

Projecte Final de Carrera

GENERACIÓ EFICIENT D'INTERFEROGRAMES DIFERENCIALS MITJANÇANT UN DEM EXTERN



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



**ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA DE TELECOMUNICACIÓ DE
BARCELONA**



**DEPARTAMENT DE TEORIA DEL SENYAL
I COMUNICACIONS**

Autor:

Dani Monells Miralles

Director:

Dr. Jordi J. Mallorquí Franquet

AGRAÏMENTS

Ha arribat l'hora d'enfrontar-me cara a cara amb aquestes línies i se'm fa una muntanya. Costa molt arribar al final d'una etapa de la vida, mirar enrere, i fer un recull en poques paraules de totes les petites i grans coses que t'han permès aconseguir-ho. El que em conegui de debò sap que per mi és especialment difícil, però intentaré fer-ho el millor possible.

Començant pel començament (com ha de ser) ho he d'agrair tot a la meva família. Dono totes les gràcies del món als meus pares pel suport, la paciència i la confiança que han permès fer-me arribar on sóc ara. Que estigui aquí és tant mèrit vostre com meu, i me'n sento molt orgullós. També ho vull agrair a la meva germana, que ha pesar de ser bastant més jove que jo i molt diferent en caràcter, hi comparteixo un vincle molt especial. També a la meva àvia, una de les millors persones que han existit mai, a qui m'estimo amb tot el cor (com trobo a faltar el menjar de casa entre setmana ...). No puc oblidar-me tampoc dels meus parents més pròxims. Moltes gràcies tant a la banda de Molló com a la de Badalona, aquesta petita família en expansió que som fa que vinguin ganes de seguir endavant. Gràcies a tots!

Un paràgraf apart es mereix la meva xicoteta, la Mariona, una persona que m'ha acompanyat gairebé al llarg de tot el temps que porto en aquesta carrera. Per les més desafortunades circumstàncies, aquests últims anys han estat els més durs de la teva vida, però has seguit endavant amb el cap ben alt i no t'ha pogut aturar res ni ningú. Jo no hagués pogut continuar amb la fermesa que ho has fet tu. I malgrat tots els problemes que t'envolten, sempre has estat allà per donar-me una empenteta quan calia. Per mi ets un exemple de força de voluntat i sóc realment feliç de tenir-te al meu costat. Aquesta victòria també és teva!

Moltes gràcies també a la família de la Mariona. A l'Esther, l'Anna i en Josep, que des de que ens varem conèixer he estat com de la família i m'he sentit un més de vosaltres. També vull donar gràcies a en Josep Capdevila pare. Malgrat el poc temps que varem compartir en vaig tenir suficient per copsar la magnitud de la teva persona. Per nosaltres sempre seràs un exemple a seguir.

Tot seguit vull donar les gràcies a totes les persones que han estat al meu voltant durant el curs d'aquest projecte. En primer lloc al meu tutor, en Jordi, per donar-me la oportunitat de entrar en un món tant fascinant com és el de la interferometria radar. Gràcies per estar sempre disposat a resoldre qualsevol dubte (ja se que sóc molt pesat), i per anar guiant els meus passos per arribar finalment a la meta. També vull agrair el suport donat per tots els companys de departament, especialment al Sergi, al Pablo, al David i al Paco. Costa molt trobar persones tant intel·ligents i alhora tant properes. Sense el vostre suport no ho hagués aconseguit mai. Tampoc em vull oblidar del Rubén, el meu company projectista. No et perdonaré mai que acabessis abans que jo, però em compensa de tres les bones estones que

hem passat i l'oportunitat de treballar amb una persona tant brillant com tu. Gràcies tio! També vull recordar altres persones que han passat pel departament, sobretot a l'Àlicia i a l'Alba, dues persones d'una qualitat tant humana com intel·lectual brutals. Treballar amb gent com vosaltres és realment inspirador. Moltíssimes gràcies a tots!

Vull recordar també a tots els meus amics. No faré cap llista de noms per no posar ningú per davant i per no gastar mitja selva amazònica en paper (Tot i que això la faria més coherent..... bé, deixem-ho córrer). Dono mil gràcies als companys de la colla, també als del teatre i vaja, a tot Sant Joan en general. Tots plegats m'heu donat el contrapunt necessari a l'estudi i heu fet que aquesta etapa de la meua vida fos molt més plena. Em feu sentir orgullós de ser santjoaní! També a tots els companys de la universitat. Em sento molt afortunat d'haver-los conegut. Per mi va ser un començament molt difícil i francament, no me'n hagués sortit sense vosaltres al meu costat. Ja se que cada cop m'és més difícil de trobar-nos (que voleu, les meves arrels són allà dalt, a les muntanyes...) però sereu part de mi per sempre!

He estat molt general i malgrat tot segur que m'estic deixant algú. Sempre he estat molt despistat (o almenys això diuen les males llengües). Demano perdó a tots els que d'alguna manera no s'hagin identificat amb cap dels anteriors i mereixin ser-hi també. A tots vosaltres, moltes gràcies!

Finalment, un agraïment previ a tot lector que li pugui caure a les mans aquest document. Siguem francs, això no serà un *bestseller* i per tant seràs de la poca gent que li farà una ullada. Espero que almenys t'ajudi a resoldre alguns dels problemes que sens dubte estàs tenint. Només per això ja haurà valgut la pena.

*Mai no consideris l'estudi com una obligació,
sinó com una oportunitat per penetrar
en el bell i meravellós món del saber.*

Albert Einstein

ÍNDEX

1	INTRODUCCIÓ	9
1.1	LA TELEDETECCIÓ	9
1.2	OBJECTIUS DEL PROJECTE	11
1.3	ESTRUCTURA DEL DOCUMENT	12
2	TEORIA BÀSICA DE LA INTERFEROMETRIA SAR	13
2.1	FONAMENTS DE SAR	13
2.1.1	<i>Geometria d'adquisició d'un sistema SAR</i>	13
2.1.2	<i>Principis del processament SAR</i>	16
2.2	INTERFEROMETRIA SAR	18
2.2.1	<i>L'interferograma</i>	19
2.3	LA COHERÈNCIA	24
2.3.1	<i>Concepte de coherència</i>	24
2.3.2	<i>Factors que degraden la coherència</i>	27
2.4	INTERFEROMETRIA DIFERENCIAL SAR	28
2.4.1	<i>Interferometria diferencial clàssica</i>	28
2.4.2	<i>Coherència diferencial</i>	30
2.4.3	<i>Interferometria diferencial avançada</i>	31
2.5	LA GEOCODIFICACIÓ	39
2.5.1	<i>Models el·lipsoidals</i>	39
2.5.2	<i>Algorisme bàsic de geocodificació</i>	39
3	LA CADENA INTERFEROMÈTRICA	41
3.1	INTRODUCCIÓ	41
3.2	ESQUEMA	42
3.3	DESCRIPCIÓ DE LA CADENA INTERFEROMÈTRICA	43
3.3.1	<i>Alineament de les imatges SLC</i>	43
3.3.2	<i>Interpolació de les imatges SLC</i>	43
3.3.3	<i>Filtratge de les imatges SLC</i>	44
3.3.4	<i>Generació dels interferogrames</i>	44
3.3.5	<i>Generació dels interferogrames diferencials</i>	44
4	ALINEAMENT FI AMB UN DEM DE REFERÈNCIA	45
4.1	INTRODUCCIÓ	45
4.2	DIAGRAMA DE L'ALGORISME	46
4.3	PAS PREVI: ALINEAMENT GRUIXUT	47
4.3.1	<i>Alineament gruixut entre sensors iguals</i>	48
4.3.2	<i>Alineament gruixut entre sensors diferents</i>	48
4.4	PRECEDENTS	49
4.4.1	<i>Alineament fi per coherència</i>	49
4.4.2	<i>Alineament fi per correlació d'amplitud</i>	49
4.5	PRINCIPIS DEL NOU ALGORISME	49
4.5.1	<i>Obtenció de la informació orbital</i>	50
4.5.2	<i>Càlcul dels offsets de subpíxel</i>	53
5	OBTENCIÓ D'UN SET D'INTERFEROGRAMES SINTÈTICS	59
5.1	INTRODUCCIÓ	59
5.2	GENERACIÓ DEL SET D'INTERFEROGRAMES SINTÈTICS	59

5.3	PRINCIPI DE LINEALITAT.....	60
5.4	COMPROVACIÓ DE LA VALIDESA DEL SET D'INTERFEROGRAMES SINTÈTICS.....	61
5.5	COMPARATIVA DE COST COMPUTACIONAL.....	66
5.6	CONCLUSIÓ.....	67
6	CORRECCIÓ ORBITAL AMB UN DEM DE REFERÈNCIA	69
6.1	INTRODUCCIÓ.....	69
6.2	CORRECCIÓ MITJANÇANT PUNTS DE CONTROL	69
6.3	OBTENCIÓ DE PUNTS DE CONTROL AUTOMÀTICS	70
6.3.1	<i>Principi de l'algorisme.....</i>	70
6.4	COMPROVACIÓ DE LA VALIDESA DELS PUNTS DE CONTROL SINTÈTICS	73
6.4.1	<i>Comprovació qualitativa</i>	73
6.4.2	<i>Comprovació quantitativa</i>	77
6.5	CONCLUSIÓ	82
7	RESULTATS EXPERIMENTALS	85
7.1	INTRODUCCIÓ.....	85
7.2	CONSIDERACIONS I REQUERIMENTS DE LES DADES.....	85
7.3	COMPARACIÓ DE LA COHERÈNCIA ENTRE L'ANTIC ALGORISME I EL NOU ALGORISME D'ALINEAMENT.....	86
7.3.1	<i>El Bages: Càlcul de la coherència diferencial</i>	86
7.3.2	<i>Gardanne: Càlcul de la coherència diferencial</i>	90
7.4	CÀLCUL DE LA SUBSIDÈNCIA.....	94
8	CONCLUSIONS I LÍNIES FUTURES.....	105
	ANNEX A: DESCRIPCIÓ DE LES RUTINES GENERADES	107
	ANNEX B: DADES REFERENTS A L'ESTUDI DE SÚRIA	115
	REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES.....	127

1 INTRODUCCIÓ

1.1 La Teledetecció

En aquestes últimes dècades s'ha donat molta rellevància a l'estudi de la Terra i dels fenòmens que s'hi produeixen, com els atmosfèrics o els sísmics, per citar dos exemples. Aquesta importància és deguda a l'impacte que poden tenir sobre l'ésser humà i el seu entorn quan es produeixen a gran escala, com poden ser els huracans o els terratrèmols. Així doncs, tècniques que puguin preveure o fins i tot analitzar les possibles conseqüències d'aquests fenòmens resulten molt útils a l'hora de prevenir en la mesura del possible les catàstrofes humanes.

La tecnologia ha permès fer un gran salt en aquest sentit i han aparegut un gran nombre de mètodes per tal de realitzar aquesta monitorització. Un dels grans grups que ha aparegut i en el qual està englobat el marc d'aquest projecte rep el nom de Teledetecció (*Remote Sensing*). Com bé indica el nom, es tracta de l'observació terrestre a gran escala, ja sigui des d'un vehicle aerotransportat (avions) o des de l'espai (satèl·lits).

Dins la Teledetecció hi podem trobar infinitat de mètodes, cadascun amb la seva finalitat concreta. Aquest projecte es desenvolupa en el camp espacial, concretament en la tecnologia radar embarcada en un satèl·lit. Es tracta d'un tipus especial de sistema radar anomenat SAR (*Synthetic Aperture Radar*) que presenta unes característiques ideals pel tipus d'aplicació que es desenvoluparà al llarg d'aquest projecte.

La tècnica que s'utilitzarà s'anomena *interferometria*. Es basa en observar una escena des de dos punts de vista lleugerament diferents per tal d'obtenir informació tridimensional de la escena, de la mateixa manera que treballen els ulls humans per tenir una mesura de la profunditat. En els apartats posteriors es donarà una base de com es gestiona i processa aquesta informació.

La informació processada durant el desenvolupament dels algorismes que formen part d'aquest projecte és la procedent dels sensors SAR dels satèl·lits ERS-1, ERS-2 i ENVISAT de la Agència Espacial Europea (ESA). El satèl·lit ERS-1 és va posar en òrbita l'any 1991. Es tractava d'un satèl·lit d'òrbita polar que tenia l'objectiu d'adquirir dades radar per a una finalitat comercial. Per tal de complementar la feina que duia a terme l'ERS-1, el 1995 es va llançar l'ERS-2, un satèl·lit amb unes característiques anàlogues al seu predecessor. D'aquesta manera va començar l'anomenada *missió tàndem*, que consistia en sincronitzar les òrbites dels dos satèl·lits de tal manera que la separació temporal entre ambdós quedava reduïda a un sol dia. Això resulta molt propici en el camp de la interferometria, ja que amb una separació temporal tant petita es pot generar de forma molt òptima un dels seus productes més rellevants, els mapes digitals d'elevació del terreny (DEM).



Fig. 1.1 Imatge simulada del satèl·lit ERS-2 en òrbita

L'any 1999 el satèl·lit ERS-1 va deixar de funcionar. Un any més tard els giroscopis encarregats de mantenir la direcció de visió del satèl·lit ERS-2 van començar a tenir problemes, amb la qual cosa es feia patent la necessitat d'un relleu. Amb aquest objectiu es va posar en òrbita el satèl·lit ENVISAT (*ENVironmental SATellite*) l'any 2002. De fet era un projecte molt més ambiciós, ja que és un satèl·lit amb molta més instrumentació apart del sistema SAR, per tal de cobrir més tipus de mesures ambientals.

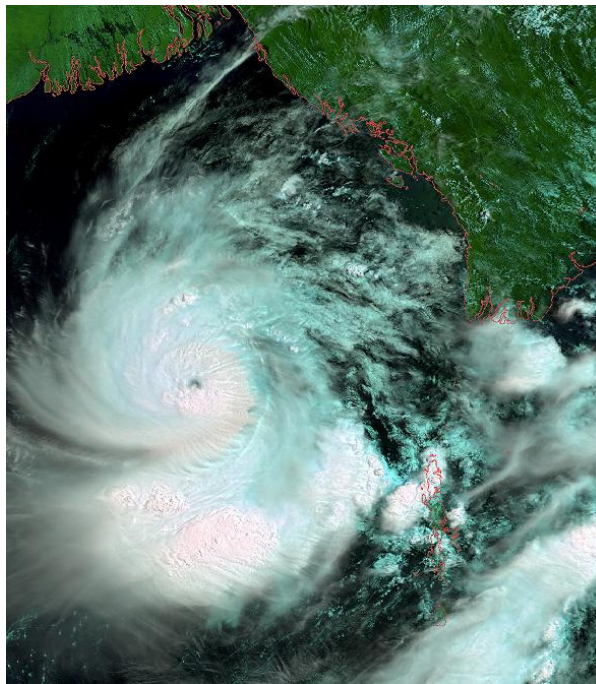


Fig. 1.1 Ciclò captat pel sensor MERIS de ENVISAT a la badia de Bengala l'1 de maig del 2008

Malgrat tot, el satèl·lit ENVISAT planteja un problema de continuïtat. Aquest problema és degut a que la seva freqüència d'operació és lleugerament diferent a la dels satèl·lits ERS. Malgrat tot, les diferències són prou petites com perquè es pugui arribar a combinar la informació i realitzar un processament conjunt amb tots la informació disponible dels tres satèl·lits. Posteriorment veurem quina implicació tenen aquestes diferències i com es du a terme aquesta combinació.

1.2 Objectius del projecte

Com s'ha dit en la introducció aquest projecte està emmarcat en el camp de la *interferometria*, una aplicació que permet tenir informació al llarg de l'eix d'observació d'una escena. La informació d'alçada s'extreu a partir del que s'anomena *interferograma*, que no és res més que una combinació de la informació d'una mateixa zona vista des de dos punts de vista diferents. De fet es pot anar més enllà, ja que el terreny no té perquè ser inamovible i pot deformar-se. Per tant es pot eliminar la component immòbil del terreny i restar només la informació de deformació. Així s'haurà creat l'anomenat *interferograma diferencial*.

La cadena de processament es divideix en dues grans parts: una que s'encarrega de generar interferogrames diferencials i l'altra de processar-los per extreure'n la informació. Aquest projecte, tal com indica el títol, planteja introduir millores en la primera part, anomenada *cadena interferomètrica*.

El sistema SAR té el seu propi sistema de referència. Per tant les dades obtingudes estan donades en aquest sistema. En diferents moments serà necessari trobar una relació entre aquest sistema de referència i un altre més pràctic, com pot ser unes coordenades geogràfiques sobre un mapa terrestre. Aquesta transformació entre sistemes rep el nom de *geocodificació*. La base algorítmica de totes les rutines desenvolupades en aquest projecte estan basades en la geocodificació, concretament en la *geocodificació inversa*, que és el pas d'un sistema de coordenades terrestre al sistema de coordenades radar. En la introducció teòrica es donarà una explicació més exhaustiva de les bases de la geocodificació.

Les millores no pretenen substituir completament els algorismes utilitzats fins el moment, sinó més aviat complementar-los. De fet supleixen les mancances que tenien els primers en certs casos, fent així el processament més robust per a qualsevol tipus d'escenari. Malgrat tot, les noves rutines permeten una millor gestió de les dades i és preferible utilitzar-les abans de les antigues, tal com es veurà.

La cadena interferomètrica tenia dos passos fins el moment completament diferenciats: Per una banda, cal alinear la informació de cada una de les parts que formen l'interferograma per tal de que la combinació sigui correcta i per altra banda, cal generar la component fixa del terreny per tal de sostreure-la de l'interferograma i així generar l'interferograma diferencial. Aquesta component que s'extreu s'anomena *interferograma sintètic*. Durant aquest projecte s'ha desenvolupat un nou mètode d'alineament que permet integrar també la generació d'interferogrames sintètics, amb la qual cosa es guanya temps de processament *a posteriori*. Més endavant se'n veuran els motius.

Un dels problemes que té la cadena interferomètrica es la manipulació humana en un dels

seus passos, concretament en la correcció orbital. Aquesta correcció necessita el que s'anomena *punts de control*, que no són res més que una relació entre la imatge que proporciona el radar amb una referència terrestre estàndard. Fins el moment aquest pas es feia de forma manual, amb la qual cosa podia donar lloc a errors humans en el procés. Així doncs s'ha generat un mètode per tal de trobar aquests punts de control de manera automàtica, reduint així de forma considerable el possible error introduït.

1.3 Estructura del document

Aquest document es divideix en vuit capítols. En el segon capítol es donarà una base teòrica per tal de situar-nos en el marc del projecte, sobretot en la geometria del sistema radar i la relació existent amb la geometria terrestre, que juga un paper molt important en els algorismes dissenyats.

El capítol tres fa una descripció general de la cadena interferomètrica, per tal de situar on es fan les millores i la implicació que tenen. Es donarà també una breu explicació de les parts que no tenen rellevància en aquest projecte per tenir una clara visió dels objectius finals.

El capítol quatre està centrat en el nou algorisme d'alineament, que té una filosofia algorísmica completament diferent als algorismes existents fins el moment. Aquí se'n farà una descripció exhaustiva i es compararà amb els algorismes precedents.

El capítol cinc se centra en el nou sistema d'obtenció d'interferogrames sintètics. Malgrat estar integrat en l'algorisme d'alineament mereix un esment apart, ja que les dades obtingudes es processaran de forma diferent. També se'n farà un estudi de viabilitat, ja que el seu ús dona lloc a situacions presumptament desfavorables.

El capítol sis tracta del nou algorisme per obtenir punts de control automàtics. En aquest capítol es descriurà la problemàtica de la obtenció manual i es descriurà l'algorisme, tot indicant-ne les limitacions d'ús. Tot seguit es farà una sèrie de comprovacions de la validesa del nou mètode.

En el capítol set es presentaran els resultats experimentals. Aquests resultats estan destinats a observar les millores que s'observen amb la aplicació dels nous algorismes, sobretot en el cas del nou mètode d'alineament.

Finalment, el capítol vuit s'exposaran les conclusions de la introducció de les millores, així com les línies futures d'investigació.

2 TEORIA BÀSICA DE LA INTERFEROMETRIA SAR

2.1 Fonaments de SAR

Un SAR (Synthetic Aperture Radar) és un tipus especial de sistema radar, que es basa en l'emissió d'un pols electromagnètic sobre un blanc (en el nostre cas, el terreny en estudi) i en recollir la senyal reflectida. Aquest pols radar és coherent, és a dir, conserva la informació de la fase a més de la d'amplitud, la qual cosa és útil per a moltes aplicacions, com és el cas de la interferometria. A més, en el cas concret que ens ocupa, el SAR orbital, té certes característiques que el fan molt pràctic:

- a) Permet la monitorització de grans extensions de terreny, tot i que normalment es perd resolució respecte al SAR aero-transportat.
- b) Com que la freqüència de treball se situa en les microones és molt més insensible a les condicions meteorològiques i a les condicions d'il·luminació que un sistema òptic.

La seva característica especial és el fet que aprofita que el radar, al estar embarcat en un satèl·lit o en un avió, segueix una trajectòria i, d'aquesta manera es pot simular una agrupació d'antenes prenent cada sub-antena com una posició orbital diferent. Combinant coherentment les senyals reflectides de totes les posicions es pot obtenir una imatge amb molta més resolució que les diferents imatges de partida.

Per a la realització dels resultats experimentals inclosos en aquest projecte s'ha usat informació extreta dels sistemes SAR embarcats en els satèl·lits ERS-1, ERS-2 i ENVISAT de la Agència Espacial Europea (ESA).

2.1.1 Geometria d'adquisició d'un sistema SAR

Per a tenir una fàcil comprensió dels algorismes desenvolupats al llarg d'aquest projecte, cal tenir clar com adquireix les dades el sistema orbital SAR.

El mètode d'adquisició de dades utilitzat en aquest sistema rep el nom de *Strip Mode* [Curlander'91]. Es caracteritza pel fet que l'antena del radar apunta a una direcció fixa respecte a la trajectòria del satèl·lit. En tenim un exemple gràfic a continuació:

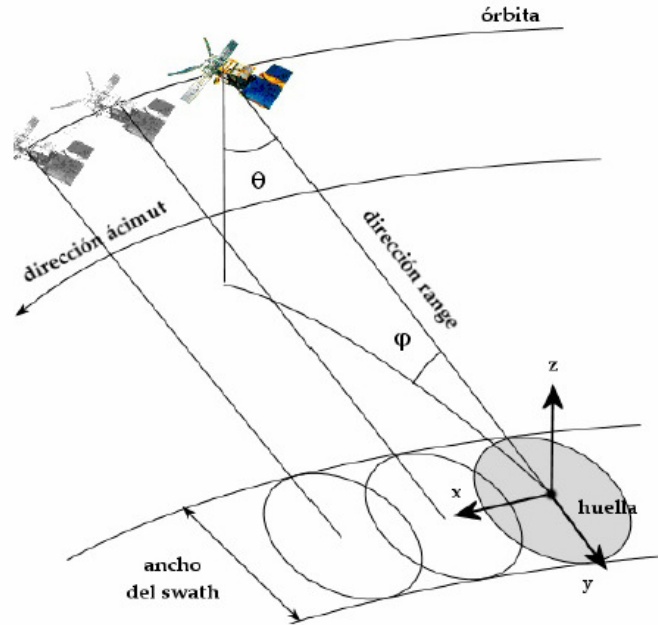


Fig. 2.1 Geometria Strip-Mode d'un sistema SAR orbital

Seguint l'esquema geomètric de la figura 2.1, el radar va emetent polsos sobre la superfície terrestre a una freqüència marcada per la PRF (*Pulse Repetition Frequency*), i va recollint els seus "ecos" mentre el satèl·lit avança en la seva trajectòria. El fet d'il·luminar lateralment és per desfer l'ambigüitat dreta-esquerra, ja que el radar pren mesures de distància i si apuntés de forma zenital no podria discernir de quin costat és la informació que li arriba.

Des del punt de vista del radar, s'utilitza com a sistema de coordenades el mateix sensor, ja que les imatges que s'obtenen estan projectades sobre el pla d'incidència dels polsos radar. Aquest pla rep el nom de *slant-range*. Així doncs, l'angle sobre la vertical d'aquest pla coincideix amb l'angle d'incidència del pols electromagnètic respecte la vertical, també anomenat angle *off-nadir* (θ).

Prenent com a origen el satèl·lit, es poden definir dos eixos principals per definir el pla *slant-range*:

- a) La direcció de la trajectòria del satèl·lit, anomenada *azimuth*.
- b) La direcció en la qual es propaga el pols radar, anomenada *range*.

Els polsos electromagnètics emesos es reflecteixen sobre l'àrea de terreny il·luminat, marcada pel *Swath*, els quals retornen cap al mateix sensor i són mostrejats. D'aquesta manera s'obté una línia de la imatge crua, anomenada *Raw data*. Com ja s'ha dit abans, es pot combinar de forma coherent diferents línies de la *Raw data* per obtenir una línia amb molta més resolució, que formarà part de la imatge anomenada *Single Look Complex (SLC)*, punt de partida del processament interferomètric. En apartats posteriors s'explicarà amb més detall el pas de *Raw Data* a *SLC*.

Així doncs, el sensor va emetent polsos electromagnètics segons la PRF. D'aquesta manera, cada $1/PRF$ segons s'obté una línia de la imatge, formada per mostres preses cada

$1/f_m$ segons (on f_m és la freqüència de mostreig dels polsos reflectits). Des d'un altre punt de vista, cada línia representa una posició del satèl·lit en la seva trajectòria i cada mostra un instant de la senyal reflectida. El tractament matricial de les dades no deixa de ser una aproximació, ja que en teoria la posició del satèl·lit entre la emissió i la recepció del pols no és exactament la mateixa, però el fet que la velocitat dels escombrats en *range* (velocitat de la llum) es diversos ordres de magnitud més gran que en *azimuth* (velocitat del satèl·lit) permet aquest tractament.

Degut a la geometria d'adquisició, la imatge està projectada en el pla *slant-range*, fent referència a un terreny situat sobre la superfície terrestre, també anomenada pla *ground-range*. Com es pot veure en la figura 2.1, els eixos de coordenades en *ground-range* venen donats per:

- a) **X**: ens marca la direcció de la trajectòria del *Swath*.
- b) **Y**: direcció perpendicular a X sobre el terreny.
- c) **Z**: Direcció perpendicular a la superfície terrestre.

Com es pot observar en la figura 2.2, la mètode d'adquisició de les imatges és molt diferent que en un sistema òptic:

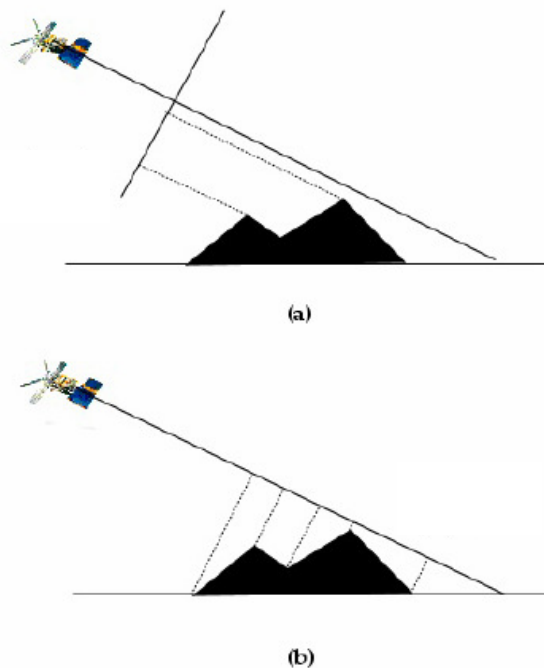


Fig. 2.2 (a) Pla de projecció d'un sensor òptic i (b) pla de projecció d'un sensor radar

El fet que es projecti la imatge en el pla *slant-range* provoca certs efectes de distorsió en la imatge [Curlander '91]:

- a) **Foreshortening**: Quan hi ha un pendent encarat al radar, aquest queda comprimit al projectar-se sobre el pla *slant-range*. L'efecte és més pronunciat quan l'angle del pendent és més pròxim a l'angle d'incidència θ . En el cas extrem, quan l'angle del pendent es igual a θ , aquest queda comprimit en un punt.
- b) **Layover**: Es dona si l'angle del pendent encarat al radar arriba a ser més gran

que θ . En aquest cas, els punts més elevats del pendent es capten abans que els punts inferiors. Això provoca que la imatge quedi desordenada respecte a la realitat.

c) **Shadowing:** Quan un pendent no encarat al radar té una inclinació superior a l'angle d'incidència sobre la horitzontal (φ), fa que part del terreny no quedi il·luminat pel pols radar (zona d'ombra), amb la qual cosa no es té informació de la reflectivitat d'aquesta zona.

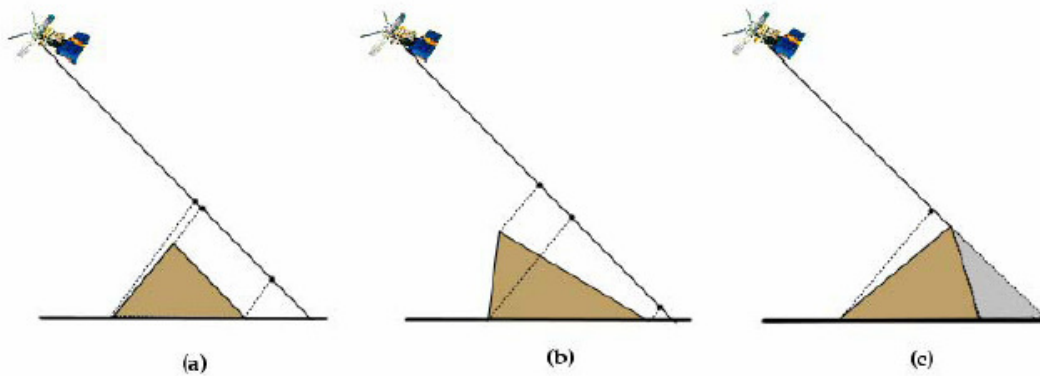


Fig. 2.3 Efectes de distorsió de la imatge radar: (a) Foreshortening, (b) Layover i (c) Shadowing

2.1.2 Principis del processament SAR

El punt de partida per obtenir imatges aptes pel nostre processament són les dades que obtenen els satèl·lits, anomenades *Raw Data*. El mètode pel qual s'obtenen aquestes imatges s'anomena RAR (Real Aperture Radar). Com s'ha comentat anteriorment, una imatge de *Raw data* es pot tractar matricialment, ja que les freqüències dels escombrats en les dues dimensions (*range* i *azimuth*) són diferents en diversos ordres de magnitud. En la dimensió *azimuth* es tracta de la freqüència de repetició de polsos (PRF), que ens marcarà l'equidistància entre les línies de la matriu *Raw Data*. Pel que fa la dimensió *range*, tenim la freqüència de mostreig (f_m) que donarà la equidistància entre les mostres.

