

ELS MODELS DIGITALS DEL TERRENY GESTALT: ASPECTES ALGORÍSMICS

Durant els dos darrers anys l'Institut Cartogràfic de Catalunya ha estat treballant en la generació automàtica de mapes de corbes de nivell, a partir de models digitals del terreny (MDT) a través de processos numèrics. La font de les dades que constitueixen els models digitals i l'escala del mapa, entre d'altres factors, condicionen fortament aquests processos.

En aquest cas, els models digitals s'obtenen amb tècniques de correlació automàtica d'imatges aèries a escala 1:22 000, del sistema Gestalt Photomapper IV-3 (GPM-IV). És la primera vegada que hom intenta extreure'n mapes a escala 1:5 000, amb la conseqüent aparició de problemes nous. Ha calgut, doncs, dissenyar nous algorismes capaços de resoldre aquests nous problemes.

En aquest article hom tracta de descriure aquests processos, així com d'introduir alguns conceptes i tècniques bàsiques per a la comprensió del tema. En una primera part, hom presenta el concepte de model digital del terreny, els diferents mètodes per a la seva obtenció i la qualitat de les dades que el constitueixen. A la segona part, es presenten els algorismes que en aquests moments són objecte d'estudi i d'experimentació a l'Institut Cartogràfic de Catalunya.

Alguns principis elementals de fotogrametria

Una de les tècniques més usades en la generació dels models digitals és la fotogrametria. Això és espe-

cialment vàlid a l'Institut Cartogràfic de Catalunya, on mitjançant l'ús de fotografies aèries s'elaboren els MDT. Per aquest motiu és convenient començar oferint una breu panoràmica dels principis fotogramètrics elementals que hi ha implicats en aquesta elaboració.

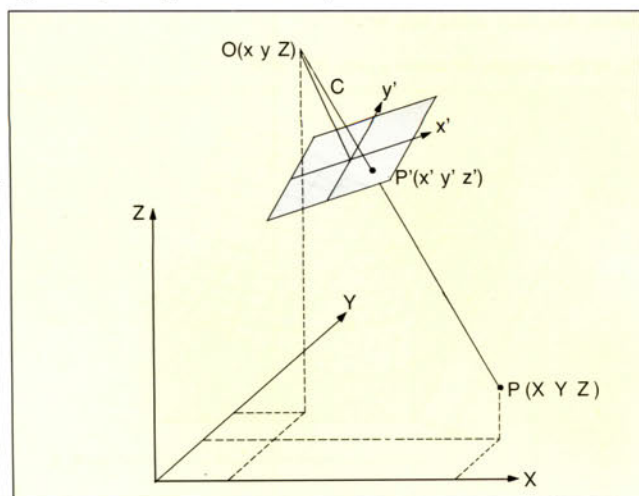
S'entén per fotogrametria la ciència i la tècnica que permeten d'obtenir informació mètrica d'objectes i del seu entorn mitjançant l'enregistrament, la mesura i la interpretació d'imatges fotogràfiques. A partir de l'any 1920, la fotogrametria aèria ha estat la principal tècnica emprada en la confecció de mapes topogràfics. Actualment, hom acostuma a calcular les coordenades dels punts del terreny que constitueixen els models digitals, a partir de fotografies aèries.

A la *figura 1* hom presenta un model geomètric simplificat. La fotografia aèria és considerada com el resultat d'una projecció cònica de l'objecte sobre el pla que conté la fotografia. El centre de la projecció (O) és a una distància C del pla de projecció. C és la distància focal o constant de la cambra. La determinació efectiva de les coordenades d'un punt del terreny, no pot ser efectuada utilitzant una sola fotografia, en calen, al menys, dues.

Amb dues fotografies, és possible calcular les coordenades de tots els punts del terreny presents simultàniament a l'una i a l'altra. El conjunt d'aquests punts del terreny comuns a ambdues fotografies s'anomena parell o model estereoscòpic. La *figura 2* mostra com es restitueix el terreny a partir d'un model estereoscòpic. P' i P'' són dos punts, situats un a cada fotograma, que representen el mateix punt P del terreny. Es fa palès que el càlcul de la intersecció de la recta que passa per O₁ i P' amb la recta que passa per O₂ i P'' permet conèixer les coordenades del punt P del terreny.

La materialització del model estereoscòpic anterior es realitza en aparells fotogramètrics restituïdors. Fins a l'adveniment dels ordinadors, els aparells restituïdors eren de construcció òptico-mecànica. Les relacions geomètriques de la *figura 2*, s'hi estableixen mitjançant un conjunt de mecanismes i lents que permeten visualitzar el model estereoscòpic a escala reduïda. Això permet, després d'haver calculat alguns paràmetres de transformacions, obtenir coordenades de punts

Fig. 1: Interpretació geomètrica de la fotografia aèria



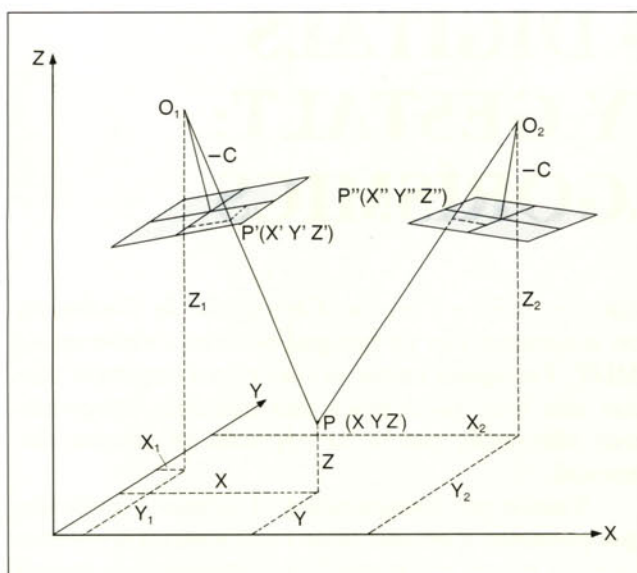


Fig. 2: Interpretació geomètrica del model estereoscòpic

o dibuixar corbes de nivell. Aquest tipus de restituïdor s'anomena analògic.

Els darrers anys han aparegut aparells en què les relacions geomètriques són establertes per un model matemàtic amb el suport d'un ordinador. El model matemàtic pot ser més complex que el que rep suport de dispositius mecànics. Així doncs, descriu millor el fenomen fotogramètric i s'obtenen més bons resultats. Es tracta dels restituïdors analítics.

Un dels passos claus del procés de restitució fotogramètrica és la identificació de parells de punts que representin el mateix punt del terreny en els seus respectius fotogrames. Fins fa poc temps, aquesta tasca ha descansat en la capacitat estereoscòpica de la visió humana. Per això, els darrers anys —en un intent d'automatitzar i millorar aquesta identificació— s'han desenvolupat les tècniques de correlació d'imatges. Correlar dues imatges és establir una correspondència entre punts d'una imatge i punts de l'altra, de manera que dos punts d'imatges distintes es corresponen quan representen el mateix punt del terreny.

La base del mètode de correlació és la digitalització de les imatges, és a dir, la substitució de l'emulsió fotogràfica per una matriu numèrica. Cada element de la matriu (*pixel*) és associat a una petita part del fotograma (per exemple un quadrat de $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$) i el seu valor representa la intensitat mitjana d'aquella part del fotograma a l'escala de grisos.

Els aparells que treballen segons aquests principis són les estacions fotogramètriques digitals (GRÜN, 1986). L'èmfasi d'aquest article recau damunt dels models digitals generats pel GPM-IV, que es pot considerar com un instrument pioner en el camp de la fotogrametria digital.



Foto 1: Gestalt Photomapper IV-3 (conjunt)

(ICC)



Foto 2: Restituïdor analític Wild AC-1

(ICC)

Fig. 3: Reconstrucció del terreny a partir d'un MDT

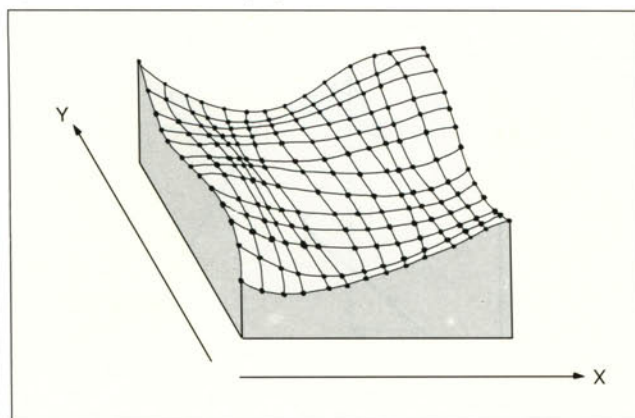




Foto 3-5: Fotografia digitalitzada amb diferents mides de píxel

(ICC)

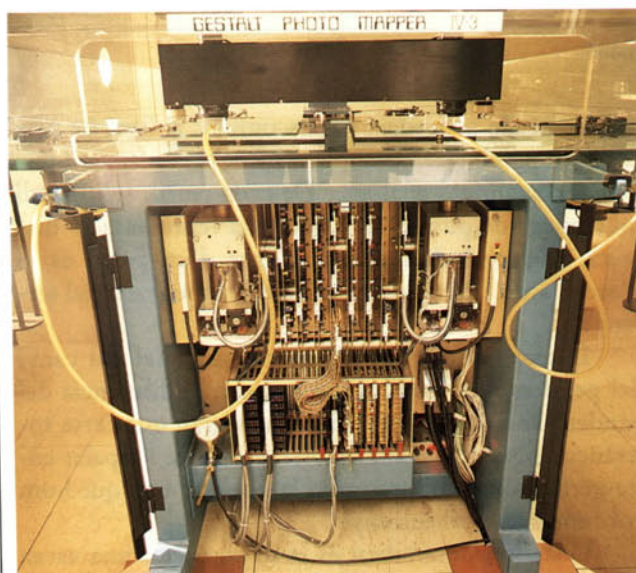


Foto 6: Restituïdor analògic

(ICC)

Foto 7: Gestalt Photomapper IV-3 (detall)

(ICC)



Els models digitals del terreny

El terme model digital del terreny té el seu origen en el treball dut a terme pel professor Charles L. Miller del *Massachusetts Institute of Technology*, durant els anys 1955-1960. El professor Miller i els seus col·laboradors investigaven per encàrrec del *Massachusetts Department of Public Works* i del *USA Bureau of Public Roads*. L'objectiu del seu estudi era dissenyar una autopista, amb l'ajut de càlculs digitals, amb punts del terreny compilats per tècniques fotogramètriques.

Un model digital del terreny pot definir-se com una representació discreta del relleu (figura 3), consistent en un conjunt de punts distribuïts sobre una zona del terreny, dels quals hom coneix les coordenades. En realitat, el concepte es pot estendre a representacions discretes de qualsevol característica que es pugui associar al terreny: el pendent, la declinació magnètica, etc. En aquest article, hom es referirà als models digitals del terreny només com a representacions discretes del relleu.

Generació de models digitals del terreny

La generació d'un model digital comprèn dues etapes. La primera consisteix en l'ús de qualsevol mètode o tècnica que permeti adquirir coordenades de punts del terreny. A la segona etapa hom transforma, si cal, l'estructura i els valors de les coordenades, segons quin sigui el model a obtenir.

Els procediments més usuals per a l'adquisició de les coordenades de punts són: a partir de cartografia ja existent; a partir de la restitució d'un model estereoscòpic; i, a partir de treballs de camp topogràfics. Altres mètodes, menys usats al nostre país, mesuren les altituds amb sensors situats en helicòpters, en avions dotats de sistemes de posicionament, o en satèl·lits.

