos àmbits geogràfics del territori català: 1) Model de les illes Medes a escala 1:5000. 2) Model de part de la ciutat de Barcelona a escala 1:25000. 3) Model de part de la ciutat de Lleida a escala 1:50000. 4) Model de la ciutat de Tarragona a escala 1:25000. 5) Model de les roques de Benet a escala 1:20000. 6) Model del massís del Pedraforca a escala 1:33000. 7) Model de la muntanya de Montserrat a escala 1:50000.

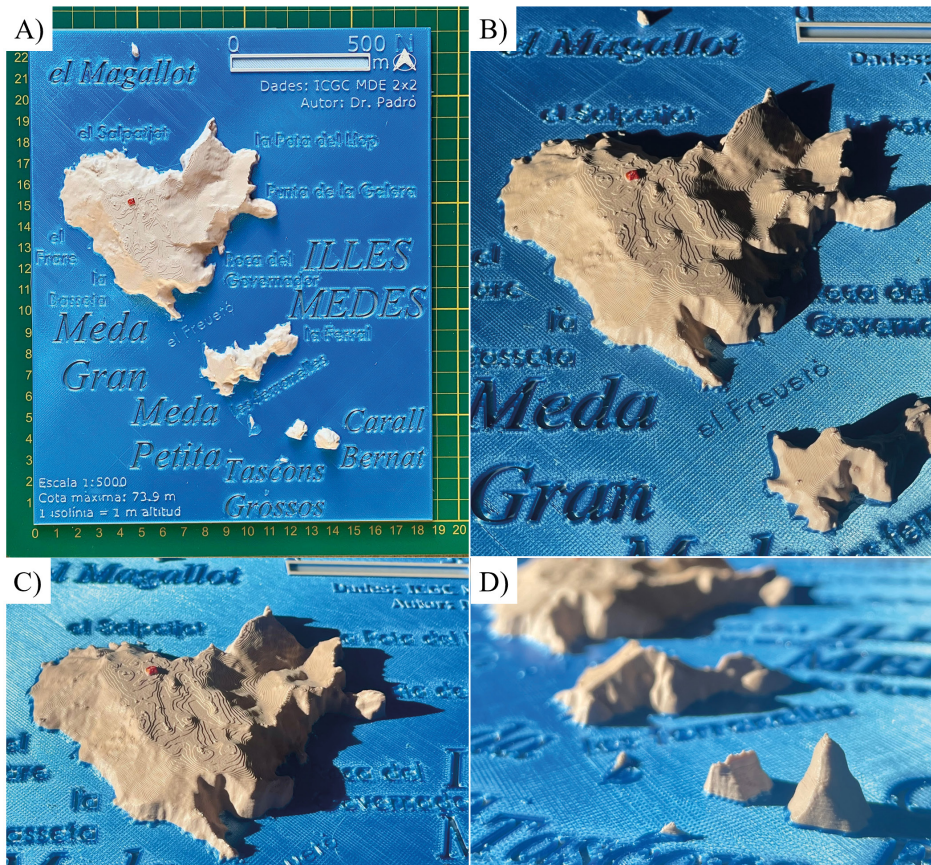
### **4.1 Model de les illes Medes**

El model de les illes Medes a escala 1:5000 té com a principal característica la seva gran escala i el detall aconseguit. Com a elements singulars d'aquest



model, s'han introduït textos amb toponímia més rellevant de les illes (Meda Gran, Meda Petita, Tascons Grossos, Carall Bernat, i el Magallot), i els seus accidents costaners més remarcables (Punta de la Galera, Roca del Governador, la Pota del Llop, el Salpatjot, el Frare Fuster, la Basseta, el Rreuetó, les Ferranelles i la Ferral) (fig. 12).

**Figura 12.** Materialització del MDS de les Illes Medes en impressió 3D



A) Vista nadiral del model sobre una base per mesurar (unitats cm). B) Detall oblic de la Meda Gran i el Magallot. C) Detall de la Meda Gran (en vermell, el far de les illes Medes). D) Detall del Carall Bernat i els Tascons Grossos. Font: Elaboració pròpia. Noti's que hi ha elements cartogràfics essencials com l'escala gràfica, l'escala numèrica, la indicació de nord, la font de les dades, l'autoria, la cota màxima i l'equivalència de cada isolínia de PLA en altitud de la realitat, a més de diversos topònims.

Fotografies: Miriam Corrius Mujal.

Aquest model s'ha realitzat amb 5 colors diferents: blau pel mar, marró clar per la terra emergida de les illes, vermell per l'edificació del far de les illes Medes, i per sota les capes del mar s'ha utilitzat el color blanc i el color gris. El blanc i el gris s'han utilitzat per visualitzar millor la toponímia, que s'ha retallat a la capa superior del mar per tal de visualitzar-se amb el color de les capes inferiors.

Les dimensions planimètriques del model (190 × 230 mil·límetres) abasten gairebé la totalitat de la plataforma d'impressió (210 × 250 mil·límetres). No s'ha aplicat exageració vertical i la dimensió del model en altura és de gairebé 1,5 centímetres. El material utilitzat és de poc més de 100 grams (sumat tots els colors), i el temps d'impressió ha estat de 10 hores. El temps dedicat al disseny del model (descàrrega de dades, tractament SIG, edició del fitxer STL per incloure la toponímia i la informació cartogràfica) ha estat de 12 hores (taula 1).

**Taula 1.** Característiques del model imprès en 3D de les illes Medes a escala 1:5000

X (mm)	Y (mm)	Mida Z (mm)	Exag. Vert.	Capes Z	Temps impressió	Colors de fil	Material (g)	Material (€)	Temps disseny
190	230	14,5	×1	97	10h03m	5	101	3,54	12h

Exag. Vert = Factor multiplicador d'exageració vertical. El cost material es calcula a 35€/kg de filament PLA.

## 4.2. Models en àrees urbanes

### 4.2.1. Model de Barcelona

El model de part de la ciutat de Barcelona a escala 1:25000 té com a principal característica la presència d'una trama urbana densa. Com a elements singulars d'aquest model, s'han utilitzat dades lidar (V2) interpolades i s'ha aplicat una exageració de x2,5 (fig. 13).