Per fer-nos una idea de les prestacions d'aquestes imatges podem calcular el terme de "resolució màxima", que es defineix com la mínima separació entre dos blancs perquè puguin ser detectats individualment. En la direcció *range*, la definició de resolució ve donada per la següent expressió:

$$\Delta r = \frac{c \cdot \tau_p}{2} \quad (2.1)$$

Donat que c fa referència a la velocitat de la llum, tenim que la resolució en la direcció *range* depèn exclusivament de la duració del pols electromagnètic (τ_p), directament relacionat amb l'amplada de banda. En la direcció *azimuth* tenim que la resolució ve donada per:

$$\Delta x = \frac{R \cdot \lambda}{L} \quad (2.2)$$

En aquest cas, R fa referència a la distància entre el satèl·lit i el blanc, λ a la longitud d'ona i L és la longitud física de l'antena en la direcció de vol. Donat que R i λ són paràmetres

intrínsecs dels sistema, podem dir que la resolució ens depèn fonamentalment de la mida de l'antena.

Si realitzem els càlculs concrets pels paràmetres de ERS i ENVISAT, obtindrem resolucions al voltant dels 5 km en les dues direccions. Això resulta molt pobre per l'aplicació que li volem donar a les imatges (de l'ordre de pocs metres), i per tant cal processar les imatges per tal d'aconseguir obtenir una resolució molt millor [Elachi '88].

Per millorar la resolució en la direcció *range*, n'hi hauria prou amb reduir la duració del pols, però això implicaria haver de treballar amb potències de pic molt altes per compensar la pèrdua de potència. Això és tecnològicament inviable i per tant s'ha d'optar per una altra solució. Es tracta del concepte de compressió de polsos amb un pols *chirp*. La compressió de polsos es basa en realitzar una convolució de la senyal rebuda amb el pols transmès. Tot seguit es mostra el pols *chirp* i la seva autoconvolució.

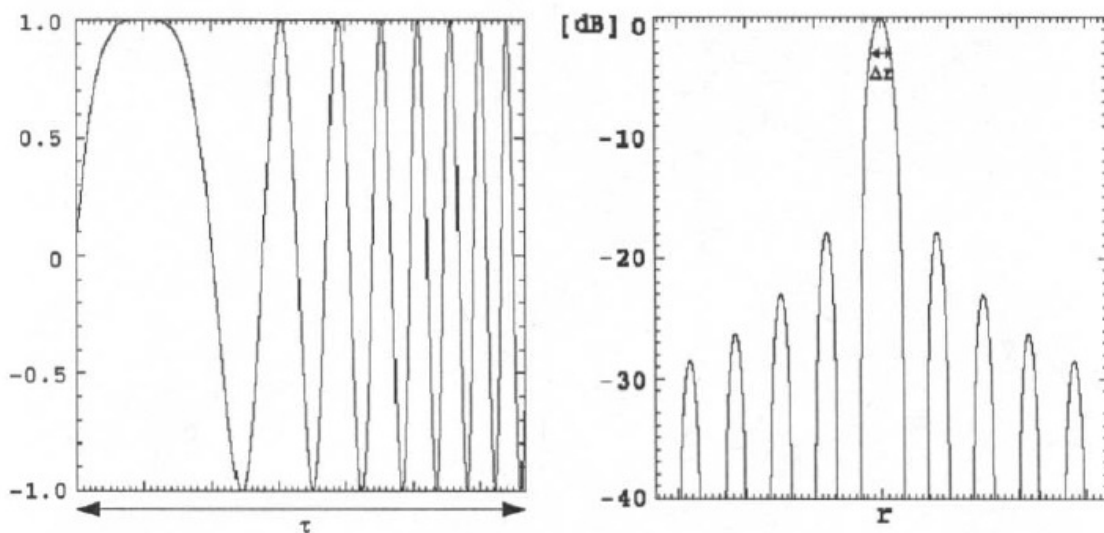


Fig. 2.4 Pols Chirp i la seva auto-convolució

Així doncs, malgrat que la duració del pols *chirp* sigui elevada, al realitzar la convolució en recepció la seva durada passa a ser $\Delta\tau_p$, que és molt menor que la duració del pols. Aplicant aquest fet a la resolució:

$$\Delta r' = \frac{c \cdot \Delta\tau_p}{2} \quad (2.3)$$

Al contrari que en la direcció *range*, en la direcció *azimuth* es basa en un post-processament de la imatge per millorar la resolució. Una possible solució seria augmentar la mida de l'antena fins a aconseguir la resolució desitjada. Malauradament, si es fa el càlcul, es té que l'antena hauria de tenir una longitud de quilòmetres, cosa totalment inviable. Així doncs, cal "sintetitzar" aquesta longitud d'alguna manera. Per això el mètode utilitzat es basa en el concepte d'agrupació d'antenes.

Si es té una antena amb unes certes característiques i es realitza una agrupació d'antenes del mateix tipus, s'obté l'equivalent a una antena amb molta més resolució. Aquest podria semblar no ser el cas, ja que només es disposa de l'antena que va embarcada en el satèl·lit. La idea és que el satèl·lit descriu una trajectòria, i d'aquesta manera es poden aprofitar diferents punts de la trajectòria que comparteixin el mateix blanc i així, combinant-los

coherentment, obtenir el mateix efecte que si realment es disposés d'una agrupació real. Aquest mètode és el que s'anomena SAR (Synthetic Aperture Radar).

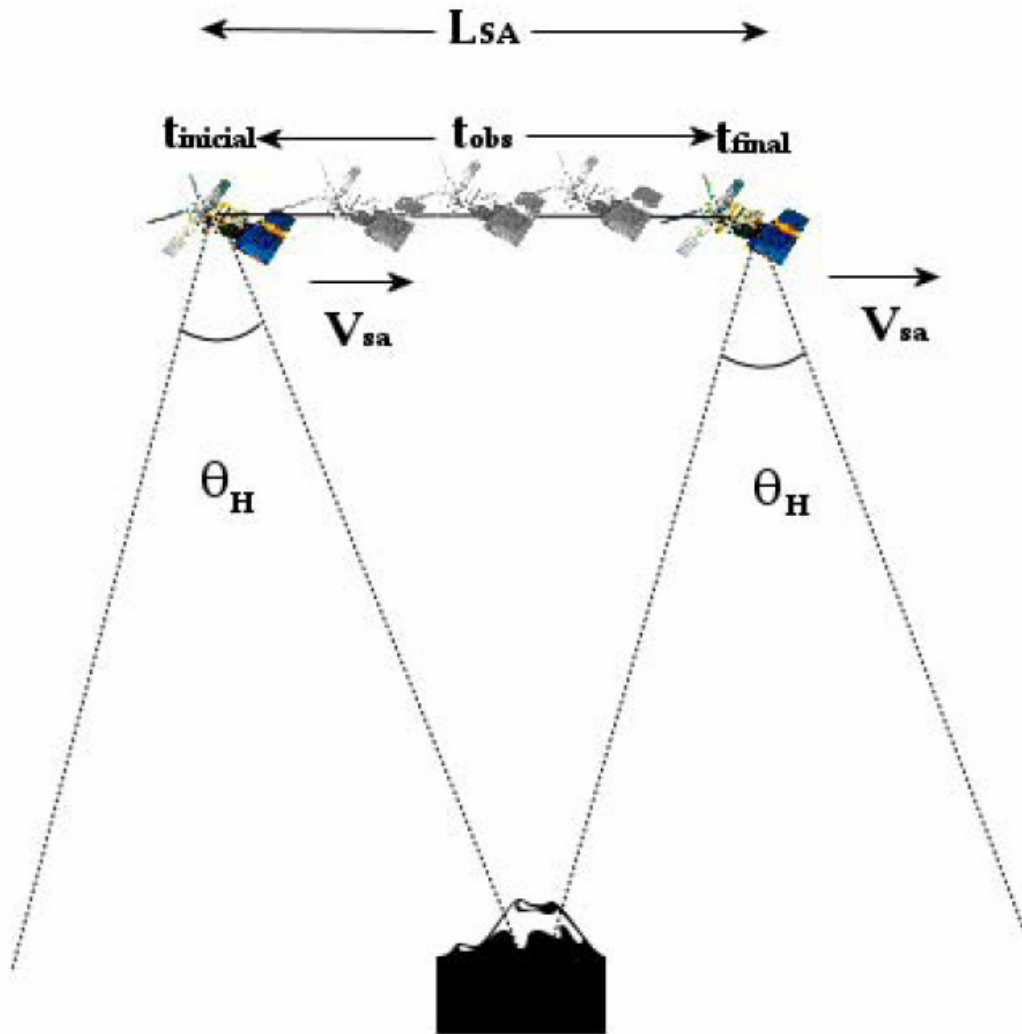


Fig. 2.5 Representació gràfica de la obertura sintètica

D'aquesta manera s'ha passat de tenir una imatge amb una resolució molt pobre (*Raw Data*) a tenir una imatge òptima per a la aplicació que se li vol donar (*SLC*). Les imatges *SLC* són el punt de partida en el càlcul interferomètric.

2.2 Interferometria SAR

Com s'ha dit anteriorment, les imatges SAR disposen tant d'informació de mòdul com de fase. La interferometria es basa en explotar la informació d'aquesta fase, concretament en la diferència de fase entre dues imatges. L'aplicació més clàssica de la interferometria SAR és la d'obtenir un mapa digital d'elevació del terreny (DEM) d'una zona a partir de dues imatges *SLC*, preses des de punts de vista lleugerament diferents. Per a obtenir aquesta informació, primer cal combinar aquestes dues imatges i obtenir un interferograma, la fase del qual serà proporcional al relleu.

2.2.1 L'interferograma

Es defineix l'interferograma amb la següent expressió:

$$I(x, y) = S_1(x, y) \cdot S_2^*(x, y) \quad (2.4)$$

En la expressió anterior, S_1 fa referència a la SLC *master*, S_2 a la SLC *slave* i I a l'interferograma resultant. Així doncs, en termes de fase, es té que la fase interferomètrica és la diferència entre la fase de la imatge *master* i la de l'*slave*:

$$\psi(x, y) = \phi_1(x, y) - \phi_2(x, y) \quad (2.5)$$

Arribats a aquest punt és interessant preguntar-se pels termes que contribueixen en la fase de cada imatge SLC:

$$\phi_{SLC} = \phi_{distància} + \phi_{dispersió} + \phi_{atmosfera} + \phi_{soroll} \quad (2.6)$$

on:

a) $\phi_{distància}$ es la fase deguda a la distància entre sensor i el blanc. Per a cada píxel de la imatge es pot definir com:

$$\phi_{distància} = -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2r \quad (2.7)$$

on r és la distància entre sensor i blanc (també anomenada distància *range*) i λ la longitud d'ona d'operació del radar.

b) $\phi_{dispersió}$ és el terme de fase degut a la reflexió sobre el terreny, que dependrà de cada cel·la de resolució.

c) $\phi_{atmosfera}$ és la fase deguda a la propagació per l'atmosfera

d) ϕ_{soroll} és el terme de fase que afegeix el propi soroll tèrmic del sistema SAR

Si s'actualitza l'expressió de la fase interferomètrica amb aquesta informació es té:

$$\psi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (r_2 - r_1) + \Delta\phi_{atmosfera} + \Delta\phi_{soroll} \quad (2.8)$$

En aquesta expressió s'ha considerat que les imatges són suficientment similars per tenir el mateix terme de dispersió, i per tant queda cancel·lat en la fase interferomètrica. Així doncs, essencialment la fase interferomètrica depèn de la diferència de camins entre el blanc i els dos sensors (*master* i *slave*) respectivament. Ara cal trobar una relació entre aquesta diferència de distàncies i el relleu del terreny.

La figura 2.6 mostra la geometria d'adquisició d'una línia en la direcció *range*. S'ha agafat

la posició del satèl·lit *master*, P_1 , com l'origen de coordenades. Es defineix la primera direcció de les coordenades seguint l'*slant-range* com a \vec{r} . \vec{n} fa referència a la direcció orthogonal a aquesta. Així doncs, segons aquestes coordenades s'obté la posició del segon satèl·lit, P_2 , com (B_r, B_n) . La distància entre els dos satèl·lits s'anomena línia de base.

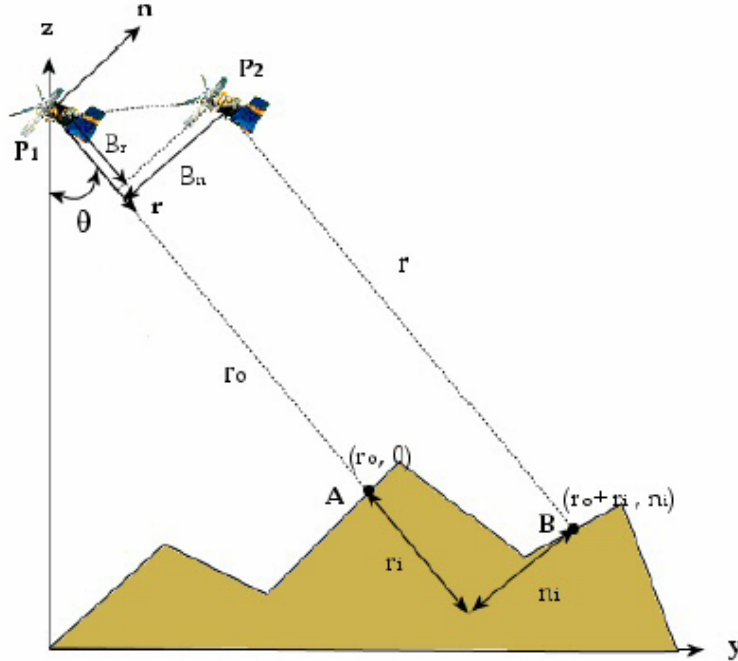


Fig. 2.6 Sistema de coordenades per a l'interpretació d'un interferograma

Per a aquest càlcul no es tindran en compte les components atmosfèriques i de soroll de la fase interferomètrica, és a dir que queda reduïda a:

$$\psi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (r_2 - r_1) = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \Delta r \quad (2.9)$$

Així doncs, es calcularà la fase interferomètrica en el punt B [Prati '94]. La distància entre B i P_2 serà:

$$r = \sqrt{(r_0 + r_i - B_r)^2 + (n_i - B_n)^2} \quad (2.10)$$

Per al càlcul de Δr es realitza una aproximació tenint en compte que la línia de base és molt menor que la altura del vol dels satèl·lits, es a dir, $B_r, B_n \ll r_0$. Així doncs, es pot trobar la diferència de distàncies entre B i A aplicant Taylor:

$$\Delta r = r_2 - r_1 = \left. \frac{\partial r}{\partial B_n} \right|_{B_r=B_r=0} \cdot B_n + \left. \frac{\partial r}{\partial B_r} \right|_{B_r=B_r=0} \cdot B_r \quad (2.11)$$

La fase interferomètrica entre els punts A i B és:

$$\Delta \psi_{AB} = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \Delta(\Delta r) \quad (2.12)$$

Per derivar Δr respecte la variació de coordenades sobre el terreny es considera que la distància entre A i B és molt menor que la distància *range*. Derivant respecte r_i y n_i es té:

$$\Delta(\Delta r) = \left. \frac{\partial \Delta r}{\partial n_i} \right|_{n_i=r_i=B_r=B_r=0} \cdot n_i + \left. \frac{\partial \Delta r}{\partial r_i} \right|_{n_i=r_i=B_r=B_r=0} \cdot r_i \quad (2.13)$$

Substituint Δr per la seva expressió:

$$\begin{aligned} \Delta(\Delta r) = & \left. \frac{\partial^2 r}{\partial B_n \partial n_i} \right|_{n_i=r_i=B_r=B_r=0} \cdot B_n \cdot n_i + \left. \frac{\partial^2 r}{\partial B_r \partial r_i} \right|_{n_i=r_i=B_r=B_r=0} \cdot B_r \cdot r_i + \\ & \left. \frac{\partial^2 r}{\partial B_n \partial r_i} \right|_{n_i=r_i=B_r=B_r=0} \cdot B_n \cdot r_i + \left. \frac{\partial^2 r}{\partial B_r \partial n_i} \right|_{n_i=r_i=B_r=B_r=0} \cdot B_r \cdot n_i \end{aligned} \quad (2.14)$$

Totes les derivades tret de la primera són nul·les, amb la qual cosa s'obté:

$$\Delta(\Delta r) = \frac{B_n \cdot n_i}{r_o} \quad (2.15)$$

Substituint en la expressió 2.12. s'arriba a que la diferència de fase entre A i B és:

$$\Delta \psi_{AB} = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \Delta(\Delta r) = \frac{4 \cdot \pi \cdot B_n \cdot n_i}{\lambda \cdot r_o} \quad (2.16)$$

L'expressió anterior mostra la fase interferomètrica entre dos punts proporcional a la distància que els separa en la dimensió perpendicular al pla *slant-range* (\vec{n}). Seria més interessant tenir aquesta fase relacionada amb una distància més pràctica, com és ara la separació entre els 2 punts en la dimensió perpendicular al terra. Per aconseguir-ho es duu a terme el que s'anomena *extracció de terra plana*.

Es coneix com a *terme de terra plana* el terme de fase interferomètrica que s'obtidria d'estudiar una zona de terreny sense topografia, és a dir, completament plana. En tenim un exemple en la figura 2.7:

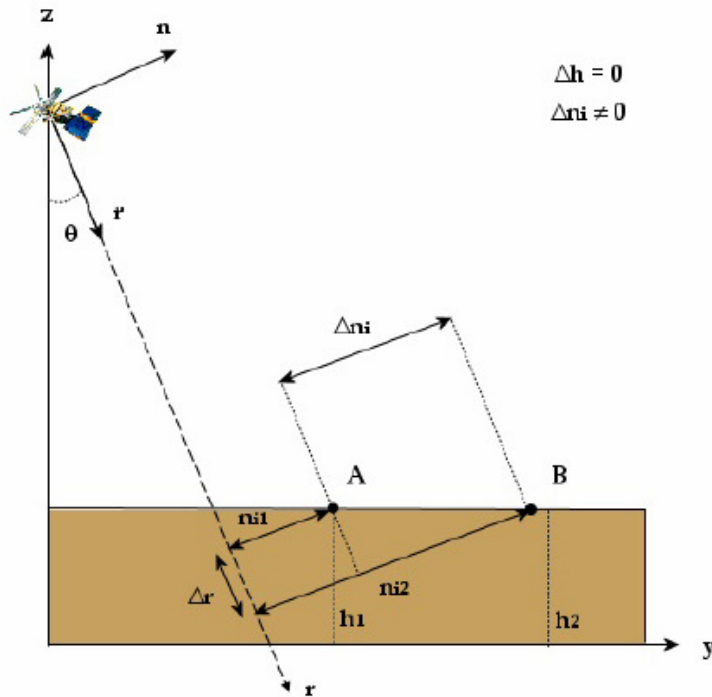


Fig. 2.7 Exemple de la geometria d'adquisició d'un terreny pla

Com es pot comprovar en la figura 2.7, malgrat que A i B estan a la mateixa alçada sobre el sòl, degut a que els termes de distància perpendicular al pla d'incidència són diferents, la fase interferomètrica també ho és.

Si es resta de la fase total el terme de terra plana s'obté únicament el terme que depèn de la topografia. Com es pot veure en la figura 2.8, és possible dividir la fase interferomètrica en la part topogràfica i la de terra plana:

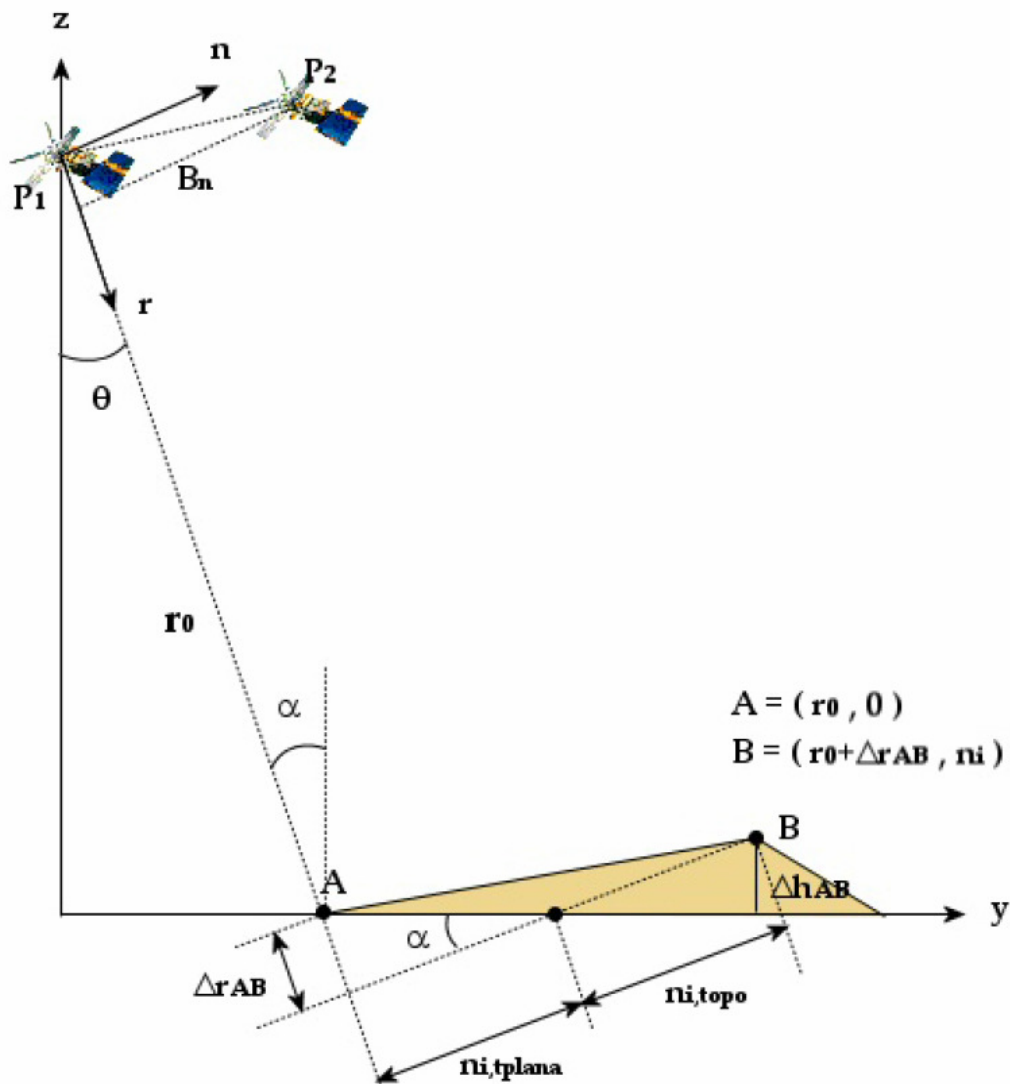


Fig. 2.8 Descomposició de la fase interferomètrica en el terme de terra plana i el terme de topografia

Tal com mostra la figura 2.8, es pot descompondre n_i en una component topogràfica i una component relacionada amb la terra plana, la primera que depèn de la diferència d'alçada sobre el terreny entre els punts A i B (Δh_{AB}) i la segona que depèn de la de la distància sobre el pla *slant-range* entre els punts A i B (Δr_{AB}). Així doncs, es té la següent expressió:

$$n_i = n_{i,plana} + n_{i,topo} = \frac{\Delta r_{AB}}{\tan \alpha} + \frac{\Delta h_{AB}}{\sin \alpha} \quad (2.17)$$

Degut a aquesta separació, si s'aplica a la expressió de la fase interferomètrica, s'obté el següent:

$$\Delta \Psi_{AB} = \Delta \Psi_{plana} + \Delta \Psi_{topo} = \frac{4\pi}{\lambda r_0} \cdot B_n \cdot \left(\frac{\Delta r_{AB}}{\tan \alpha} + \frac{\Delta h_{AB}}{\sin \alpha} \right) \quad (2.18)$$

Amb això és té que coneixent la geometria orbital és molt senzill generar sintèticament el terme de terra plana. Si es resta de la expressió anterior s'obté fàcilment la component de la fase interferomètrica que depèn de la topografia:

$$\Delta\Psi_{topo,AB} = \frac{4\pi}{\lambda r_0} \cdot B_n \cdot \frac{\Delta h_{AB}}{\sin \alpha} \quad (2.19)$$

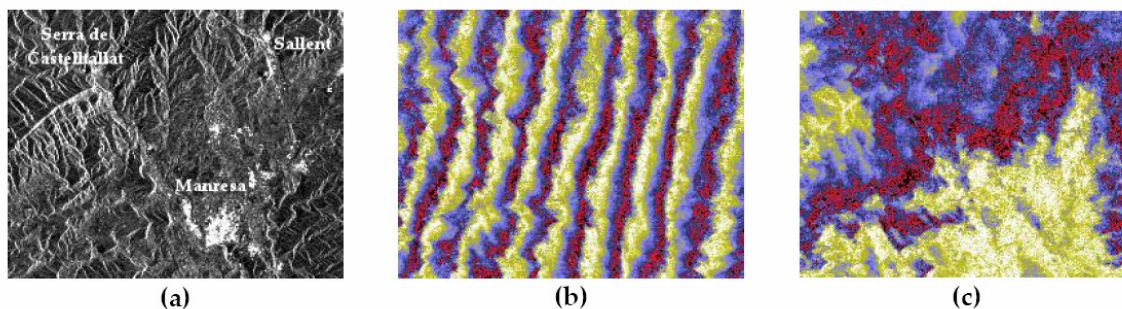


Fig. 2.9 (a) Amplitud d'una imatge SLC de la zona de Manresa. (b) Fase d'un interferograma de la mateixa zona amb el terme de terra plana inclòs. (c) Fase de l'anterior interferograma amb el terme de terra plana extret. S'observa que un cop extreta la terra plana les franges de fase són degudes a la topografia del terreny.

2.3 La coherència

La qualitat dels resultats obtinguts a partir dels interferogrames depèn, en bona part, de la qualitat de la seva fase. La coherència no és res més que una mesura d'aquesta qualitat de fase. Tot seguit es donarà una definició matemàtica de la coherència i una descripció dels factors que poden contribuir en la seva degradació.

2.3.1 Concepte de coherència

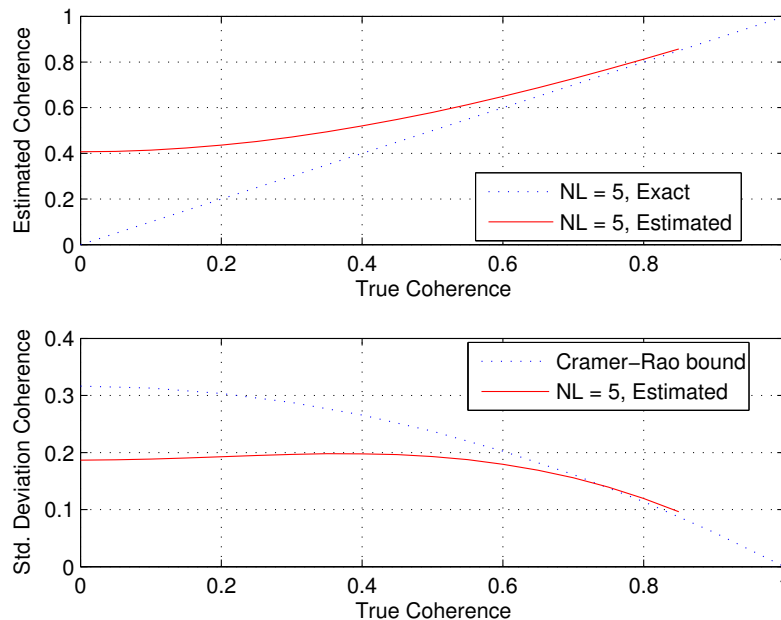
Siguin P_1 i P_2 els valors complexos de les dues imatges de les quals es calcula la coherència respectivament. Es defineix la coherència entre ambdós píxels com:

$$\gamma = \frac{E\{P_1 \cdot P_2^*\}}{\sqrt{E\{|P_1|^2\} \cdot E\{|P_2|^2\}}} \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (2.20)$$

Malgrat tot, a la pràctica només es calcularà un estimació de la coherència, ja que per calcular la esperança es necessitaria un conjunt d'observacions simultànies i amb les mateixes característiques, cosa totalment inviable en el nostre sistema ja que es pren una sola adquisició per cada passada del satèl·lit. Així doncs se substituirà l'operador esperança per una mitjana entre píxels, amb una finestra de M mostres per L línies, tal com es mostra tot seguit. Aquesta mitjana que s'aplica a la imatge rep el nom de *multilook*. Així, el valor de γ designarà la coherència d'un píxel en la imatge amb *multilook*. Per altra banda, el *multilook* ajuda a reduir l'anomenat soroll *Speckle* [Bará '96], un soroll multiplicatiu i aleatori present en tota imatge SAR provocat per la suma coherent dels ecos de tots els blancs dins una mateixa cel·la de resolució.

$$\hat{\gamma} = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{L-1} S_1(i, j) \cdot S_2^*(i, j)}{\sqrt{\left(\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{L-1} |S_1(i, j)|^2 \right) \cdot \left(\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{L-1} |S_2(i, j)|^2 \right)}} \quad 0 \leq \hat{\gamma} \leq 1 \quad (2.21)$$

En la figura 2.10 es mostren les gràfiques comparatives de la coherència estimada y la desviació estàndard de fase respecte la coherència real per a dos *multilooks* diferents [Hanssen '01]. Es pot comprovar que $\hat{\gamma}$ és un estimador esbiaixat de la coherència real. Es pot reduir el biaix quan la desviació estàndard de l'estimador es baixa o fent més gran la mida de la finestra de *multilook*, amb la consegüent pèrdua de resolució. La mida de la finestra de coherència escollida dependrà del nivell mig de coherència de l'escena. Escenaris amb un nivell baix de coherència necessitaran una finestra més gran. La qualitat de la estimació serà un compromís entre el nombre de píxels que intervinguin en la mitjana i com d'homogènia sigui la escena.