Els mètodes de generació de models digitals a partir de mapes ja existents parteixen del càlcul de les coordenades dels punts del model, emprant la infor-

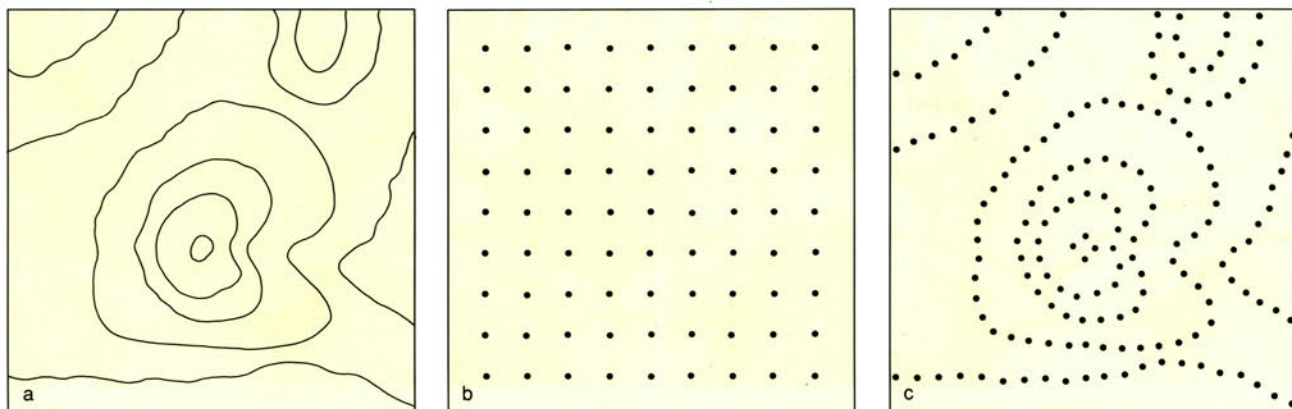


Fig. 4: Generació de MDT a partir de la informació altimètrica continguda a les corbes de nivell. a) Corbes de nivell originals; b) Model digital en xarxa regular interpolada; c) Model digital en xarxa irregular

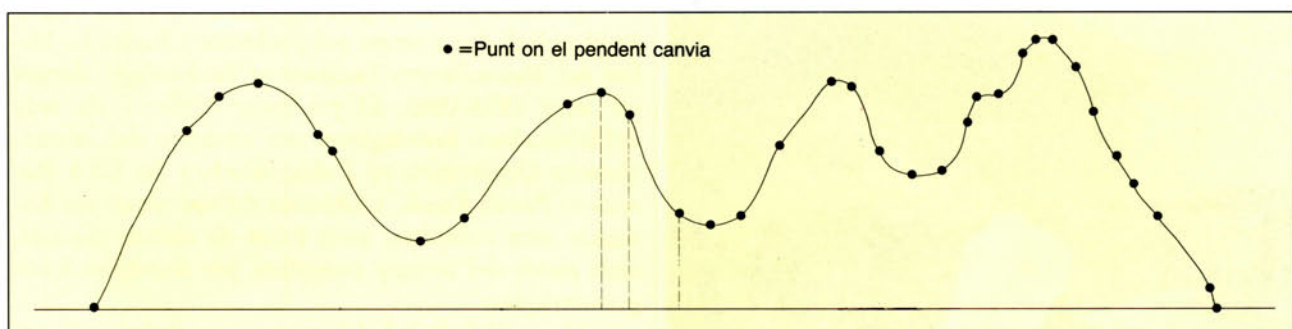


Fig. 5: Resultat de la discretització d'un perfil del terreny emprant el mètode del canvi del pendent

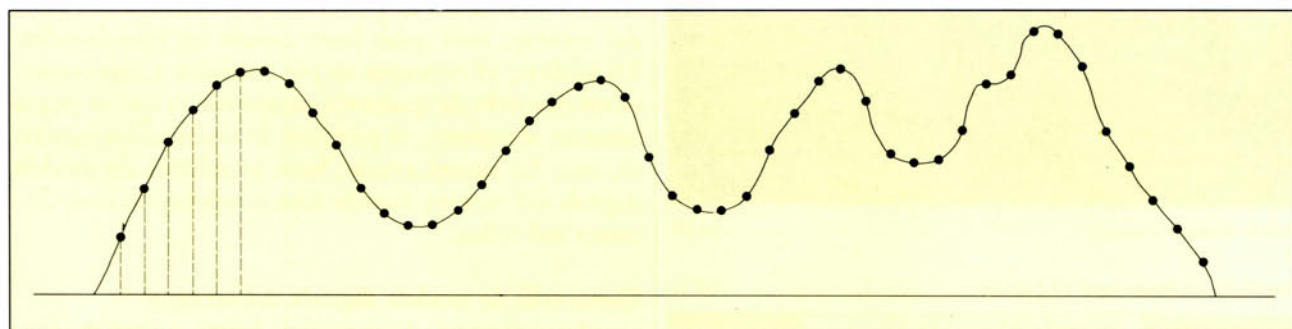


Fig. 6: Resultat de la discretització d'un perfil del terreny per un conjunt de punts equiespaiats

mació altimètrica continguda a les corbes de nivell. Així doncs, hom reconstrueix el relleu a partir de les corbes de nivell. Aquest procés es pot realitzar o bé mitjançant càlculs punt per punt, per interpolació, o bé mitjançant un procés de digitalització de les corbes de nivell, assignant a cada punt la seva altitud. El procés de digitalització de les corbes de nivell consisteix a extreure per a cadascuna d'elles un conjunt de punts. En el primer cas, hom obté una família de punts la localització dels quals ha pogut ésser decidida (figura 4c). En canvi, en el segon cas, els punts han de pertànyer necessàriament a les corbes de nivell (figura 4b).

La generació de models digitals del terreny a partir de fotografies aèries és molt estesa. La modalitat

més emprada procedeix per escombrat al llarg de perfils d'un parell estereoscòpic mitjançant un aparell restituidor analític o analògic. De cada perfil, se'n recull un conjunt de punts i se'n obté una representació discreta. L'elecció dels punts al llarg d'un perfil es fa d'acord amb criteris que analitzin la topografia del terreny.

D'acord amb el criteri més emprat (el del canvi del pendent), es recull un punt quan la diferència del pendent amb l'últim escollit és més gran que certa tolerància (figura 5). Tant la tolerància com l'espaiat entre perfils són escollits segons la fidelitat amb què hom vol representar el terreny.

Una altra possibilitat és la de construir una xarxa

regular de punts. Aquest procediment és semblant a l'anterior, però se'n diferencia pel fet que l'espaiat entre perfils i l'espaiat dels punts al llarg de cada perfil són constants i coincideixen (*figura 6*). En aquest cas, el fet que els punts al llarg de cada perfil quedin determinats per l'espaiat escollit i sense basar-se en cap criteri d'anàlisi de la topografia del terreny, fa que alguns punts, com, per exemple, màxims relatius, mínims relatius i punts d'inflexió, que són importants per a la representació del perfil, no quedin recollits en general. També és clar que l'espaiat juga un paper fonamental en l'obtenció d'una descripció fidel del terreny que hom vol representar.

Alguns restituïdors fotogramètrics van equipats amb correladors d'imatges que permeten d'obtenir coordenades de gran quantitat de punts de forma automàtica i ràpida. La font dels models digitals dels quals hom parla aquí és un restituïdor que descansa en aquests principis, el sistema GPM-IV-3 (ALBERICH, 1985).

L'adquisició de coordenades de punts a partir de treballs de camp topogràfics és, sens dubte, la més cara de totes; l'elevat cost és, però, compensat per la precisió. Aquest procediment és adequat quan hom cerca una representació molt acurada del terreny.

En funció de com sigui el que s'ha obtingut a l'etapa d'adquisició de les dades i de com hagi de ser el MDT, potser caldrà aplicar transformacions a aquestes dades. A la vegada, l'estructura i l'organització de les dades d'un model digital es dissenyen en funció de l'ús que se'n pretengui fer. Amb això es vol dir, que es tracta de transformacions molt particulars que depenen de multitud de factors. Hom no cita cap exemple, perquè, precisament, l'objectiu d'aquest article és exposar com s'han de transformar les dades del GPM-IV per tal de disposar d'un MDT adequat per al dibuix de mapes de corbes de nivell a escala 1:5 000.

Algunes consideracions sobre la qualitat dels models digitals

La finalitat d'un model digital és representar la superfície topogràfica mitjançant un conjunt de punts dels quals hom coneix les coordenades en determinat sistema de referència, tot reduint qualsevol estudi del relleu a una manipulació encertada d'aquests valors. Per assolir aquest objectiu cal que el MDT descrigui el terreny amb la fidelitat adequada. Cal entendre, doncs, el concepte de qualitat en el sentit de fidelitat a la representació de la realitat física del terreny.

Alguns problemes encara estan oberts, com per exemple trobar un sistema de paràmetres que permeti de mesurar la fidelitat a la representació de la realitat física del terreny, i que, un cop determinat el valor de tals paràmetres, permeti d'especificar els requisits que

han de complir els instruments i els mètodes de mesura. En qualsevol cas sembla que entre aquests paràmetres cal comptar-hi la qualitat dels punts que constitueixen el model i l'encert en la seva distribució segons la topografia del terreny.

La qualitat dels punts és afectada per cadascun dels passos que intervenen en l'etapa d'elaboració del model. En primer lloc, hi ha l'adquisició de les dades, la qualitat de les quals —que pot estimar-se de distintes formes— depèn del procediment, de l'equip i del personal emprats. En segon lloc, hi ha les transformacions aplicades a les dades; cal controlar l'error dels punts del model després de l'aplicació de les transformacions, i en ocasions quantificar-lo. Això se sol fer amb tècniques de propagació d'errors; els algorismes més correntment emprats en aquestes transformacions són els d'interpolació, els de filtratge i els de reducció de dades.

La distribució dels punts del model, llur localització, depèn de la geometria del terreny; una distribució òptima en regions planes no pot ésser la mateixa que la de regions muntanyenques. D'altra banda, els mètodes emprats en l'adquisició de dades i en el seu tractament, i els que hom empra de cara a posteriors aplicacions, limiten el nombre de punts d'un model. En algunes circumstàncies, doncs, el nombre de punts és escàs. Per tant, la seva distribució és crítica, ja que amb «pocs» punts s'ha de garantir una bona descripció del terreny. En altres ocasions, però, el nombre de punts és prou gran per a deixar de banda consideracions de distribució; és el cas de les dades que proporciona el sistema GPM-IV instal·lat a l'Institut Cartogràfic de Catalunya i, en general, de tots els sistemes que utilitzen tècniques de correlació automàtica d'imatges.

Aplicacions

Les aplicacions dels models digitals són nombroses, ja que poden substituir amb avantatges altres tipus d'informació mètrica de la superfície del terreny, i per tant, poden ésser utilitzats en qualsevol tipus de disciplina tècnica o científica en què calgui conèixer el relleu.

A l'Institut Cartogràfic de Catalunya, els models digitals s'utilitzen principalment per a la confecció de mapes topogràfics, o, més exactament, per a la generació de les corbes de nivell d'aquests mapes. La segona aplicació important és la producció ortofotogràfica, ja que, de fet, l'ortofotografia i els MDT (ALBERICH i FERNÁNDEZ, 1984) s'obtenen al GPM IV de forma simultània. Altres aplicacions són: la generació de vistes en perspectiva dels mapes per facilitar-ne la interpretació, i la classificació del terreny segons característiques geomètriques, com, per exemple, els

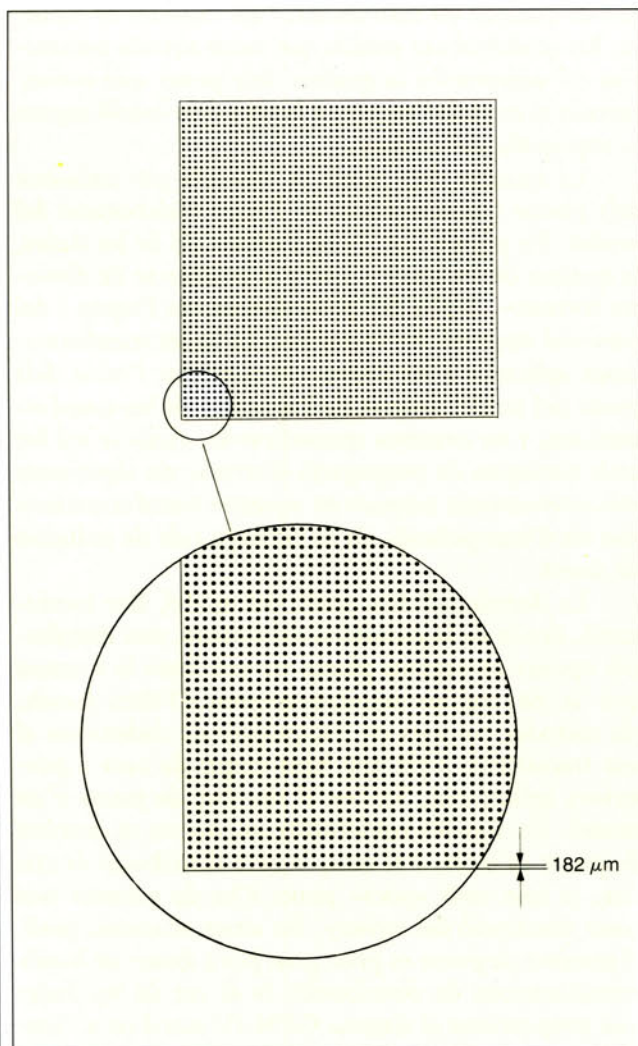
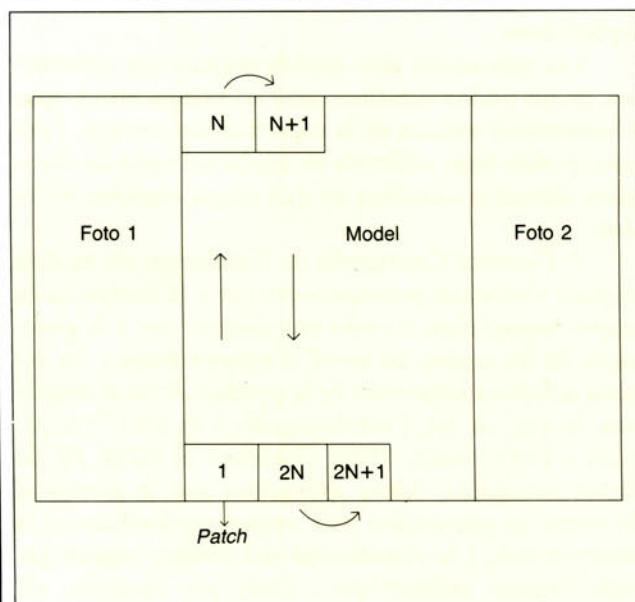