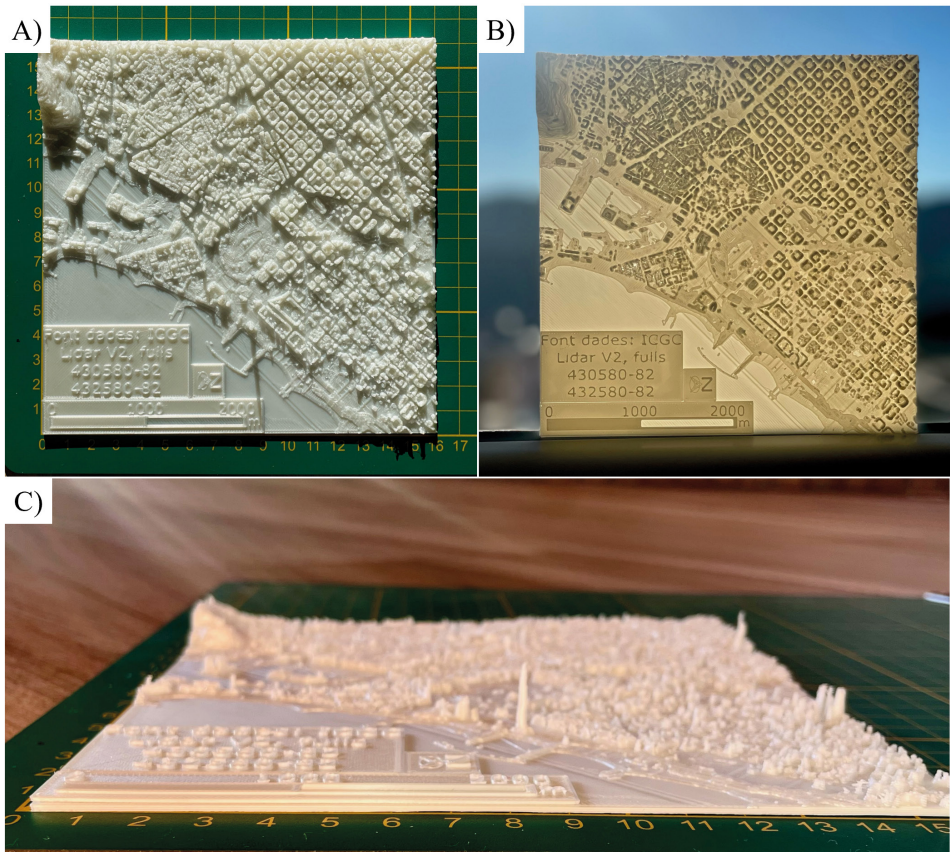
Només s'ha fet servir un color, el blanc sedós, que li dona al model una translucidesa que pot ser utilitzada per visualitzar altres dades a sota. Les dimensions planimètriques del model (160 × 160 mil·límetres) abasten gran part de la plataforma d'impressió (210 × 250 mil·límetres). La dimensió del model en altura és de gairebé 2 centímetres. El material utilitzat és de poc més de 60 grams (sumat tots els colors), i el temps d'impressió ha estat de 3 hores i mitja. El temps dedicat al disseny del model (descàrrega de dades, tractament SIG, edició del fitxer STL per incloure la informació cartogràfica) ha estat de 5 hores (taula 2).

**Taula 2.** Característiques del model imprès en 3D de Barcelona a escala 1:25000

X (mm)	Y (mm)	Mida Z (mm)	Exag. Vert.	Capes Z	Temps impressió	Colors de fil	Material (g)	Material (€)	Temps disseny
160	160	19	×2,5	110	3h26m	1	62	2,17	5h

Exag. Vert = Factor multiplicador d'exageració vertical. El cost material es calcula a 35€/kg de filament PLA.



**Figura 13.** Materialització del MDS de part de la ciutat de Barcelona en impressió 3D

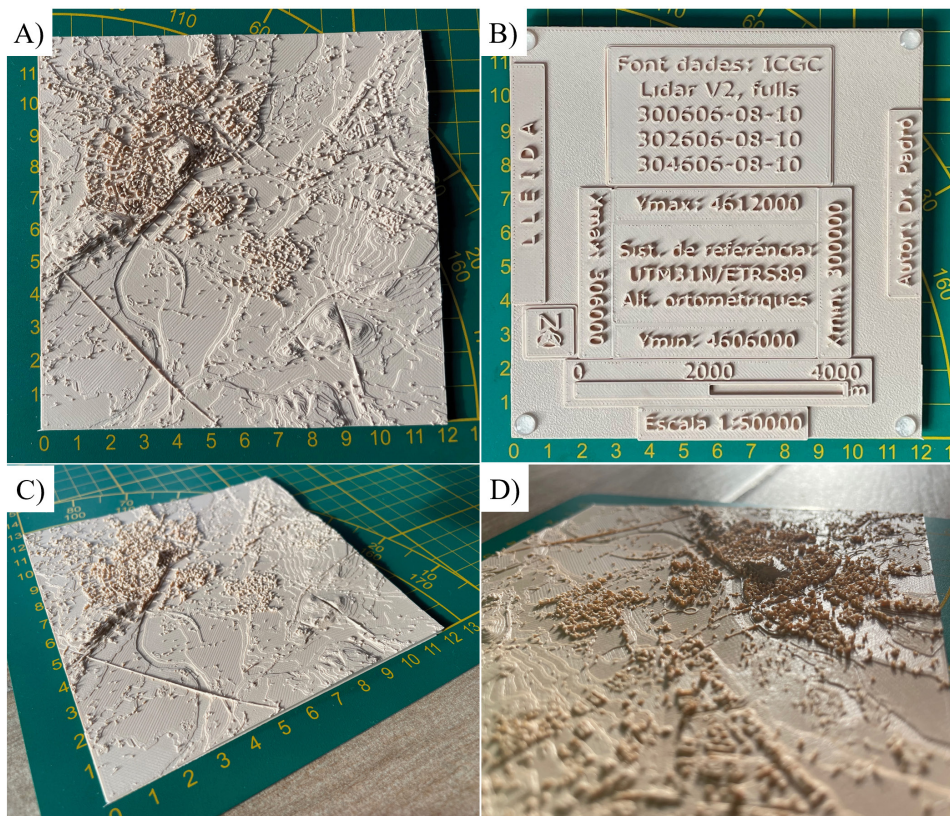
A) Vista nadiral del model sobre una base per mesurar (unitats cm). B) Vista nadiral sobre una finestra, on es pot apreciar la translucidesa del material (PLA blanc seda). C) Detall oblic del Front Marítim. Font: Elaboració pròpia. Noti's que hi ha elements cartogràfics essencials com l'escala gràfica, l'escala numèrica, la indicació de nord i la font de les dades. Fotografies: Miriam Corrius Mujal.

#### 4.2.2. Model de Lleida

El model de part de la plana de Lleida a escala 1:50000 té com a principal característica l'ús de 9 fulls lidar, és a dir, l'àmbit és més gran que el de Barcelona i el de Tarragona. Com a elements singulars d'aquest model, s'hi pot observar la trama urbana de la ciutat però també el pas del riu Segre i barris perifèrics. S'ha utilitzat un sol color (marró clar), aplicat una exageració de  $\times 2$ , i les dades informatives cartogràfiques s'han adjuntat al revers de la peça 3D (fig. 14).

Les dimensions planimètriques del model ( $120 \times 120$  mil·límetres) i la dimensió del model en altura és de gairebé mig centímetre. El material utilitzat és de 27 grams, i el temps d'impressió ha estat de 3 hores i 47 minuts (més 1 hora 45 minuts pels caixetins informatius). El temps dedicat al disseny del model (descàrrega de dades, tractament SIG i el disseny dels caixetins de la informació cartogràfica) ha estat de 5 hores (taula 3).

**Figura 14.** Materialització del MDS de part de la plana de Lleida en impressió 3D



A) Vista nadiral del model sobre una base per mesurar (unitats cm). B) Vista nadiral del revers, amb les dades informatives. C) Vista obliqua del model sobre una base per mesurar (unitats cm). D) Detall oblic del model amb vista del riu Segre. Font: Elaboració pròpia. Fotografies: Miriam Corrius Mujal.

**Taula 3.** Característiques del model imprès en 3D de Lleida a escala 1:50000.

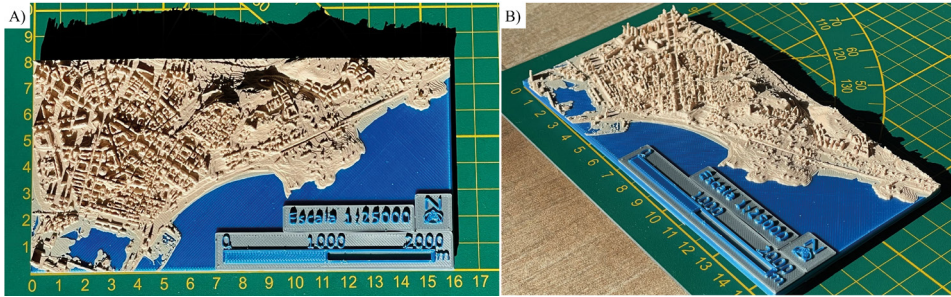
X (mm)	Y (mm)	Mida Z (mm)	Exag. Vert.	Capes Z	Temps impressió	Colors de fil	Material (g)	Material (€)	Temps disseny
120	120	4,9	×2	32	3h47m	1	27	0,95	5h

Exag. Vert = Factor multiplicador d'exageració vertical. El cost material es calcula a 35€/kg de filament PLA.