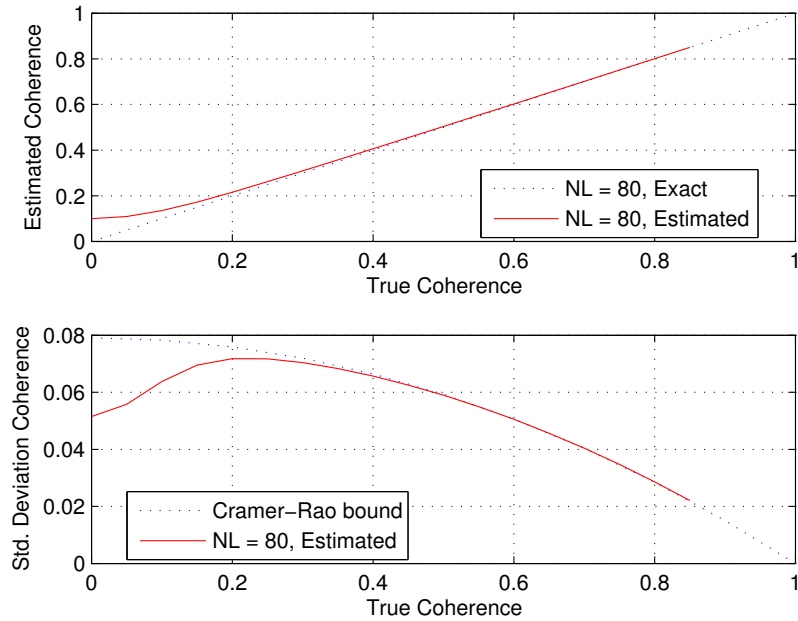


Fig. 2.10 Gràfiques de coherència estimada i desviació estàndard de coherència respecte a la coherència real per a dos multilooks diferents. En les gràfiques de coherència estimada s'observa el biaix de l'estimador per a valors baixos de coherència.

Per acabar un exemple d'un mapa de coherència. La separació temporal és d'uns 2 anys, i per tant hi ha una diferència notable entre les zones més coherents i les que menys. Les zones més brillants (blanc) fan referència en major part a zona urbana, ja que és on s'esperen menys canvis. La franja fosca de l'esquerra és el mar, que naturalment al tractar-se d'una zona canviant té un nivell de coherència molt baix. La imatge està girada en el sentit esquerra-dreta respecte la realitat. El multilook utilitzat és de 5x25.

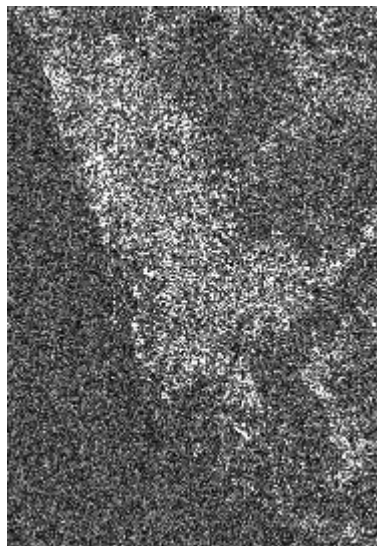


Fig. 2.11 Coherència d'un interferograma de la zona de Barcelona.

2.3.2 Factors que degraden la coherència

Hi ha un seguit de factors que influeixen negativament en el valor de la coherència. Són els següents:

a) Soroll inherent al sistema SAR: Soroll que trobarem en qualsevol sistema. En els sistemes SAR que es treballarà aquí es troba al voltant dels 11 dB.

b) Decorrelació temporal i espacial: En anteriors apartats s'ha suposat que el terme de fase de les SLC degut a la reflectivitat del terreny era el mateix per a qualsevol SLC i per tant, al calcular la fase interferomètrica es cancel·lava. Això no es així en realitat, pels següents motius:

- Les imatges SLC que formen un interferograma s'han obtingut amb un temps de separació. Durant aquest temps les característiques de reflectivitat del terreny poden haver canviat i per tant, les components de fase de cada SLC també. Aquest efecte es més pronunciat com més gran sigui la línia de base temporal o més canviant sigui la zona d'estudi (bosc, rius, etc...). Aquest efecte rep el nom de *decorrelació temporal* i l'única de reduir els seus efectes es fent la línia de base temporal el més petita possible.

- Angle d'incidència i desplaçament espectral: Per tal de poder parlar d'interferometria, cal que les dues imatges s'observin des de punts de vista diferents. Això provoca que les dues imatges s'observin amb angles d'incidència diferents, la qual cosa provoca que les projeccions de les dues imatges en el pla *slant-range* sigui diferents. Concretament una imatge queda comprimida respecte l'altra, tal com s'observa en la figura 2.12a. En el domini freqüencial això representaria un eixamplament de l'espectre, però com que el sistema SAR és un sistema de banda estreta, es pot interpretar com un desplaçament de l'espectre. A aquest efecte se l'anomena *decorrelació espacial*.

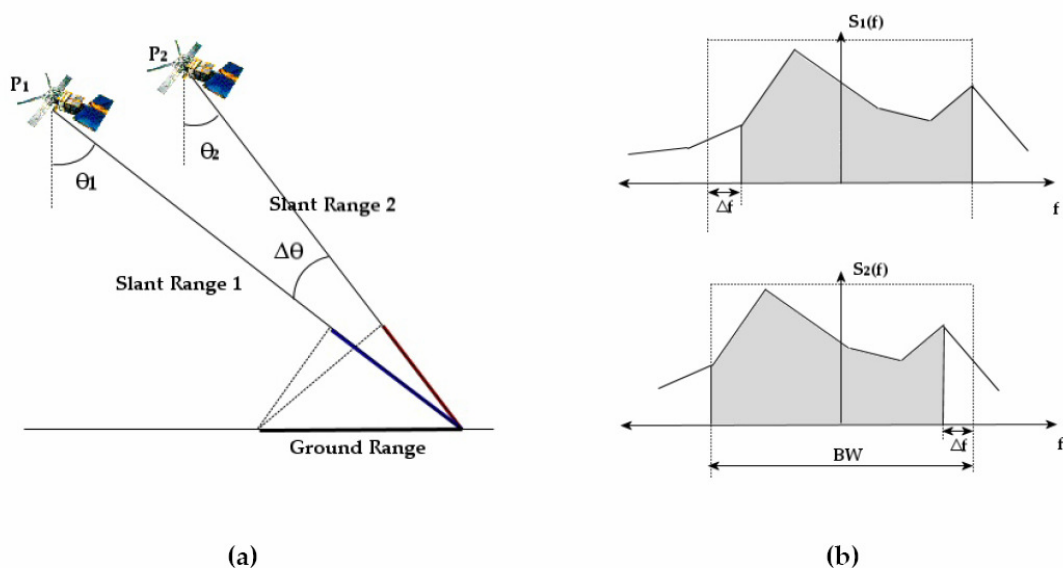


Fig. 2.12 (a) Compressió espacial deguda a la variació d'angles d'incidència. (b) Desplaçament espectral en el domini freqüencial

Es pot expressar el desplaçament en freqüència de la següent manera:

$$\Delta f = \frac{f_0 \cdot B_n}{r_0 \cdot \tan(\theta - \alpha)} \quad (2.22)$$

on f_0 és la freqüència portadora, r_0 la distància entre els satèl·lits y el terreny, B_n la línia de base perpendicular, θ l'angle d'incidència y α el pendent local.

A l'hora de formar l'interferograma només aporta informació l'espectre comú entre les dues imatges, i la resta es considera soroll. Si la línia de base és massa gran pot arribar a passar que els espectres deixin de superposar-se. La línia de base llindar s'anomena *línia de base crítica*.

c) *Pixel misregistration*: Pot passar que els píxels corresponents de dues imatges no representin exactament la mateixa porció de terreny, i per tant, les fases que es resten per a formar l'interferograma no són exactament del mateixos blancs. A aquest fet se l'anomena *pixel misregsitration*. Aquest efecte es corregeix mitjançant l'alineament de les imatges, tant a nivell de píxel com de subpíxel.

d) Freqüència Doppler: El desplaçament de l'espectre en la direcció *azimuth* degut a les diferents freqüències Doppler ocasionarà un efecte anàleg al que ocasionava la diferència d'angles d'incidència en la direcció *range*.

2.4 Interferometria Diferencial SAR

En els apartats anteriors s'ha vist com obtenir el resultat bàsic de la cadena interferomètrica: informació sobre la elevació del terreny, és a dir, un DEM. El cas ideal per aconseguir aquesta fita seria disposar d'imatges amb una línia de base espacial suficient per tenir sensibilitat i detectar una bona fase topogràfica, i amb una línia de base temporal nul·la per així anul·lar la component de fase interferomètrica deguda als moviments del terreny i obtenir amb la màxima precisió la topografia.

En aquest apartat es busca el cas contrari: calcular aquests moviments de terreny al llarg del temps entre les dues dates d'adquisició de les imatges que formen l'interferograma, obviant en la mesura del possible la topografia. Aquesta tècnica rep com a nom *Interferometria Diferencial Clàssica*. Així doncs, idealment interessaria tenir imatges amb una línia de base espacial nul·la per així eliminar completament la component topogràfica de la fase interferomètrica.

2.4.1 Interferometria diferencial clàssica

Suposem el cas de la figura 2.13: S'observen dues imatges SAR que s'han pres des del mateix punt de vista, i que entre el temps d'adquisició de les dues s'ha produït una deformació. Així doncs, la fase interferomètrica resultant és proporcional a la distància recorreguda pel punt en observació en la direcció *range*.

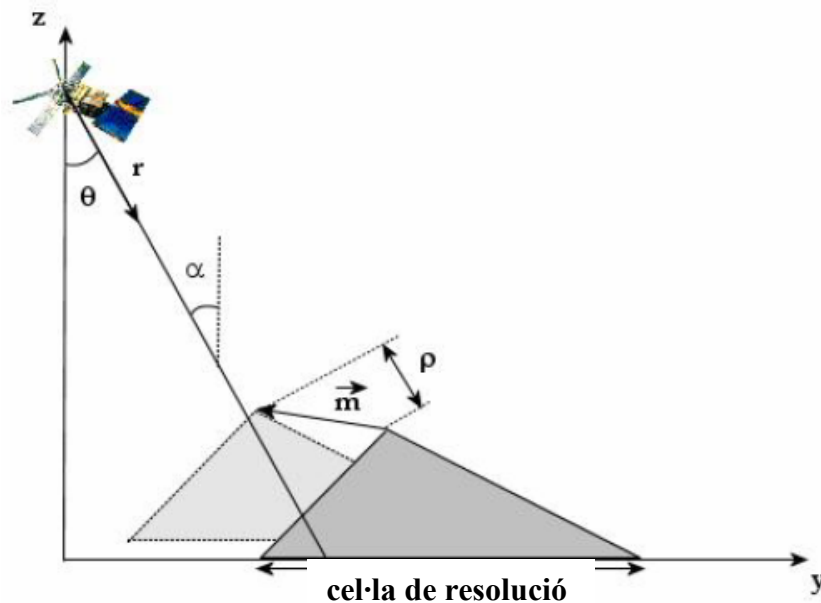


Fig. 2.13 Geometria de la interferometria diferencial SAR, suposant la línia de base espacial igual a zero

La fase interferomètrica s'expressa de la següent manera:

$$\psi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \rho \quad (2.23)$$

Naturalment, el cas ideal és molt poc freqüent i per tant sempre tindrem una línia de base espacial no nul·la. Això provocarà que la fase interferomètrica tingui una component de moviment del terreny i una component topogràfica, a més de les components atmosfèriques i de soroll. Així doncs, en un cas general, l'increment de fase entre dos punts (A i B) és pot expressar com:

$$\Delta\psi_{AB} = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \left(\frac{B_n \cdot \Delta r_{AB}}{r_o \cdot \tan(\theta)} + \frac{B_n \cdot \Delta h_{AB}}{r_o \cdot \sin(\alpha)} + \Delta\rho \right) + \Delta\psi_{atmos} + \Delta\psi_{soroll} \quad (2.24)$$

Cal "netejar" aquesta fase per tal d'aproximar-nos en la mesura del possible a la fase de moviment aïllada. Primer de tot caldrà eliminar les components de terra plana i topografia. Tal com s'ha vist, es pot cancel·lar la component de terra plana a partir de la informació orbital. Així doncs només resta cancel·lar la component topogràfica. Per a aquesta fita existeixen diferents mètodes. El que ha demostrat donar més bons resultats és el d'usar un DEM extern. A partir d'ell es sintetitza una fase que, al provenir d'un DEM, és exclusivament topogràfica i posteriorment es resta de la fase total. Aquesta fase obtinguda a partir del DEM rep el nom de d'interferograma sintètic. De fet, en el nostre cas, l'interferograma sintètic inclou tant la component topogràfica com la de terra plana.

La qualitat de l'interferograma sintètic dependrà de la precisió del DEM. Així doncs, com que el DEM estarà sotmès a un cert error, les altures d'on s'obté la fase sintètica ($\Delta h'$) no seran les mateixes que les altures reals (Δh). Així doncs, la fase diferencial quedarà de la següent manera:

$$\Delta\psi_{dif} = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \frac{B_n \cdot (\Delta h - \Delta h')}{r_o \cdot \sin(\alpha)} + \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \Delta\rho + \Delta\psi_{atmos} + \Delta\psi_{soroll} \quad (2.25)$$

Si definim el terme *error de DEM* de la següent manera:

$$\varepsilon_{DEM} = \Delta h - \Delta h' \quad (2.26)$$

Ara podem expressar la fase diferencial com:

$$\Delta\psi_{dif} = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \frac{B_n \cdot \varepsilon_{DEM}}{r_o \cdot \sin(\alpha)} + \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \Delta\rho + \Delta\psi_{atmos} + \Delta\psi_{soroll} \quad (2.27)$$

2.4.2 Coherència diferencial

El càlcul de la coherència es pot arribar a refinar des del punt de vista de la interferometria diferencial. Això es degut a que en la expressió 2.20 es tenia en consideració les components topogràfica i de terra plana, i això dona lloc a una escena menys homogènia i per tant a una pitjor estimació. Així doncs, es tindrà un càlcul més net de la coherència si es realitza sense aquestes components.

Si es parteix de l'expressió 2.20 es pot aïllar fàcilment la component de fase deguda a la topografia i a la terra plana.

$$\gamma = \frac{E\{P_1 \cdot P_2^*\}}{\sqrt{E\{|P_1|^2\}} \cdot E\{|P_2|^2\}}} = \frac{E\{P_1' \cdot P_2'^* \cdot e^{j\phi_{topogr+1,plana}}\}}{\sqrt{E\{|P_1|^2\}} \cdot E\{|P_2|^2\}}} \quad (2.28)$$

Per altra banda, la informació de cada píxel d'un interferograma diferencial es pot expressar com:

$$I_{dif} = P_1 \cdot P_2^* \cdot e^{-j\phi_{topogr+1,plana}} = P_1' \cdot P_2'^* \quad (2.29)$$

Si es substitueix a l'expressió 2.28 s'obté:

$$\gamma = \frac{E\{I_{dif} \cdot e^{-j\phi_{topogr+1,plana}}\}}{\sqrt{E\{|P_1|^2\}} \cdot E\{|P_2|^2\}}} \quad (2.30)$$

Així doncs, per tal de calcular la coherència diferencial només cal utilitzar l'interferograma diferencial calculat. Com en la coherència convencional, se substitueix l'operador esperança per una mitjana entre píxels.

$$\gamma = \frac{E\{I_{dif}\}}{\sqrt{E\{|P_1|^2\}} \cdot E\{|P_2|^2\}}} \quad (2.31)$$

2.4.3 Interferometria diferencial avançada

La interferometria diferencial clàssica proposa extreure informació de deformació del terreny entre les dates que compren l'interferograma diferencial. S'ha vist com la fase diferencial conté components atmosfèriques i de soroll. Resultaria molt convenient poder pal·liar en la mesura del possible aquestes contribucions que emmascaren la informació útil.

L'interferometria diferencial avançada té un objectiu més ambiciós: es tracta d'aprofitar la redundància d'un set d'interferogrames diferencials per tal d'obtenir una evolució temporal de la deformació i a més, mitjançant tècniques de filtrat espacial i temporal, estimar la component atmosfèrica de la fase interferomètrica.

L'algorisme d'interferometria diferencial avançada utilitzat en el transcurs d'aquest projecte rep el nom de CPT (*Coherent Pixels Technique*) desenvolupat pel *Departament de teoria de la Senyal i la Comunicació* (TSC) de la *Universitat Politècnica de Catalunya* (UPC). Tot seguit es procedirà a una breu explicació del seu funcionament.

2.4.3.1 Selecció de píxels i triangulació

No tots els píxels que formen els interferogrames diferencials tenen una qualitat suficient per aportar informació útil. Per tant el primer pas és seleccionar els píxels per tal de processar només els que compleixin un cert nivell de qualitat, és a dir, que mantinguin la coherència al llarg del temps.

Els principals mètodes de selecció de píxels són els següents:

a) Selecció per coherència: S'agafen com a referència els mapes de coherència diferencial calculats en la cadena interferomètrica. Hi ha dos criteris de selecció:

- i) Selecció dels punts que superin un cert llindar de coherència en un % dels interferogrames.
- ii) Selecció dels punts dels quals la mitjana de la seva coherència superi un cert llindar.

Aquest mètode té l'inconvenient de la pèrdua de resolució (*multilook*) però en canvi dóna resultat satisfactoris amb relativament poca informació (interferogrames).

b) Selecció de punts per amplitud: La selecció es basa en la desviació estàndard de la amplitud dels píxels de les SLCs. Així doncs, es prendran els píxels més estables al llarg del temps. Aquest mètode presenta l'avantatge que no es perd resolució en el càlcul, però en canvi és necessari realitzar una calibració radiomètrica de les imatges, a més de necessitar-ne un nombre major per obtenir bons resultats [Ferretti '01].

c) Selecció per correlació espectral: Aquest és el mètode més sofisticat. Es basa en el càlcul de la correlació espectral estimada temporalment entre els parells de *sublooks* (dues parts de l'espectre de la imatge) per a cada SLC. Es prendran els píxels que superin un cert llindar de correlació espectral. D'aquesta manera no cal

calibrar les imatges, però en canvi els requeriments de processament són més grans [Iglesias '08].

En aquest projecte s'utilitzarà el mètode de selecció de píxels per coherència.

Un cop feta la selecció es disposa d'un mapa de punts seleccionats i un set d'interferogrames diferencials amb la informació de la fase en aquests punts. Com que cada interferograma té un offset de fase diferent no es pot treballar amb fases absolutes, i per tant, es treballarà amb fases relatives. Per tal d'aconseguir-ho, es creen enllaços entre els diferents píxels i s'associa un increment de fase a cada enllaç. Per tal de crear la xarxa d'enllaços ens basarem en una *Triangulació de Delaunay* [Delaunay '34], la qual està formada per relacions triangulars no superposades entre els punts seleccionats. El valor dels enllaços es pot representar amb la següent expressió:

$$\begin{aligned} \Delta\Psi_{dif}(x_m, y_m, x_n, y_n, T_i) &= \Psi_{dif}(x_m, y_m, T_i) - \Psi_{dif}(x_n, y_n, T_i) = \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} \cdot T_i \cdot [v(x_m, y_m) - v(x_n, y_n)] + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_n(T_i)}{r(T_i) \cdot \sin \alpha(T_i)} \cdot [\varepsilon(x_m, y_m) - \varepsilon(x_n, y_n)] + \\ &+ [\beta(x_m, y_m) - \beta(x_n, y_n)] + [\varphi(x_m, y_m) - \varphi(x_n, y_n)] + [n(x_m, y_m) - n(x_n, y_n)] \end{aligned} \quad (2.32)$$

on:

x i y : Posicions de cada píxel (*range, azimuth*) dins la imatge.

T_i : Línia de base temporal de l'interferograma i .

λ : Longitud d'ona.

v : velocitat lineal de la deformació.

B_n : Línia de base perpendicular.

r : Distància *range*.

α : Angle d'incidència.

ε : Error de DEM.

β : Component no lineal de la velocitat de deformació.

φ : Component atmosfèrica.

n : Soroll.

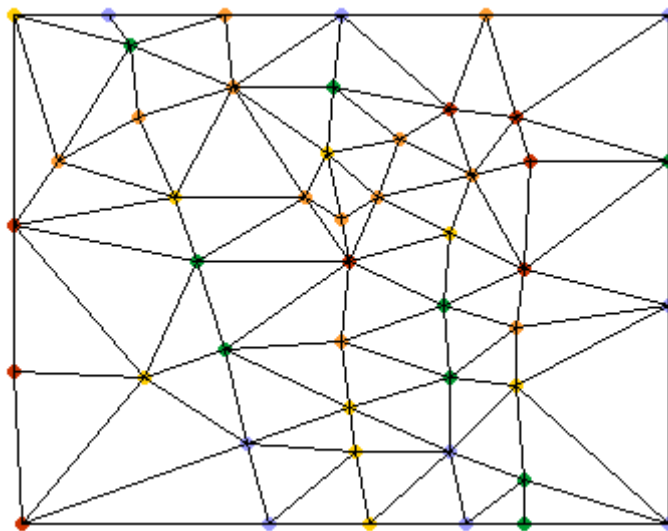


Fig. 2.14 Exemple de triangulació Delaunay

En l'apartat següent es veurà com es pot processar la informació dividint-la en capes diferents, cadascuna amb un cert llindar de coherència. A aquest mètode de treball se l'anomena processament multicapa o *multilayer*. Així doncs, si s'utilitza el *multilayer* la selecció de píxels es realitza també per capes, associant cada píxel a una capa segons el seu nivell de coherència.

2.4.3.2 Càlcul de la velocitat lineal de deformació

La primera component que s'extraurà de la fase interferomètrica serà la de velocitat lineal de deformació i l'error del DEM [Ferreti '00]. Es construirà un model de fase que tant sols inclogui aquestes components:

$$\begin{aligned} \Delta\Psi_{\text{model}}(x_m, y_m, x_n, y_n, T_i) &= \frac{4\pi}{\lambda} \cdot T_i \cdot [v_{\text{model}}(x_m, y_m) - v_{\text{model}}(x_n, y_n)] + \\ &+ \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_n(T_i)}{r(T_i) \cdot \sin \alpha(T_i)} \cdot [\varepsilon_{\text{model}}(x_m, y_m) - \varepsilon_{\text{model}}(x_n, y_n)] \end{aligned} \quad (2.33)$$

S'obtidran els valors de velocitat lineal i error de DEM dels v_{model} i $\varepsilon_{\text{model}}$ que millor aproximïn l'increment de fase model, $\Delta\Psi_{\text{model}}$, a l'increment de fase $\Delta\Psi_{\text{dif}}$. Per a aquesta tasca es defineix l'anomenada *Funció d'ajust al model* i se li aplica un procés de minimització, basat en el *mètode del gradient conjugat* (CGM):

$$\Gamma(x_m, y_m, x_n, y_n) = \sum_{i=0}^{N-1} \left| e^{-j \cdot \Delta\Psi_{\text{dif}}(x_m, y_m, x_n, y_n, T_i)} - e^{-j \cdot \Delta\Psi_{\text{model}}(x_m, y_m, x_n, y_n, T_i)} \right|^2 \quad (2.34)$$

Com a resultat s'obtidrà un parell (increment de velocitat, increment d'error de DEM) estimat per a cada un dels enllaços de la triangulació:

$$\begin{aligned} \Delta\bar{v}(x_m, y_m, x_n, y_n) &= [v_{\text{model}}(x_m, y_m) - v_{\text{model}}(x_n, y_n)]_{\Gamma=\Gamma_{\min}} \\ \Delta\bar{\varepsilon}(x_m, y_m, x_n, y_n) &= [\varepsilon_{\text{model}}(x_m, y_m) - \varepsilon_{\text{model}}(x_n, y_n)]_{\Gamma=\Gamma_{\min}} \end{aligned} \quad (2.35)$$

Com a mètode d'avaluació de les estimacions que permetrà prescindir dels valors estimats incorrectament es defineix la *Funció de coherència de model*. Es defineix de la següent manera [Mora '04]:

$$\mathcal{Y}_{\text{model}}(x_m, y_m, x_n, y_n) = \frac{1}{N} \cdot \left| \sum_{i=0}^{N-1} e^{-j \cdot [\Delta\Psi_{\text{dif}}(x_m, y_m, x_n, y_n, T_i) - \Delta\Psi_{\text{model}}(x_m, y_m, x_n, y_n, T_i)]} \right| \quad (2.36)$$

on N és el nombre d'inteferogrames. Com més pròxim a 1 sigui el valor d'aquesta funció més semblant serà el model de fase a la realitat.

Ara només cal passar els increments de fase a valors absoluts. Aquest pas es durà a terme mitjançant un procés *d'integració*. Es partirà de valors absoluts de píxels coneguts a priori, anomenats llavors (*seed*), i mitjançant un algorisme basat en el CGM s'obtidran els altres valors, també de forma absoluta. Les llavors s'escullen segons un criteri de qualitat dels enllaços que tenen al voltant.

En cas d'utilitzar el *multilayer* es realitza el mateix processament independentment per a cada capa, amb la restricció que s'utilitzen les capes de major qualitat com a llavors de les capes de menor qualitat, per d'aquesta manera fer més sòlida la integració dels resultats.

Tot seguit es du a terme un test de qualitat. Simplement es recalculen els valors dels increments dels enllaços a partir dels valors absoluts obtinguts i es comparen amb els valors de base. Els píxels que no passin el test quedaran descartats.

En aquest punt s'ha obtingut un mapa de velocitat lineal de deformació i un mapa d'error de DEM de cada un dels píxels de la selecció. La qualitat de l'estimació d'aquests mapes està directament relacionat amb el grau d'exigència que se'ls ha imposat. Com més exigent es sigui, millor qualitat de fase s'obtindrà a canvi de informació en menys punts i viceversa.

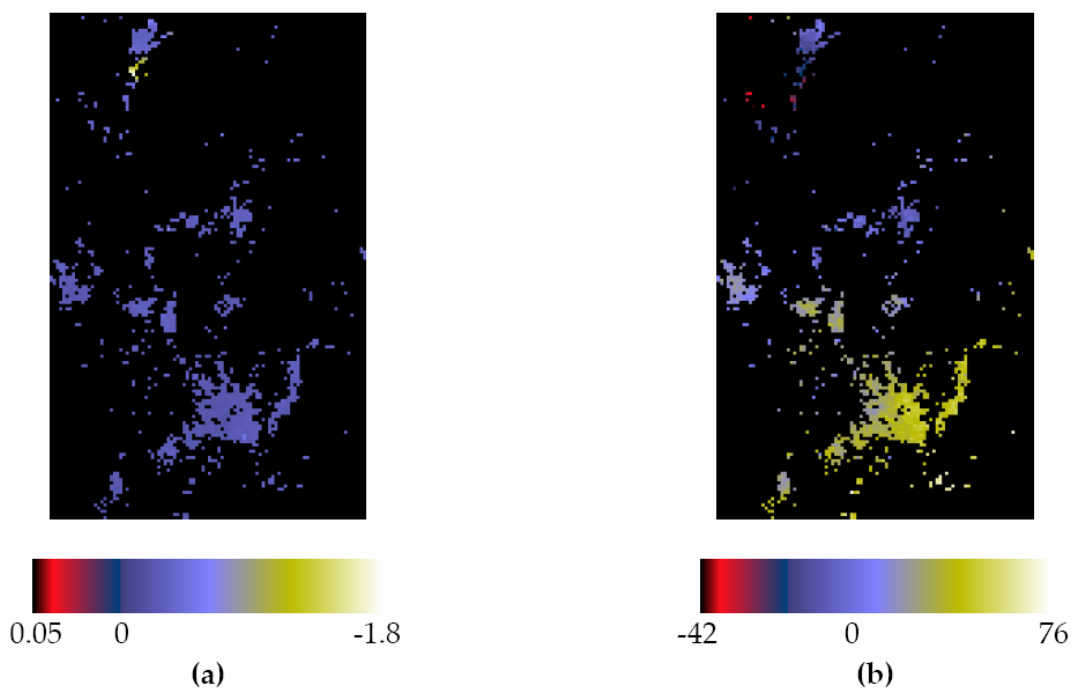


Fig. 2.15 Exemples de mapa de velocitat lineal de deformació (a) i mapa d'error de DEM (b) de la zona del Bages. La zona groguenca del mapa de velocitat lineal correspon a un fenomen de subsidència detectat al poble de Sallent.

2.4.3.3 Concepte de fase residual. Artefactes atmosfèrics

Des del punt de vista de la informació addicional que es vol extreure, es pot expressar la fase interferomètrica de la següent manera:

$$\Delta\Psi_{dif} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot T_i \cdot v + \frac{4\pi}{\lambda \cdot r \cdot \sin \alpha} \cdot B_i \cdot \varepsilon_h + \Delta\Psi_{atm} + \Delta\Psi_{mnl} + \Delta\Psi_{soroll} \quad (2.37)$$

on:

T_i : línia de base de l'interferograma i.

B_i : línia de base perpendicular de l'interferograma i.