Fig. 7: La distribució dels punts d'un MDT Gestalt consisteix en una xarxa regular molt densa amb un espaiat entre punts de 182 micres

Fig. 8: Seqüència de la generació dels patches d'un MDT Gestalt



mapes de pendents. Finalment, i no menys important, és la creació d'una base de dades altimètriques de Catalunya.

Altres camps en què ja s'ha començat a fer un ús important dels models digitals són definits pels projectes d'enginyeria civil i d'urbanisme, entre els quals destaquen el disseny de carreteres, autopistes i vies fèrries, el control d'explotació de mines a cel obert, o els sistemes de navegació i de guiatge. De fet, cada dia apareixen noves aplicacions sense cap altra limitació que la imaginació dels usuaris.

Els models digitals Gestalt i les seves particularitats

El correlador automàtic d'imatges és el que fa del sistema GPM-IV una màquina singular, ja que produeix de forma automàtica, ràpida (un model digital de 500 000 punts és generat aproximadament en dues hores) i massiva. Els punts de l'MDT proporcionats per aquest sistema són distribuïts uniformement, i constitueixen una xarxa regular —una quadrícula— molt densa (figura 7). L'espaiat de la quadrícula és de $182 \mu\text{m}$ a escala dels fotogrames.

L'elaboració dels models digitals Gestalt, és a dir, la generació de la quadrícula de punts, es fa per etapes. En cadascuna d'aquestes etapes es correla un petit tros quadrat del terreny (o més exactament, es correlen les dues petites parts de les imatges que representen aquell tros quadrat del terreny) que s'anomena amb el mot anglès *patch*, que significa retall, peça d'un mosaic; el costat d'un *patch*, sobre la imatge, fa $4368 \mu\text{m}$.

Així, un *patch* és un conjunt de 576 punts distribuïts segons una xarxa regular d'espaiat $182 \mu\text{m}$. De cada punt, el sistema en dona dues coordenades planimètriques (x,y) expressades en micres i segons un sistema de referència associat al fotograma, i una coordenada altimètrica, expressada en metres que correspon a l'altitud real del punt.

Per donar una idea de la gran densitat de punts dels models Gestalt n'hi ha prou amb un exemple. Un full a escala 1:5 000, que cobreix una zona d'aproximadament $2,5 \text{ km} \times 2,5 \text{ km}$, i que s'obté a partir de fotografies aèries d'escala mitjana a 1:22 000, conté uns 400 000 punts que corresponen a un espaiat de quadrícula d'aproximadament 4 m.

El correlador automàtic d'imatges fa que el sistema produeixi un model digital amb característiques també singulars. Cal considerar, abans de continuar amb el correlador automàtic, la situació descrita a la figura 9. Els punts A' i B', A'' i B'' tenen les mateixes coordenades planimètriques, però no l'altimètrica. Hom pot entendre —el cas de la figura— per causa d'un edifici o d'un arbre. Aquesta situació es reproduïx amb l'existència de qualsevol accident artificial del terreny. Quan es tracta de representar aquesta su-

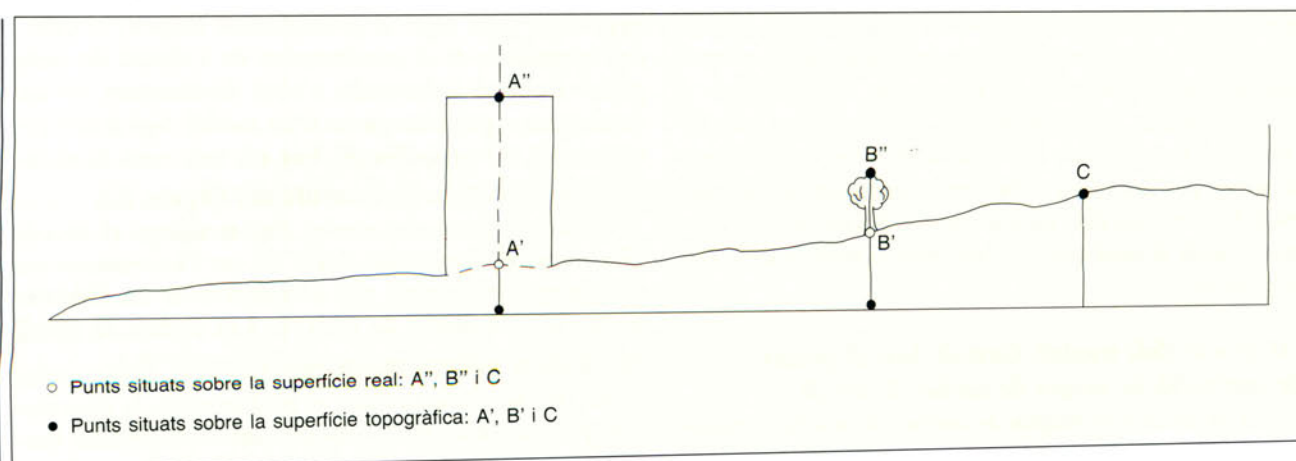


Fig. 9: Diferents interpretacions de la superfície del terreny

perfície, podem escollir entre els punts A', B' i els A'', B''. L'elecció dependrà de l'ús que es faci d'aquesta representació. Tradicionalment, per als mapes topogràfics, hom es decideix per A' i B', però si es volgués utilitzar el model digital per a la rectificació digital d'imatges (ortofotografia), llavors els escollits serien A'' i B''. En aquest sentit hom parla de superfície topogràfica i de superfície real del terreny, segons que s'hagin triat els punts A', B' o els punts A'', B'' per a representar-lo.

Un operador fotogramètric, quan restitueix el terreny, sia amb un aparell analític o analògic, és conscient de l'ús que es farà del model i d'acord amb això restituirà el terreny. En el cas d'A'' i B'' ho farà sense més problemes que en el cas C. En el cas d'A' i B', intentarà restituir aquests punts, de forma més o menys aproximada, a partir de la informació del terreny que és capaç d'apreciar al voltant dels accidents artificials dins dels quals són A' i B'. En canvi, el correlador automàtic del GPM-IV només pot restituir els punts A'' i B''; així, doncs, restitueix la superfície real i no la topogràfica. Això fa que part de les altituds correctament obtingudes, o *reals*, siguin errònies com a representació de la superfície topogràfica i que hagin d'ésser tractades com a *errors* en les dades.

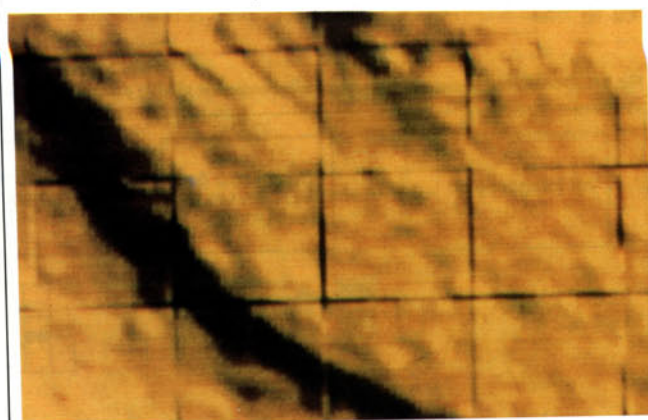
Si, a més, hom disposa de coordenades sense error dels punts del model digital, llavors pot estudiar l'exactitud dels punts del model original. En particular, hom estudia la mitjana de l'error i la seva desviació estàndard (σ). Com és ben sabut, σ és una mesura de la dispersió de l'error i, en el nostre cas, reflecteix el grau de pertorbació de la superfície real respecte de la topogràfica. Els tractaments per a acostar la superfície real a la topogràfica giren al voltant de la reducció de σ , operació anomenada aquí filtratge. D'altra banda, l'algorisme de correlació emprat pel GPM-IV té limitacions. Entre d'altres, té dificultats per correlar àrees amb pendents superiors al 40% que, en el cas

de Catalunya, constitueixen al voltant del 18% del territori.

La font particular d'aquestes dades fa que certs tipus d'errors característics dels models digitals obtinguts amb tècniques tradicionals desapareguin mentre que n'apareixen de nous i d'importants. Per exemple, desapareixen els típics errors sistemàtics entre perfils que s'han compilat "escombrant" el model estereoscòpic alternativament en un sentit i en el contrari. En canvi, apareixen salts entre les unitats de generació dels models digitals, ara els *patch*. Això és a causa del fet que el càlcul de les coordenades dels punts d'un *patch* és independent dels altres *patches*. Com a resultat, en alguns casos, els valors de les altituds dels punts de la frontera de *patches* adjacents no són consistents. Llavors, hom parla de *discontinuitat* entre *patches* (foto 8).

Un altre problema dels models digitals Gestalt és la gran densitat de punts. En principi, això no és cap problema ja que com més punts hi hagi, millor pot descriure's la topografia del terreny. A la pràctica, però, la manipulació de tanta informació és molt costosa, fins i tot per a ordinadors de tipus mitjà. A més,

Foto 8: Aspecte del relleu obtingut a partir d'un MDT Gestalt on es poden observar les discontinuïtats entre *patches* (ICC)



gran part d'aquesta informació és probablement excessiva ja que, per exemple, hom representa àrees planes amb la mateixa densitat de punts que les abruptes.

Finalment, sia a causa de la manca de contrast de l'emulsió fotogràfica, o per la manca de contrastos a les àrees per correlar, o bé per la complexitat geomètrica de la topografia, alguns *patches* deixen d'ésser correlats, amb la qual cosa es perd tota la informació corresponent.

Integració dels models *Gestalt* dins el procés de confecció de mapes de corbes de nivell

L'objecte dels mapes de corbes de nivell, o mapes topogràfics, és descriure geomètricament la superfície del terreny. Això s'assoleix amb les corbes de nivell, les quals són línies que uneixen punts amb la mateixa cota. Tot i que per a la descripció exacta de la topografia calen corbes de nivell de totes les cotes, es pot obtenir una aproximació acceptable només amb unes quantes; en el cas de mapes a escala 1:5 000, hom considera les corbes de nivell cada 5 m.

El procediment més habitual per a dibuixar les corbes és la restitució de parells estereoscòpics de fotografies aèries. Entre els procediments de restitució fotogramètrica hi ha diferents possibilitats: des de les més clàssiques —dibuixar directament les corbes en un aparell analògic— fins a les més recents —generació automàtica del model digital en un aparell digital i interpolació posterior de les corbes. Cal destacar

que, sigui quin sigui el procediment emprat, el principi geomètric és el coneixement de l'altitud de cada punt. Aquesta informació s'obté directament en un restituïdor o pot obtenir-se d'un model digital per interpolació. El procediment fins ara més estès és el dibuix de les corbes en el restituïdor (*figura 10*).