#### 4.2.3. Model de Tarragona

El model de part central de la ciutat de Tarragona a escala 1:25000 té com a principal característica l'ús de 2 colors, un pel mar i l'altre per la superfície emergida. Com a elements singulars d'aquest model, s'hi pot observar clarament l'Eixample de la ciutat, la trama urbana de la ciutat vella (Barri Jueu) i a la costa part del Port, la platja del Miracle, la Punta del Miracle i la platja de l'Arrabassada (fig. 15).



**Figura 15.** Materialització del MDS de part de la ciutat de Tarragona en impressió 3D

A) Vista nadiral del model sobre una base per mesurar (unitats cm). B) Vista obliqua del model amb detall la ciutat vella (es poden apreciar les corbes de nivell a la zona de l'amfiteatre).

Font: Elaboració pròpia. Fotografies: Míriam Corrius Mujal.

Les dimensions planimètriques del model (160 × 80 mil·límetres) i la dimensió del model en altura és d'1,1 centímetres. El material utilitzat és de 40 grams (sumat tots els colors), i el temps d'impressió ha estat de 3 hores i 47 minuts (més 1 hora 45 minuts pels caixetins informatius). El temps dedicat al disseny del model (descàrrega de dades, tractament SIG i el disseny dels caixetins) ha estat de 5 hores (taula 4).

**Taula 4.** Característiques del model imprès en 3D de Tarragona a escala 1:25000

X (mm)	Y (mm)	Mida Z (mm)	Exag. Vert.	Capcs Z	Temps impressió	Colors de fil	Material (g)	Material (€)	Temps disseny
160	80	11,14	×2	68	5h36m	2	40	1,40	5h

Exag. Vert = Factor multiplicador d'exageració vertical. El cost material es calcula a 35€/kg de filament PLA.

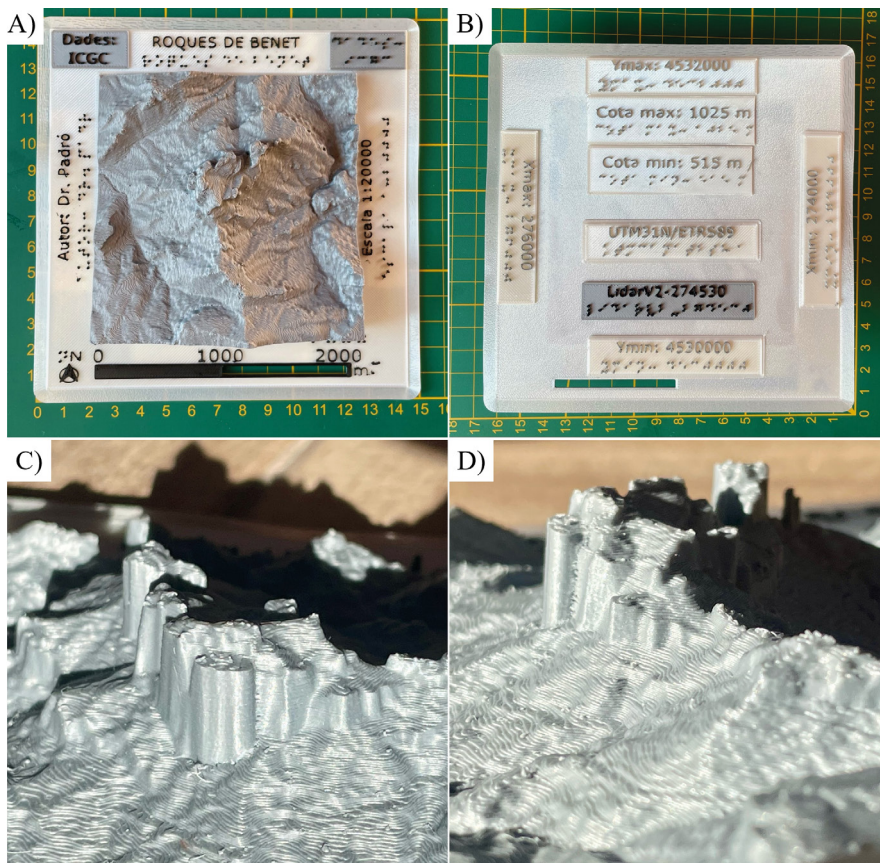
### 4.3. Models en àrees muntanyoses

#### 4.3.1. Model de les roques de Benet

El model de les roques de Benet escala 1:20000 té com a principal característica l'ús de la impressió 3D per reproduir un relleu abrupte a partir d'un sol full de dades Lidar. L'objectiu principal és el relleu, pel que només s'ha utilitzat un color. Com a objectiu secundari s'ha introduït el Braille en els caixetins de orla informativa, amb els elements cartogràfics essencials a l'anvers (títol escala gràfica, escala numèrica, indicació de nord, autor), i altra informació rellevant al revers (coordenades envolupants, sistema de referència, cota màxima i cota mínima, i fonts de dades). En aquest cas, les dades corresponen a dades lidar (V2) interpolades.

Les dimensions planimètriques del model (100 × 100 mil·límetres sense orla, 140 × 140 mil·límetres amb orla). La dimensió del model en altura és de 2,6 cm ja que no se li ha donat exageració. El material utilitzat és de 50 grams (sumat tots els colors i l'orla), i el temps d'impressió ha estat de poc més de 6

**Figura 16.** Materialització del MDS de les roques de Benet en impressió 3D



A) Vista nadiral del model sobre una base per mesurar (unitats cm). B) Vista nadiral del revers, amb els caixetins informatius. C i D) Detall oblic de la zona amb més pendent (es poden observar les isolínies). Font: Elaboració pròpia. Noti's que s'ha utilitzat la tipografia Braille addicionalment, referint-se a elements cartogràfics essencials com l'escala gràfica, l'escala numèrica, la indicació de nord, coordenades envolupants, les cotes mínima i màxima i la font de les dades. Fotografies: Miriam Corrius Mujal.

hores. El temps dedicat al disseny del model (descàrrega de dades, tractament SIG incloent la interpolació, edició del fitxer STL per incloure la informació cartogràfica) ha estat de 8 hores (taula 5).

**Taula 5.** Característiques del model imprès en 3D de les roques de Benet a E. 1:20000

X (mm)	Y (mm)	Mida Z (mm)	Exag. Vert.	Capas Z	Temps impressió	Colors de fil	Material (g)	Material (€)	Temps disseny
100 (140 orla)	100 (140 orla)	26,22	×1	174	6h08m	1 (3 orla)	50	1,75	8h

Exag. Vert = Factor multiplicador d'exageració vertical. El cost material es calcula a 35€/kg de filament PLA.

### 4.3.2. Model del Pedraforca

El model del massís del Pedraforca escala 1:33000 té com a principal característica l'ús de diversos colors per tal de simbolitzar l'altitud en intervals hipsomètrics de 500 metres. S'han fet dues versions hipsomètriques, una a escala de grisos (fig. 17) i una altra amb color verd a la franja altitudinal entre els 1.000 i els 1.500 metres (fig. 18). En cada versió s'ha fet una orla informativa amb els elements cartogràfics essencials (escala gràfica, escala numèrica, indicació de nord), i també s'hi ha afegit l'escala amb els intervals hipsomètrics com a novetat. En aquest cas, les dades corresponen directament al model 2 x 2 de l'ICGC obtingut de dades lidar (VI). Com a elements singulars d'aquest model, s'han introduït textos informatius en Braille a una versió a escala 1:50000 sense diferenciació hipsomètrica (fig. 19).