ε_h : Error de DEM.

v : Velocitat lineal de deformació.

$\Delta\Psi_{atm}$: Component de fase deguda als artefactes atmosfèrics.

$\Delta\Psi_{mnl}$: Component de fase deguda al moviment no lineal de deformació en la direcció *range*.

$\Delta\Psi_{soroll}$: Component de fase deguda al soroll i altres factors (errors orbitals, decorrelació, ...).

En l'apartat anterior s'ha sintetitzat la component de velocitat lineal i la d'error de DEM, amb la qual cosa es pot restar de l'expressió 2.37, tot obtenint el que s'anomena *residu* o *fase residual*:

$$\Delta\Psi_{residu} = \Delta\Psi_{dif} - \Delta\Psi_{model} = \Delta\Psi_{atm} + \Delta\Psi_{mnl} + \Delta\Psi_{soroll} \quad (2.38)$$

Així doncs, es disposa d'un residu per a cada un dels interferogrames. El que interessa en aquest punt és poder aïllar per una banda la fase atmosfèrica i per l'altra la fase de moviment no lineal de deformació. Aquesta tasca es basarà en les propietats de cada una de les components.

En primer lloc es té la fase atmosfèrica, la qual s'ocasiona per la presència de l'atmosfera terrestre entre el satèl·lit i la zona d'observació. El factor més important que provoca aquesta fase és el vapor d'aigua que s'acumula en la troposfera [Castro '03]. El comportament de l'atmosfera és molt invariant entre posicions properes, i per tant es pot dir que el seu comportament és *pas baix espacialment*. S'ha calculat que dos punts separats fins a 1 km de distància mantenen les mateixes característiques atmosfèriques [Hanssen '98]. En canvi, des del punt de vista temporal, l'atmosfera es troba present en tota la banda freqüencial i per tant té un comportament de *soroll blanc* [Mora '04].

La component de fase deguda al moviment no lineal de deformació és defineix per ella mateixa, és a dir, defineix la component de deformació en la direcció d'observació del satèl·lit que no segueix un patró lineal. Els moviments detectats en aquest tipus d'estudi són moviments lents de deformació, i per tant es pot considerar que el moviment no lineal és *pas baix temporalment*. Així doncs, filtrant temporalment es pot eliminar part de l'atmosfera que emmascara el moviment no lineal.

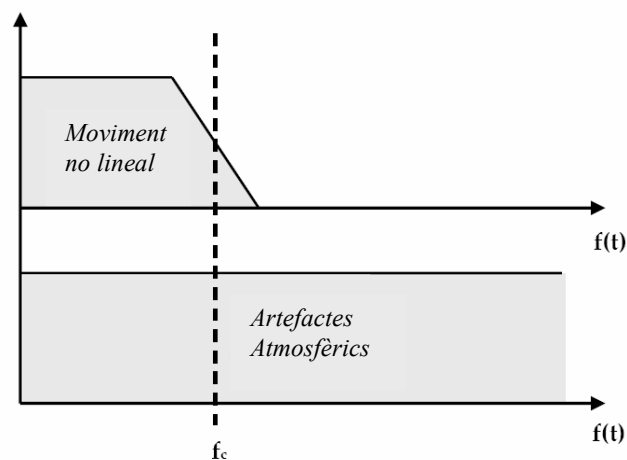


Fig. 2.16 Comportament freqüencial dels artefactes atmosfèrics i el moviment no lineal

Per tal d'extreure la component atmosfèrica caldrà filtrar el residu pas baix en el domini espacial. Les dimensions del filtre no poden superar la distància de correlació de la atmosfera (1 km) per a poder conservar la component atmosfèrica.

En aquest punt s'ha obtingut un residu filtrat pas baix, de tal forma que s'ha conservat pràcticament la totalitat de la component de fase atmosfèrica i la part freqüencial baixa del moviment no lineal:

$$(\Psi_{residu})_{LP} = \Psi_{atm} + (\Psi_{mnl})_{LP} \quad (2.39)$$

Per tal d'obtenir la component atmosfèrica no superposada amb la component de fase no lineal (veure figura 2.16) només cal aplicar un filtre temporal pas alt del paquet de residus ja filtrats. Com que els residus fan referència a interferogrames i aquest alhora representen la informació entre dos instants de temps, caldrà realitzar una ordenació temporal de les imatges i descompondre el valor del residu en cada una de les imatges. Això s'aconsegueix mitjançant l'algorisme SVD (*Single Value Decomposition*) [Usai '02].

L'algorisme SVD necessita que la fase residual estigui desenrotllada. Com que ja ha estat filtrada espacialment i per tant no presenta variacions brusques, serà senzill desenrotllar-la. Es realitzarà mitjançant el mètode del gradient conjugat (CGM).

Així doncs, s'ha obtingut un conjunt de fases residuals associades a cada una de les imatges SLC. Així doncs ja es poden ordenar però malgrat tot encara no es pot filtrar, ja que l'SVD assigna un valor nul a la primera imatge, component que es perdria al filtrar pas baix. Es a dir, en aquest punt es pot expressar la fase residual com:

$$(\phi_{residu})_{LP}(t) = \begin{cases} 0 & i = 0 \\ \phi_{atm}(t_i) + (\phi_{mnl})_{LP}(t_i) - \phi_{atm}(t_0) & 1 \leq i \leq M-1 \end{cases} \quad (2.40)$$

on M és el nombre d'imatges.

Per tal de poder filtrar caldrà estimar el valor de la component atmosfèrica de la primera imatge. S'ha demostrat que per un nombre d'imatges superior a 20 és una bona aproximació considerar:

$$\phi_{atm}(t_0) \approx \frac{1}{M-1} \cdot \sum_{i=1}^{M-1} (\phi_{residu})_{LP}(t_i) \quad (2.41)$$

Substituint el valor de l'atmosfera de la primera imatge per aquest valor aproximat es pot procedir al filtrat temporal del residu filtrat pas baix, que es realitzarà mitjançant una finestra triangular. El fet de ser triangular pondera les fases segons el temps entre SLC, de tal forma que tenen més pes les més properes al centre del filtre. A més el filtre s'amplia automàticament en cas de no trobar mostres.

En aquest punt es té el residu filtrat pas baix espacialment i pas alt temporalment, la qual cosa equival aproximadament a la component atmosfèrica per a cada imatge SLC. Es diu aproximadament perquè hi ha una part no separable de la atmosfera, ja que aquesta es troba en tota la banda freqüencial.

Ara cal tornar a les components de fase atmosfèriques pròpies de cada interferograma, però això és tant senzill com restar les dues components de fase de les SLC que conformen l'interferograma.

2.4.3.4 Extracció de la component no lineal de deformació

Per tal d'extreure la component no lineal de deformació es realitzaran dos passos: Primer s'extraurà la component no lineal a baixa resolució a partir del residu filtrat pas baix i després es calcularà el moviment no lineal d'alta resolució creant un model de fase a baixa resolució i restant-lo de la fase interferomètrica original [Pérez '02].

Per tal d'obtenir la component no lineal de baixa resolució només cal filtrar pas baix temporalment el residu filtrat pas baix espacialment. En tot cas seguirà estant emmascarat per part de la component atmosfèrica present a tota la banda.

$$(\phi_{residu})_{LP,P}(t) \approx (\phi_{mnl})_{LP}(t) = \phi_{mnl_slr}(t) \quad (2.42)$$

Així doncs, amb el que es té fins aquest punt, es pot obtenir el següent model de fase a baixa resolució:

$$\begin{aligned} \Delta\Psi_{slr}(T_j) &= \Delta\Psi_{mov_slr}(T_j) + \Delta\Psi_{err_topo}(T_j) + \Delta\Psi_{atm}(T_j) \quad \forall j = 1, \dots, N \\ \Delta\Psi_{mov_slr}(T_j) &= \Delta\Psi_{ml}(T_j) + \Delta\Psi_{mnl_slr}(T_j) \end{aligned} \quad (2.43)$$

on:

$\Delta\Psi_{ml}(T_j)$: Component de moviment lineal de deformació.

$\Delta\Psi_{mnl_slr}(T_j)$: Component de moviment no lineal de baixa resolució de deformació.

$\Delta\Psi_{err_topo}(T_j)$: Component deguda a l'error de DEM.

$\Delta\Psi_{atm}(T_j)$: Component atmosfèrica.

Així doncs només cal obtenir cada una de les components.

a) $\Delta\Psi_{mov_slr}(T_j)$: Primer s'obté la component lineal de deformació per a cada SLC a partir mapa de velocitat lineal ja obtingut, tot aplicant la següent expressió:

$$\Delta\phi_{ml}(t_i) = \frac{t_i - t_0}{365} \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \cdot (v_{lineal} + v_{cal}) \quad \forall i = 1, \dots, M \quad (2.44)$$

on:

t_i : Temps d'adquisició de la imatge SLC i en anys.

t_0 : Temps d'adquisició de la primera imatge SLC en anys.

λ : Longitud d'ona del radar.

v_{cal} : Offset de calibració per en referència a un punt on es coneix a priori que la velocitat és nul·la.

M : Número d'imatges SLC.

En tot moment s'està parlant d'offsets de fase per a cada SLC. Així doncs es té:

$$\Delta\phi_{mov_slr}(t_i) = \Delta\phi_{ml}(t_i) + \Delta\phi_{mnl_slr}(t_i) \quad (2.45)$$

Per a trobar la fase interferomètrica simplement es resten les fases de la *master* i l'*slave* corresponents:

$$\Delta\Psi_{mov_slr}(T_j) = \Delta\phi_{mov_slr}(t_{master,j}) + \Delta\phi_{mov_slr}(t_{slave,j}) \quad (2.46)$$

b) $\Delta\Psi_{err_topo}(T_j)$: La component d'error de DEM es calcula amb la següent expressió utilitzant el mapa d'error de DEM ja calculat:

$$\Delta\Psi_{err_topo}(T_j) = \frac{4\pi \cdot B_n(j)}{\lambda \cdot r_0 \cdot \sin \theta} \cdot \varepsilon_{DEM} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (2.47)$$

on:

B_n : Línia de base perpendicular de l'interferograma j .

λ : longitud d'ona del radar.

r_0 : distància *range*.

θ : angle d'incidència del satèl·lit.

ε_{DEM} : mapa d'error de DEM.

N : Numero d'interferogrames.

c) $\Delta\Psi_{atm}(T_j)$: Es la component atmosfèrica ja calculada.

Així doncs, es disposa d'un model no lineal de baixa resolució que si s'extreu de la de la fase de l'interferograma diferencial s'obindrà la component no lineal d'alta resolució de la fase interferomètrica.

$$\Delta\Psi_{shr}(T_j) = \Delta\Psi_{dif}(T_j) - \Delta\Psi_{slr}(T_j) = \Delta\Psi_{mnl_shr}(T_j) + \Delta\Psi_{soroll}(T_j) \quad (2.48)$$

Per tal de poder estimar l'evolució temporal de la deformació caldrà trobar les components de fase de les imatges SLC en concret. Així doncs, s'haurà d'aplicar una altra vegada l'algorisme SVD.

Un cop obtingudes aquestes components, es poden sumar les components de fase a alta i baixa resolució, obtenint així el moviment no lineal total per a cada imatge SLC.

$$\Delta\phi_{mnl}(t_i) = \Delta\phi_{mnl_slr}(t_i) + \Delta\phi_{mnl_shr}(t_i) \quad \forall i = 1, \dots, M \quad (2.49)$$

Finalment, per a tenir una evolució completa de la deformació per a cadascun dels píxels seleccionats, només caldrà afegir a la anterior expressió la component de moviment lineal calculada al principi.

2.5 La Geocodificació

Com s'ha vist anteriorment, totes les dades obtingudes pel sistema radar tenen com a sistema de referència el pla *slant-range*. És a dir, per a cada píxel d'informació, sabem des de quina línia de la orbita va ser pres i a quina mostra pertany dins d'aquesta línia. Com es pot suposar, aquest no és un bon sistema per a presentar resultats finals, ja que ens interessaria poder projectar-los sobre la superfície terrestre. Aquest és l'objectiu de la geocodificació.

2.5.1 Models el·lipsoïdals

Quan es parla de projectar dades sobre la superfície de la terra hom es pot preguntar com podem modelar una superfície tant complexa com és la superfície terrestre. Per a aquest fi utilitzem una superfície tant senzilla com una el·lipsoide, definida per dos eixos i un centre. El que es pretén es trobar una el·lipsoide que s'adapti el millor possible a la zona que s'estigui estudiant. Existeix una llista molt gran d'el·lipsoïdes de referència; de fet molts països tenen la seva pròpia el·lipsoide. Habitualment les dades de l'el·lipsoide reben el nom de *datum*.

En el nostre cas es farà ús de dos datums diferents en els nostres processaments, depenent de les dades d'entrada:

- a) ED-50 (European Datum 50): És un datum utilitzat a nivell europeu, tal com indica el nom. La majoria de dades europees venen en referència a aquest datum.
- b) WGS-84 (World Geodetic System 84): És un datum utilitzat a nivell mundial. És el que s'adapta millor globalment a tota la superfície terrestre. Això el fa molt versàtil. De fet, com és el nostre cas, molts sistemes realitzen els càlculs interns en aquest datum.

2.5.2 Algorisme bàsic de geocodificació

Sigui un punt $P=(P_x, P_y, P_z)$ sobre la superfície terrestre, donat en el sistema cartesià (XYZ) amb la referència del centre de la terra. Per altra banda, sigui un punt de la imatge SLC, del qual es coneix la posició (*range, azimuth*). Pel que fa a la coordenada *range*, si se sap el temps de retard del primer píxel de la imatge, es pot obtenir fàcilment el temps de retard per a aquest *range* en concret, i per tant la distància entre el radar i blanc o el que és el mateix, la distància *range* R. La coordenada *azimuth*, combinada amb la PRF i el temps de la primera línia, dona informació de la posició orbital des de la qual es va obtenir el píxel $S=(S_x, S_y, S_z)$. A més es disposa de la velocitat del satèl·lit (V_s) i la velocitat del punt sobre la superfície (V_p).

Fent ús d'aquestes dades, tot seguit es mostren tres equacions que relacionen la posició sobre el terreny amb la posició sobre el pla *slant-range*:

- a) Equació Range: Aquesta equació defineix una esfera centrada en la posició del satèl·lit. El radi de la esfera és R, que coincideix amb la distància entre la posició del satèl·lit (S) i el punt sobre la superfície (P).

$$|S-P|^2 = (S_x - P_x)^2 + (S_y - P_y)^2 + (S_z - P_z)^2 = R^2 \quad (2.50)$$

b) Equació Doppler: Aquesta equació dona la relació entre la velocitat del satèl·lit i la velocitat del punt sobre el terreny amb la freqüència Doppler que presenta el blanc. A la pràctica, com el píxel ha estat enfocat en la posició zero-Doppler, f_D serà igual a zero. Això transforma la equació en un pla perpendicular a l'òrbita. Si suposem que el nostre sistema de referència estan fixats a la superfície terrestre, es a dir, que els seus eixos giren juntament amb la terra, la velocitat del punt sobre el terreny (V_p) serà zero.

$$f_D = \frac{2 (V_s - V_p) \cdot (P - S)}{\lambda |P - S|} \quad (2.51)$$

c) Model terrestre: Com s'ha vist, es modela la terra aproximant-la per un el·lipsoide amb semieixos (a,b). A més, es pot modelar la altura del punt sobre el terreny (h) simplement ampliant la longitud dels eixos per h .

$$\frac{P_x^2}{(a+h)^2} + \frac{P_y^2}{(a+h)^2} + \frac{P_z^2}{(b+h)^2} = 1 \quad (2.52)$$

Un cop definides les equacions, es poden usar des de 2 punts de vista diferents:

a) Geocodificació directa: En aquest cas es coneixen les coordenades (*range, azimuth*) d'un píxel sobre el pla *slant-range* i es vol conèixer la seva posició P sobre el terreny. Si es combinen les tres equacions anteriors en un sistema d'equacions, la solució P serà la intersecció de les tres formes (esfera, pla i el·lipsoide). De fet es tenen dos punts d'intersecció, dels quals se'n pot discriminar un sabent cap a quin costat apunta el satèl·lit respecte la seva direcció de vol (a la dreta en el cas de ERS i ENVISAT). El sistema resultant no és lineal i per tant cal resoldre'l per mètodes iteratius, com el mètode Newton-Raphson.

b) Geocodificació inversa: Aquest és el cas contrari, en el qual es coneix el punt P sobre la superfície de la terra i en canvi es desconeixen les coordenades (*range, azimuth*) sobre el pla *slant-range*. Aquest problema és molt més senzill de resoldre, ja que només es necessiten dues de les tres equacions anteriors, la equació Range i la equació Doppler, les quals no estan acoblades. Primer de tot es calcula la coordenada *azimuth* buscant la posició orbital que fa que f_D sigui igual a zero a l'equació 2.51. Després la coordenada *range* es pot calcular directament de la distància que separa el satèl·lit del blanc.

3 LA CADENA INTERFEROMÈTRICA

3.1 Introducció

Per partir de les SLC fins a arribar als interferogrames diferencials cal passar per tot un procés. Aquest rep el nom de cadena interferomètrica. Tot seguit és realitzarà una descripció de tots els passos que es duen a terme en el cas de la cadena interferomètrica desenvolupada al DTSC, anomenada PRISAR. A partir d'aquest esquema es tindrà una visió general i serà molt més fàcil ubicar les millores que s'han desenvolupat al llarg d'aquest projecte i tenir en compte alguns petits canvis de filosofia en la distribució dels processos.

En primer lloc es representarà un esquema general de la cadena interferomètrica i llavors s'anirà entrant en cada un dels passos en concret.

3.2 Esquema

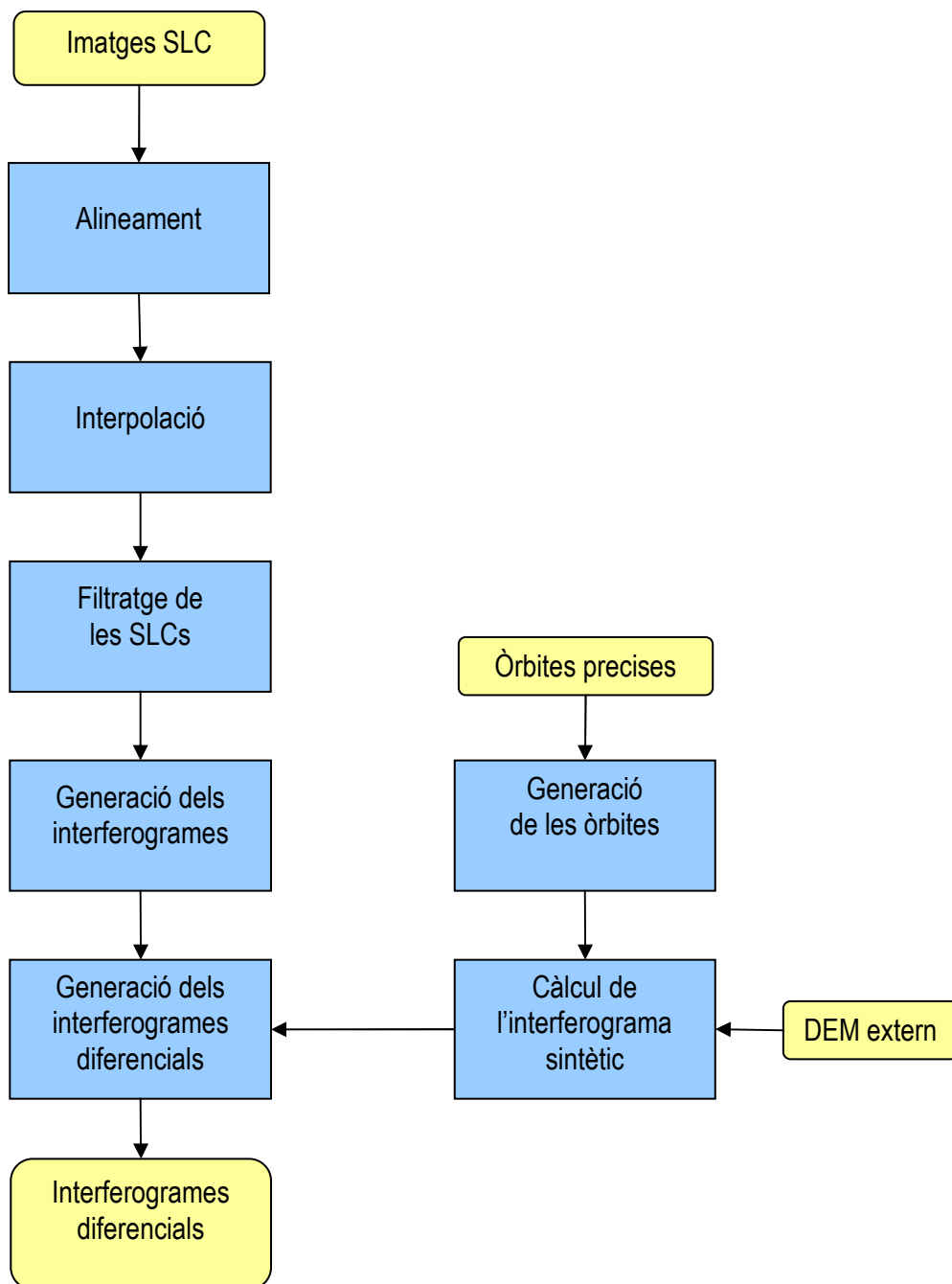


Fig. 3.1 Esquema bàsic de la cadena interferomètrica PRISAR

3.3 Descripció de la cadena interferomètrica

En l'esquema es descriu a grans trets el procés que es du a terme en la cadena interferomètrica, amb les seves corresponents entrades de dades. Tot seguit es farà una breu descripció de cada un dels passos, per tenir una idea clara de la seva motivació i el seu funcionament.

3.3.1 Alineament de les imatges SLC

Com a punt de partida del nostre processament hi ha les imatges SLC, és a dir, matrius de dades on cada píxel representa una porció de terreny, amb el seu corresponent valor complex, indicant el mòdul i la fase de la reflectivitat radar en aquell punt. Aquestes imatges fan referència a una extensió de terreny molt gran (~ 100 x 100 km), amb la qual cosa el més natural és centrar-se en una zona d'estudi més petita, tant perquè les zones en estudi no solen afectar una àrea tant gran com també per motius de capacitat de processament. Així doncs, s'escull un retall d'una de les SLC que s'agafarà com a referència. Aquesta SLC rebrà el nom de *MASTER-MASTER*.

L'objectiu final de la cadena és la d'obtenir interferogrames, és a dir, combinacions de les SLC's per tal de trobar diferències de fase entre elles. Per tal que la informació sigui útil és necessari que les imatges es prenguin des de punts de vista diferents. Això fa que la geometria d'adquisició de les imatges no sigui la mateixa i que per tant les imatges estiguin desalineades. Resulta vital que la informació que es combina en les imatges que formen l'interferograma faci referència a la mateixa zona sobre el terreny. Així doncs, caldrà un alineament entre cada una de les imatges i la imatge *MASTER-MASTER*. Aquest alineament es du a terme en 2 fases: alineament gruixut i alineament fi. El primer realitza un alineament a nivell de píxel per obtenir una primera aproximació al retall que volem i el segon acaba d'afinar l'alineament, realitzant-lo a nivell de subpíxel, amb un tractament exclusiu per a cada un dels píxels.

Un dels objectius d'aquest projecte és el de desenvolupar un nou sistema d'alineament fi, com es veurà en apartats posteriors.

3.3.2 Interpolació de les imatges SLC

L'objectiu final de la interferometria és obtenir informació a partir de dues imatges obtingudes de dos punts de vista diferents. Aquest fet, en el domini transformat, es tradueix en que els dos espectres estan desplaçats l'un respecte l'altre. Aquest desplaçament depèn de la línia de base entre els satèl·lits, és a dir, de la distància entre els punts de vista des dels quals estan preses les imatges. Si la línia de base és molt gran és pot donar el cas que hi hagi *aliasing* degut a un desplaçament excessiu dels espectres. Així doncs, resulta convenient realitzar una interpolació de les imatges per evitar-lo.

La interpolació de les imatges té altres aplicacions que no són de rellevància en aquest projecte, com per exemple en el procés de detecció de PS (*Permanent Scatters*).

3.3.3 Filtratge de les imatges SLC

En aquest pas es realitzen dos filtratges de les imatges, un en la direcció *range* i l'altre en l'*azimuth* [Carrasco '98]. Aquests filtratges són necessaris degut als desplaçaments espectrals comentats a l'apartat 2.3.2.

En el primer cas es té el desplaçament en la direcció *range*. A grans trets, des del punt de vista espectral, quan es multipliquen les dues SLC's per obtenir l'interferograma, el que s'està fent es correlar dos espectres desplaçats freqüencialment l'un de l'altre degut als diferents angles d'incidència. Això dona lloc a que hi haurà zones dels dos espectres que no seran comunes i que per tant no aportaran informació interferomètrica. Així doncs, s'aplica un filtre passa banda a l'espectre de les dues imatges per tal de quedar-se únicament amb la zona comuna de l'espectre, per així reduir el soroll. Aquest filtratge serà més necessari com més gran sigui la línia de base entre els dos satèl·lits, ja que el desplaçament espectral és directament proporcional a la línia de base perpendicular (B_n).

En el segon cas, el filtratge en la direcció *azimuth*, també es té un desplaçament freqüencial, però aquesta vegada és degut a la diferència de freqüències Doppler. Així doncs, es resol el problema com en el cas anterior, mitjançant un filtre passa banda en la direcció *azimuth*. En la majoria dels casos aquest filtratge és prescindible, ja que les diferències de freqüència Doppler són petites. És fa necessari en les imatges obtingudes pel satèl·lit ERS-2 a partir de l'any 2000, on degut a un problema amb els giroscopis que mantenien la direcció de visió del satèl·lit, amb la qual cosa les freqüències Doppler deixen de ser estables i poden provocar desplaçaments significatius en la direcció *azimuth*.

3.3.4 Generació dels interferogrames

En aquest pas simplement es multipliquen els retalls *master* i *slave* per formar l'interferograma. Llavors es realitza un nou filtratge, aquest cop de l'interferograma en si, amb l'objectiu d'incrementar la relació senyal-soroll (SNR). Aquest consisteix en un filtre passa banda que conserva la informació interferomètrica (part comuna de l'espectre de les dues imatges) tot rebutjant el soroll [Carrasco '98].

3.3.5 Generació dels interferogrames diferencials

En aquest punt s'obté el producte final de la cadena interferomètrica, els interferogrames diferencials. Com s'ha vist anteriorment, aquest pas consisteix en sostreure la component topogràfica i la component de terra plana de la fase interferomètrica. Per això, partint de les òrbites i d'un DEM extern, s'obtiniran interferogrames sintètics mitjançant la geocodificació inversa, els quals inclouen les dues components. Així doncs, simplement restant els interferogrames sintètics dels interferogrames (a nivell de fase) s'obtenen interferogrames diferencials. Durant el desenvolupament d'aquest projecte s'ha generat un mètode òptim per la generació dels interferogrames sintètics, lligat a l'algorisme d'alineament.

4 ALINEAMENT FI AMB UN DEM DE REFERÈNCIA

4.1 Introducció

Com ja s'ha vist, un dels passos importants de la cadena interferomètrica és el d'alinejar les dues imatges amb les quals es formarà l'interferograma, és a dir, aconseguir que el cada píxel de la imatge *master* representi la mateixa porció de terreny que el píxel corresponent de la imatge *slave*. D'aquesta manera s'aconsegueix combinar de forma coherent la informació per a cada píxel de l'interferograma. Malgrat tot, realitzar l'alineament de forma acurada no és tant senzill com fer un simple desplaçament d'una imatge respecte l'altra, ja que degut a la diferència entre les dues geometries d'adquisició (les imatges estan preses des de dos punts de vista diferents, és a dir, amb diferents angles d'incidència), les SLCs presenten una certa deformació entre elles.

Així doncs s'ha de realitzar un alineament més acurat que “deformi” la imatge *slave* per poder adaptar-la a la imatge *master*. Cal tenir en compte que cada píxel de la imatge radar representa una porció de terreny, amb la qual cosa és molt difícil que el l'offset entre una imatge i l'altra sigui enter. El següent gràfic mostra aquesta problemàtica amb el cas simplificat d'un offset constant per a tots els píxels.

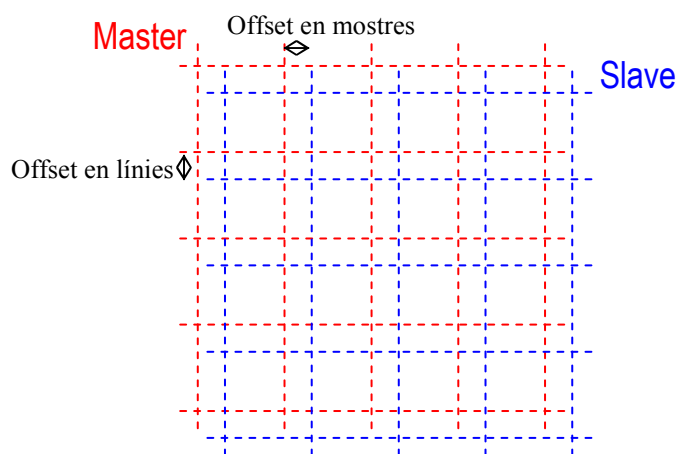


Fig. 4.1 Representació de l'offset no enter.

Cal realitzar un alineament a nivell de subpíxel per corregir l'offset. El que es pretén en aquest capítol és plantejar un nou algorisme per a realitzar aquest pas, anomenat *alineament fi*. Concretament es tracta de trobar els offsets entre la imatge *master* i la

imatge *slave* per a cada un dels píxels corresponents, prenent com a base la informació que aporten un DEM extern i les òrbites des d'on es van adquirir les imatges.

Aquest mètode d'obtenció dels offsets és radicalment diferent del que s'utilitzava fins el moment. Per tant es realitzarà una comparació d'ambdós mètodes, tot ressaltant els pros i els contres de cada un d'ells.