La utilització del model digital allarga el procés una mica; el restituïdor deixa de ser l'instrument on es generen les corbes per a convertir-se en l'instrument de compilació de l'MDT. Les corbes de nivell es generen posteriorment per aplicació d'algorismes d'interpolació que resolen el problema de la intersecció de plans d'altitud constant amb la superfície descrita pel model digital. L'esquema de la *figura 10* esdevé, llavors, el de la *figura 11*.

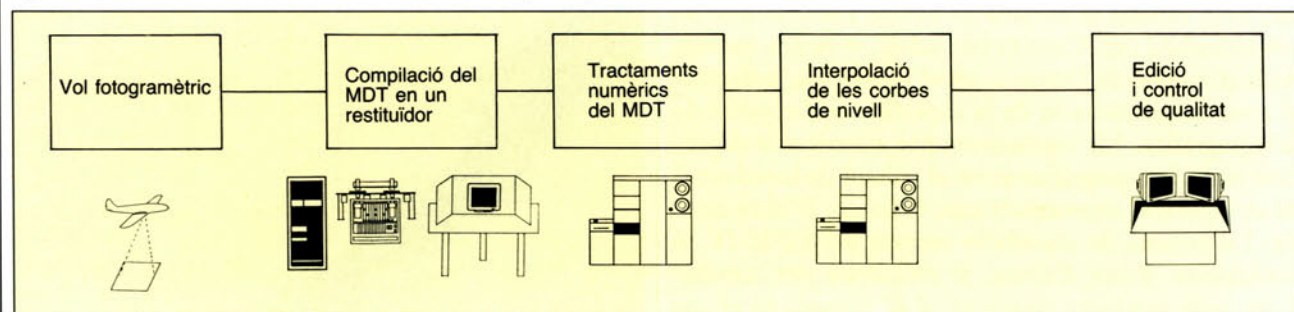
El procediment a través del qual es confeccionen els mapes de corbes de nivell quan s'usen models digitals, a l'Institut Cartogràfic de Catalunya, pertany doncs, a aquesta segona categoria. Si, a més, el model és obtingut per correlació automàtica d'imatges al restituïdor GPM IV, llavors els processos de compilació i tractament numèric són d'un tipus molt particular al qual hom es refereix en aquesta publicació.

La introducció d'aquest pas intermedi de *tractament numèric*, entre la compilació de l'MDT i la interpolació de les corbes de nivell, obeeix a raons diverses segons quin sigui l'origen de l'MDT. En el cas dels models digitals *Gestalt*, a més dels problemes ja esmentats, i per exigències de la base de dades altimètri-



Fig. 10: Procediment tradicional d'obtenció de les corbes de nivell

Fig. 11: Procediment automàtic d'obtenció de les corbes de nivell a partir d'un MDT



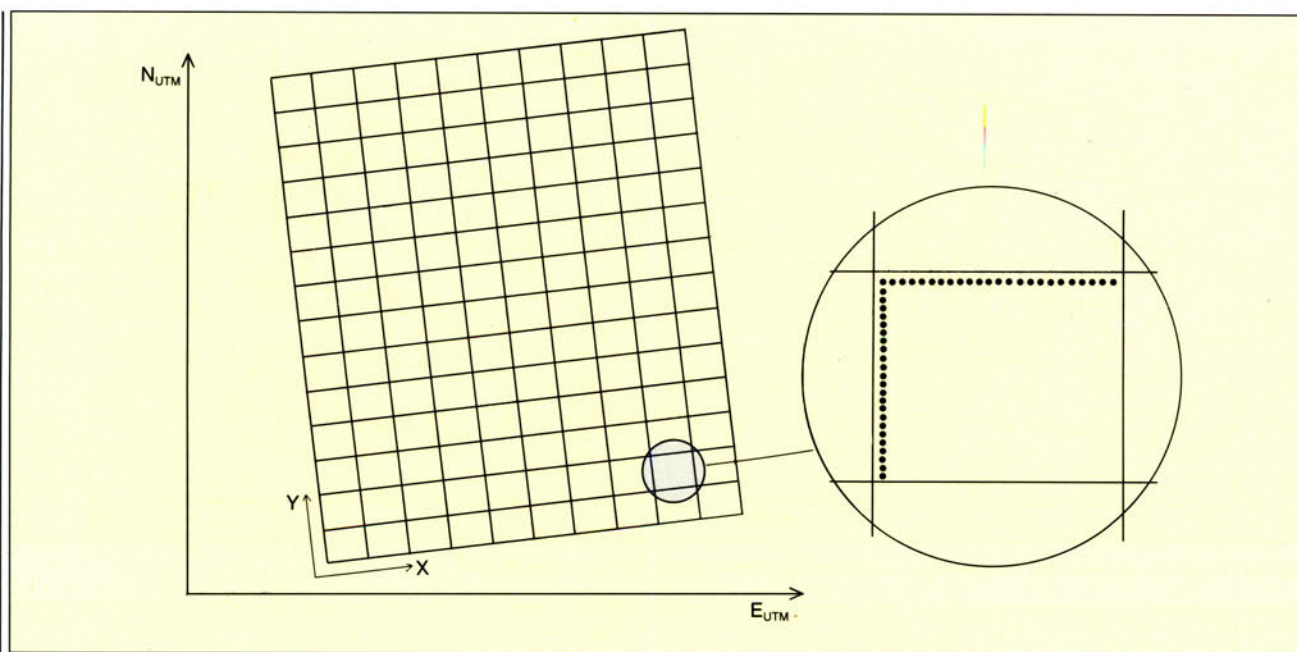


Fig. 12: Sistema de referència ortofotograma i sistema de referència terreny

ques, cal reorientar el model. El model Gestalt és constituït com una xarxa regular de punts (x, y, Z) on les coordenades planimètriques (x, y) són expressades en el sistema de referència associat a l'ortofotograma i la coordenada Z és expressada en el sistema de referència associat al terreny (figura 12). Per altra banda, la base de dades altimètriques fa necessari que el model digital sigui referit al sistema de projecció cartogràfica, de manera que les direccions de files i columnes del model coincideixin amb les direccions dels eixos X i Y de la projecció, respectivament. Cal doncs, efectuar una transformació addicional, essencialment una interpolació, que afecti el conjunt de les tres coordenades (x, y, Z) . Resumint, el tractament numèric per al model Gestalt engloba els dos punts anteriors de *resoldre problemes* i de *referir i reorientar* el model al sistema de projecció.

Quant al que apareix a la figura 11, primer, cal resoldre el problema de les discontinuïtats entre *patches* adjacents, per tal d'obtenir una superfície homogènia sense trencaments; així els salts entre *patches* no esdevenen salts a les corbes de nivell. En segon lloc, i per tal de fer més senzilla la manipulació dels punts del model digital, a partir del model original cal calcular-ne un altre que consisteix en una xarxa regular equiespaiada i orientada segons els eixos principals del sistema de projecció cartogràfica.

Per tal que tots aquests procediments es puguin integrar en processos de producció cal que el temps de càlcul es mantingui dins de límits raonables. Això obliga a aplicar tractaments de reducció del nombre

de punts del model (figura 13). Finalment, és necessari aplicar algun tipus de tractament numèric per tal de reduir el valor de σ de les dades originals el qual, tal com es veurà més endavant, és excessiu. Un cop realitzats tots aquests passos hom està en condicions de passar a la interpolació de les corbes de nivell.

Estructura algorísmica del tractament numèric

La sèrie d'operacions a efectuar sobre l'MDT són: 1. Resoldre discontinuïtats entre *patches*; 2. Reorientar la xarxa del model segons les direccions principals de la projecció cartogràfica emprada; 3. Reduir el nombre de punts; 4. Reduir el valor de σ (filtratge); 5. Generar les corbes de nivell.

Cadascuna d'aquestes operacions suposa un procés numèric conceptualment diferent sobre el model. Ara bé, a la pràctica hom pot dissenyar algorismes que combinin diferents processos numèrics. Les eines numèriques més emprades consisteixen en algorismes d'interpolació, algorismes de filtratge i combinacions d'ambdós tipus.

En cas particular de l'MDT Gestalt s'ha reduït el nombre de passos a tres: 1. Resoldre les discontinuïtats entre *patches*; 2. Interpol·lar una quadrícula orientada segons les direccions principals de la projecció emprada, reduir els punts, i reduir el valor de σ (filtratge); i 3. Generar les corbes de nivell.

Les operacions de reducció de dades, de filtratge i d'interpolació d'una quadrícula orientada segons les direccions principals del sistema de projecció, poden ésser fetes en una de sola, mitjançant tècniques de

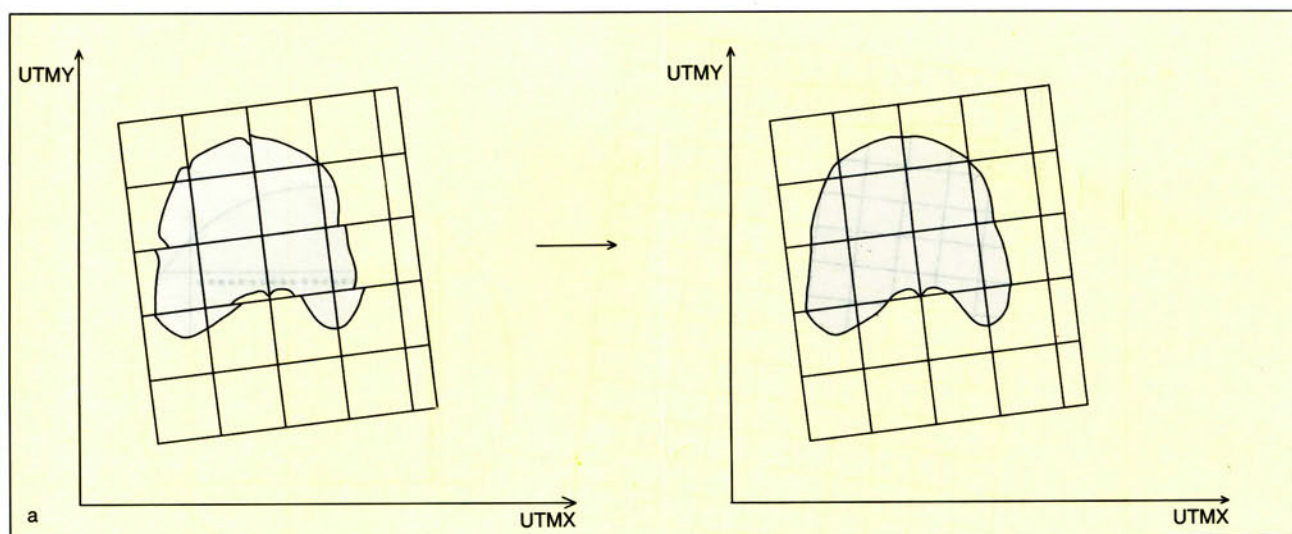


Fig. 13a: Eliminar les discontinuïtats entre *patches* per tal que no es produixin trencaments a les corbes de nivell