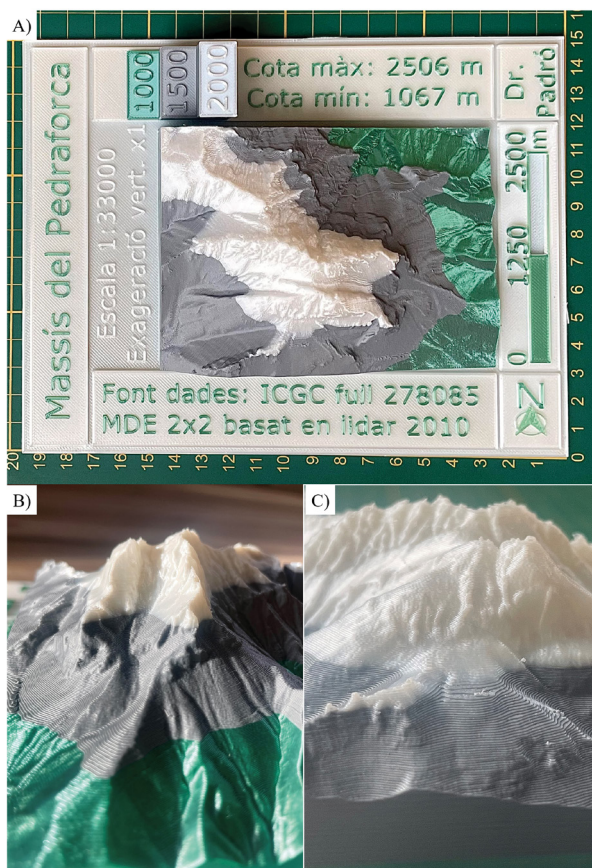
**Figura 17.** Materialització del MDE del Pedraforca en impressió 3D (versió amb simbolització hipsomètrica negre-gris-blanc a intervals de 500 metres)



A) Vista nadiral del model sobre una base per mesurar (unitats cm). B) Detall oblic de l'enforcadura des de l'est (es poden observar les isolínies). C) Detall oblic del Pollegó Superior des del nord-est (es poden observar les isolínies). Font: Elaboració pròpia. Noti's que hi ha elements cartogràfics essencials com l'escala gràfica, l'escala numèrica, la indicació de nord, l'escala vertical amb els intervals d'altitud simbolitzats, les cotes mínima i màxima i la font de les dades. Fotografies: Miriam Corrius Mujal.



**Figura 18.** Materialització del MDE del Pedraforca en impressió 3D (versió amb simbolització hipsomètrica verd-gris-blanc a intervals de 500 metres)



A) Vista nadiral del model sobre una base per mesurar (unitats cm). B) Detall oblic de l'enforcadura des de l'est (es poden observar les isolínies). C) Detall oblic del Pollegó Superior i el Coll del Verdet des del nord (es poden observar les isolínies). Font: Elaboració pròpia. Noti's que hi ha elements cartogràfics essencials com l'escala gràfica, l'escala numèrica, la indicació de nord, l'escala vertical amb els intervals d'altitud simbolitzats, les cotes mínima i màxima i la font de les dades. Fotografies: Miriam Corrius Mujal.

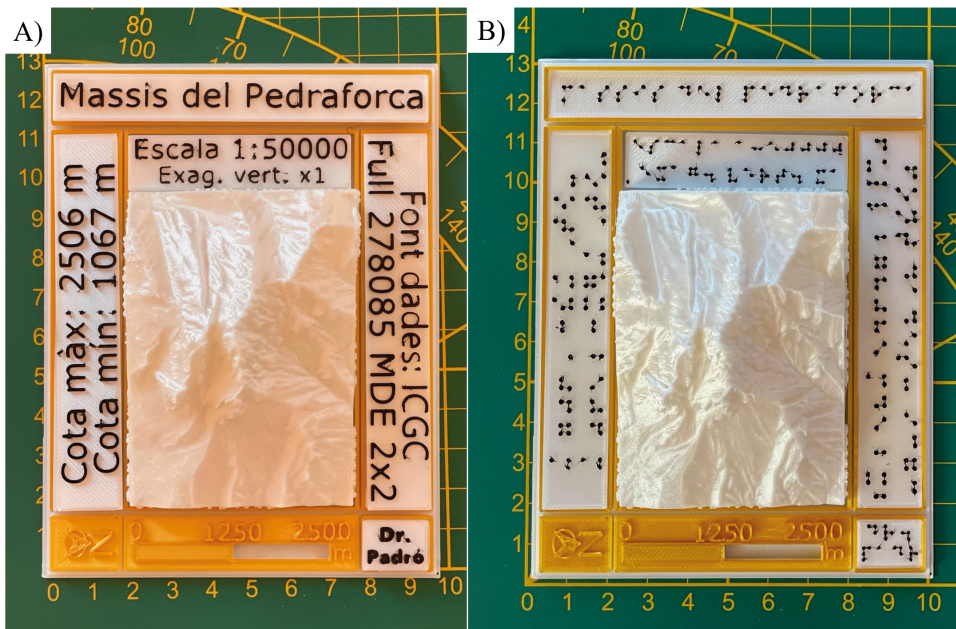
Les dimensions planimètriques del model (116 × 83 mil·límetres sense orla) donen marge per fer impressions més grans del model. La dimensió del model en altura és de gairebé 5 centímetres. El material utilitzat és de 135 grams (sumat tots els colors i l'orla), i el temps d'impressió ha estat de 12 hores i 42 minuts. El temps dedicat al disseny del model (descàrrega de dades, tractament SIG, edició del fitxer STL per incloure la informació cartogràfica) ha estat de 12 hores (taula 6).

**Taula 6.** Característiques del model imprès en 3D del Pedraforca a escala 1:33000.

X (mm)	Y (mm)	Mida Z (mm)	Exag. Vert.	Capcs Z	Temps impressió	Colors de fil (4 orla)	Material (g)	Material (€)	Temps disseny
116 (150 orla)	83 (130 orla)	48	x1	320	12h42m	3	135	4,73	12h

Exag. Vert = Factor multiplicador d'exageració vertical. El cost material es calcula a 35€/kg de filament PLA.

**Figura 19.** Materialització del MDE del Pedraforca en impressió 3D (versió blanca a escala 1:50000)



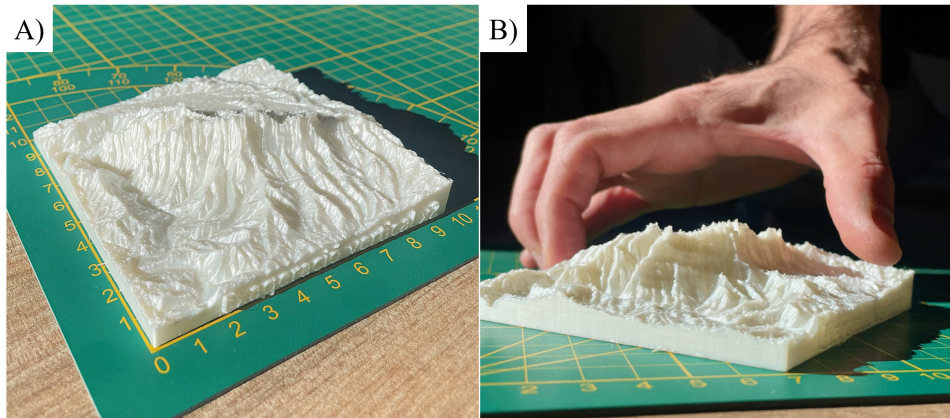
A) Vista nadiral del model sobre una base per mesurar (unitats cm) amb tipus de lletra Verdana. B) Vista nadiral del model sobre una base per mesurar (unitats cm) amb tipus de lletra Braille. Font: Elaboració pròpia. Noti's que hi ha elements cartogràfics essencials com l'escala gràfica, les cotes mínima i màxima i la font de les dades. Fotografies: Miriam Corrius Mujal.