Paral·lelament a aquest càlcul dels offsets, i com a part del procés per obtenir-los, es pren també la distància entre cada òrbita i el píxel sobre el terreny. La diferència entre aquestes dues distàncies es proporcional a la fase interferomètrica entre les dues imatges que, al provenir d'un DEM, només conté informació de topografia. En altres paraules, s'està obtenint un interferograma sintètic entre les dues imatges implicades. Aquesta fase topogràfica es podrà utilitzar mes endavant per extreure la part de topografia d'un interferograma i així obtenir un interferograma diferencial.

També s'ha de fer front a un altre problema: Les SLC d'entrada al sistema poden provenir de diferents sensors, els de ERS i el de ENVISAT. La cadena interferomètrica anterior permetia el processament conjunt de ambdós tipus, i per tant, s'ha mantingut aquesta compatibilitat. Així doncs, passem a la descripció de l'algorisme.

4.2 Diagrama de l'algorisme

Tot seguit és mostra el diagrama complet de tots els passos que es durant a terme en l'algorisme per a una més fàcil comprensió d'aquest. Cal dir que alguns passos ja es realitzaven en l'alineament anterior i es seguiran realitzant de la mateixa manera. La descripció de cada un d'ells es durà a terme en els següents apartats.

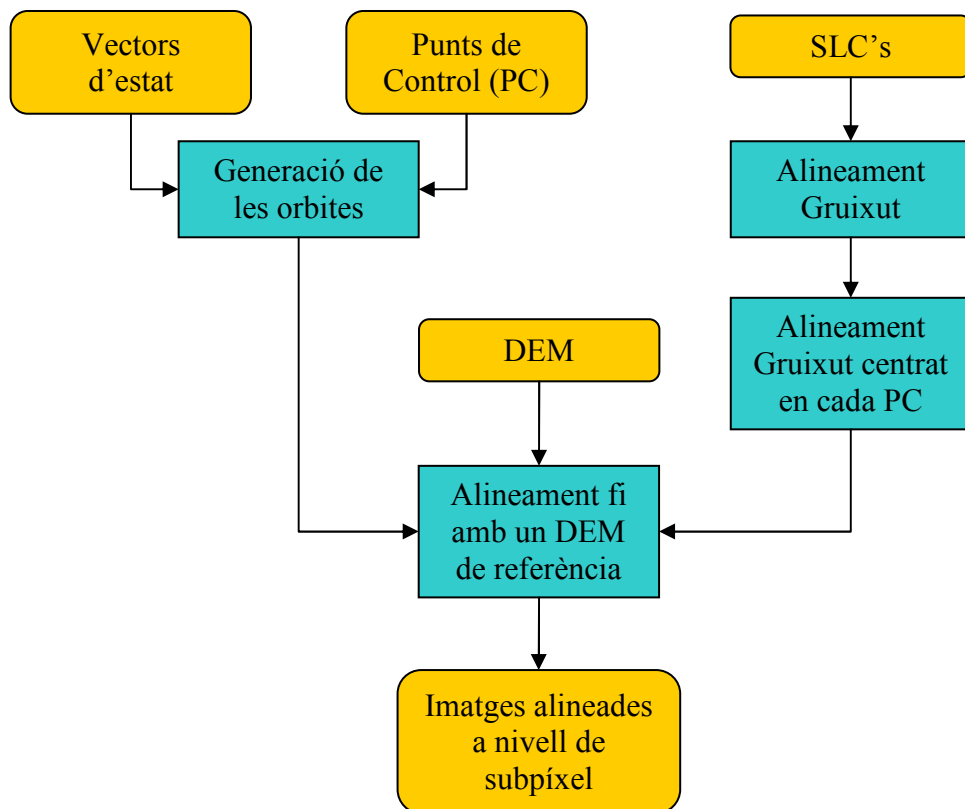


Fig. 4.2 Diagrama de blocs de l'algorisme d'alineament

4.3 Pas previ: Alineament gruixut

Primer de tot caldrà realitzar un alineament a nivell de píxel per així obtenir els retalls sobre els que es farà l'alineament fi. Mitjançant aquest pas s'obté un retall de la SLC reduït i aproximat de la zona d'estudi que desitgem, amb la qual cosa s'estalviarà molt de temps de processament *a posteriori*.

Aquest alineament consisteix simplement en una comparació entre les imatges per tal d'obtenir el desplaçament (en les direccions *range* i *azimuth*) fix i comú per tots els píxels entre les dues imatges. Aquesta comparació es realitza mitjançant una correlació creuada de l'amplitud i buscant el màxim d'aquesta [Torrents '93]. Tot seguit es mostra la l'expressió de la correlació creuada entre dues matrius, A i B, de mida S mostres per L línies:

$$R_{AB}(m_1, m_2) = \sum_{n_1=0}^{S-1} \sum_{n_2=0}^{L-1} A(m_1, m_2) \cdot B(n_1 - m_1, n_2 - m_2) \quad (4.1)$$

Es un càlcul molt simple i eficient en el domini de Fourier, ja que es correspon a una multiplicació dels espectres de les dues imatges:

$$\overline{R_{AB}} = FT^{-1} \left(FT(\overline{A}) \cdot FT(\overline{B}^*) \right) \quad (4.2)$$

Per facilitar un bon resultat d'aquesta correlació, es quantifica la amplitud a tres nivells per incrementar el contrast de les imatges.

En aquest punt es presenta el problema esmentat anteriorment de treballar amb sensors diferents. La diferència entre ambdós sensors es tradueix en que a la pràctica les dimensions dels píxels entre imatges dels dos satèl·lits estaran lleugerament expandides o comprimides, en cada dimensió, els uns respecte els altres, degut a les diferents freqüències de repetició de polsos (*PRF*), que afectaran a les línies i a les freqüències de mostreig, que afectaran a les mostres de la imatge. Si es vol realitzar un processament coherent (obtenir el retall de la mateixa zona d'estudi per a totes les SLC's), és necessari que s'alineïn totes les imatges disponibles respecte a una única, anomenada *MASTER-MASTER*, de tal manera que cada píxel de cada imatge respectivament representi la mateixa porció de terreny. Així doncs, serà necessari realitzar els anomenats alineaments creuats entre diferents sensors. Per això existeixen dues línies de processament diferents: una per l'alineament directe (ERS-ERS o ENVISAT-ENVISAT) i una altra per l'alineament creuat (ERS-ENVISAT o ENVISAT-ERS).

4.3.1 Alineament gruixut entre sensors iguals

Per realitzar aquest alineament, es treballa sobre una porció de les SLC completes. No necessàriament ha de coincidir amb el retall de la zona d'interès que s'ha escollit pel processament, ja que és un alineament a nivell de tota la SLC. A més, la porció d'imatge utilitzada té la següent restricció: Caldrà que les seves dimensions (tant en *range* com en *azimuth*) siguin potència de 2, per tal de poder treballar amb FFT's. Aquestes dimensions donaran el màxim offset detectable, que es correspon amb la meitat d'elles, ja que un desplaçament més gran faria que les porcions d'imatge ja no es superposessin i no fos possible calcular la correlació. L'opció més senzilla és que el programa esculli automàticament la matriu que s'utilitzarà, que serà amb les dimensions escollides i centrada en la SLC. Així i tot hi ha cert casos on és més interessant col·locar-la manualment, com per exemple quan hi hagi una zona notable de la SLC que sigui mar. Llavors, si el retall agafés una part molt gran de mar, al tractar-se d'una zona molt incorrelada, podria donar lloc a un error en la detecció del màxim correcte de la correlació.

Així doncs, d'aquesta manera s'obté un offset a nivell de píxel que permet fer tant retall de la *master* (l'original) com el de la *slave* (aplicant l'offset). Com que és una primera aproximació, es deixa una marge addicional de 128 píxels al voltant de la imatge per acabar de fer l'ajustament.

4.3.2 Alineament gruixut entre sensors diferents

Com ja s'ha dit anteriorment, aquest cas és més complicat degut les diferents mides de píxel. L'única manera que hi ha per realitzar l'alineament es remostrejant la imatge *slave* per tal que tingui la mateixa mida de píxel que la imatge *master*. Es segueix el següent procediment:

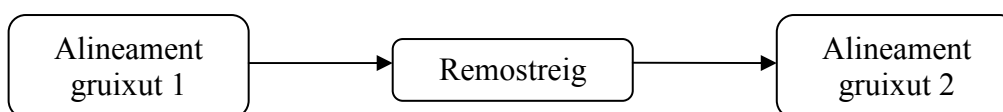


Fig. 4.3 Procediment de l'alineament gruixut entre sensors diferents

El primer pas pot semblar innecessari i fins i tot incoherent, degut que les mides de píxel són diferents, però com que la diferència no és molt gran, es pot aconseguir una primera aproximació dels retalls i d'aquesta manera s'estalvia haver de remostrejar tota la imatge SLC, economitzant així espai de disc i temps de processament. Per a fer aquest primer alineament gruixut, es deixen uns marges en *range* i *azimuth* marcats pels paràmetres *B_SIZE_X* i *B_SIZE_Y* respectivament. Llavors es remostreja el retall de la imatge *slave*, amb la qual cosa s'acaben tenint dos retalls amb la mateixa mida de píxel. Ara només queda tornar a fer un altre alineament gruixut per tal de trobar un segon offset a nivell de píxel entre els dos retalls amb la mateixa mida de píxel i així refinar l'alineament global. Un cop fet això s'elimina part del marge fins a tenir el marge habitual de 128 píxels.

4.4 Precedents

4.4.1 Alineament fi per coherència

Aquest és l'algorisme més antic. Es tracta de trobar l'offset que maximitza la coherència. Es du a terme mitjançant la correlació creuada dels píxels complexes de les dues imatges. Va ser ideat pel processament d'imatges de la *missió tàndem*, en la qual es processaven imatges amb una línia de base temporal molt baixa (un dia) i per tant amb un nivell mig de coherència molt elevat. La limitació evident d'aquest mètode és que al ampliar el ventall d'imatges la línia de base temporal també augmenta i la coherència baixa dràsticament, i per tant la estimació dels offsets és menys fiable.

4.4.2 Alineament fi per correlació d'amplitud

L'algorisme utilitzat fins el moment proposa una idea paral·lela al cas de l'alineament gruixut: la correlació de la amplitud. En aquest cas, primer es divideixen els retalls en blocs. Llavors es calcula la FFT de cada parella de blocs corresponents (*master* i *slave*) i es realitza una interpolació per Zero-padding, la qual dona una millor resolució per trobar offsets a nivell de subpíxel. Així doncs, només cal fer la IFFT i buscar el màxim de la correlació. D'aquesta manera s'obté un offset per a cada bloc. Aquest algorisme presenta algunes limitacions:

- a) No es pot trobar l'offset concret per cada píxel, sinó que s'ha de trobar a nivell d'un bloc, ja que aquest es necessari per fer la correlació.
- b) Els offsets de zones amb molt poc contrast (boscos, aigua, camps de cultiu, etc...) poden no ser fiables. Per contrarestar aquest fet, es realitza un filtre de mediana sobre la matriu d'offsets. D'aquesta manera s'eliminen els offsets incorrectes i es dedueix el valor a partir dels offsets veïns, cosa que no deixa de ser una aproximació.

4.5 Principis del nou algorisme

La part principal d'aquest algorisme es basa en la obtenció dels offsets a nivell de subpíxel. La idea bàsica és partir de la informació d'un DEM (coordenades geogràfiques i altura) i

projectar-la sobre cada una de les geometries *slant-range* de cada imatge mitjançant la geocodificació inversa. D'aquesta manera s'obté el desalineament existent entre elles.

Així doncs, la informació necessària s'extreu a partir de les dades orbitals i un DEM. Com que el DEM és una dada externa, és comuna per qualsevol parell d'imatges. Així doncs, només resta trobar la informació orbital per a cada parell d'SLC's.

4.5.1 Obtenció de la informació orbital

Un cop realitzat l'alineament gruixut es tenen dos retalls (*master* i *slave*) alineats a nivell de píxel i amb un marge de guarda de 128 píxels. Ara cal obtenir la posició dels satèl·lits des d'on es van captar cada una de les línies d'aquests retalls respectivament. Aquesta informació es pot extreure de dos llocs diferents:

- a) Vectors d'estat de les capçaleres de les SLC's.
- b) Fitxers d'òrbites precises de la ESA.

Sempre que es pugui cal utilitzar les òrbites precises, ja que són molt més acurades que les dades de la capçalera.

Primer de tot, s'obtenen les òrbites per tota la imatge SLC. En les òrbites precises contenen informació de posició (vectors d'estat) cada 30 o 60 segons, en els casos de ERS i ENVISAT respectivament. Aquest interval, segons les PRF's, equivalen a més de 50.000 línies en el primer cas i gairebé 100.000 línies en el segon. Donat que una SLC té al voltant de 25.000 línies, és fa necessària una densitat d'informació orbital molt més gran (de fet es vol la posició orbital per a cada línia de la imatge), i per tant caldrà interpolar l'òrbita.

Es farà servir una interpolació basada en un polinomi. Concretament s'utilitzarà un polinomi de tercer grau, amb la qual cosa s'han de resoldre quatre coeficients. Així doncs, es necessiten 4 equacions, que surten de particularitzar el polinomi pels 2 vectors d'estat, (x_0, x_1) , i també les velocitats en aquests punts, (v_{x0}, v_{x1}) , de la següent manera:

$$x(t) = a_{x3} \cdot t^3 + a_{x2} \cdot t^2 + a_{x1} \cdot t + a_{x0} \quad (4.3)$$

$$v_x(t) = 3 \cdot a_{x3} \cdot t^2 + 2 \cdot a_{x2} \cdot t + a_{x1} \quad (4.4)$$

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ v_{x0} \\ v_{x1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_0^3 & t_0^2 & t_0 & 1 \\ t_1^3 & t_1^2 & t_1 & 1 \\ 3 \cdot t_0^2 & 2 \cdot t_0 & 1 & 0 \\ 3 \cdot t_1^2 & 2 \cdot t_1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{x3} \\ a_{x2} \\ a_{x1} \\ a_{x0} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

En les equacions anteriors es planteja el cas per l'eix X, però es duu a terme el mateix procés pels eixos Y i Z.

Així i tot, el cas anterior es té quan el tram d'òrbita queda entre dos vectors d'estat. En el cas que en el tram d'òrbita hi intervinguin 3 vectors d'estat (tal com mostra la figura 4.4), simplement es realitzen dues interpolacions diferents per cada un dels dos trams.

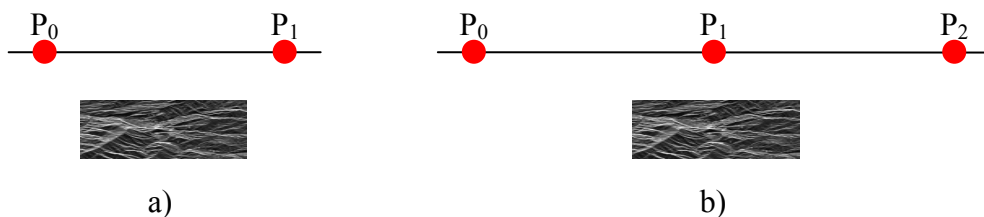


Fig. 4.4 Casos possibles durant la interpolació orbital.
 a) La interpolació depèn de 2 vectors d'estat. b) La interpolació depèn de 3 vectors d'estat

Tot seguit es realitza un alineament de les òrbites i s'agafen només els segments d'òrbita necessaris pels retalls. Es realitza aquest alineament en dos passos:

a) Alineament en *azimuth* zero: En aquest alineament se suposa que la component *azimuth* de la línia de base espacial és nul·la, es a dir, que les dues òrbites són exactament paral·leles. Tot seguit s'agafa com a posició *azimuth* en la òrbita *slave* com la mateixa que la *master*. En realitat no s'utilitza aquest mètode sinó que es fa ús d'un criteri de mínima distància entre les òrbites, ja que s'ha comprovat que hi ha molt poca diferència (de l'ordre de mil·límetres) entre els dos mètodes i el segon és molt més senzill i òptim computacionalment.

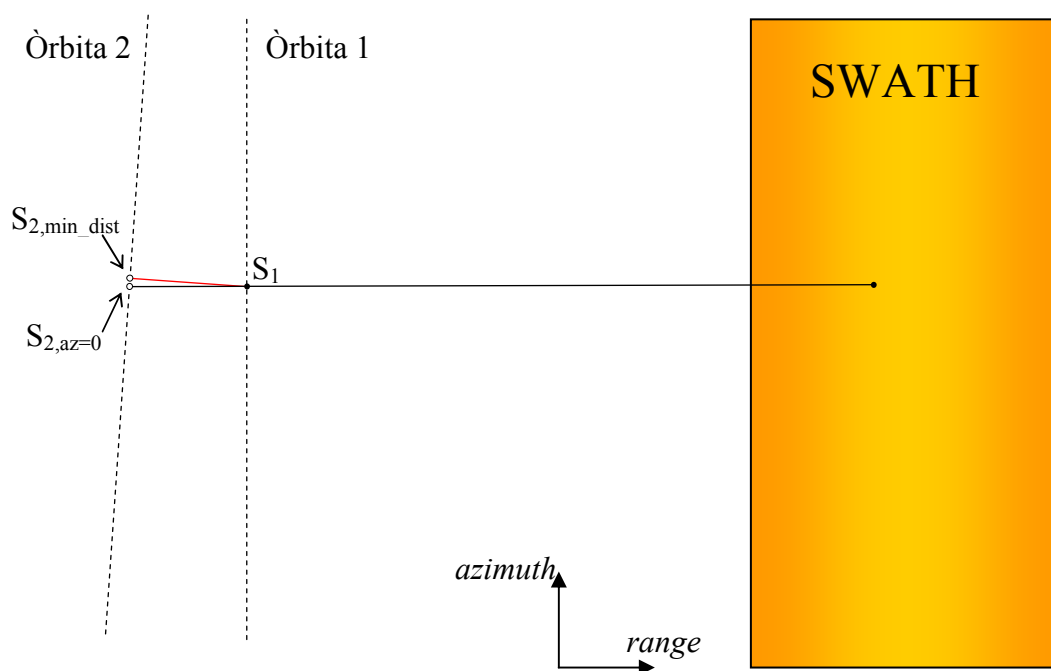


Fig. 4.5 Representació de l'alineament orbital en *azimuth* zero

b) Alineament en Doppler zero: En realitat les òrbites no són del tot paral·leles i per tant l'alineament en *azimuth* zero no deixa de ser una primera aproximació. Per tant cal corregir les òrbites mitjançant l'alineament en Doppler zero. Aquest procés és un xic més complicat, ja que es farà ús de les tècniques de geocodificació explicades a l'apartat 2.5.2. Per a cada posició orbital es calcula la posició sobre el terreny d'un punt donat de la SLC mitjançant la geocodificació directa. Per a aquest propòsit s'ignorarà la topografia, és a dir, s'utilitzarà un el·lipsoide pla com a model

terrestre. Un cop es té la posició sobre el terreny, es calcula la coordenada *azimuth* sobre la segona imatge fent ús de la geocodificació inversa, la qual donarà la posició sobre la segona òrbita. D'aquesta manera s'assegura que les dues òrbites estan veient el terreny amb geometria *zero-Doppler*.

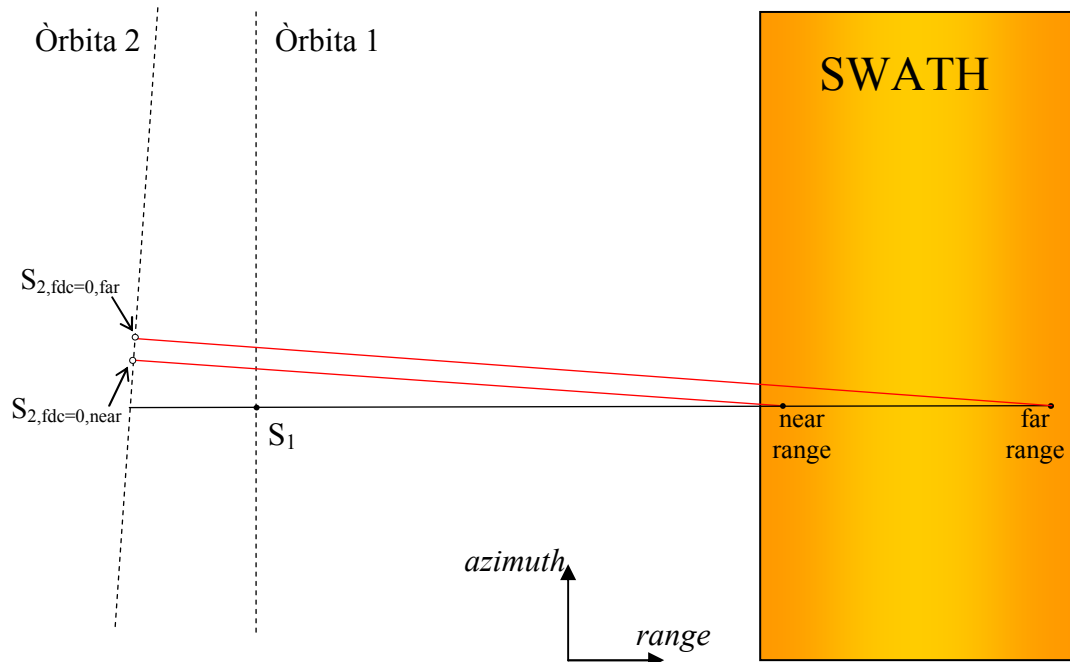


Fig. 4.6 Representació de l'alineament orbital en Doppler zero

D'altra banda, els paràmetres de temps de retard del pols radar (direcció *range*) i el temps en *azimuth* que solen ser imprecisos també. Per fer front a aquest problema, s'utilitzen punts de control. Aquests punts de control relacionen la informació de posició geogràfica (*ground-range*) amb la posició sobre els retalls de les SLC's (*slant-range*). Per a cada punt de control es passa, mitjançant geocodificació inversa, la informació en *ground-range* (latitud i longitud) a *slant-range* (línia i mostra sobre el retall). Llavors es mira l'error comès respecte la posició esperada. La correcció final que s'aplicarà sobre la òrbita és la mitjana de totes les correccions. Per això es recomana utilitzar tants punts de control com sigui possible, ja que d'aquesta manera es minimitzarà l'error humà a l'hora d'escollir-los. De tota manera, es genera informació de la desviació típica entre els diferents errors en cada punt de control per a poder discriminar-ne algun molt dolent a posteriori. Per millorar el càlcul, prèviament es realitza un càlcul dels offsets gruixut (alineament per amplitud) particularitzats per a cada punt de control. Per això s'utilitza una petita matriu de correlació al voltant del píxel del retall associat a cada punt de control. Durant el curs d'aquest projecte també s'ha realitzat també un mètode per generar punts de control automàticament i s'explicarà en el capítol 6.

Paral·lelament es generen dos fitxers geomètrics (un per la *master* i un per la *slave*) amb la informació de la distància *range* entre cada píxel de la SLC i la posició orbital des de la qual van ser presos, informació també necessària per al càlcul dels offsets d'alineament fi, com es veurà més endavant. L'obtenció del fitxer geomètric referent a la imatge *slave* és diferent pel cas directe que pel cas creuat. El problema és que cal trobar un punt de referència d'on comença el retall de la imatge *slave* sobre la SLC un cop aplicat l'alineament gruixut. Hi ha els dos casos següents:

a) **Cas directe:** És el cas més senzill. El càlcul de la distància *range* (R) de cada píxel es basa en les següents expressions:

$$T_R = zdt_near_{master} + \frac{(mos0_{master} + m_i)}{f_{m_master}} \quad (4.6)$$

$$R = \frac{T_R \cdot c}{2} \quad (4.7)$$

El paràmetre zdt_near_{master} fa referència al temps de retard de la primera columna de la SLC, $mos0_{master}$ a la primera mostra del retall en estudi, m_i a la mostra en concret dins el retall i f_{m_master} a la freqüència de mostreig de la SLC. Pel cas de la imatge *slave* es tant senzill com fer el mateix càlcul prenent els paràmetres referents a la imatge *slave* i considerant $mos0_{slave} = mos0_{master} - off_mos$, on off_mos és l'offset en mostres entre la imatge *master* i la *slave*, calculat durant l'alineament gruixut.

b) **Cas creuat:** Aquest cas ja és més complicat, ja que el retall *slave* està sotmès a un remostreig durant l'alineament gruixut, per aconseguir que els dos retalls tinguin la mateixa mida de píxel. Pel que fa al cas de la *master* es pot seguir calculant de la mateixa manera que en el cas anterior, però per la imatge *slave* s'haurà de prendre un punt de referència que no es vegi afectat pel remostreig. Degut a que aquest s'aplica des del centre de la imatge cap als costats, la posició corresponent a la meitat de la imatge en la direcció *range* restarà immòbil en termes d'expansió o compressió dels píxels. Així doncs, les expressions per la imatge *slave* són les següents:

$$T_{R_2} = zdt_{near_2} + \frac{(mos0_{master} - off_{mos_1} + \frac{(mos-1)}{2})}{f_{m_slave}} + \frac{(-off_{mos_2} - \frac{(mos-1)}{2} + m_i)}{f_{m_master}} \quad (4.8)$$

$$R_2 = \frac{T_{R_2} \cdot c}{2} \quad (4.9)$$

Com es pot veure, s'acaba donant la referència de temps a l'inici del retall ja que amb les condicions abans del remostreig s'aplica el terme $(mos - 1)/2$ per desplaçar la referència al centre del retall i es torna a l'inici del retall aplicant-lo amb signe contrari amb les condicions després del remostreig.

4.5.2 Càlcul dels offsets de subpíxel

Una vegada s'obté la informació orbital, es pot procedir al càlcul dels offsets menors d'un píxel. Com ja s'ha dit, l'algorisme consisteix en trobar la posició *range* i *azimuth* de cada píxel del DEM sobre cada una de les SLC's. D'aquesta manera, la diferència entre les posicions correspon a l'offset entre cada parella de píxels. Es realitzen els següents passos:

a) **Càlcul de les línies:** Per a cada píxel de l'àrea d'interès del DEM, es calcula a quina línia (no entera) correspon sobre cada retall. Aquest càlcul es basa en trobar la posició orbital des d'on s'observa el píxel del DEM. Aquesta posició correspon

al lloc on la freqüència Doppler és igual a 0, és a dir, el píxel no presenta velocitat respecte a aquest punt. Es realitzen els càlculs a partir de la freqüència Doppler normalitzada, que s'obté a partir de la posició i la velocitat del satèl·lit en cada línia. La velocitat es pot obtenir a partir de la diferència de distància entre una posició i la següent multiplicat per la freqüència de repetició del polsos (PRF).

L'algorisme utilitzat en aquest cas es basa en un sistema iteratiu on es parteix del càlcul de les freqüències Doppler en tres punts: en els extrems de les òrbites i just al centre. Això divideix la òrbita en dos segments, dels quals es pren el que conté la freqüència Doppler 0. Seguidament es divideix aquest sub-segment en dues parts iguals i altre cop s'agafa el sub-segment que contingui la freqüència Doppler 0. Iterant en aquest sentit s'acabarà obtenint un segment de mida 1 línia que contindrà al seu interior la freqüència Doppler 0. Amb una aproximació lineal agafant com a dades les freqüències Doppler als extrems d'aquest segment serà suficient per obtenir a quina línia no entera es troba el Doppler Centroid per a cada imatge. Seguidament es mostra un exemple gràfic.