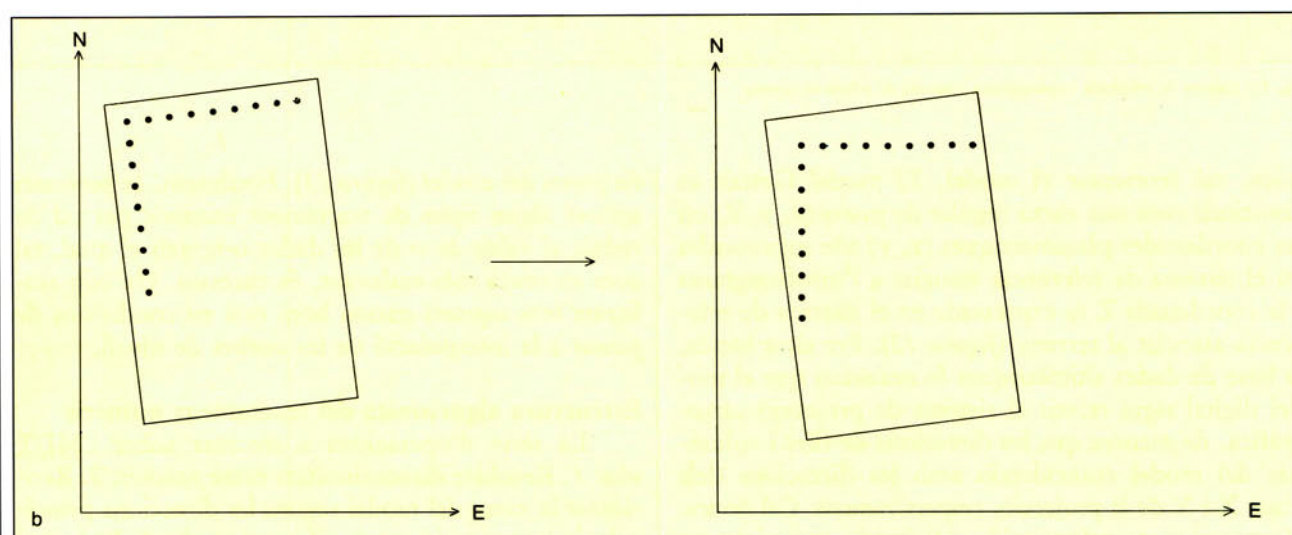
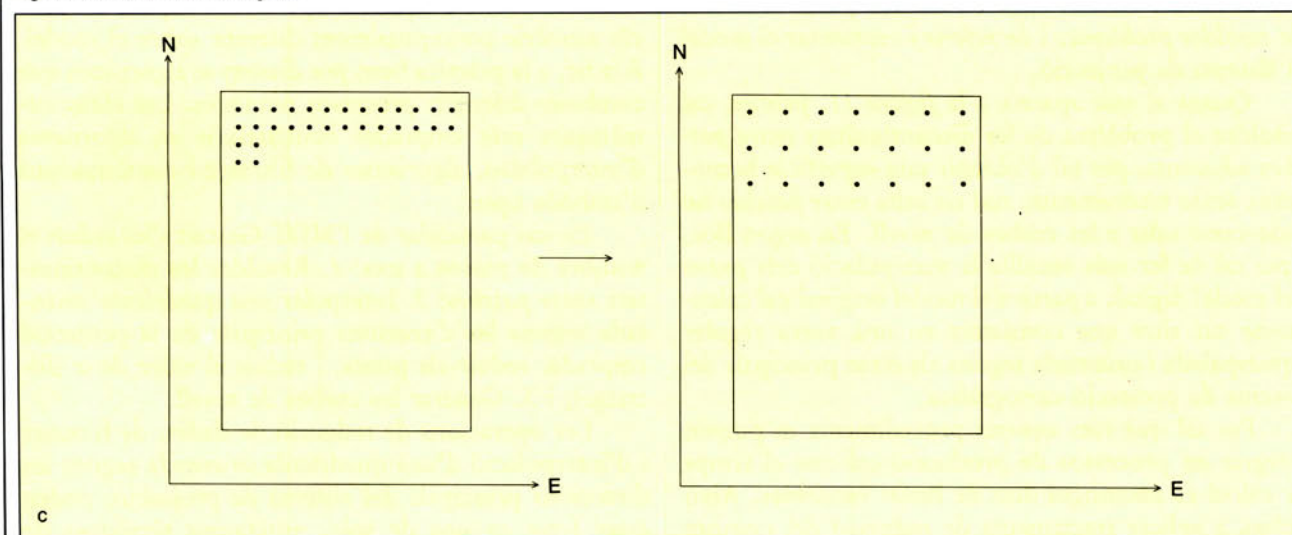


Fig. 13b: Calcular a partir del MDT original d'un sub-MDT orientat segons els eixos principals del sistema de projecció cartogràfica

Fig. 13c: Procés de reducció de punts



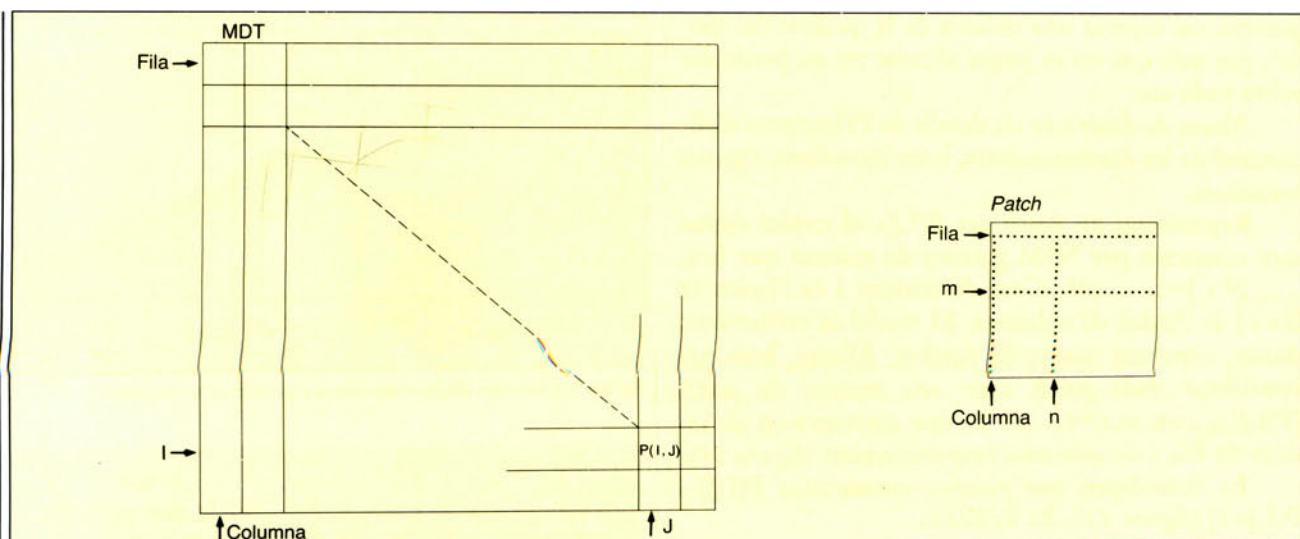


Fig. 14: Estructures del MDT Gestalt

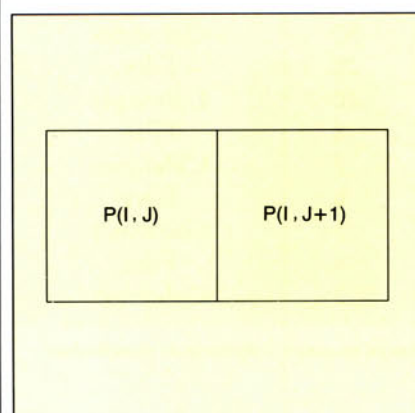


Fig. 15: Dos patches adjacents

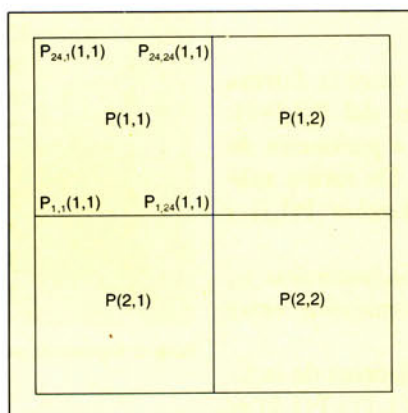
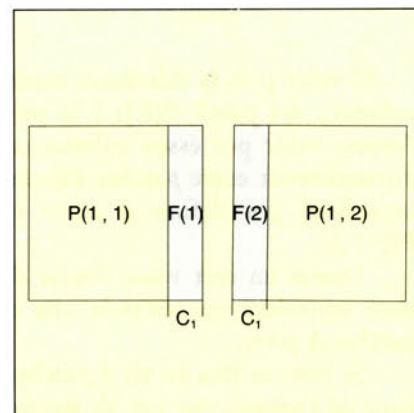


Fig. 16: Quatre patches adjacents

Fig. 17: Les franges F(1) i F(2) són afectades d'error.
L'amplada C_1 depèn del grau de discontinuïtat

convolució que, ben dissenyades, redueixen els errors aleatoris existents a les dades Gestalt, alhora que calculen la nova quadrícula per a un nombre reduït de punts.

L'eliminació de les discontinuïtats entre patches

Una discontinuïtat entre patches es correspon amb una forta irregularitat o discontinuïtat a la topografia del sòl. Si, tal com passa en la majoria de casos, aquesta discontinuïtat és el resultat de deficiències en el procés de correlació i no d'una topografia accidentada, el mapa de corbes de nivell final, no només serà afectat per error quantitatiu groller, sinó que qualitativament donarà una falsa imatge de la forma de la superfície del terreny.

Hi ha alternatives diferents per a la solució d'aquest problema, i cadascuna d'elles respon a punts de vista diferents. En altres paraules, cadascuna d'elles és el resultat d'assumir certes hipòtesis sobre la naturalesa de la topografia del terreny. Si, per exemple, hom pos-

tula que tal topografia és imprevisible, no hi ha més remei que remesurar, d'una manera o d'altra, aquelles zones afectades de discontinuïtats. Si, en canvi, hom admet propietats de continuïtat i derivabilitat, llavors té sentit emprar tècniques d'interpolació i suavització en el tractament de les àrees problemàtiques.

Per a qui hagi treballat un mínim de temps en aquest camp, és ben clar que la primera hipòtesi és la vàlida. Així i tot, desenvolupada estrictament fa impossible la generació automàtica de corbes de nivell. La segona hipòtesi, en canvi, pot provocar decisions errònies (considerar com error un accident natural del sòl), encara que permeti aquella generació. Afortunadament, el nombre d'errors a què condueix aquesta hipòtesi és comparativament petit respecte al conjunt. Aquesta afirmació es basa en resultats empírics de diferents tests.

Així, finalment hom ha acceptat el risc que suposa la interpolació i la suavització automàtica de les discontinuïtats entre patches, en el ben entès que, en

general, cal esperar una millora de la qualitat del model, per més que no es pugui afirmar res en particular sobre cada cas.

Abans de descriure els detalls de l'algorisme d'eliminació de les discontinuïtats, hom introdueix algunes notacions.

Representat un *patch* per $P(I,J)$, el model digital serà constituït per $N \times M$ patches de manera que $I=1, \dots, N$ i $J=1, \dots, M$. Com de costum I és l'índex de fila i J és l'índex de columna. El model és estructurat, doncs, com una matriu de *patches*. Alhora, hom pot considerar cada *patch* com una matriu de punts $(P(I,J))_{m,n}$ on $m,n=1, \dots, 24$ que corresponen als índexs de fila i de columna respectivament (figura 14).

Es consideren dos *patches* consecutius $P(I,J)$ i $P(I,J+1)$ (figura 15). Es defineix,

$$p = \max_{1 \leq i \leq 24} \{ |P(I,J)_{i,24} - P(I,J+1)_{i,1}| \}$$

El valor p és la diferència màxima entre la darrera columna del *patch* $P(I,J)$ i la primera del $P(I,J+1)$. Aquest valor pot ésser utilitzat com a paràmetre de discontinuïtat entre *patches* adjacents. De forma anàloga hom pot definir p entre els *patches* $P(I,J)$ i $P(I+1,J)$.

Donat un cert valor llindar de discontinuïtat t_1 , hom considera que existeix una discontinuïtat entre *patches* si $p > t_1$.

Si hom es fixa en els 4 *patches* adjacents de la figura 16 i suposa que per als *patches* $P(1,1)$ i $P(1,2)$ es verifica $p > t_1$, llavors, cal eliminar la discontinuïtat entre $P(1,1)$ i $P(1,2)$. Eliminar-la significa substituir dues franges-columna a $P(1,1)$ i $P(1,2)$ respectivament per nous valors interpolats a partir d'altres punts dels *patches* (figura 17).

L'amplada de la franja-columna c_1 (nombre de columnes per interpolar) depèn del valor de t_1 . En definitiva, els punts que seran substituïts són: en el *patch* $P(1,1)$, $P(1,1)_{i,j}$ on $i=1,2, \dots, 24$ i $j=24-c_1+1, \dots, 24$, i en el *patch* $P(1,2)$, $P(1,2)_{i,j}$ on $i=1,2, \dots, 24$ i $j=1,2, \dots, c_1$.

Aquest procediment suposa l'existència d'error en les dades del terreny a les franges $F(1)$ i $F(2)$ respectivament (figura 18).

L'algorisme d'interpolació procedeix per files. Primer es recuperen els elements: $P(1,1)_{1,24-c_1+1}, \dots, P(1,1)_{1,24}$, $P(1,2)_{1,1}, \dots, P(1,2)_{1,c_1}$. Després el $P(1,1)_{2,24-c_1+1}, \dots, P(1,1)_{2,24}$ i el $P(1,2)_{2,1}, \dots, P(1,2)_{2,c_1}$. Així fins a la darrera fila de les dues franges. Per a cada fila, la tècnica usada és la d'interpolació cúbica hermitiana. A l'interval $[P(1,1)_{i,24-c_1+1}, P(1,2)_{i,c_1+1}]$. Les dues columnes anteriors i posteriors a les franges s'usen per imposar les condicions de pas i de pendent del polinomi cúbic que efectua la interpolació (figura 19).