#### 4.3.3. Model de Montserrat

El model del massís de Montserrat escala 1:50000 té com a principal característica la dificultat topogràfica del relleu imprès. S'han fet proves prèvies amb diferents extensions i exageracions altimètriques (fig. 20), que han contribuït a detectar problemes amb la impressió d'un relleu tan complex.



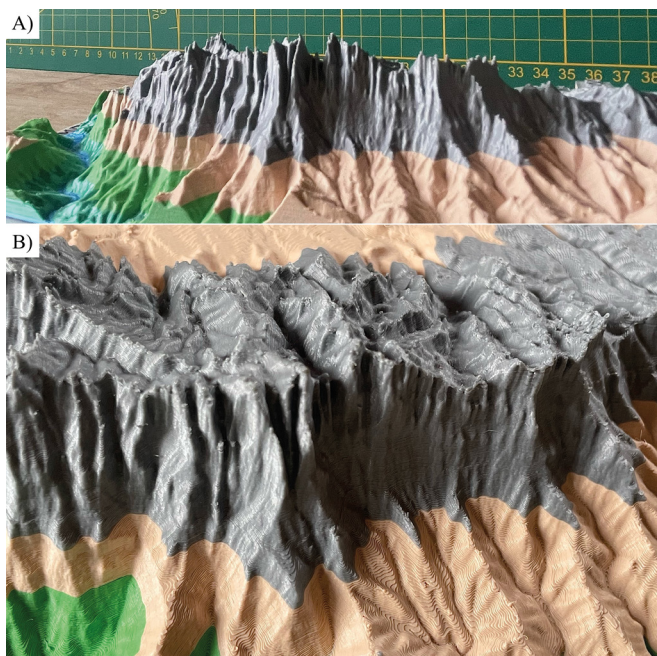
**Figura 20.** Test de materialització del MDE de Montserrat en impressió 3D



Font: Elaboració pròpia. Fotografies: Miriam Corrius Mujal

En el model final (fig. 21) s'han emprat diversos colors per tal de simbolitzar l'altitud en intervals hipsomètrics, en aquest cas en intervals de 200 metres fins als 600 metres (dels 600 metres en amunt s'ha utilitzat el color gris).

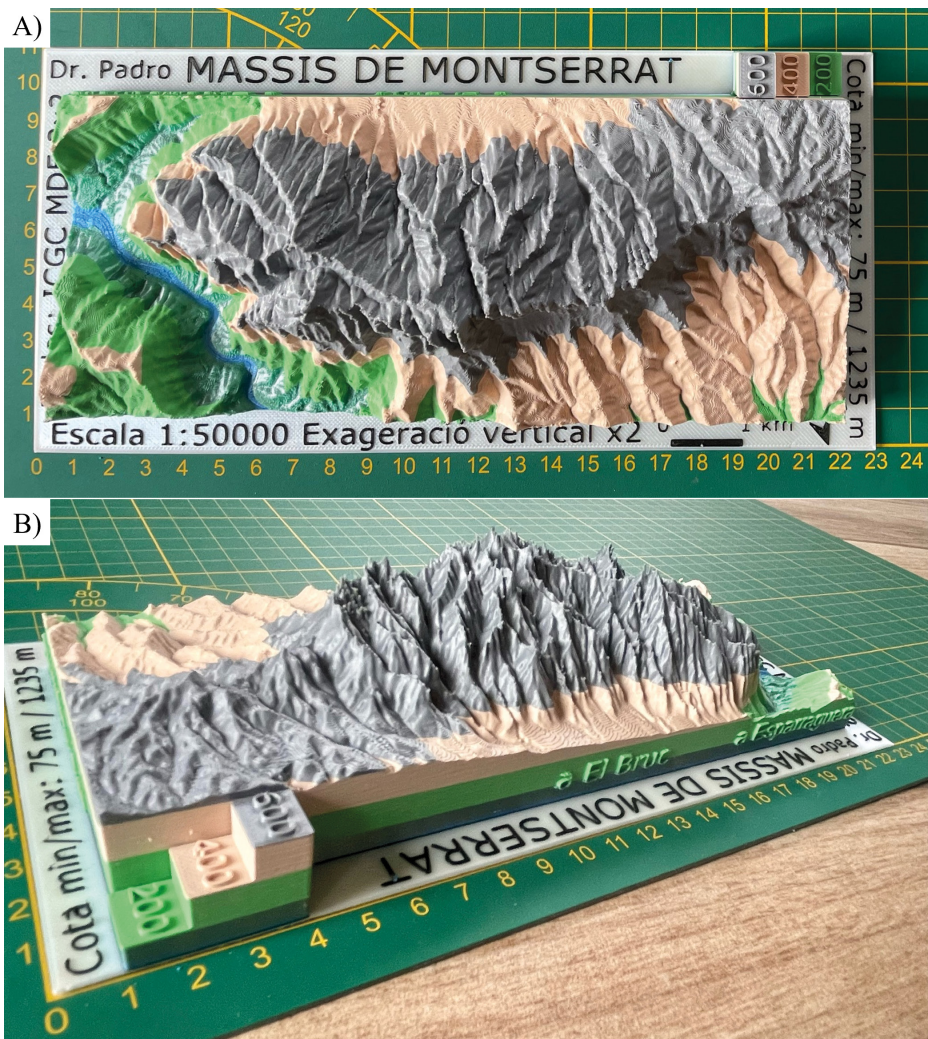
**Figura 21.** Materialització del MDE de Montserrat en impressió 3D (versió amb simbolització hipsomètrica blau - verd fosc - verd clar - marró clar - gris a intervals variables 200 metres)



A) Vista obliqua des del nord. B) Detall nadiral de Sant Jeroni i la part central de la muntanya des del nord (es poden observar les isòlinies). Font: Elaboració pròpia. Fotografies: Miriam Corrius Mujal

Per tal de fer visible la informació cartogràfica complementària, s'ha fet una orla informativa amb els elements cartogràfics essencials (escala gràfica, escala numèrica, indicació de nord, cota mínima, cota màxima, equivalència de cada isolínia de material), i també s'hi ha afegit l'escala amb els intervals hipsomètrics (fig. 22).

**Figura 22.** Materialització del MDE de Montserrat en impressió 3D (versió amb simbolització hipsomètrica blau - verd fosc - verd clar - marró clar - gris a intervals variables 200 m). A) Vista nadiral del model sobre una base per mesurar (unitats cm). B) Vista del model des del sud-oest (es pot observar l'escala hipsomètrica).