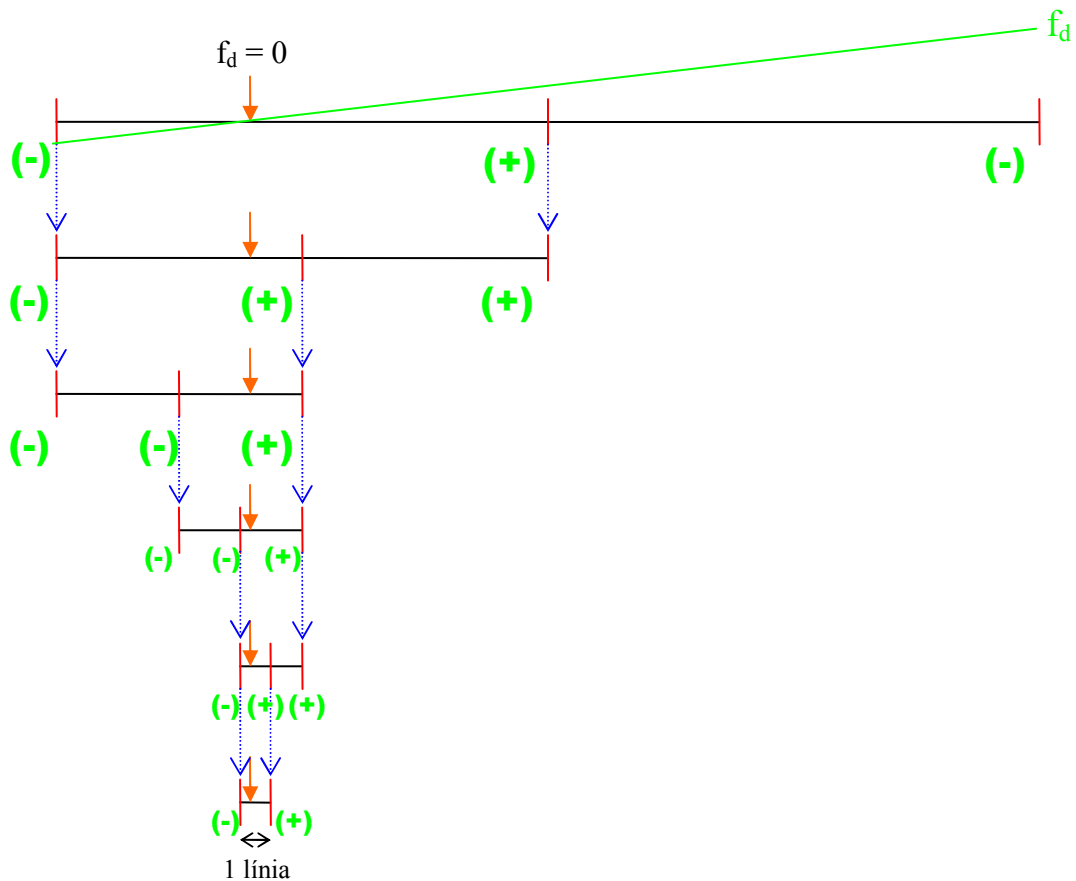


Fig. 4.7 Exemple gràfic del càlcul de la línia que inclou el Doppler Centroid

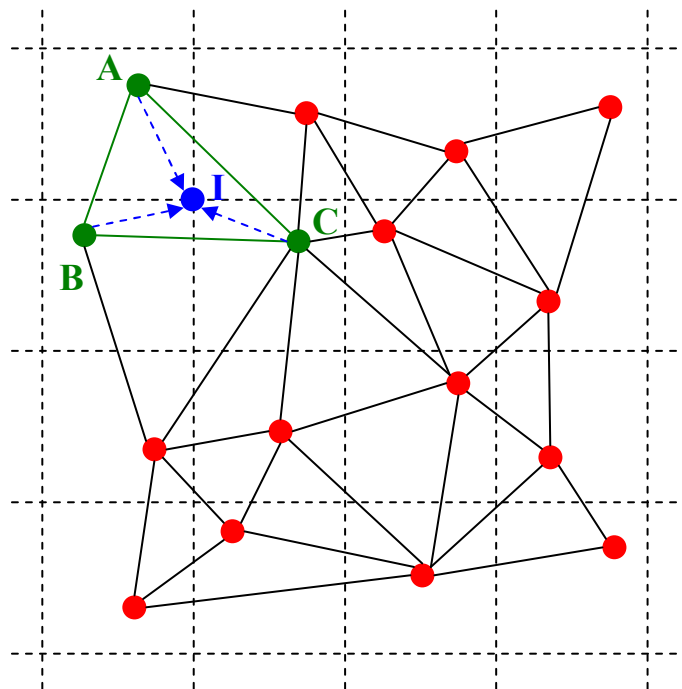
Seguint aquest algorisme, el màxim nombre de passos necessaris és:

$$N_{steps} = \log_2(L) + 1 \quad (4.10)$$

on L és el nombre de línies de la òrbita.

b) **Càlcul de les mostres:** Un cop es tenen les línies a les quals es correspon el píxel del DEM en estudi, es pot passar al càlcul de les mostres. Per això es disposa dels dos fitxers geomètrics que s'han obtingut durant el càlcul orbital, amb la informació de distància *range* entre cada píxel del retall i la seva posició orbital. De fet aquest fitxers estan delmats per un factor 10 per economitzar espai de disc, però es pot obtenir el valor en cada punt mitjançant una interpolació bilineal. Així doncs, el càlcul de la mostra corresponent es redueix a una comparació entre en les distàncies dels fitxers geomètrics i les distàncies que s'obtenen fent el mòdul entre les posicions satel·litals i la posició sobre el terreny (píxel del DEM). Òbviament no es disposa de la posició en una línia no entera de la òrbita, però es pot obtenir interpolant a partir de les dues posicions enteres entre les quals es troba. Així s'obté la mostra no entera en la qual es troba el píxel del DEM per a cada imatge.

c) **Interpolació:** Un cop es tenen les línies i les mostres no enteres es té en realitat l'offset entre posicions no enteres de les SLC. En realitat interessaria un offset no enter respecte a posicions enteres d'una de les dues imatges, en el nostre cas concret, la imatge *master*, que és la referència. Es a dir, s'han obtingut unes matrius d'offsets irregular que s'han d'interpolat per obtenir les matrius d'offsets en *slant-range*. El pas d'aquesta matriu irregular a una matriu regular es du a terme mitjançant una interpolació lineal a partir d'una triangulació Delaunay.



$$offset_I = \frac{|AI|^{-1} \cdot offset_A + |BI|^{-1} \cdot offset_B + |CI|^{-1} \cdot offset_C}{|AI|^{-1} + |BI|^{-1} + |CI|^{-1}} \quad (4.11)$$

Fig. 4.8 Exemple d'una triangulació Delaunay y càlcul de l'offset d'un píxel enter

d) **Aplicació dels offsets sobre la imatge *slave*:** Un cop s'obté l'offset entre cada píxel de la imatge *master* sobre el corresponent de la imatge *slave* es passa a la seva aplicació. Com que cada píxel tindrà un offset diferent caldrà aplicar una interpolació. La interpolació aplicada es basa en centrar una funció sinc sobremostrejada, enfinestrada i escalada sobre cada píxel d'informació i s'obté el valor en el punt desitjat (en aquest cas, on duen els offsets) com a combinació dels valors de totes les sincs veïnes en aquest punt. És convenient passar l'espectre de la imatge a banda base abans de realitzar la interpolació, ja que així s'evita que es filtri en cas d'estar molt desplaçat espectralment.

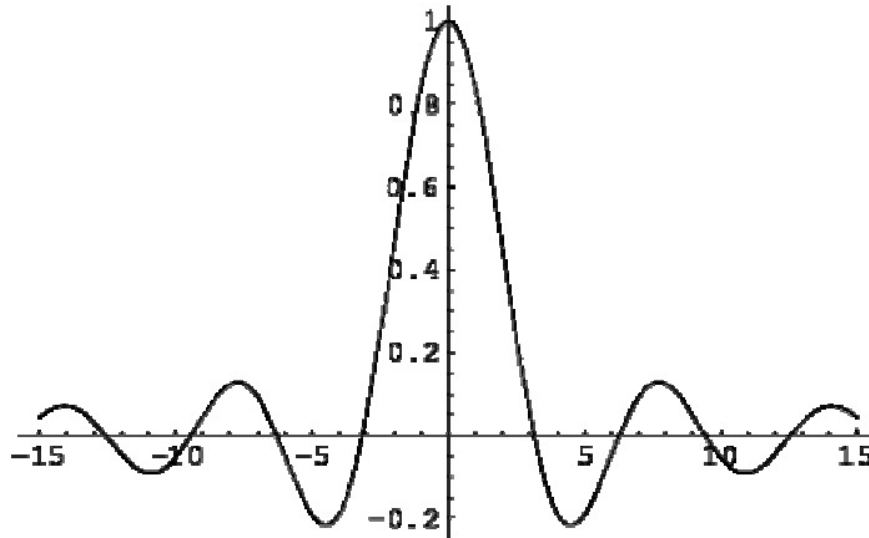


Fig. 4.9 Funció sinc unidimensional

Arribat a aquest punt, la imatge ha estat alineada a nivell de píxel i de subpíxel. Així i tot, encara es peca de certa imprecisió. Per sort, es tracta d'un petit offset de caire constant, degut a possibles errors en les dades, com per exemple, una mala elecció dels punts de control.

Es farà la correcció d'aquest offset amb l'algorisme d'alineament per amplitud. Òbviament, al tractar-se d'un offset constant, realitzant un càlcul en les parts més propícies de la imatge serà suficient. El criteri per decidir quines zones de la imatge utilitzar vindrà donat pel contrast de la imatge, ja que és en aquestes zones on l'algorisme de correlació de l'amplitud és més eficient. Una possible mesura del contrast ens ve donada per:

$$\rho = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{\left(\sum_i x_i\right)^2} \quad (4.12)$$

On x_i són els píxels dels quals es calcula el contrast, \bar{x} la mitjana de tots ells i ρ el contrast calculat.

El criteri seguit és el següent: es divideix la imatge en blocs superposats i es realitza el

càlcul del contrast per cada un d'ells. La mida d'aquest blocs la pot escollir l'usuari, i el més adient és que siguin més grans en la direcció *azimuth*, degut a la naturalesa de les imatges SAR que estem processant.

Un cop es tenen els contrastos es calcula la seva mitjana i s'agafen tots els blocs que la superin. D'aquesta manera el càlcul el realitzarà en les zones més propícies, en termes de contrast.

Es d'aquests blocs seleccionats dels quals es calcularà el valor de l'offset fi segons el criteri d'amplitud. Com a últim control de qualitat, es calcularà la mitjana i la desviació típica de tots els offsets calculats, tot descartant els que superin la desviació típica, per tal d'evitar valors absurds.

Finalment es calcula l'offset constant com la mitjana ponderada per la matriu de contrastos de tots els offsets i s'aplica sobre la imatge *slave*. Es tracta igualment d'un offset no enter, per tant que per aplicar-lo s'hauria de recórrer a una interpolació, però ja que es tracta d'un offset constant per a tots els píxels es pot recórrer al fet que un desplaçament en temps equival a l'aplicació d'un faser en el domini espectral, tal com mostra la següent expressió pel cas unidimensional.

$$FT[f(x-x_0)](\omega) = FT[f(x)](\omega) \cdot e^{-j\omega x_0} \quad (4.13)$$

De fet, malgrat tractar-se d'un cas bidimensional, es poden aplicar els dos offsets constants (en la direcció *range* i la direcció *azimuth*) de forma separada i per tant dividir el problema en dos casos unidimensionals.

Per això, s'aplica la FFT a la imatge (posteriorment a passar-la a banda base), s'apliquen els fasors en les dues dimensions amb l'offset constant corresponent per cada cas i es torna al domini espacial amb la IFFT.

5 OBTENCIÓ D'UN SET D'INTERFEROGRAMES SINTÈTICS

5.1 Introducció

Un dels objectius finals de la cadena interferomètrica és el d'obtenir la deformació del terreny al llarg del temps. En la introducció teòrica es mostrava com la fase interferomètrica es componia de diferents termes. Si només interessa trobar la deformació, resultaria molt útil netejar-la de les components innecessàries. En aquest apartat es veurà un mètode eficient per gestionar la eliminació de la part topogràfica de la fase.

Durant el càlcul dels offsets d'alineament fi, per a cada píxel del DEM es calcula la distància entre aquest punt i la posició orbital des de la qual es va prendre. La diferència entre aquestes dues distàncies és directament proporcional a la fase topogràfica, és a dir, es pot generar un interferograma amb informació únicament de la topografia, ja que prové de les dades d'un DEM. Aquest interferograma és l'anomenat *interferograma sintètic* o *invers*. Aquesta informació resulta molt útil en el camp de la interferometria diferencial, ja que si es resta aquesta fase de l'interferograma corresponent, s'obté un interferograma diferencial, és a dir, amb informació únicament de deformació (en el cas ideal, ja que sempre es tindran components atmosfèriques i possibles errors en el DEM). Fins el moment, es realitzava un interferograma sintètic per a cada interferograma generat. Aquest càlcul es una de les parts de la cadena interferomètrica amb un cost computacional més alt, per això es interessant poder obtenir un interferograma sintètic a partir d'un set d'interferogrames sintètics finit generat prèviament, de forma ràpida i eficient.

5.2 Generació del set d'interferogrames sintètics

Durant el càlcul de l'alineament fi es calcula la línia i la mostra sobre la SLC *MASTER-MASTER* de cada un dels píxels del DEM. Llavors obtenim també l'offset en píxels que hi ha entre aquesta posició i la corresponent de la imatge *slave*. Una de les dades utilitzades per a realitzar aquests càlculs és la distància entre la posició del radar i la posició sobre el terreny, anomenada distància *range*. Com ja s'ha vist, la diferència de distàncies *range* és proporcional a la fase sintètica que es pretén generar en aquest punt. Així doncs, es pot aprofitar la mateixa interpolació utilitzada per passar els offsets d'alineament fi de la malla irregular en *ground-range* a la malla regular en *slant-range* per fer el mateix amb la matriu de diferència de distàncies.

Arribat a aquest punt, es disposa d'una matriu amb informació de diferència de distàncies *range*. Només cal aplicar la següent expressió per obtenir una matriu amb la fase topogràfica, que serà directament l'interferograma sintètic entre la imatge *MASTER-MASTER* i la imatge en qüestió que s'estigui processant en aquest moment.

$$\psi_{\text{ sint }}(l, s) = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \Delta R(l, s) \quad (5.1)$$

on $\psi_{\text{ sint }}$ és la fase sintètica en radians, λ la longitud d'ona, ΔR la diferència de distàncies i (l, s) les línies i les mostres en el pla *slant-range* de la *MASTER-MASTER*.

D'aquesta manera, aplicant l'expressió 5.1 per a cada imatge, s'obindrà un set d'interferogrames sintètics, sempre amb la *MASTER-MASTER* d'alineament com a *master* de l'interferograma.

5.3 Principi de linealitat

Segons aquesta disposició, si es disposa de N imatges alineades s'obtenen N-1 interferogrames sintètics linealment independents. Tot seguit es comprovarà com efectivament es pot obtenir qualsevol interferograma sintètic a partir d'una combinació lineal de dos interferogrames d'aquest set. Cal mencionar que malgrat el conveni de representar tots els interferogrames amb la data de la *master* més antiga que la de la *slave*, en el cas del set d'interferogrames sintètics que s'han generat, tots tenen com a *master* la imatge *MASTER-MASTER* per simplificar l'algorisme.

La combinació lineal d'interferogrames sintètics és basa en un concepte purament geomètric, que es pot assimilar a una suma de vectors. Sigui $\vec{M} = (m_x, m_y, m_z)$ la posició cartesiana del satèl·lit per la imatge *MASTER-MASTER*, $\vec{A} = (a_x, a_y, a_z)$ i $\vec{B} = (b_x, b_y, b_z)$ les posicions per dues imatges qualssevol i $\vec{P} = (p_x, p_y, p_z)$ un punt qualsevol sobre el terreny. Tot seguit es mostra un diagrama de la situació:

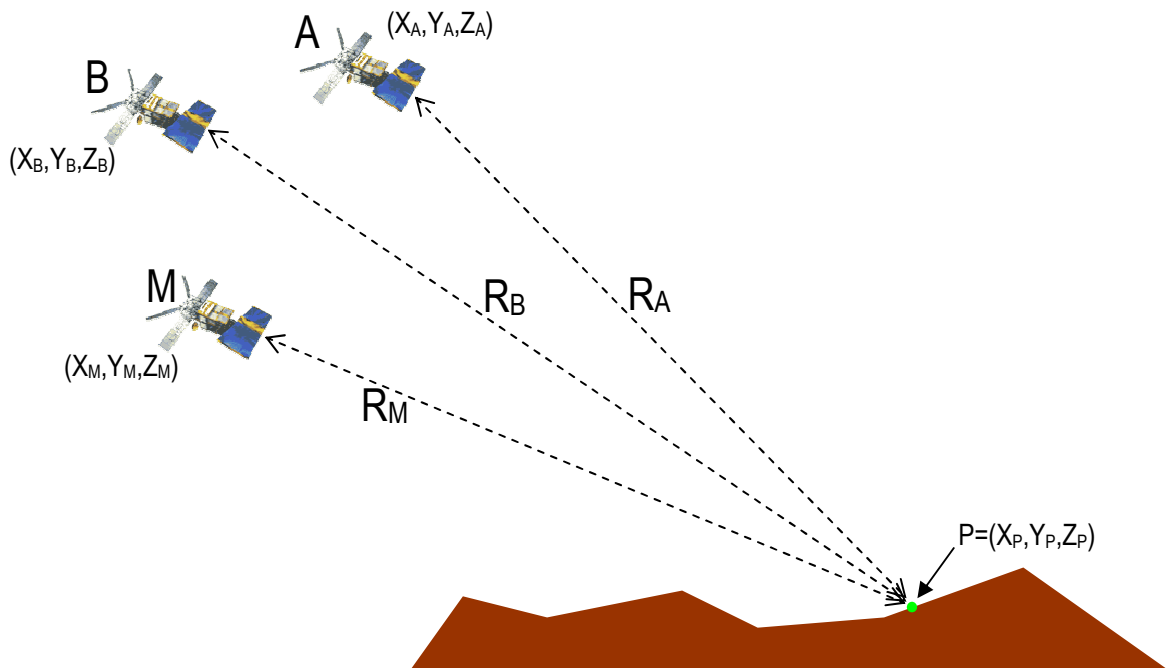


Fig. 5.1 Interpretació geomètrica de la linealitat entre interferogrames sintètics

Com ja s'ha vist en l'apartat 2.2.1, la fase interferomètrica per a cada punt \bar{P} depèn de la diferència de distàncies entre cada satèl·lit i aquest punt (distàncies *range*). És a dir:

$$\psi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (r_2 - r_1) \quad (5.2)$$

En el cas del set generat, de partida es tenen els interferogrames sintètics entre la *MASTER-MASTER* i cada una de les imatges:

$$\begin{aligned} \psi_{MA} &= \phi_M - \phi_A = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (|\bar{M} - \bar{P}| - |\bar{A} - \bar{P}|) = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (R_M - R_A) \\ \psi_{MB} &= \phi_M - \phi_B = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (|\bar{M} - \bar{P}| - |\bar{B} - \bar{P}|) = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (R_M - R_B) \end{aligned} \quad (5.3)$$

És senzill veure que es pot trobar la fase interferomètrica entre A i B com la resta de les dues fases anteriors:

$$\psi_{AB} = \psi_{MB} - \psi_{MA} = \phi_A - \phi_B = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (|\bar{A} - \bar{P}| - |\bar{B} - \bar{P}|) = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (R_A - R_B) \quad (5.4)$$

5.4 Comprovació de la validesa del set d'interferogrames sintètics

L'interferograma sintètic representa la component de fase topogràfica que es vol extreure de la fase de l'interferograma per tal d'obtenir l'interferograma diferencial. El mètode que s'utilitzarà per tal de generar cada interferograma sintètic està basat en aconseguir-ne una base linealment independent, on la *master* de cada un dels interferogrames sintètics de la base sigui la *MASTER-MASTER* escollida durant l'alineament. D'aquesta manera, per una senzilla qüestió geomètrica, es pot obtenir qualsevol interferograma sintètic com a combinació lineal dels de la base.

En aquest apartat es proposa buscar les limitacions i els punts febles d'aquest mètode, així com donar una mesura de l'error comès en el procés. El problema principal que es planteja és el fet que tots els interferogrames sintètics de la base tinguin com a *master* la *MASTER-MASTER* d'alineament. Com s'ha vist en l'apartat 2.3.2, si l'angle d'incidència de les dues adquisicions que formen l'interferograma és molt diferent, o el que és el mateix, que la línia de base entre els satèl·lits és molt gran, la decorrelació espacial fa que els espectres quedin tant separats que la fase interferomètrica sigui en bona part soroll. Així doncs se sol aplicar un límit a la línia de base per tal de processar només els interferogrames que aporten informació útil. Aquesta limitació s'aplica als interferogrames finals, i no als de la base. Això pot donar lloc a que existeixin interferogrames sintètics dins de la base amb una línia de base molt gran. Si es dona aquest cas (i per tant l'angle d'incidència molt diferent) els efectes de distorsió seran molt diferents en les geometries *slant-range* dels dos satèl·lits i per tant donaran lloc a errors en la combinació lineal.

Si se suposa que els interferogrames sintètics de la base són ideals, només es tindria aquest problema. Però això no és així, ja que els interferogrames sintètics estan sotmesos a certs errors:

- Errors en el DEM: Malgrat que per un punt concret l'error de DEM serà el mateix, el fet d'observar-lo des de punts de vista diferents fa que la projecció de l'error en la fase sigui diferent.
- Error d'interpolació: Durant la creació del sintètic es realitza una interpolació d'una malla irregular, ja que les dades en *ground-range* difícilment equivaldran a posicions enteres dins la malla en *slant-range*. Així doncs, també cal tenir en compte l'error en la interpolació.

Tot seguit s'analitzarà el pitjor dels casos: generar un interferograma sintètic amb línia de base petita com a combinació lineal de dos interferogrames sintètics amb línia de base gran. Llavors es compararà el resultat amb l'interferograma sintètic de línia de base petita generat de forma directa. Com s'ha vist, els errors seran de major magnitud en les zones amb topografia més abrupta i per tant s'ha escollit per fer la prova l'àrea al voltant del poble de Diezma, a Granada, en la qual es poden trobar tant zones planes com diversos graus de relleu, degut a la proximitat del parc natural de Sierra Nevada. Tot seguit es mostra una imatge d'amplitud d'alta resolució de la zona on es poden apreciar els efectes de distorsió que provoca la topografia.

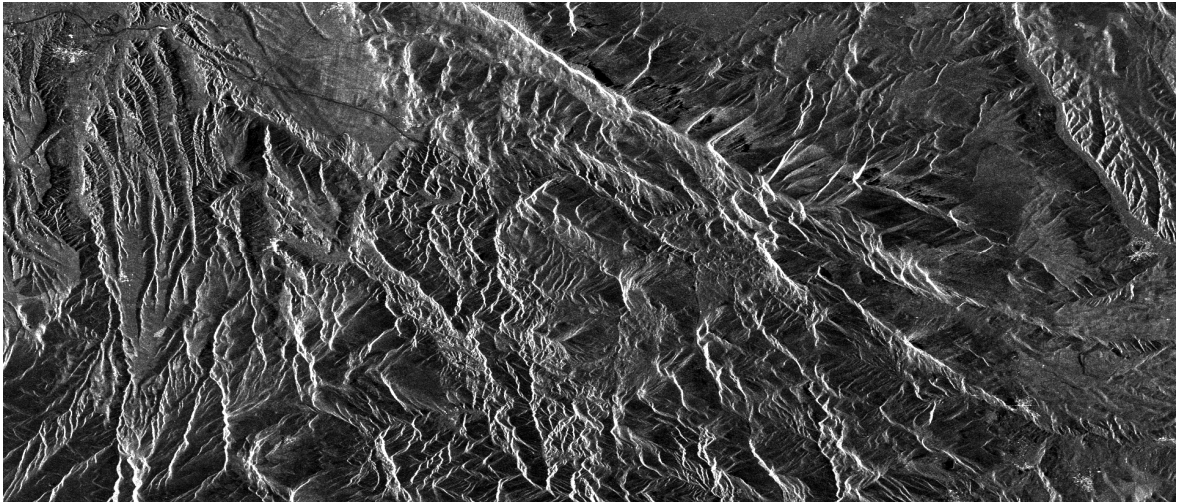


Fig. 5.2 Imatge d'amplitud d'alta resolució d'una zona de Granada. S'ha canviat la relació d'aspecte per tal de fer el píxel quadrat.

Tot seguit es mostren els interferogrames sintètics obtinguts pels dos mètodes.

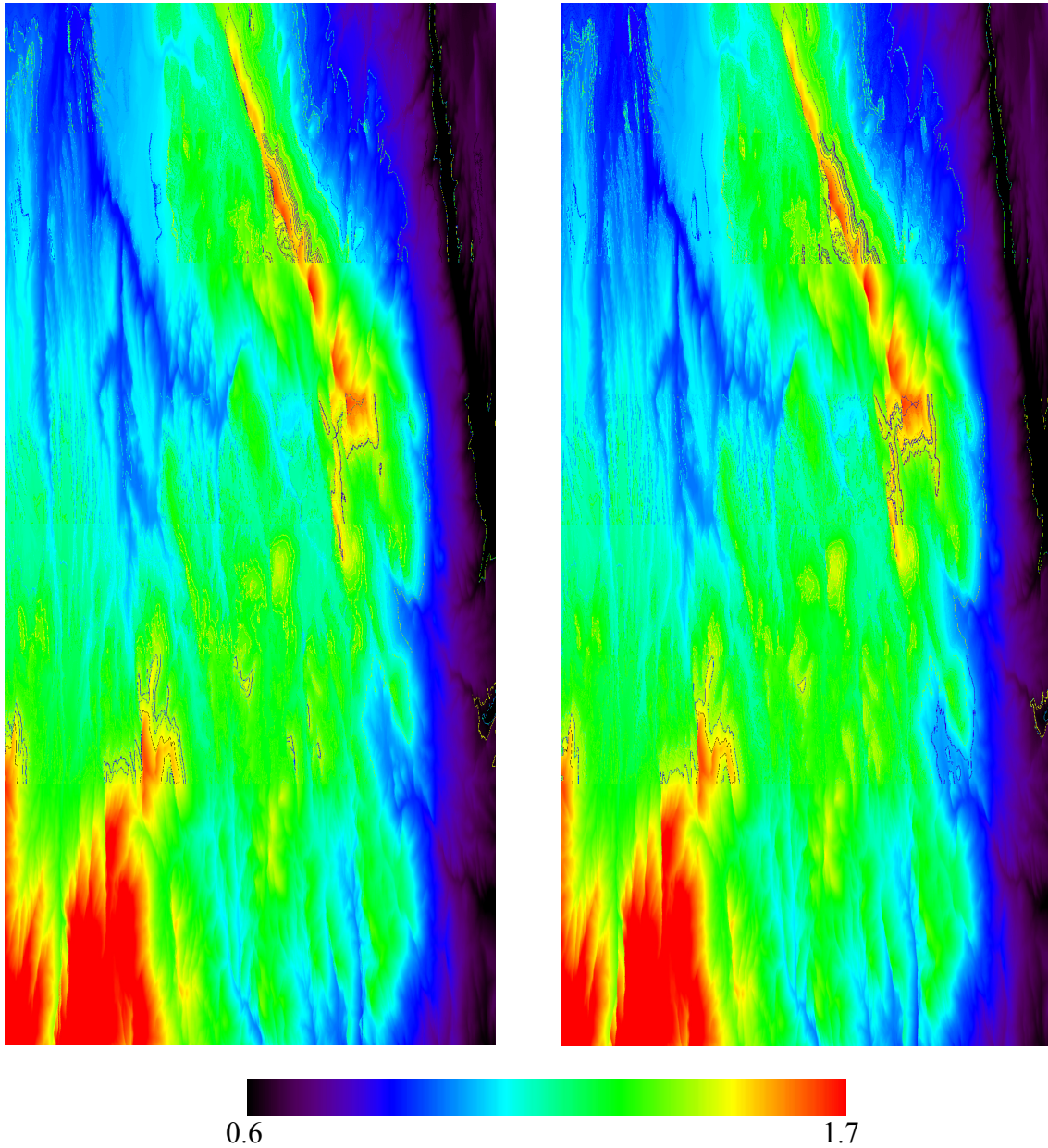


Fig. 5.3 Interferogrames sintètics generats amb els dos mètodes. A l'esquerra tenim la generació per combinació lineal i a la dreta la generació directa. L'escala ve donada en cicles de fase.

Òbviamment a simple vista és difícil veure-hi les diferències i per tant s'ha realitzat la resta per tal de ressaltar-les, obtenint el següent resultat:

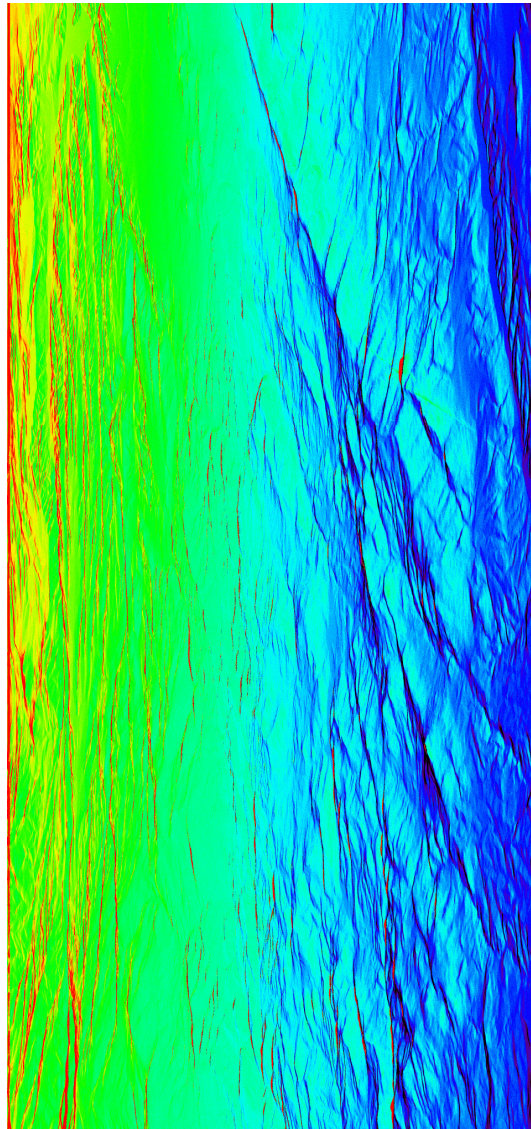


Fig. 5.4 Diferència dels interferogrames sintètics generats amb els dos mètodes. L'escala ve donada en cicles de fase.

Seguidament es mostra una comparativa entre un retall de la diferència de sintètics i el corresponent de la imatge d'amplitud. Es pot observar a simple vista com les màximes diferències es donen en les zones amb topografia forta, tal com s'esperava.

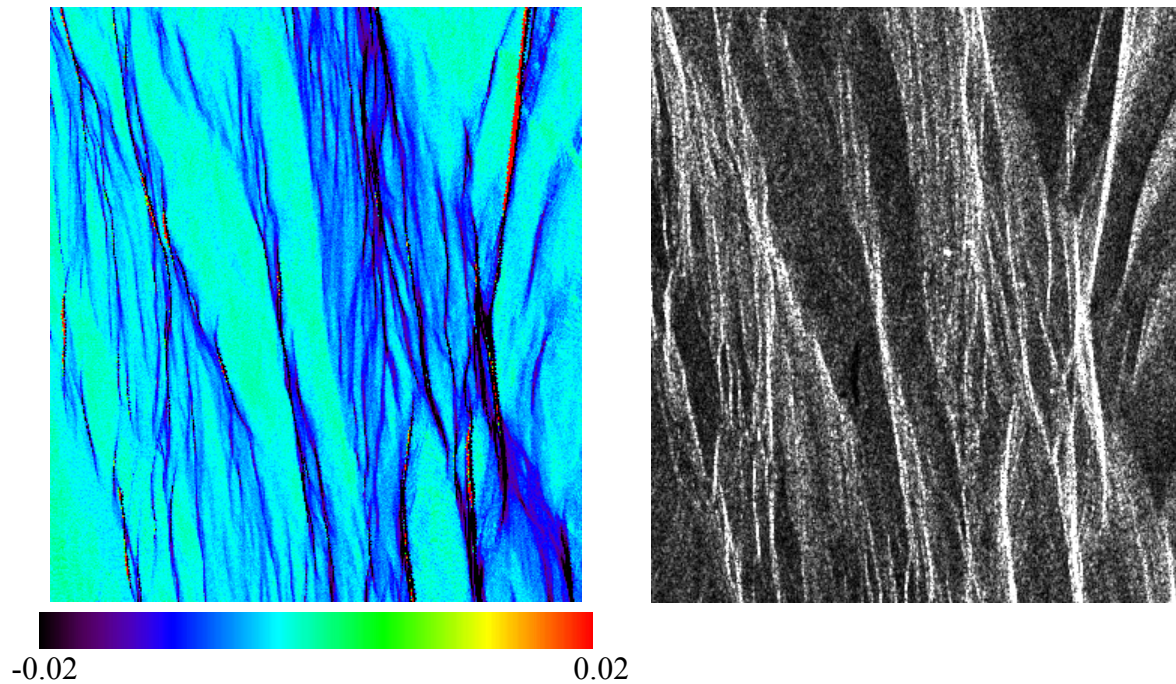


Fig. 5.5 Comparativa entre la diferència de sintètics i la imatge d'amplitud d'alta resolució. S'observa com els màxims errors es donen en les zones més abruptes.