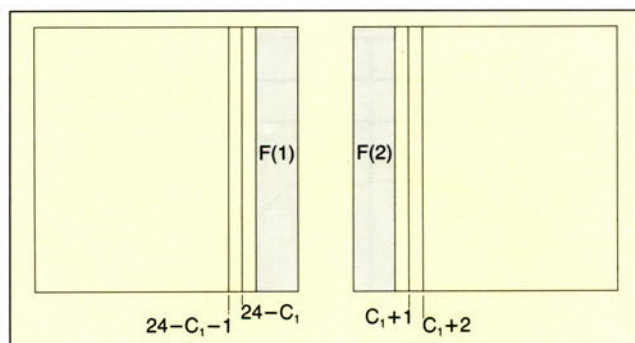


Fig. 18: Les columnes adjacents determinen el pendent de la interpolació

i	c	t	Sentit de la interpolació
1	12	50	Columnes
2	11	40	Files
3	10	30	Columnes
4	9	20	Files
5	8	10	Columnes
6	7	8	Files
7	6	7	Columnes
8	5	6	Files
9	4	5	Columnes
10	3	4	Files
11	2	3	Columnes

Taula 1: Seqüència de paràmetres pel tractament d'eliminació de discontinuïtats

Per eliminar les discontinuïtats entre dos *patches* dins la mateixa columna del model, per exemple entre els $P(1,1)$ i $P(2,1)$, es procedeix de forma anàloga, canviant franges-columna per franges-fila i files per interpolar per columnes per interpolar.

Aquest és un mètode línia a línia, ja sigui en sentit horitzontal o vertical. Això fa que, mentre s'han eliminat les discontinuïtats entre $P(1,1)$ i $P(1,2)$, poden persistir o bé aparèixer noves discontinuïtats entre: $P(1,1)$ i $P(2,1)$; $P(1,2)$ i $P(2,2)$; $P(1,1)$ i $P(2,2)$; $P(2,1)$ i $P(1,2)$.

Per resoldre aquest darrer inconvenient hom pot prendre un $c_2 < c_1$ i un $t_2 < t_1$ i aplicar el mateix procediment a franges-fila (figura 20).

D'aquesta manera les discontinuïtats entre $P(1,1)$ i $P(2,1)$ i entre $P(1,2)$ i $P(2,2)$ són eliminades.

Aquest procés d'eliminació de discontinuïtats, en el sentit de les files i en el sentit de les columnes alternativament, pot ésser reiterat fins a obtenir una superfície contínua. A la taula 1 es donen els paràmetres c_i , t_i típics dels models digitals per a l'elaboració de cartografia a escala 1:5 000.

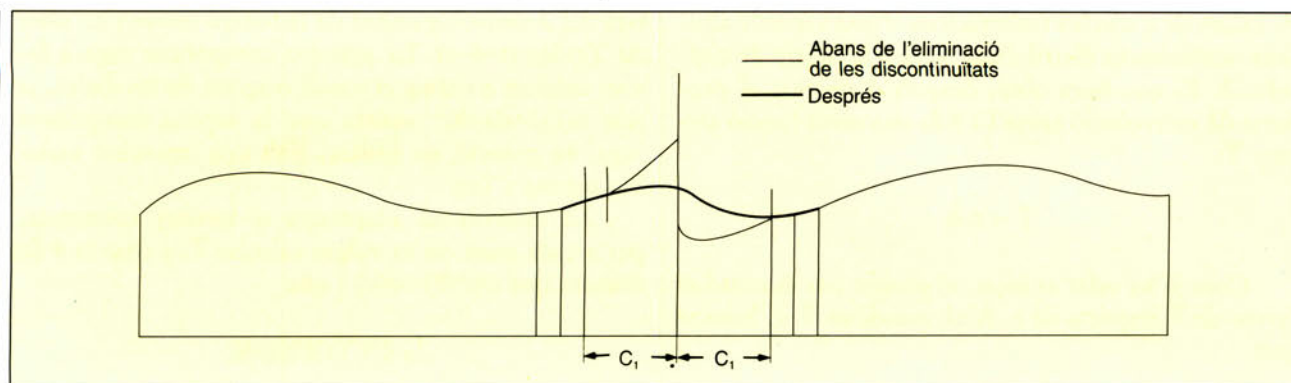


Fig. 19: Resultat d'interpolació d'una fila

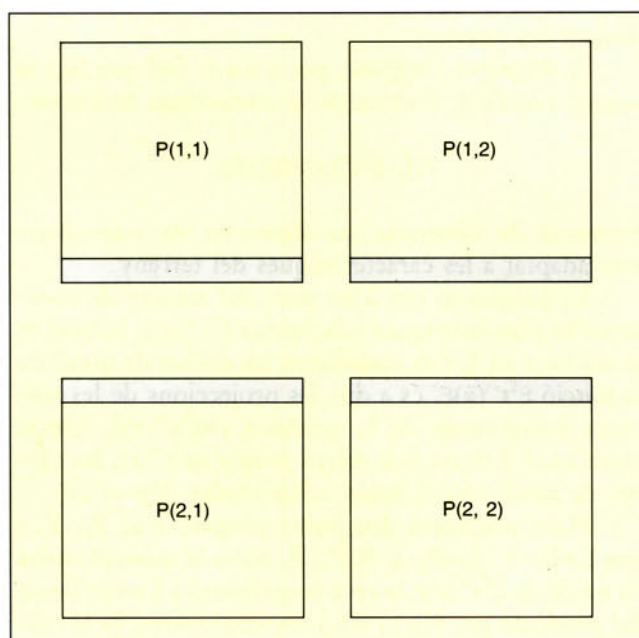
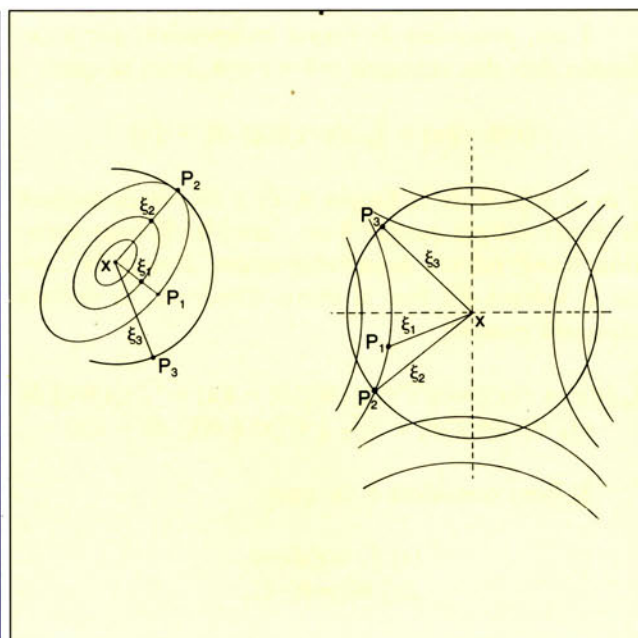


Fig. 20: Canvi del sentit d'interpolació

Fig. 21: Corbes de nivell de la funció $\xi^T t''(x) \xi$

Interpolació d'una quadrícula segons les direccions de la projecció cartogràfica, la reducció i el filtratge de dades

Si hom observa globalment el procés que les dades originals han de recórrer, llevat del pas de l'eliminació de discontinuïtats entre *patches*, s'adona que tot es redueix a interpolat cert nombre de punts, distribuïts en una quadrícula regular, i, si és possible, de manera que el soroll present a les dades originals sigui més baix.

Aquest nou model digital reduït, reorientat i fil-

trat, hom l'obté de l'original efectuant un producte de convolució¹ amb certes funcions regularitzants (els filtres) que varien d'acord amb la topografia del terreny.

Abans d'explicar en què consisteix aquesta «convolució», hom suposa que les coordenades dels punts del model només tenen error en la seva component z . L'anàlisi que segueix condueix de forma natural a l'algorisme de convolució adaptativa. Sigui, doncs, $t(x)$ la funció terreny, on x és una variable bidimensional. Per funció terreny hom entén la que avalua l'altitud d'un punt de coordenades planimètriques x . La funció terreny t és desconeguda. Hom coneix, només en el nombre finit de punts que constitueixen el model digital, una funció $\bar{t}$. Si l'error de les dades és, per a cada punt x del terreny $e(x)$, es verifica que:

$$\bar{t}(x) = t(x) + e(x)$$

S'introdueix aquí una segona simplificació o hipòtesi sobre la naturalesa de l'error: hom suposa que

Notes

¹ El producte de convolució de dues funcions $f, g: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ és una nova funció $f * g: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, definida per:

$$(f * g)(x) = \int_{\mathbb{R}^2} f(x+s) g(s) ds$$

Per altra banda, parlem de filtratge en el sentit de reducció de σ , que es porta a terme transformant f en $\bar{f}$ mitjançant una funció regularitzadora ('el filtre') θ , amb $\bar{f} = f * \theta$.

els valors de e són les realitzacions d'una variable aleatòria normalment distribuïda. Sigui θ la funció de convolució. El que hom obté, després d'efectuar el producte de convolució entre $\bar{t}$ i θ és una nova funció terreny $\bar{t}$:

$$\bar{t} = \bar{t} * \theta$$

Com ja ha estat avançat, el proper pas és estudiar l'error de $\bar{t}$ respecte de t . Així, estudiant $\bar{t} - t$, hom té que:

$$\bar{t} - t = \bar{t} * \theta - t = (t + e) * \theta - t = (t * \theta - t) + e * \theta$$

I ara, procedint de forma independent per a cadascun dels dos sumands $t * \theta - t$ i $e * \theta$, hom té que:

$$(t * \theta - t)(x) = \int_P t(x + \xi) \theta(\xi) d\xi - t(x)$$

P és el suport de la funció θ , és a dir, és el conjunt de punts del pla en què θ no s'anul·la. Si hom aproxima $t(x + \xi)$ pel seu desenvolupament en sèrie de Taylor al voltant d' x fins al terme d'ordre 2, la darrera expressió queda:

$$\int_P [t(x) + t'(x)\xi + \frac{1}{2}t''(x)\xi^2] \theta(\xi) d\xi - t(x) = \int_P t(x)\theta(\xi) d\xi + \int_P t'(x)\xi\theta(\xi) d\xi + \frac{1}{2}\int_P t''(x)\xi^2\theta(\xi) d\xi - t(x)$$

Si hom considera θ tal que:

$$\begin{aligned} 1r) \int_P \theta(\xi) d\xi &= 1, \\ 2n) \theta(\xi) &= \theta(-\xi), \end{aligned}$$

llavors es verifica:

$$\int_P t(x)\theta(\xi) d\xi = t(x)$$

per la condició primera, i a causa de la condició segona hom té:

$$\int_P t'(x)\xi\theta(\xi) d\xi = 0.$$

De tot això s'obté l'aproximació següent per a $t * \theta - t$:

$$(t * \theta - t)(x) \approx \frac{1}{2} \int_P t''(x)\xi^2\theta(\xi) d\xi$$

Pel que fa a $e * \theta$ és suficient observar que pot trobar-se θ de manera que $\sigma(e * \theta) < \sigma(e)$. Per exemple, això es verifica si $\theta > 0$.

Resumint, $\bar{t} - t$ té dues components: una és la deguda a la propagació de l'error aleatori e pel producte de convolució ($e * \theta$), i l'altre component depèn de la forma del terreny, o, més ben dit, de la part quadrà-

tica del desenvolupament de la funció terreny en sèrie de Taylor ($t * \theta - t$). La primera component juga a favor: tendeix a reduir el soroll original de les dades, ja que $\sigma(e) > \sigma(e * \theta)$; mentre que la segona component juga, en general, en contra, amb una intensitat variable segons $t''(x)$.

La convolució adaptativa al terreny consisteix, per a cada punt on es vulgui calcular $\bar{t}$, a triar la θ de manera que $\sigma(e * \theta) < \sigma(e)$ i que

$$\int_P \xi^2 t''(x) \xi \theta(\xi) d\xi$$

es mantingui petit. La primera condició s'assoleix per a qualsevol θ que representi una característica promitjant del terreny:

$\int_P \theta(\xi) d\xi = 1$ i $\theta(\xi) \geq 0$, per a tot ξ . Pel que fa a la segona condició, l'estudi de la component de l'error

$$\frac{1}{2} \int_P \xi^2 t''(x) \xi \theta(\xi) d\xi$$

permetrà de dissenyar un algorisme de convolució més adaptat a les característiques del terreny.