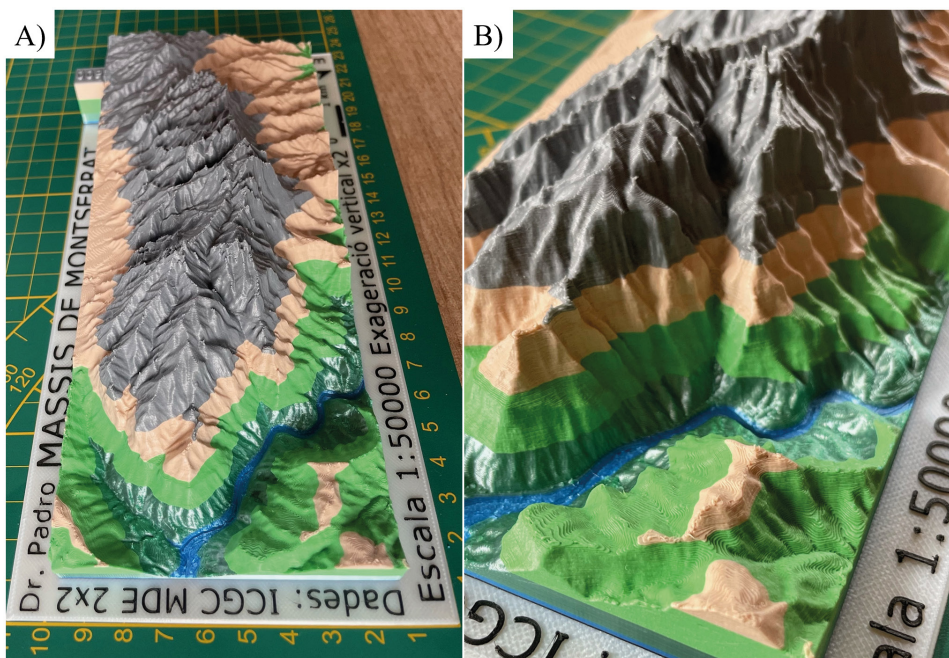


Font: Elaboració pròpia. Noti's que hi ha elements cartogràfics essencials com l'escala gràfica, l'escala numèrica, la indicació de nord, l'escala vertical amb els intervals d'altitud simbolitzats, les cotes mínima i màxima i la font de les dades. Fotografies: Miriam Corrius Mujal.



El cromatisme dels filaments es pot utilitzar per indicar, per exemple, per on passa un riu (el cas del riu Llobregat en aquest model), el bosc de ribera associat, zones de poca vegetació o zones rocoses, però amb l'inconvenient de que sempre és el mateix color en una mateixa cota i per tant es tracta d'interval·ls discrets vinculats a una altitud concreta. (fig. 23).

**Figura 23.** Materialització del MDE de Montserrat en impressió 3D (versió amb simbolització hipsomètrica blau - verd fosc - verd clar - marró clar - gris a interval·ls variables 200 metres)



A) Vista obliqua des de l'est. B) Detall oblic des de l'est (es poden observar les isolínies al Pla de les Bruixes). Font: Elaboració pròpia. Noti's que hi ha elements cartogràfics essencials com l'escala gràfica, l'escala numèrica, la indicació de nord, l'escala vertical amb els interval·ls d'altitud simbolitzats, les cotes mínima i màxima i la font de les dades. Fotografies: Miriam Corrius Mujal.

En aquest cas, les dades corresponen directament al model 2 x 2 de l'ICGC obtingut de dades lidar (V1). Les dimensions planimètriques del model (210 mm x 86,5 mm sense orla) abasten gran part de la plataforma d'impressió. La dimensió del model en altura és de gairebé 5 cm. El material utilitzat és de 140 g (sumat tots els colors i l'orla), i el temps d'impressió ha estat de 16 hores i 20 minuts. El temps dedicat al disseny del model (descàrrega de dades, tractament SIG, edició del fitxer STL per incloure la informació cartogràfica) ha estat de 15 hores (Taula 7).

**Taula 7.** Característiques del model imprès en 3D de Montserrat a escala 1:50000

X (mm)	Y (mm)	Mida Z (mm)	Exag. Vert.	Capes Z	Temps impressió	Colors de fil	Material (g)	Material (€)	Temps disseny
210 (230 orla)	86.5 (110 orla)	46,8	×2	310	16h20m	5 (7 orla)	140	5	15h

Exag. Vert = Factor multiplicador d'exageració vertical. El cost material es calcula a 35€/kg de filament PLA.

## 5. Discussió

El flux de treball per descarregar un MDT de l'ICGC, fer-ne el tractament SIG pertinent, convertir-lo al format STL i imprimir-lo en 3D s'ha demostrat reproducible i executable en tots els casos, en consonància amb fonts de dades d'altres parts del món (Agrawal *et al.*, 2014). Els resultats de la impressió del relleu de la superfície terrestre utilitzant dades de l'ICGC són satisfactoris quant a qualitat, tenint en compte que es tracta de materials de baix cost i no professionals. Representen fidelment el territori, sempre tenint en compte que el model prové d'una digitalització, i que és precisament la resolució espacial de les dades digitals, combinada amb l'escala d'impressió, cosa que ha fet més detallat o menys el model físic resultant.

Les potencialitats de la impressió 3D de relleus tenint en compte la tecnologia de baix cost utilitzada (impressora de 1.000 euros i material PLA a un cost de 35 euros la bobina d'un quilogram), es poden sintetitzar en els següents aspectes:

1. Les dades Lidar són una bona font de dades per ser impreses en 3D i els resultats són qualitativament satisfactoris. Tant les interpolades per l'ICGC i distribuïdes com a producte MDT 2 × 2 metres, com les interpolades per l'usuari seleccionat els punts de classe sòl i edificacions, han mostrat reproduir el terreny fidelment.
2. En els models en àrees urbanes són acceptables a escala 1:50000 (com el de Lleida), es pot apreciar bé la configuració general metropolitana però la trama de carrers i la distinció dels edificis es veu amb dificultats. En canvi, en els models a escala 1:25000 (com el de Barcelona) o 1:20000 (com el de Tarragona) ofereixen una millor visualització de la trama urbana.
3. Els models en àrees muntanyoses són especialment satisfactoris. Les dades originals permeten percebre detalls del relleu que hom pot comprovar en la realitat, i la possibilitat de fer models hipsomètrics fa que la informació altimètrica es comuniqui millor.
4. En àrees costaneres la definició del perfil de la costa és correcta, tot i que alguns artefactes en les dades lidar poden provocar que vaixells, onades o

zones portuàries presentin ambigüitats al no ajustar-se perfectament a la cota 0. En aquest cas, aplicar una màscara a la zona d'aigua pot ajudar a polir el model en la fase de tractament SIG.

Les limitacions actuals tenint en compte la tecnologia utilitzada es poden sintetitzar en els següents aspectes:

1. Limitació a les dimensions del model. La plataforma d'impressió té unes dimensions limitades (en el cas d'aquest estudi, 250 × 210 × 210 mil·límetres) i això fa que la grandària dels models en un sol bloc sigui limitada. No obstant, es poden dividir els models en diferents peces, dissenyar-les amb encadellats per facilitar-ne la connexió, i enganxar-les amb cola.
2. Dificultat d'ús de paletes de colors contínues. La tecnologia 3D avança cap a l'ús de diversos colors de filament per una sol model, i a l'automatització del canvi de bobines. No obstant, actualment les impressores de baix cost requereixen el canvi manual i aquesta és una tasca tediosa. Però el principal inconvenient és que el canvi de color està associat a una cota (làmina) concreta d'impressió i per tant és complicat fer mapes de relleu amb impressores 3D que continguin tota la riquesa cromàtica que tenen els mapes de relleu fets a partir de tècniques de termoformat. Una alternativa seria fer la impressió 3D amb un filament blanc i posteriorment pintar la superfície amb tècniques aerogràfiques.
3. Limitacions en la toponímia. Si bé en aquest estudi s'ha demostrat que és possible incloure textos i toponímia en les impressions 3D, aquestes han estat incloses en la fase d'edició del fitxer STL. Per tant, no és una informació que s'hagi heretat de les dades SIG, i això és un inconvenient quan es pretén imprimir un gran volum de dades textual. D'altra banda, cal tenir en compte que la mida de lletra mínima perquè els textos siguin llegibles i reduir els artefactes d'impressió, és de 9 mm.