Val a dir que estrictament no és pot parlar d'error, ja que l'interferograma generat de forma directa també està afectat per diferents fonts d'error. Seria més correcte parlar de diferència. Així doncs, per tenir una idea de les implicacions de la diferència es farà un càlcul estadístic i la repercussió que té sobre els resultats que es volen extreure de les dades. Pel cas concret escollit, es té la següent mitjana i desviació típica:

$$\begin{aligned}\bar{\phi} &= -0.000543 \\ \sigma_{\phi} &= 0.011216\end{aligned}\tag{5.5}$$

Les dades anteriors estan en cicles de fase. El que interessa en els resultats finals és la diferència de distàncies, així que aplicant l'expressió 2.9 a la inversa s'obté:

$$\Delta R = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \phi(rad)\tag{5.6}$$

Per tenir una mesura de l'error es calcularà l'increment de distància que representa un error de fase igual a la desviació típica. Tenint en compte que $\lambda = 0.0566$ m, aleshores:

$$\varepsilon_{\Delta R} = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \sigma_{\phi}(rad) = 3.174 \cdot 10^{-4} m\tag{5.7}$$

Com es pot observar, en el pitjor dels casos l'error és dos ordres de magnitud inferior a la longitud d'ona i per tant entra dins dels marges acceptables.

5.5 Comparativa de cost computacional

Com s'ha vist, la nova base algorísmica proposa unir en una sola etapa l'alineament i la generació dels interferogrames sintètics. Tot seguit es donaran una idea del temps necessari de processament en cada cas.

Com a exemple s'utilitzarà una retall de la ciutat de Barcelona, amb unes característiques estàndard als processaments que es duen a terme:

- Mida del retall: 6820 línies, 940 mostres.
- Resolució del DEM: 10 metres.

Així doncs, s'ha calculat el temps necessari per alinear una imatge i obtenir l'interferograma sintètic corresponent que formarà part de la base linealment independent, tot obtenint el següent resultat:

$$t_{new} = 1619 \text{ s} \quad (5.8)$$

Per altra banda, el temps necessari per realitzar l'alineament per amplitud de la mateixa imatge és el següent:

$$t_{alin_amp} = 873 \text{ s} \quad (5.9)$$

Com es pot comprovar és pràcticament la meitat, però cal afegir-hi el temps necessari per generar un sintètic de les mateixes característiques:

$$t_{sint} = 1450 \text{ s} \quad (5.10)$$

Així doncs, el temps total aproximat per obtenir el mateix que amb el nou mètode és el següent:

$$t_{old} = t_{alin_amp} + t_{sint} = 2323 \text{ s} \quad (5.11)$$

Globalment resulta que el temps necessari amb el nou mètode és sensiblement inferior al temps necessari amb el mètode antic. Caldria tenir en compte també el temps necessari per fer la combinació lineal de matrius, però és negligible comparat amb els temps obtinguts (de l'ordre d'un segon).

A més cal tenir en compte que si es processen N imatges, amb el nou mètode només cal generar els $N-1$ interferogrames sintètics de la base. Si es suposa el cas que es volen generar tots els interferogrames possibles amb les imatges disponibles, el nombre d'interferogrames M generats seria:

$$M = \binom{N}{2} = \frac{N!}{2!(N-2)!} \quad (5.12)$$

Per exemple, per un cas de 30 imatges, es generarien 435 interferogrames. Amb el mètode

antic caldria generar-los tots de forma separada, mentre que amb el nou mètode només se'n en caldrien 29. Així doncs queda comprovat com el cost computacional global del nou mètode és molt menor.

5.6 Conclusió

L'apartat anterior mostra com el càlcul de l'interferograma sintètic es redueix a una combinació lineal de matrius. Això redueix dràsticament el temps de processament quan es disposa de la base d'interferogrames sintètics. Com que el càlcul de la base està integrat en l'algorisme d'alineament no suposa una càrrega computacional addicional massa gran, ja que aprofita bona part dels passos necessaris per obtenir els offsets d'alineament. L'únic inconvenient rau en l'augment d'espai de disc per emmagatzemar el set d'interferogrames, però els avantatges el compensen amb escreix.

A més s'ha demostrat que és viable la utilització del set d'interferogrames sintètics que utilitzin tots la *MASTER-MASTER* d'alineament, ja que l'error introduït és mínim.

6 CORRECCIÓ ORBITAL AMB UN DEM DE REFERÈNCIA

6.1 Introducció

La informació orbital, és a dir, la posició del satèl·lit des d'on es capten cada una de les línies de la SLC, és una dada d'entrada d'algunes de les parts de la cadena interferomètrica. En són un bon exemple els algorismes que s'han desenvolupat en el transcurs d'aquest projecte. Així doncs, és molt important disposar d'una informació orbital acurada. Moltes vegades les dades proporcionades no són del tot fiables (sobretot en el cas dels satèl·lits ERS) i cal corregir-les d'alguna manera. En aquest apartat es presentarà un mètode automàtic de correcció orbital fent ús d'algorismes similars als vistos anteriorment.

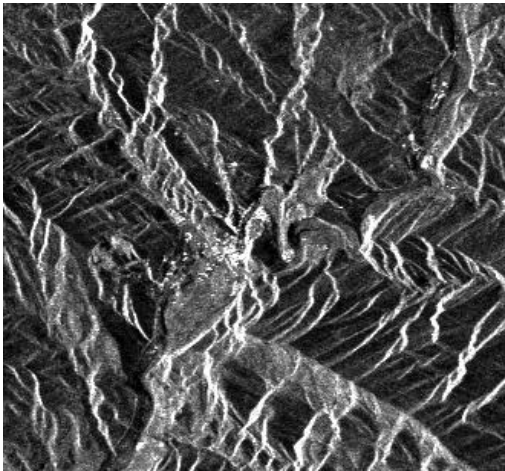
6.2 Correcció mitjançant punts de control

Com s'ha vist abans, el que es vol és trobar la correcció de certs paràmetres orbitals. En realitat es tracta de dos paràmetres que relacionen l'òrbita amb la SLC. Concretament són el temps de la primera línia de la imatge (correcció en la direcció *azimuth*) i del temps de retard del pols en la primera mostra (correcció en la direcció *range*).

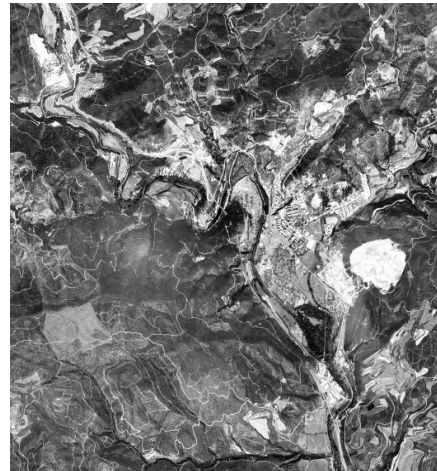
Un error en aquests paràmetres provoca un desalineament de les òrbites respecte la seva posició correcta. Això alhora es tradueix en un desalineament en el procés de geocodificació (tant directa com inversa), i per tant afectarà en l'alineament fi amb DEM extern de les imatges i en el càlcul dels interferogrames sintètics.

Per tal de corregir-los s'utilitzen punts de control. No són res més que una referència que relaciona una latitud, una longitud i una altura sobre un model el·lipsoïdal concret amb una línia i una mostra de la imatge SLC. A partir d'aquests punts de control i mitjançant geocodificació inversa es calcula la línia i la mostra corresponent a la longitud i latitud i es comparen amb la línia i la mostra indicades. D'aquesta manera s'obté la correcció a aplicar.

Fins el moment aquests punts de control es trobaven de forma manual. Així doncs, per tal de trobar-los amb el mínim error possible, calia identificar punts molt clars sobre la imatge SLC (encreuaments de carreteres, carrers, etc...) i preferiblement en una zona plana, ja que seleccionar un punt en una zona amb pendent pot induir a error degut als efectes de distorsió de les imatges SAR. Aquesta tasca pot resultar molt complicada si el terreny és abrupte i hi ha pocs punts de referència. La figura 6.1 il·lustra aquest problema.



a)



b)

Fig. 6.1 Comparació d'una imatge en slant-range (a) amb una altra en ground-range (b) d'una mateixa zona. La imatge en slant-range està amb la relació d'aspecte canviada per tal de que els píxels siguin quadrats. Visualment està girada horitzontalment respecte la imatge en ground range

S'està parlant de diversos punts de control però, de fet, amb un sol punt de control seria suficient per realitzar la correcció, però per minimitzar l'error humà es realitza la correcció per uns quants punts i es calcula la mitjana de totes les correccions. Com es pot veure, resulta interessant disposar d'un sistema per realitzar aquest pas de forma automàtica. Tot seguit es presenta un algorisme per resoldre-ho.

6.3 Obtenció de punts de control automàtics

El que cal ara és idear un sistema per trobar la correcció de les òrbites de forma automàtica. Més concretament, es tracta de punts de control generats de manera sintètica que duguin a la correcció idònia de les òrbites. Per això es farà servir el retall de la SLC que s'usarà com a *MASTER-MASTER* d'alineament, que és sobre on s'indiquen habitualment els punts de control.

Com ja s'ha vist anteriorment, si no es realitza la correcció orbital es tindrà un desalineament de les dades quan es realitzi una geocodificació. La idea d'aquest algorisme és aprofitar-se d'aquest fet, és a dir, trobar aquest desalineament i generar els punts de control adequats per corregir-lo.

Per a aquesta fita es proposa trobar una "SLC sintètica" utilitzant les òrbites sense cap mena de correcció i realitzar un alineament per correlació d'amplitud d'aquesta SLC amb la SLC original per trobar l'offset en línies i mostres entre elles. Per tal de trobar aquesta SLC caldrà un DEM de referència i la geocodificació inversa.

6.3.1 Principi de l'algorisme

S'utilitzarà un sistema similar al que es du a terme durant l'alineament fi. Mitjançant la geocodificació inversa es calcularà la línia i la mostra sobre el retall escollit de la SLC *MASTER-MASTER* de cada píxel del DEM. A més també es prendrà l'alçada sobre

l'el·lipsoide i les posicions cartesianes (X,Y,Z) per a cada un d'aquest punts. La interpolació pel pas a *slant-range* d'aquestes dades és la mateixa que s'utilitza durant l'alineament fi.

Arribats a aquest punt, es disposa de la versió en *slant-range* d'un DEM, és a dir, una matriu amb l'alçada respecte l'el·lipsoide per a cada posició (*range,azimuth*). Ara cal transformar-lo de tal manera que s'obtingui quelcom similar a una SLC. Per tal de fer-ho es prendrà com a base un dels efectes de distorsió de les imatges SAR: el *foreshortening*. Com s'ha vist a l'apartat 2.1.1, aquest efecte provoca una compressió dels pendents encarats al radar, de tal manera que en la SLC es veuen com unes franges estretes molt brillants, és a dir, amb el mòdul de la amplitud molt gran. El que es farà serà crear una plantilla binària de pendents, on es posarà a 1 tots els píxels amb un pendent superior a un llindar i es deixarà a 0 la resta. Se segueix el següent procediment:

a) **Càlcul de la matriu de pendents:** Es calcula una aproximació del pendent local per a cada píxel de la SLC a partir del DEM en *slant-range*. Per tal de dur a terme això s'aplica la següent expressió:

$$\Delta(l,m) = \frac{h(l,m+1) - h(l,m-1)}{2} \quad (6.1)$$

on Δ és el pendent calculat, (l,m) la línia i la mostra a calcular i h l'altura el les posicions en qüestió. Es calcula el pendent al llarg de la direcció *range*, ja que és en aquesta component del pla *slant-range* en la que es produeix el *foreshortening*. D'aquesta manera els pendents positius correspondran als encarats al radar.

b) **Creació de la SLC sintètica:** Un cop es té la matriu de pendents, es crea la matriu binària assignant 1 als valors que superin el llindar establert i 0 als pendents inferiors al llindar. Per defecte el llindar es calcula com la mitjana dels pendents positius (pendent positiu = pendent encarat al radar), però també es pot indicar com a paràmetre extern. Així doncs s'obté la SLC sintètica, que no és res més que una "màscara" de franges on es mostren les zones amb *foreshortening*.

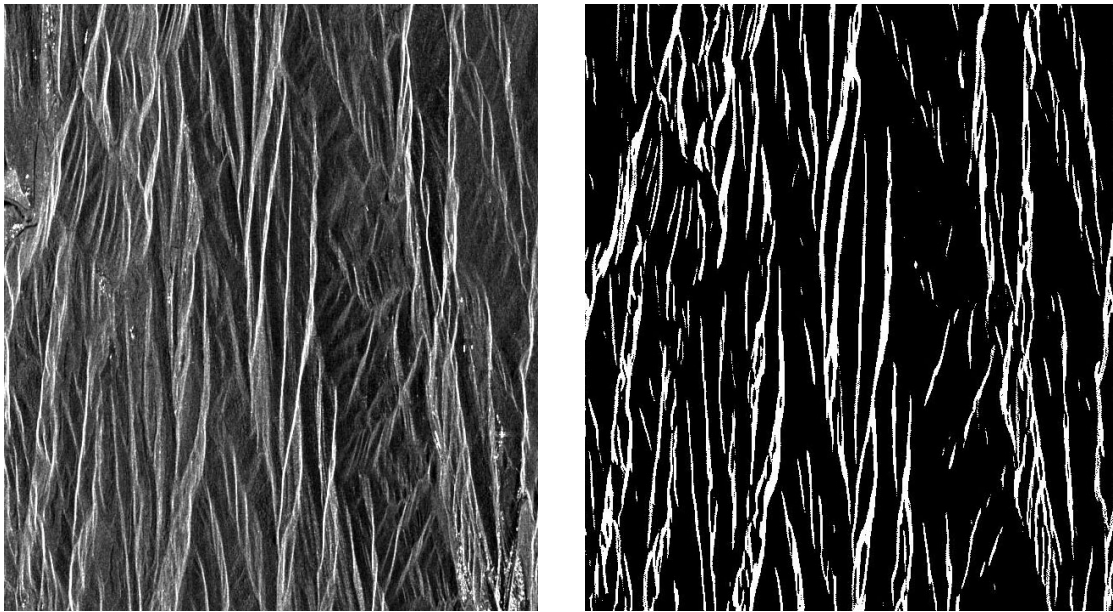


Fig. 6.2 Comparació d'una porció de SLC real amb l'equivalent sintètica. La SLC real és una imatge d'amplitud d'alta resolució per facilitar l'observació

c) **Alineament de la SLC sintètica amb la SLC original:** Es realitza un alineament a nivell de subpíxel del les dues SLCs. Es tracta del mateix tipus d'alineament que es du a terme durant la correcció constant de l'offset d'alineament f_i , però aquest cop s'agafa com a matriu de correlació la màxima matriu (amb les dimensions potència de 2) que càpiga centrada dins del retall escollit. D'aquesta manera s'obté l'offset en línies i mostres proporcional a la correcció a realitzar.

d) **Càlcul dels punts de control sintètics:** Arribats a aquest punt, només cal assignar punts de control en llocs idonis per a que s'apliqui la correcció que s'ha trobat. En aquest cas es crearà un màxim de deu punts de control, per així aprofitar el càlcul de la mitjana de les correccions que es realitza posteriorment. Aquests punts de control no cal que se situïn en zones fàcilment identificables de la SLC, ja que no intervé el factor humà en la seva creació. Per això, per facilitar el càlcul que es du a terme durant l'alineament gruixut centrat en cada punt de control, el que es farà es situar-los en les zones de la imatge amb més contrast. Per això s'utilitzarà la mateixa matriu de contrastos explicada durant l'alineament f_i . Es divideix la imatge en blocs i se'n determina el contrast de cada un d'ells mitjançant la expressió 4.11. Llavors s'escullen les deu zones amb més contrast i es col·loca al centre de cada zona els nostres punts de control.

Ara cal calcular la latitud i la longitud on es troben els punts de control. En aquest punt és on entren en joc les matrius X, Y i Z en *slant-range* creades al principi. A partir d'elles i del DEM en *slant-range* es poden trobar aquestes coordenades per a qualsevol línia i mostra de la SLC, fent una transformació de coordenades cartesianes a latitud i longitud. Cal tenir en compte que es faran els càlculs al centre de cada bloc de la matriu de contrast seleccionat, però aplicant com a offset la correcció trobada. Un cop fets els càlculs es donaran les línies i les mostres del centre dels blocs com a correctes, per així conservar la seva posició idònia.

6.4 Comprovació de la validesa dels punts de control sintètics

Es realitzarà aquesta comparació es farà en primer lloc des d'un punt de vista qualitatiu i després es passarà a una visió més quantitativa.

La primera opció consisteix en comprovar que la informació de l'interferograma sintètic generat està alineada amb la informació d'amplitud de l'interferograma real. Això ha de ser així, ja que si les òrbites són correctes i la informació de geocodificació del DEM també, cal que la geometria *slant-range* de la imatge SLC original i l'obtinguda amb la geocodificació inversa coincideixin. Això és fàcil de comprovar extraient el terme de terra plana de l'interferograma sintètic. D'aquesta manera s'obté únicament la fase topogràfica, amb la qual cosa són visibles zones que es poden relacionar entre les dues imatges (per exemple, els canvis de pendent es poden relacionar amb els marges de les zones amb *foreshortening*). Si els punts de control estan ben generats, ambdues imatges han d'estar perfectament alineades.

Per la segona opció s'utilitzarà la geocodificació directa. Es generarà una imatge d'amplitud d'alta resolució fent el promig de les amplituds de tots els retalls alineats d'una zona en concret. D'aquesta manera s'obtindrà una imatge d'amplitud més nítida, d'on serà més fàcil identificar punts. Tot seguit es procedirà a realitzar la geocodificació directa d'aquesta imatge utilitzant la informació orbital corregida amb els punts de control automàtics. Llavors es realitzarà una comparació en diversos punts fàcilment identificables (encreuaments de carreteres, per exemple) en ambdues imatges i es mirarà l'error aproximat, per veure si entra dins dels marges acceptables.

6.4.1 Comprovació qualitativa

Per fer aquesta comprovació s'utilitzaran imatges de la zona del Bages. En primer lloc s'ha realitzat l'alineament d'un set d'imatges d'aquesta zona. A partir dels retalls alineats s'ha generat la següent imatge d'amplitud d'alta resolució.

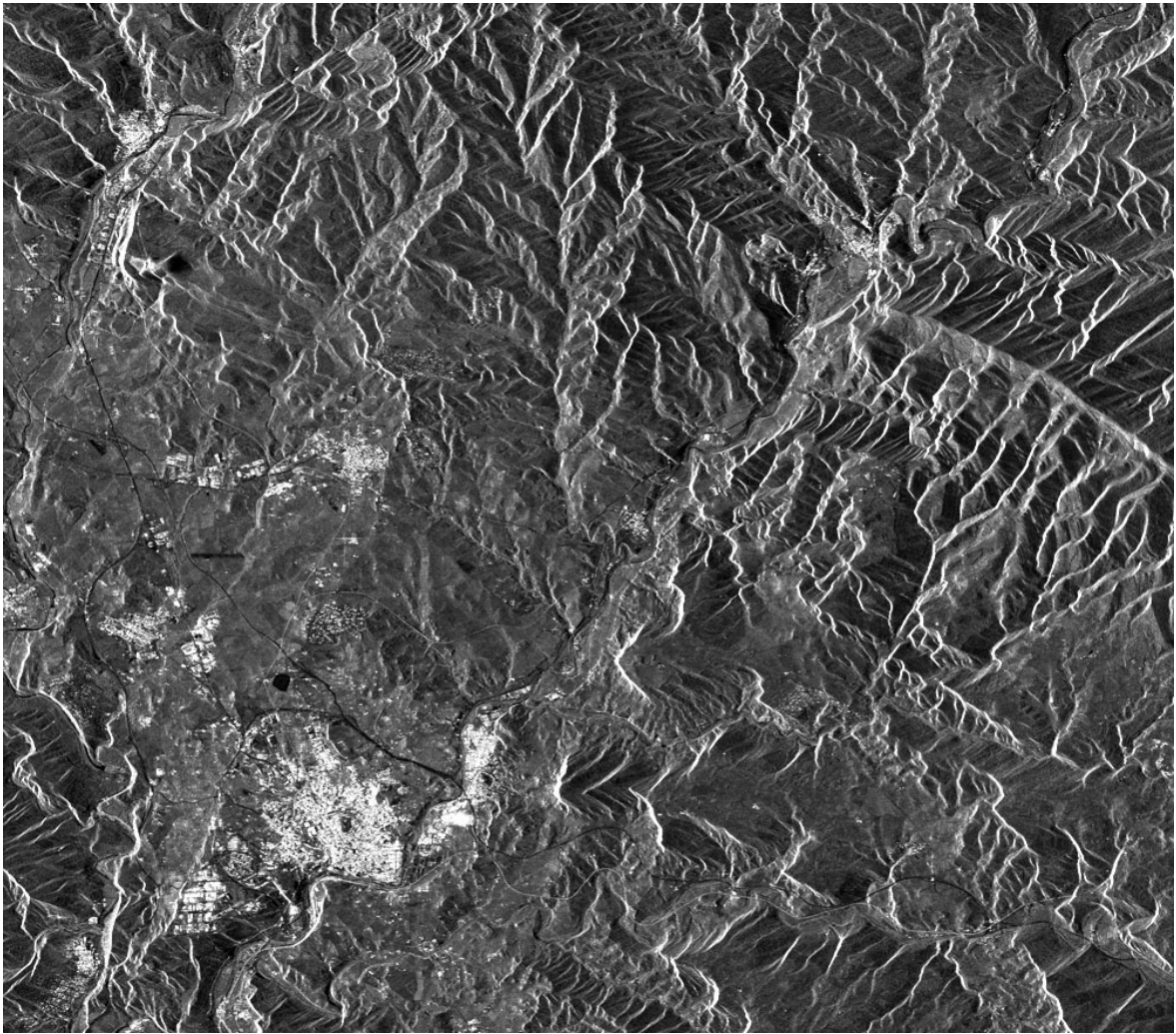


Fig. 6.3 Imatge d'amplitud d'alta resolució del Bages. S'observa Manresa a la part inferior, Sallent a la part superior esquerra i Súria a la part superior dreta.

En la imatge anterior s'ha canviat la relació d'aspecte de la imatge real per tal de fer el píxel quadrat. Tot seguit es mostrarà un dels interferogrames sintètics obtinguts. La relació d'aspecte també esta canviada.

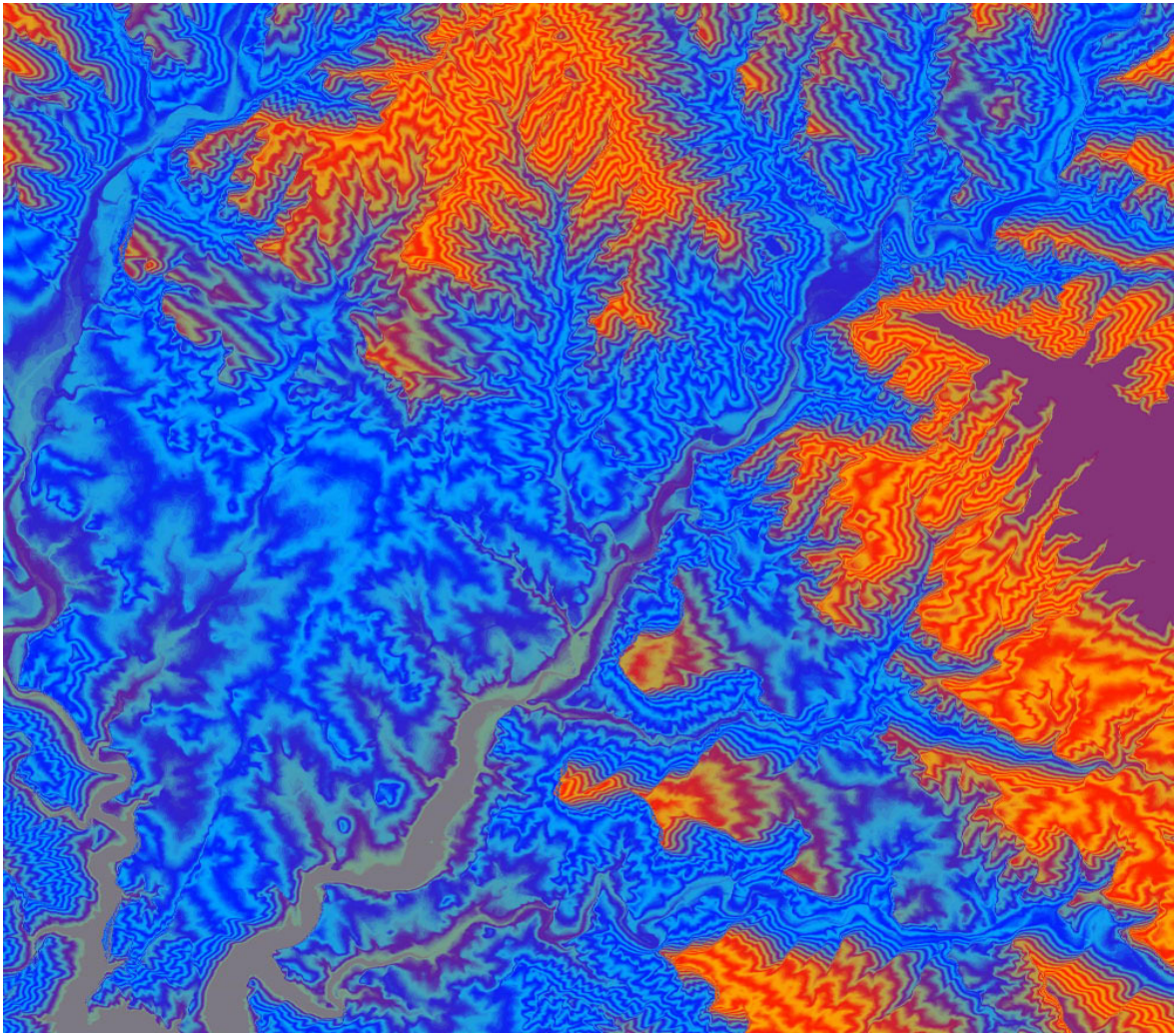


Fig. 6.4 Fase topogràfica extreta d'un interferograma sintètic de la zona de Bages.

En la figura anterior s'ha extret la terra plana de l'interferograma sintètic, obtenint així la fase topogràfica. Es pot observar a simple vista una correlació entre les dues imatges. S'ha representat la fase topogràfica amb una escala de colors que facilita l'observació dels canvis de fase.

Així i tot és complicat de dir amb certesa si realment hi ha una correlació exacta entre les dues imatges, i per tant s'han agafat porcions d'ambdues de zones que ho permetin veure mes fàcilment. Tot seguit es mostren els retalls.

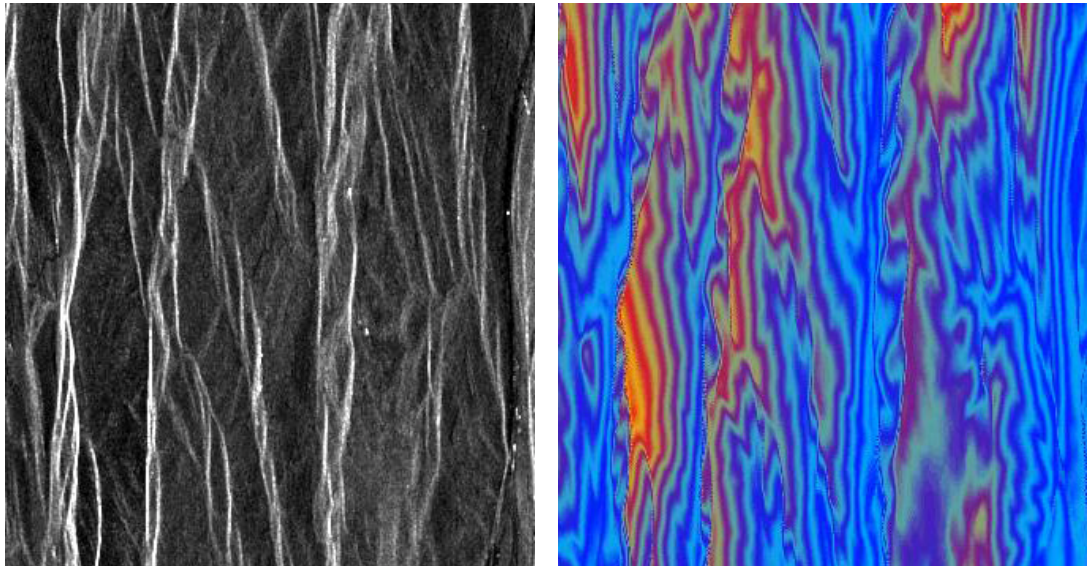


Fig. 6.5 Retalls de la imatge d'alta resolució i la fase topogràfica. Aquestes imatges es representen sense canvis en la relació d'aspecte

Per tal d'observar la correlació s'ha realitzat una superposició amb transparència dels dos retalls, obtenint el següent resultat.