Es considera, per a un punt del terreny de coordenades planimètriques x la funció $\xi^2 t''(x) \xi$, la qual és quadràtica en ξ , i es consideren les corbes de nivell de la funció $\xi^2 t''(x) \xi$, és a dir, les projeccions de les seccions horitzontals de la quàdrica $z = \xi^2 t''(x) \xi$. Llevat que s'anul·li algun dels valors propis de $t''(x)$, les corbes de nivell són el·lipses o hipèrboles (figura 21).

Hom considera dos punts propers a x , P_1 , P_2 i que $\xi_1 = P_1 - x$ i $\xi_2 = P_2 - x$. Si P_1 , P_2 són a la mateixa corba de nivell de $\xi^2 t''(x) \xi$ la seva contribució a l'error llevat del producte per $\theta(\xi_1)$ i $\theta(\xi_2)$ respectivament, és la mateixa pel fet que $\xi_1^2 t''(x) \xi_1 = \xi_2^2 t''(x) \xi_2$. Podria considerar-se un tercer punt P_3 , ($\xi_3 = P_3 - x$) que no pertany a la corba de nivell que conté P_1 , P_2 però tal que $\|\xi_3\| = \|\xi_2\|$. En general, i llevat del producte per $\theta(\xi_3)$, la contribució de P_3 a l'error és distinta de la de P_2 tot i que és a la mateixa distància d' x .

La conclusió és que per tal que θ s'adapti a les característiques del terreny ha de romandre constant sobre les corbes de nivell de la funció $\xi^2 t''(x) \xi$. Això respon a la següent idea intuïtiva: per a una àrea del terreny del tipus del de la figura 22 i per suavitzar les corbes al voltant d' x , hom utilitza, preferentment, informació al llarg de l'eix X i no de l' Y perquè, sempre intuïtivament parlant, una convolució amb θ que verifiqui les condicions primera i segona és una mitjana ponderada i la utilització de punts de cota molt diferent a la de x fa que el resultat de la mitjana $\bar{t}(x)$ s'aparti exageradament de $t(x)$.

El tractament per convolució adaptativa pretén de transformar les corbes de la figura 22 en les de la figura 24 a i no en les de la figura 23b.

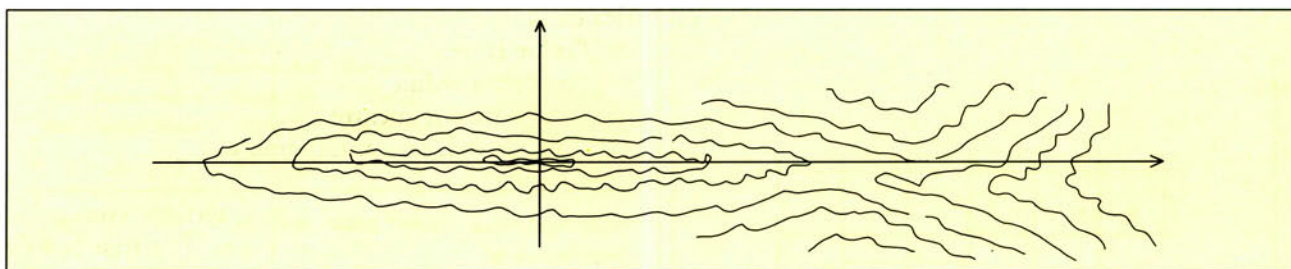


Fig. 22: Corbes de nivell originals

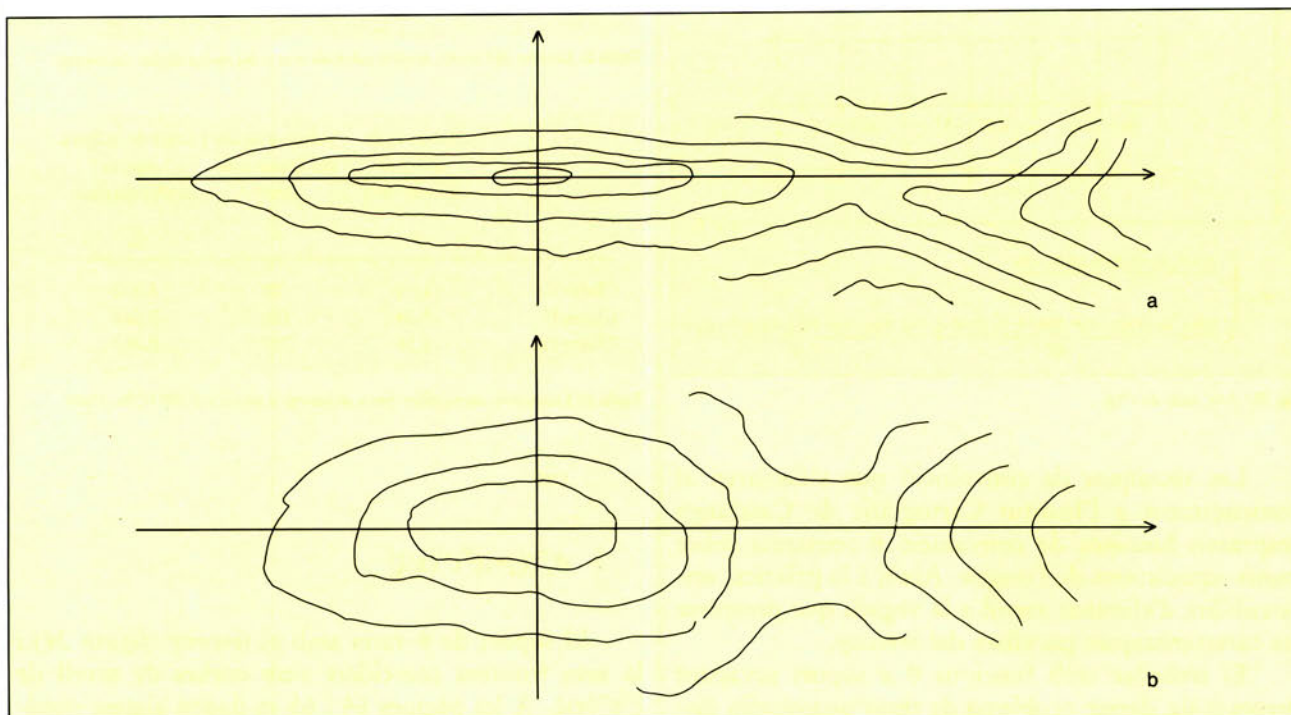
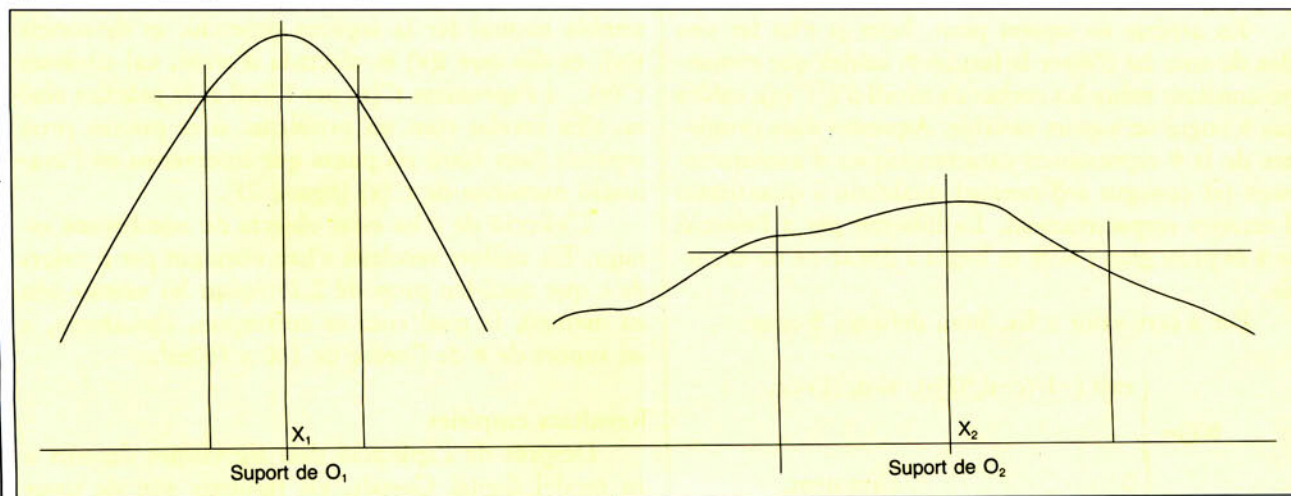
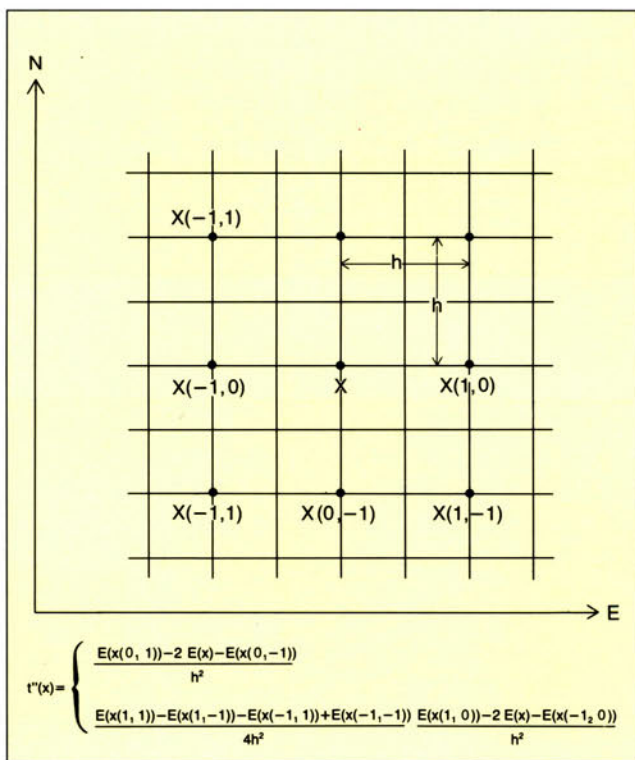


Fig. 23: Suavitització de les corbes originals. a) Correcta; b) Incorrecta

Fig. 24: Diferents suports per a les funcions regularitzants



Fig. 25: Avaluació de $t''(x)$

Les tècniques de convolució que s'assajaren al començament a l'Institut Cartogràfic de Catalunya empraven funcions de convolució θ constants sobre punts equidistants de l'origen. Això, a la pràctica, impossibilita d'eliminar soroll a la vegada que preservar les característiques peculiars del terreny.

El treballar amb funcions θ a suport invariant presenta un darrer problema de tipus quantitatiu distint dels problemes més aviat qualitius descrits anteriorment. Es tracta de la intensitat del tractament, és a dir, la grandària del suport de θ , la fixació de la qual hauria de dependre també de les peculiaritats del terreny (figura 24).

En arribar en aquest punt, hom ja s'ha fet una idea de com ha d'ésser la funció θ : caldrà que romangui constant sobre les corbes de nivell d' $\xi^T t''(x)$; caldrà que θ tingui un suport variable. Aquestes dues propietats de la θ representen característiques d'autoajustament (el conegut *self-tuning*) qualitatiu i quantitatiu al terreny respectivament. La llibertat per a l'elecció de θ és prou gran i hom es limita a donar-ne un exemple.

Per a cert valor c fix, hom defineix θ com:

$$\theta(\xi) = \begin{cases} \exp(-1/(c-d_x^2(\xi))), & \text{si } d_x^2(\xi) < c, \\ 0, & \text{altrament,} \end{cases}$$

	Valors reals sobre el terreny (m)		Valors a escala del fotograma (μm)		Factor de millora respecte model original		Figura associada
	μ	σ	μ	σ	f_μ	f_σ	
Model digital original	0,9997	2,0836	45,4	94,7	-	-	35
Amb eliminació de discontinuïtats	0,9970	2,0375	45,3	92,6	1,002	1,023	36
Amb eliminació de discontinuïtats i filtratge	1,0938	1,73	49,7	78,6	0,914	1,202	38

Taula 2: Resultat de l'estudi empíric sobre els errors del model digital del terreny

	Valors reals sobre el terreny (m)	Valors a escala del fotograma (μm)	Factor de millora respecte model original
	σ	σ	f_σ
Classe I	1,52	70	1,352
Classe II	3,04	138	0,686
Classe III	4,56	207	0,457

Taula 3: Estàndards cartogràfics per a altimetria a escala 1:5 000 (CSS, 1985)

on

$$d_x^2(\xi) = |\xi^T t''(x) \xi|$$

El suport de θ varia amb el terreny (figura 24) i la seva frontera coincideix amb corbes de nivell de $\xi^T t''(x) \xi$. A les pàgines 64 i 65 es donen alguns resultats numèrics i gràfics del rendiment d'aquesta θ .