Pel que fa al cost de la generació dels models, es poden segregar en 3 segments:

1. Impressora. La impressora utilitzada, una Prusa MK3i, té un cost de prop de 1.000 euros (el cost és menor si se la munta el propi usuari). No obstant, no és necessari comprar-la per tenir un model, ja que hi ha laboratoris col·laboratius (per exemple, Open Labs UAB) o copisteries que imprimeixen els models si els portes el fitxer GCODE.
2. Material d'impressió. El material emprat ha estat PLA amb un cost mitjà per bobina de 35 €/kg. El model amb més quantitat de material és el de Montserrat, que amb 140 grams comporta una despesa d'uns 5 €, un cost relativament baix.
3. Hores dedicades: Si bé en aquest entorn no professional i d'afició a la cartografia el preu de l'hora dedicada és un tema personal, es pot aplicar el



concepte de cost d'oportunitat per quantificar la monetització del temps dedicat al disseny del model. El temps dedicat és funció de l'escala del model, l'elaboració de caixetins, interpolacions, nombre de fulls processats, estar pendent de la màquina mentre imprimeix, canvis de filament... també cal tenir en compte, que un cop fet un model aquest és imprimible  $n$  vegades i per tant el cost d'oportunitat del temps dedicat s'hauria de dividir entre tots els models reproduïts.

Properes innovacions permetran millorar la combinació de colors, i possiblement s'arribi a poder fer combinacions de RGB o CMYK per cada punt d'extrusió a baix preu, el que podria permetre la impressió d'una imatge aèria a la última capa del model en relleu. Actualment, aquest tipus d'impressora superen els 50.000 euros de cost (Mimaki, 2023).

En aquest nivell d'exigència, les aplicacions que poden tenir els models impresos són principalment la docència, la divulgació (Horowitz i Schultz, 2014), la conservació del patrimoni, percepció de l'espai per invidents o el simple *hobby* cartogràfic per a geògrafs, excursionistes i altres interessats pel medi ambient.

## 6. Conclusions

La materialització cartogràfica de relleus de la superfície terrestre amb impressores 3D de baix cost i codi obert, a partir dels Models Digitals del Terreny distribuïts per l'ICGC en formats SIG, ha resultat factible i satisfactòria. S'han fet models a diverses escales (1:5000, 1:10000, 1:25000, 1:33000 i 1:50000), en distintes morfologies de terreny (costaner, muntanyós, urbà), i en diferent àmbits del territori català (illes Medes, Pedraforca, Montserrat, Barcelona, Lleida, Tarragona), obtenint en tots els casos models d'una qualitat suficient per la interpretació del relleu des d'una perspectiva diferent a la dels clàssics mapes en dues dimensions. Com a elements complementaris al propi model del relleu, s'han incorporat caixetins informatius essencials per la correcta interpretació cartogràfica (escala gràfica, escala numèrica, escala altimètrica (en el cas de models hipsomètrics), indicació de nord, fonts de dades, autoria) i també caixetins opcionals (coordenades de l'envolupant, cota màxima i cota mínima, equivalència de cada capa de material respecte l'altitud real, metodologia emprada), fet que dota a aquests models un caràcter plenament cartogràfic. També s'ha demostrat factible l'ús de la tipografia de lletra Braille en els textos, aprofitant així la textura com una de les principals potencialitats de la cartografia 3D.

D'altra banda, s'han fet evidents algunes limitacions. La principal és la dificultat d'aplicar cromatismes de degradats continus, ja que el procediment de canvi de color és tediós i està vinculat a un canvi de cota; en aquest sentit, la simbologia de colors per intervals discrets d'altitud es mostra com una alternativa (mapes hipsomètrics). Una segona dificultat és la incorporació de toponímia,

que si bé s'ha demostrat possible, també és difícil al estar desvinculada del SIG i haver-se d'introduir manualment en la fase d'edició.

Amb la tecnologia utilitzada en aquest estudi, de programari obert i baix cost, la modelització cartogràfica amb impressores 3D no arriba ni de bon tros al nivell de qualitat temàtica, cromàtica, ni d'informació toponímica que ofereixen les clàssiques maquetes o mapes de relleu termoformats. No obstant, mitjançant les impressores 3D la modelització física a escala del relleu en sí —entès com una variable contínua geogràfica— és de bona qualitat, assoleix molt de detall, és molt versàtil, fàcilment reproduïble i pot arribar a tenir una precisió apreciable (sempre depenent de la resolució espacial del model digital original i del broquet de la impressora 3D). En conclusió, s'ha presentat una metodologia de creació cartogràfica a l'abast de docents, divulgadors, o geògrafs en general, que desitgin fer els seus propis models físics d'una part del relleu català, escollint l'àmbit i l'escala al seu parer, i amb una qualitat cartogràfica apreciable.

## Bibliografia

- AGRAWAL, Sanat; DEON DE BEER; YASHWANT MODI (2014). "Conversion of a GIS Surface Data Directly to a 3D STL Part for Terrain Modeling." *Rapid Prototyping Journal*, vol. 20, p. 320–27. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2012-0093>
- ASPRS (2019). "LAS specification Version 1.4–R15". *The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing*, p. 50. [https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2019/07/LAS\\_1\\_4\\_r15.pdf](https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2019/07/LAS_1_4_r15.pdf) (consultat 04/01/2024).
- BARVIR, Radek; Alena VONDRAKOVA; Jan BRUS (2019). "TouchIt3D: Technology (notonly) for Tactile Maps". *Abstr. Int. Cartogr. Assoc.*, vol. 1, p. 24. DOI: <https://doi.org/10.5194/ica-abs-1-24-2019>
- CADMAPPER (2023). "Instant CAD files for any location on earth". <https://cadmapper.com/> (consultat 04/01/2024)
- FARR, Tom; Mike KOBRICK (2000). "Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data". *Eos Trans. AGU*, vol. 81, núm. 48, p. 583-583. DOI: <https://doi.org/10.1029/EO081i048p00583>
- GENERALITAT DE CATALUNYA. DEPARTAMENT DE CULTURA (2020). "Programa de digitalització en 3D del patrimoni cultural de Catalunya". <https://govern.cat/govern/docs/2020/12/01/16/23/b3404fc3-62e5-4469-934f-a303a3a0f48d.pdf> (consultat 04/01/2024).
- HOROWITZ, Seth; Peter SCHULTZ (2014). "Printing Space: Using 3D Printing of Digital Terrain Models in Geosciences Education and Research." *Journal of Geoscience Education*, vol. 62, p. 138–45. DOI: <https://doi.org/10.5408/13-031.1>
- INSTITUT CARTOGRÀFIC I GEOLÒGIC DE CATALUNYA (2011). "Mapes en relleu". <https://www.icgc.cat/CiutadadaDestacats/Comprar-mapes-impresos/Mapes-en-relleu> (consultat 04/01/2024).
- (2013). "Model d'Elevacions del Terreny de Catalunya 5x5metres (MET-5) v1.0". <https://datacloud.ide.cat/especificacions/model-digital-terreny-5x5-v1r0-esp-02ca-20130601.pdf> (consultat 04/01/2024).
- (2016). "Model d'Elevacions del Terreny de Catalunya 2x2metres (MET-2) v1.0". <https://datacloud.ide.cat/especificacions/model-digital-terreny-2x2-v1r0-esp-01ca-20160519.pdf> (consultat 04/01/2024).

- (2018). “Model d'Elevacions del Terreny de Catalunya 5x5metres Geodades oficials RCC”. [Disponible en línia: <https://ide.cat/geonetwork/srv/cat/catalog.search#/metadata/model-digital-terreny-5x5-v1r0>] (consultat 04/01/2024)
- (2022). “Connector QGIS Open ICGC”. [Disponible en línia: <https://www.icgc.cat/ca/Descarregues/Connector-QGIS-Open-ICGC>] (Consulta; 04/01/2024)
- (2023). “Dades lidar”. [Disponible en línia: <https://www.icgc.cat/Administracio-i-empresa/Descarregues/Elevacions/Dades-lidar>] (consultat 04/01/2024)
- ISENBURG, Martin (2022). “LAS tools – efficient LiDAR processing software” (versió 220613, no llicenciada). Disponible en línia: <http://rapidlasso.com/LASools> (consultat 04/01/2024)
- KOCH, Wolf Günther (2011). “State of the Art of Tactile Maps for Visually Impaired People”, dins: Manfred BUCHROITHNER. *True-3D in Cartography. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Berlin: Springer.
- KRAMER, Thomas; Frederick PROCTOR; Elena MESSINA (2000). “The NIST RS274NGC Interpreter - Version 3”. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, EUA. [https://www.nist.gov/publications/nist-rs274ngc-interpreter-version-3?pub\\_id=823374](https://www.nist.gov/publications/nist-rs274ngc-interpreter-version-3?pub_id=823374) (consultat 04/01/2024).
- LIU, Liu; Marshall FISHMAN; Kevin HICKS; Cheng-Kung LIU (2005). “Biodegradable Composites from Sugar Beet Pulp and Poly (lactic acid)”. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 53, 23, p. 9017-9022. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf058083w>
- LUDÍKOVÁ, Libuše; Dita FINKOVÁ (2012). “Improvement in Education of People with Visual Impairment”. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 55, p. 971-979 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.587>
- MIMAKI (2023). “Productos 3D: 2DUJ-2207”. <https://www.mimaki.es/products/3d-es/3duj-2207/> (consultat 04/01/2024).
- NUNES, Joan (2013). “Models Digitals d'Elevacions”. <https://www.icgc.cat/Ciutadal/Informa-t/Diccionaris/Model-digital-d-elevacions> (consultat 04/01/2024).
- ONCE (2014). *Documento Técnico B1: Parámetros dimensionales del Braille. Documentos técnicos de la Comisión Braille Española*. <https://www.once.es/servicios-sociales/braille/comision-braille-espanola/documentos-tecnicos/documentos-tecnicos-relacionados-con-el-braille/documentos/b1-parametros-dimensionales-del-braille-2/download> (consultat 04/01/2024).
- ONCE (2017). *MAPTAC3D, cartografía al alcance de todos*. <https://cti.once.es/noticias/maptac3d-cartografia-al-alcance-de-todos> (consultat 04/01/2024).
- ONCE (2024). *Comisión Braille Española (CBE). Fuente estándar de seis puntos (ONCE\_CBE\_6.ttf) formato font/truetype*. <https://www.once.es/servicios-sociales/braille/comision-braille-espanola/> (consultat 04/01/2024)
- ORTIZ-GIL, Amelia; Jordi BURGUET-CASTELL (2021). “Mapelia: Your Swiss Knife to Tactile Planetary Globes”, European Planetary Science Congress 2021, online, 13–24 Setembre 2021, EPSC2021-873. DOI: <https://doi.org/10.5194/epsc2021-873>
- PADRÓ, Joan-Cristian; Francisco-Javier MUÑOZ; Jordi PLANAS; Xavier PONS (2019). “Comparison of four UAV georeferencing methods for environmental monitoring purposes focusing on the combined use with air borne and satellite remote sensing platforms”. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 75, p. 130-140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.10.018>
- PONS, X. (2004a). “MiraMon. Sistema d'Informació Geogràfica i software de Teledetecció” Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, CREAM: Bellaterra.
- (2004b). “Col·leccions preferides de MiraMon”. <https://www.miramom.cat/CAT/Colleccions-Preferides.htm> (consultat 04/01/2024).
- Pons, Xavier; Anna ARCALÍS (2012). *Diccionari Terminològic de Teledetecció*. Barcelona: Institut Cartogràfic de Catalunya / Enciclopèdia Catalana.
- PRUSA, Joseph (2023). Original Prusa i3 MK3S+ 3D Printer. <https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-i3-mk3s-3d-printer-3/> (consultat 04/01/2024).

- RABELLA VIVES, Josep M.; Josep M. PANAREDA CLOPÉS; Graziana RAMAZZINI I GOBBO (2011). *Diccionari terminològic de cartografia*. Barcelona: Institut Cartogràfic de Catalunya / Enciclopèdia Catalana.
- REPRAP (2023). “RepRap is humanity’s first general-purpose self-replicating manufacturing machine”. <https://reprap.org/wiki/RepRap> (consultat 04/01/2024).
- RUSSELL, Erik; Joan-Cristian PADRÓ; Pau MONTERO; Cristina DOMINGO-MARIMON; Vicenç CARABASSA (2023). “Relief Modeling in the Restoration of Extractive Activities Using Drone Imagery”. *Sensors*, vol. 23, p. 2097-2112. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23042097>
- SUSTAINABILITY OF DIGITAL FORMATS (2019). “STL (STereoLithography) File Format Family”. <https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fddl/fdd000504.shtml> (consultat 04/01/2024).
- TEIXEIRA, Joao; Cecília Ogliari SCHAEFER; Bárbara RANGEL; Lino Maia; Jorge Lino ALVES (2023). “A roadmap to find in 3D printing a new design plasticity for construction – Thesate of art”. *Frontiers of Architectural Research*, vol. 12, núm. 2, p. 337-360. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2022.10.001>.
- TERMCAT (2023). Entrada “Fabricació additiva”. <https://www.termcat.cat/ca/cercaterm/fitxal/MzI4NjA2Mw==#.WBrtgPbpyss.link> (consultat 04/01/2024).
- TERRAIN2STL (2023). *Create STL models of the Surface of Earth*. <https://jthatch.com/Terrain2STL/> (consultat 04/01/2024).
- UNGAR, Simon; Ángeles Espinosa BAYAL; Mark BLADES; Esperanza OCHAITA; ChistopherSPENCER (1997). “Use of TactileMapsbyBlindandVisuallyImpairedPeople”. *Cartographic Perspectives*, vol. 28, 4–12. DOI: <https://doi.org/10.14714/CP28.686>
- UREÑA Cámara, Manuel Antonio; Francisco Javier VENCESLÁ SIMÓN; Francisco Javier ARIZA-LÓPEZ(2018). “DEMto3D, the new tool that joins GIS and 3D Printing”. *Revista Internacional Mapping*, vol. 24, núm. 170, p. 24–28. <https://ojs.revistamapping.com/MAPPING/article/view/59> (consultat 04/01/2024)
- VENCESLÁ SIMÓN, Francisco Javier (2014). “Desarrollo de un modulo de impresión 3D de modelos digitales de elevaciones basado en sistema de bajo coste”, Universidad de Jaén. <https://prezi.com/tmw-xsb2lu9i/desarrollo-de-un-modulo-de-impresion-3d-de-modelos-digitales/> (consultat 04/01/2024).
- VENCESLÁ SIMÓN, Francisco Javier; Francisco Javier ARIZA-LÓPEZ(2015a). “Evolución de la producción de mapas en relieve, desde las técnicas manuales hasta la impresión 3D”, *Técnica Industrial*, vol. 314, p. 62-69. <https://www.tecnicaindustrial.es/wp-content/uploads/Numeros/104/5021/a5021.pdf>(consultat 04/01/2024).
- (2015b). “DEMto3D, Impresión 3D de modelos del terreno”. <https://demto3d.com/> (consultat 04/01/2024).