A part de l'elecció de θ , encara queden qüestions pendents de resoldre: l'avaluació de $t''(x)$ i l'elecció de c .

Sembla clar que cal aproximar $t''(x)$ per $\bar{t}''(x)$ i, a la vegada, aproximar $\bar{t}''(x)$ numèricament. I també sembla natural fer la següent objecció: es desconeix $t(x)$, es diu que $\bar{t}(x)$ és afectada d'error, cal conèixer $t''(x)$... i s'aproxima $t''(x)$ per $\bar{t}''(x)$! A la pràctica això no s'ha revelat com un problema si es prenen prou separats (uns 40m) els punts que intervenen en l'avaluació numèrica de $t''(x)$ (figura 25).

L'elecció de c ha estat objecte de nombrosos assaigs. Els millors resultats s'han obtingut per a valors de c que oscil·len prop de 2,25 (quan les unitats són en metres), la qual cosa es correspon, típicament, a un suport de θ de l'ordre de 160 x 160m².

Resultats empírics

Després de l'aplicació dels algorismes descrits a un model digital Gestalt, els resultats són de tipus

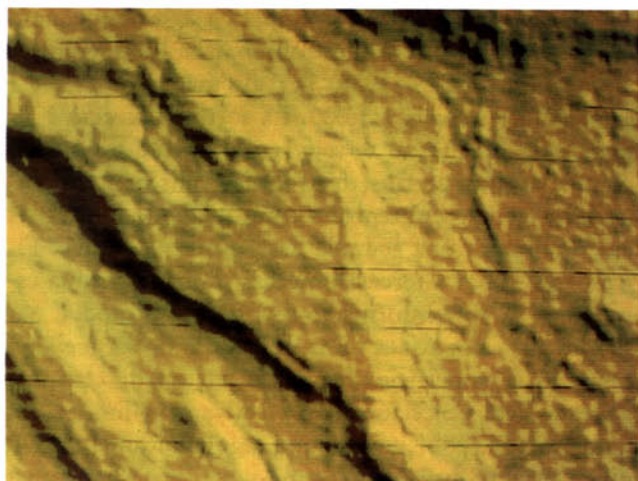


Foto 9: Aspectes del relleu un cop eliminades les discontinuïtats

(ICC)

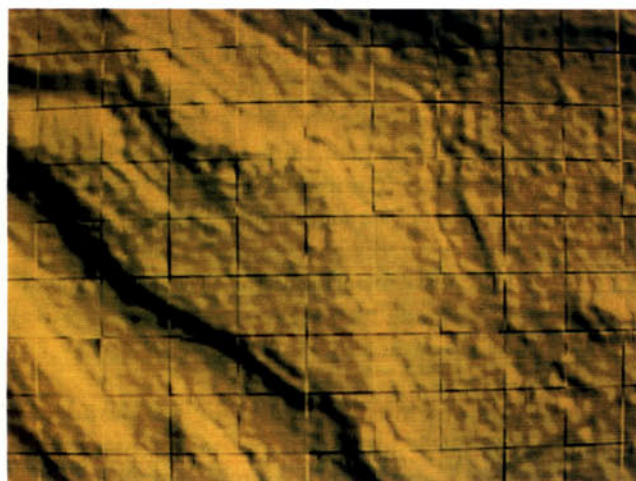


Foto 10: Aspectes del relleu abans d'eliminar les discontinuïtats

(ICC)

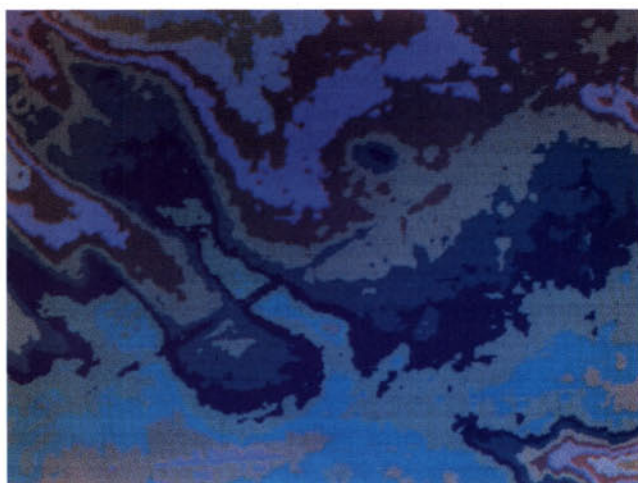


Foto 11: Mapa hipsogràfic confeccionat a partir del MDT Gestalt un cop aplicats tots els tractaments numèrics

(ICC)



Foto 12: Mapa hipsogràfic confeccionat a partir del MDT Gestalt original

(ICC)

quantitatiu (mitjana μ i desviació estàndard σ de l'error) i de tipus qualitatiu (imatges i corbes de nivell obtingudes dels diferents models digitals). L'objecte dels resultats dels tests és justificar, de forma empírica, els algorismes de tractament numèric emprats. En altres paraules, l'objectiu dels tests no és jutjar la qualitat global de l'MDT Gestalt, sinó més aviat jutjar els algorismes descrits. Tanmateix, la comparació dels valors de σ obtinguts (*taula 2*) i de les toleràncies (*taula 3*) són prou eloqüents.

La zona de test escollida és la de Sant Guim de Freixenet, d'aproximadament 2,5 x 2,5 km², amb una diferència màxima d'altituds d'uns 173 m, i situada entre les comarques de la Segarra i de l'Anoia.

El model Gestalt s'ha comparat amb un model de referència que hom suposa molt més acurat, compilat en un aparell restituïdor fotogramètric analític (Wild, BC-1); consisteix en una xarxa regular equiespaiada de 15 m de distància entre punts que té per direccions principals les X i Y de la quadrícula UTM. D'aquesta

xarxa han estat eliminats els punts situats en zones d'arbreda on la determinació de la coordenada Z no ofereix garanties.

Per comparar hom entén compte l'estudi de les diferències de la coordenada Z la qual en els mateixos punts del model Gestalt i del model de referència, respectivament. La diferència, per a cada punt, és l'error del model Gestalt i es calculen la mitjana i la desviació estàndard d'aquest error. Aquesta comparació s'ha fet després d'aplicar cada algorisme de tractament (files 2 i 3 de la *taula 2*). Finalment es comparen els resultats (columna factor de millora) amb els resultats pel model Gestalt original (fila 1 de la mateixa taula). No menys rellevants són les diferents fotografies i figures que permeten una avaluació qualitativa dels tractaments.

Hom pot concloure, d'un punt de vista global, (quantitatiu i qualitatiu) que el tractament numèric produeix una millora significativa de les dades del model original. Si bé d'un punt de vista estrictament quantitatiu les úniques variacions significatives aparei-

xen en aplicar el filtratge per convolució adaptativa (factor de millora 1.2), els aspectes qualitatius del model (l'estètica si es vol) milloren de forma espectacular sense que μ i σ se'n ressentixin.

Aquest és el cas quan hom elimina les discontinuïtats entre *patches* (comparant les fotos 9 i 10) sense variació significativa de μ i σ . Finalment, una altra comparació molt interessant s'estableix entre les fotos 11 i 12, a les quals es pot apreciar l'efecte del tractament de reducció i de filtratge (convolució adaptativa) sobre les corbes de nivell.

Potencial i limitacions del model digital Gestalt

El GPM-IV és un aparell restituïdor fotogramètric en la via de la futura fotogrametria digital. Fins i tot se'l pot considerar com un precursor dels restituïdors digitals. El GPM-IV incorpora, d'un punt de vista fotogramètrico-tecnològic, les característiques essencials dels futurs restituïdors digitals: càmeres digitals i estimació de punt per correlació (GRÜN, 1986).

D'altra banda, el GPM-IV té el problema que el desenvolupament de les tècniques de correlació d'imatges han trobat en intentar automatitzar la restitució fotogramètrica: pèrdua de la intel·ligència present en els procediments clàssics per causa de la intervenció més passiva de l'operador. Els altres problemes són, en bona part, conseqüència d'aquesta manca d'intel·ligència: pèrdua de tota la informació quan la correlació no ha estat possible; incapacitat d'adaptar-se a les característiques singulars del terreny allà on precisament caldria una restitució més fidel; cotes reals en lloc de cotes topogràfiques; etc. I si ara mateix no és així és només a causa dels recents avanços en el camp de la correlació (des de models matemàtics més sofisticats fins a *hardware* més potent).

És important de destacar que cap producte fotogramètric no ha estat tan intensivament examinat i sotmès a control a l'Institut Cartogràfic de Catalunya com el model Gestalt. El resultat és que no només en coneixem les limitacions sinó també el potencial. De cap altre producte fotogramètric, no es pot predir-se'n tan bé i de forma tan realista el comportament. Això ha permès la seva aplicació, en un termini molt breu de temps i amb molt bons resultats, a la rectificació digital d'imatges, per posar un exemple.

La primera objecció al model Gestalt és que, amb un vol a escala 1:22 000 es sobrepassen les toleràncies altimètriques (CSS, 1985) per als mapes de classe I ($\sigma=1,52$ m) a escala 1:5 000. La segona objecció és la manca de fidelitat al terreny en zones de topografia complexa (llits de rius, fons de les valls, cingles, enyorjats, etc...). Cal tenir en compte que la fidelitat és essencial per a una acurada descripció qualitativa. Finalment, i com a tercera objecció, hi ha la pèrdua esporàdica de tota informació (pel que fa al model, naturalment) a les zones on la correlació no ha reeixit a restituir la superfície del sòl. Que quedi clar que aquestes tres objeccions són efectivament limitacions i no només problemes ja que algorímicament (és a dir, sense reobservar o remesurar) no s'ha trobat forma de superar-les. Val a dir també que aquestes limitacions, ho són per a escales majors en general. De fet, i com és evident per a tothom, els problemes s'agreugen amb l'augment de l'escala.

Del punt de vista del potencial, i deixant de banda consideracions de palesa importància, com són l'alta productivitat (ALBERICH, 1985) o el manteniment del sistema, l'alta densitat de punts al model Gestalt permet la seva utilització sense cap restricció per part de tots els usuaris per als qui la precisió global del model ($\sigma=85 \mu\text{m}$ a l'escala de la imatge) sigui suficient.

A l'Institut Cartogràfic de Catalunya, per exemple, el model Gestalt proveirà la base de dades cartogràfiques de Catalunya, vàlida per a cartografia a escales menors que la 1:5 000. Aplicacions en curs a curt termini són: la rectificació digital d'imatges a escales menors o iguals que la 1:22 000, el disseny assistit de les triangulacions geodèsiques per a la futura xarxa de quart ordre de Catalunya, els mapes topogràfics a escala 1:25 000, encara pendents de confecció en la seva major part, i la correcció geomètrica de la imatgeria satèl·lit. Altres aplicacions són possibles en el terreny de la geofísica a partir de la immensa quantitat d'informació continguda a l'MDT Gestalt.

Data de recepció de l'original: 05.86

Joan Torres
Ismael Colomina
Llicenciats en Ciències Matemàtiques
Institut Cartogràfic de Catalunya

BIBLIOGRAFIA

- GRÜN, A. 1986: *Photogrammetrie-Potential und Implikationen eines modernen Messverfahrens, Vermessung. Photogrammetrie, Kulturtechnik*, Nr. 1/1986.
- ALBERICH, Ll., FERNÁNDEZ, J. 1984: *Confecció automàtica de ortofotografias*, Mundo Electrónico, núm. 152, juny 1984.
- ALBERICH, Ll. 1985: *Orthophotomapping with an automatic system at 1:5 000 map scale. Proceedings of the "American Society of Photogram-*

- metry and the American Congress on Surveying and Mapping Convention*, Washington, D.C., Vol. 1, pàgs. 222-228.
- CSS, 1985: *The Committee for Specifications and Standards (Professional Practice Divisions, the American Society of Photogrammetry. Accuracy Specification for Large-Scale Line Maps*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 51, núm. 2, febrer 1985.