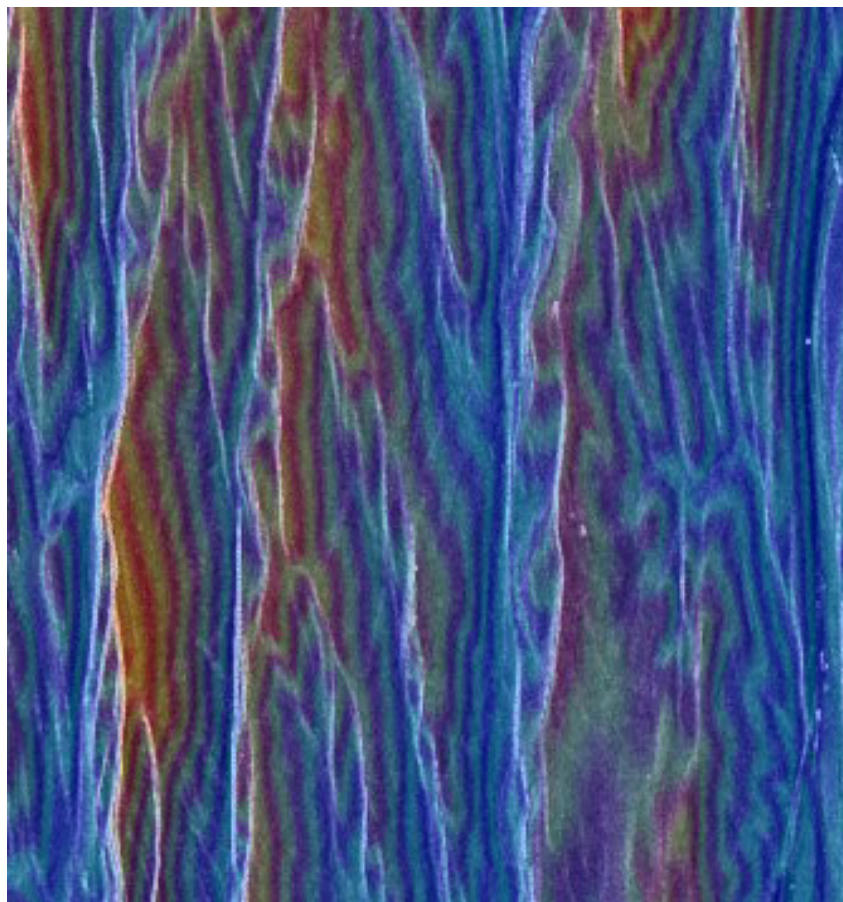


Fig. 6.6 Superposició dels retalls de la imatge d'alta resolució i l'interferograma sintètic.

En aquesta zona s'observa que els canvis de fase coincideixen amb els canvis de pendent de la imatges. Així es comprova com la informació topogràfica obtinguda a partir de les òrbites corregides amb els punts de control sintètics està alineada amb la amplitud de les SLC's. Per tant es pot dir que els punts de control s'han generat de forma correcta.

Malgrat tot es tracta d'una comprovació molt qualitativa, ja que no es pot tenir una mesura de l'error que es comet, simplement una observació visual. Tot seguit es procedirà a un càlcul més rigorós de l'error que es comet i l'impacte que tindrà en el resultats finals.

6.4.2 Comprovació quantitativa

Com s'ha vist a l'apartat 2.5.2, la posició d'un punt sobre el terreny (*ground-range*) corresponent a un punt en coordenades *slant-range* (*range, azimuth*) depèn de la intersecció de les tres equacions que modelen la posició i la velocitat del satèl·lit i la forma de la terra. Per tant, la qualitat de la geocodificació dependrà de la qualitat d'aquestes dades.

El model terrestre ve donat pel datum que s'utilitzi, el qual es fix per a qualsevol aplicació. En canvi, la posició i la velocitat del satèl·lit depenen de la qualitat de les òrbites. Per això calcular l'error de geocodificació comès permetrà donar una mesura de la qualitat de les òrbites.

Així doncs, s'ha procedit a calcular la geocodificació d'una zona, concretament la ciutat de Barcelona. S'ha pres un grup d'imatges alineades de Barcelona i s'ha creat una imatge d'alta resolució fent la mitjana de l'amplitud de totes elles, obtenint el següent resultat.



Fig. 6.7 Imatge d'amplitud d'alta resolució de Barcelona. S'ha canviat la relació d'aspecte de la imatge per tal de fer el píxel quadrat. Esta girada en el sentit dreta-esquerra

Es pren com a referència un interferograma qualsevol pertanyent a aquest grup d'imatges per utilitzar-lo com a referència de geocodificació. D'aquesta manera s'utilitzaran les òrbites corregides d'aquest interferograma. El resultat de la geocodificació és el següent:

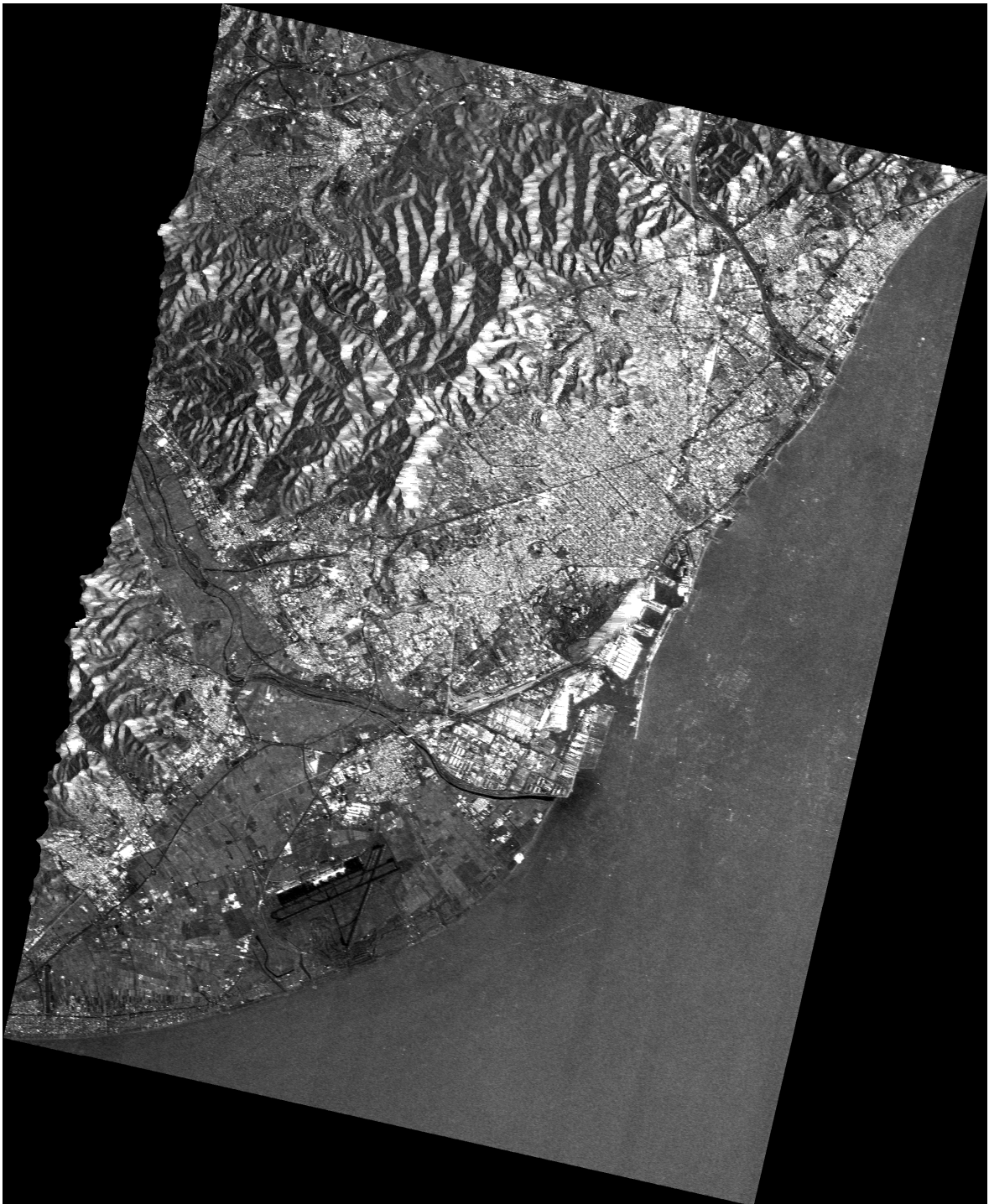


Fig. 6.8 Geocodificació de la imatge d'amplitud d'alta resolució de Barcelona. La mida del píxel és 10 metres

D'aquesta imatge es coneixen les coordenades UTM (WGS-84) de les seves cantonades i la mida del píxel. Per tant, es poden conèixer les coordenades de qualsevol dels seus píxels. Ara només resta comparar-la amb alguna dada externa. Per això s'utilitzarà una ortofoto de la mateixa zona, la qual ja està geocodificada.



Fig. 6.9 Ortofoto de la ciutat de Barcelona. La mida del píxel és de 10 metres

Per tal de comparar les imatges s'agafaran punts clarament identificables en ambdues i que estiguin sotmesos el mínim possible als efectes de distorsió de les imatges SAR (veure apartat 2.1.1). Per això el més apropiat és buscar encreuaments de carreteres en zones planes o llocs amb un canvi bruscat de tipus de terreny. S'ha evitat la zona del centre de la ciutat perquè els edificis creen un fort efecte de *layover*, cosa que fa difícil la identificació dels carrers. Així doncs, s'han pres els següents punts:

- **Punt A:** S'ha pres aquest punt a l'espigó del port de Barcelona. Tal com mostren les imatges el contrast de l'espigó amb el mar en les dues imatges fa que sigui una zona molt propícia.

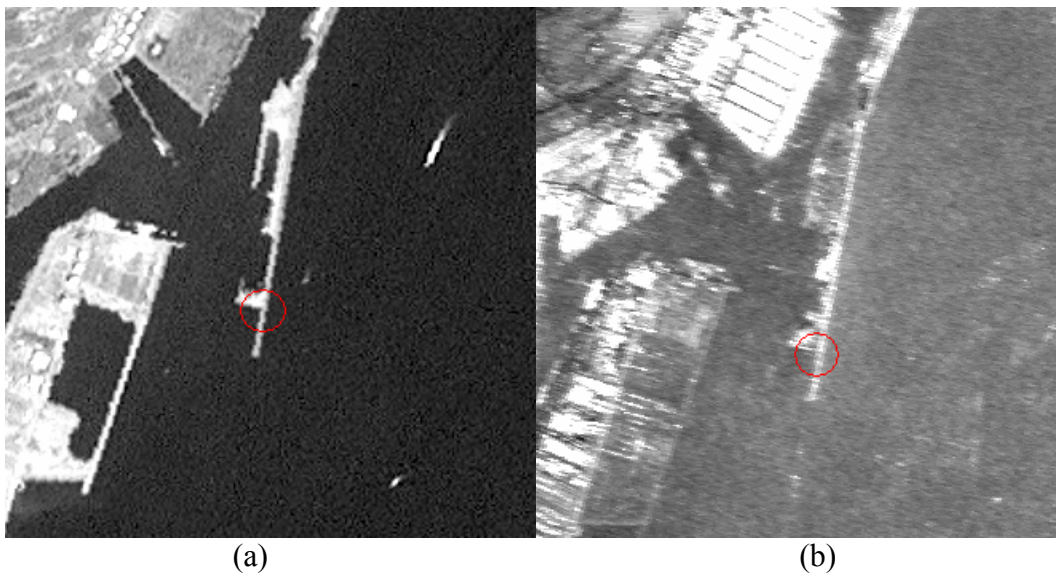


Fig. 6.10 Detall del punt de control A en la ortofoto (a) i la imatge d'alta resolució (b)

· **Punt B:** Aquest punt es troba en un encreuament de carreteres a la perifèria del Prat de Llobregat. Es tracta d'una zona plana amb un clar encreuament prou definit.

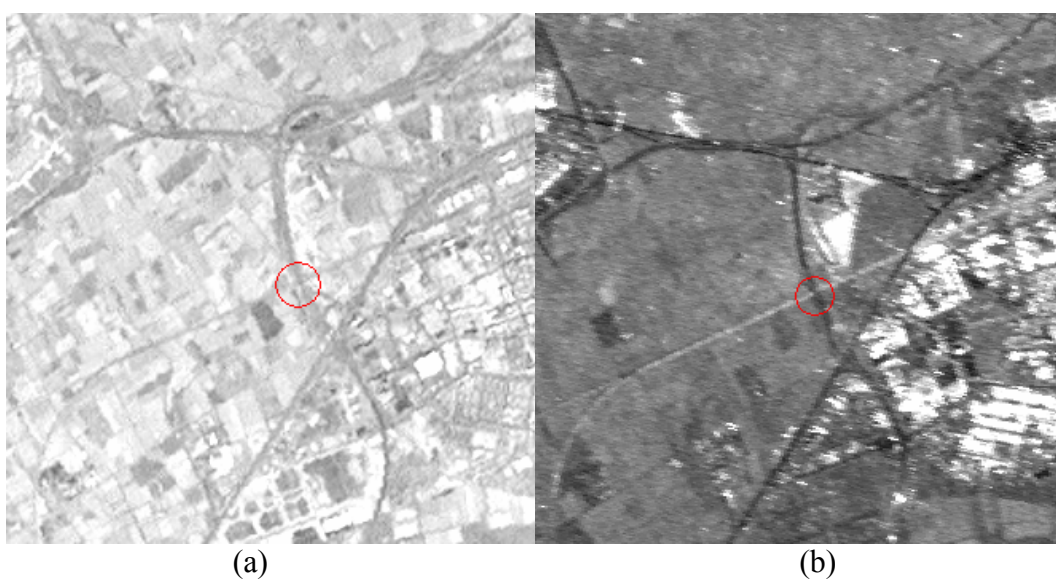


Fig. 6.11 Detall del punt de control B en la ortofoto (a) i la imatge d'alta resolució (b)

· **Punt C:** Punt situat en un encreuament de pistes a l'aeroport del Prat. Les pistes, al ser una gran superfície plana d'asfalt queden molt ben marcades a la imatge SAR.



Fig. 6.12 Detall del punt de control C en la ortofoto (a) i la imatge d'alta resolució (b)

Tot seguit es mostra una taula amb les coordenades de cada punt en la imatge d'alta resolució geocodificada i en la ortofoto, així com les diferències entre elles.

	A	B	C
X_{UTM} geocodificada	430739.04	422359.04	423949.04
X_{UTM} ortofoto	430713.13	422363.13	423943.13
ΔX_{UTM} (geo – orto)	25.91	-4.09	5,91
Y_{UTM} geocodificada	4576571.51	4575211.51	4572681.51
Y_{UTM} ortofoto	4576573.37	4575213.37	4572653.37
ΔY_{UTM} (geo – orto)	-1,86	-1,86	28,14

S'observa com els errors són de l'ordre de la mida de píxel de les imatges SAR en *ground-range*, i per tant queda entre el marge d'error acceptable. Val a dir que aquests resultats estan sotmesos també a l'error humà a l'hora d'obtenir-los i per tant són orientatius.

6.5 Conclusió

Així doncs s'ha obtingut una forma automàtica de generar els punts de control. Així i tot, aquest algorisme té una limitació important: És necessari que la zona a processar tingui una certa topografia, ja que si no disposem de zones amb *foreshortening* no es podrà generar la SLC sintètica.

Malgrat tot, com ja s'ha dit, es precisament en aquestes zones on és més complicat obtenir punts de control de bona qualitat, ja que la topografia pot induir a molt errors. En les zones d'estudi planes normalment hi trobem punts molt més fàcilment identificables degut a la presència humana, com ciutats i carreteres, amb la qual cosa és més senzill buscar manualment els punts de control.

Un punt a tenir en compte és el motiu pel que se segueix fent ús de punts de control. El que es fa durant l'algorisme és trobar directament la correcció orbital a partir de l'alineament de la SLC sintètica i la SLC real. Així doncs, es podria trobar d'aquesta manera la

correcció realitzant el procediment per a cada una de les imatges. El problema és que el cost computacional és elevat, així com l'espai de disc utilitzat per dur a terme aquest càlcul. Per tant que és més eficient realitzar el càlcul per a la *MASTER-MASTER* i generar els punts de control automàtics, tot aprofitant la infraestructura existent fins el moment.

Així doncs es pot dir que aquesta eina, a part de suposar un mètode molt més pràctic per l'usuari, es un complement per l'ús de punts de control en zones on és difícil la seva generació manual.

7 RESULTATS EXPERIMENTALS

7.1 Introducció

Un cop vista la validació individual dels diferents algorismes es passarà a obtenir-ne alguns resultats. Se seguirà el següent esquema:

- a) Comparació entre el nou algorisme d'alineament i l'antic.
- b) Càlcul de subsidència amb tots els nous algorismes.

Pel que fa a l'algorisme d'alineament fi, com s'ha vist en l'apartat 4.4.2, un dels punts febles de l'algorisme antic són les zones de la imatge amb poc contrast, ja que és més difícil trobar un bon màxim de la correlació d'amplitud en aquestes zones. El nou algorisme és independent de la informació de reflectivitat de la imatge SLC i per tant tractarà per igual qualsevol zona, tingui el contrast que tingui. Una de les maneres existents de mesurar aquesta millora és mitjançant el càlcul de la coherència, on s'hauria de detectar un augment de la mateixa en les zones de baix contrast respecte els dos algorismes.

7.2 Consideracions i requeriments de les dades

Hi ha certes formalitats pel que fa a les dades disponibles que s'han de tenir en compte per tal que el processament s'efectuï sense problemes. De fet la majoria tenen a veure amb la naturalesa del DEM utilitzat durant el processament. Tot seguit es llisten aquestes consideracions:

- a) Caldrà que el DEM tingui una resolució semblant a la dels píxels de les imatges SLC (4x20 metres). Un DEM amb una resolució de 10 metres resulta òptim. Si es disposa de DEM's amb menys resolució caldrà interpol·lar-los prèviament per tal d'adequar-los als paràmetres anteriors. Això és degut a la que si s'utilitza un DEM amb menys resolució, les interpolacions mitjançant triangulacions de Delaunay que s'apliquen en diferents punts del processament provoquen que les imatges surtin granulades i de baixa qualitat.
- b) Caldrà que el DEM cobreixi sobradament la zona d'estudi, ja que durant l'alineament es treballarà amb un marge de guarda que farà que el retall sigui més gran. Malgrat tot, s'ha fet l'algorisme prou robust per tal que encara que en les cantonades de la zona d'estudi se surti fora parcialment de la zona de la qual es té informació d'alçada del DEM es pugui processar igualment sense problemes, tenint en compte que la informació en aquestes zones serà errònia.

7.3 Comparació de la coherència entre l'antic algorisme i el nou algorisme d'alineament

Per fer aquesta comparació més redundat es farà el càlcul de la coherència per a dues zones. Val a dir que la coherència calculada és la diferencial, ja que està més neta de termes que no interessin en el càlcul que es du a terme.

La primera zona serà el Bages, concretament a la zona compresa entre Manresa, Súria i Sallent. És una zona bastant convenient pel càlcul, ja que és relativament poc poblada i amb vegetació, amb la qual cosa conté bastants zones amb poc contrast. A més es farà ús d'un tàndem, és a dir, una imatge amb una separació temporal d'un sol dia, per assegurar que les pèrdues de coherència son degudes a la pèrdua de contrast i no als canvis al llarg del temps. Cal dir que tant en el nou procés com en l'antic s'ha utilitzat el nou mètode de creació automàtica de punts de control, ja que la zona disposa de suficient topografia.

El segon lloc on es realitzarà l'estudi es tracta de la zona a voltant de la ciutat de Gardanne, al sud de França, amb característiques similars a les del primer cas. En aquest cas també es farà ús dels punts de control automàtics.

En les dues zones es realitzarà un càlcul de la coherència per a un retall que disposi de tot tipus de contrastos, tant alts com baixos, per comprovar si hi ha millora en les zones amb baix contrast utilitzant el nou mètode.

7.3.1 *El Bages: Càlcul de la coherència diferencial*

Per tal de realitzar aquesta prova, farem ús de les següents SLC's:

Data	Satèl·lit
18/07/1995	ERS-1
19/07/1995	ERS-2
11/09/1996	ERS-2

La zona en estudi comprèn la part central de la comarca del Bages. Tot seguit es mostra una imatge d'amplitud d'alta resolució creada a partir de la mitjana de l'amplitud de les tres imatges anteriors. A més se li ha aplicat un multilook de 3x15 per tal d'adequar la seva relació d'aspecte i obtenir un píxel quadrat. Com que les imatges es van prendre des d'una òrbita descendent, la imatge està girada en el sentit dreta esquerra respecte la realitat.

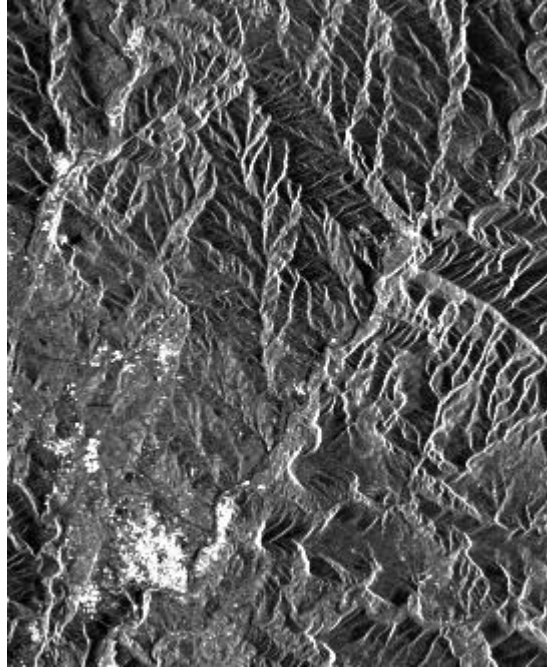


Fig. 7.1 Imatge d'amplitud d'alta resolució del Bages. S'observa Manresa a la part inferior, Sallent a la part superior esquerra i Súria a la part superior dreta.

Com es pot comprovar, les dues primeres imatges formen un tàndem, i són les imatges que s'utilitzaran en l'estudi. D'aquesta manera, al tenir una línia de base temporal de només un dia, s'assegura que les pèrdues de coherència no són degudes als canvis en l'escena. La tercera imatge la utilitzarem com a *MASTER-MASTER* en els alineaments.

El DEM extern utilitzat en els càlculs cobreix la zona de la comarca del Bages amb una resolució de 25 metres. Per tal d'adequar-lo a les nostres necessitats s'ha interpolat fins a obtenir una mida de píxel de 10 metres. S'ha calculat la coherència amb un multilook de 15x3 (promitjant 15 línies en la direcció *azimuth* i 3 mostres en la direcció *range*).

Així doncs s'ha obtingut els següents mapes de coherència diferencial:

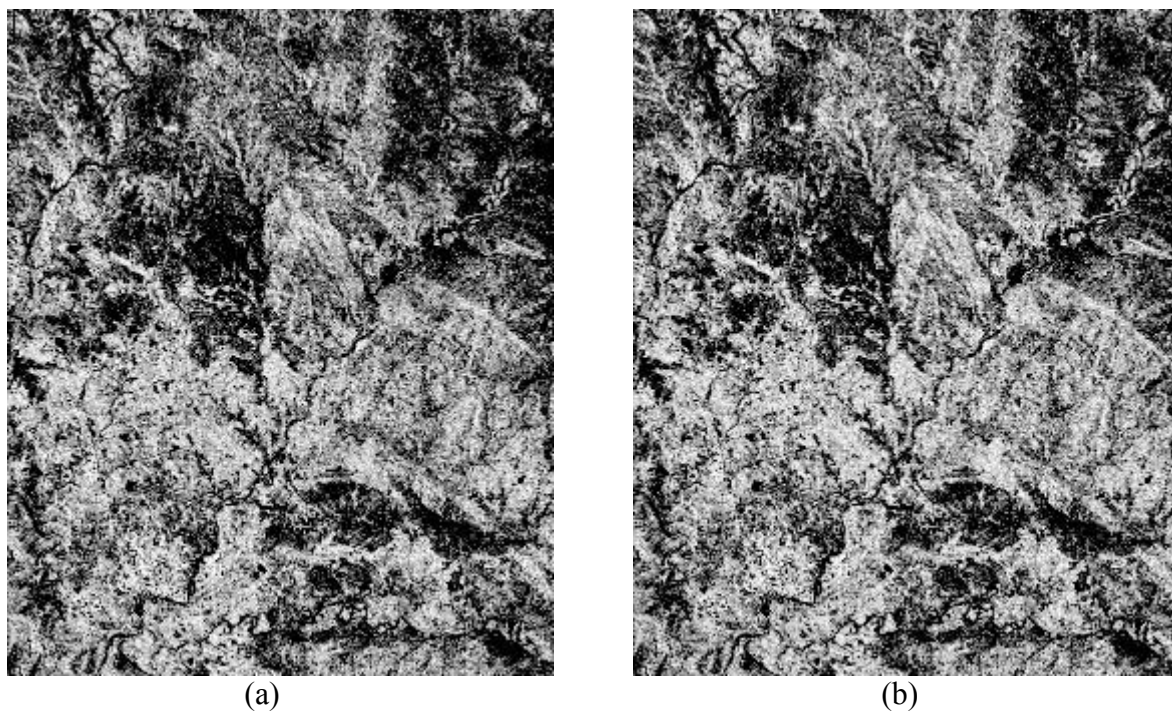


Fig. 7.2 Mapes de coherència diferencial utilitzant el mètode d'alineament fi per correlació d'amplitud (a) i el mètode d'alineament amb DEM extern (b)

En els gràfics anteriors els píxels més blancs indiquen una coherència més gran. L'escala va de un valor de coherència de 0,5 (negre) a un de 0,9 (blanc). Com es pot observar és difícil a simple vista d'identificar les millores de coherència, i per tant s'ha realitzat la diferència entre els 2 gràfics, obtenint el següent resultat:

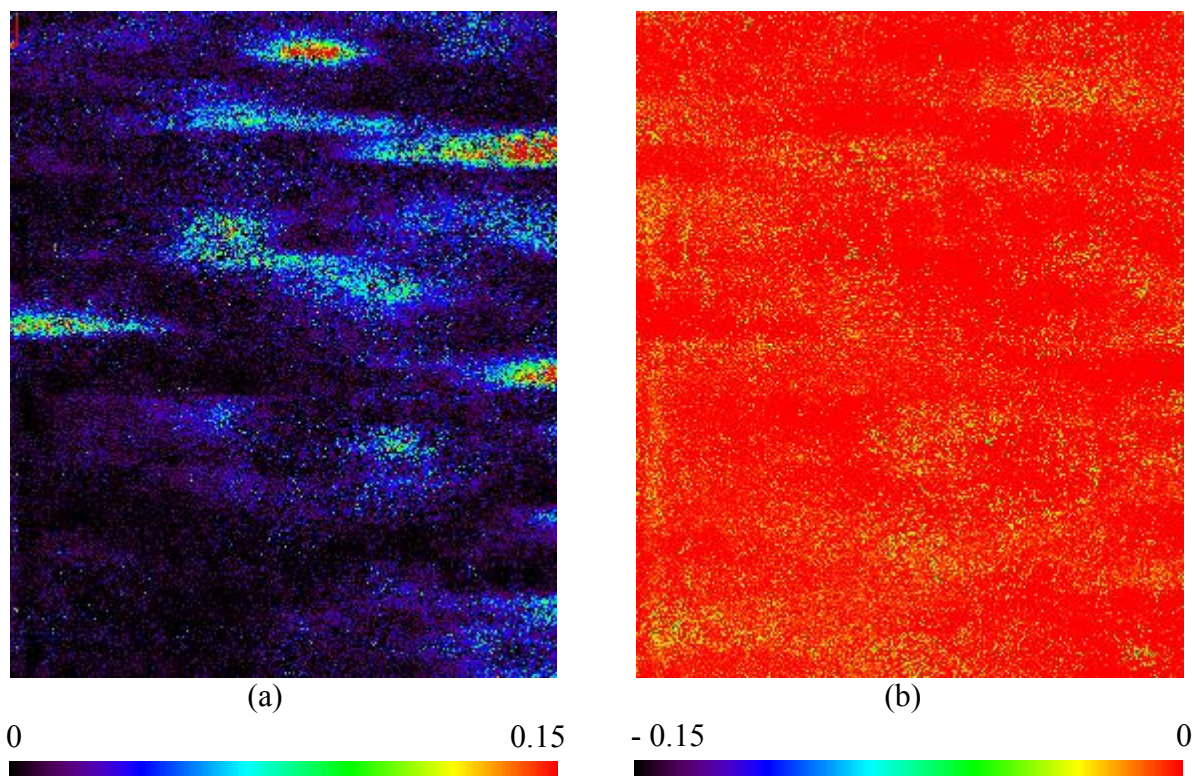


Fig. 7.3 Diferència entre els 2 mapes de coherència diferencial. És mostren diferents parts de l'histograma. El gràfic (a) mostra les millores i el (b) els empitjoraments de la coherència.

Com es pot veure, en el gràfic de l'esquerra s'hi troben zones amb una clara millora de coherència (zones vermelles) i zones amb una millora discreta (zones blavoses i verdoses). És en aquestes zones on l'algorisme anterior troba certes dificultats en l'alineament. El problema consisteix en que hi ha certes zones on l'algorisme que calcula l'offset per correlació d'amplitud fracassa donant un valor d'offset incongruent amb els valors que l'envolten, ja que se suposa que varien de forma suau. Per fer front a aquest problema s'aplica un filtre de mediana, amb la qual cosa aquests valors queden corregits a partir dels valors propers. Malgrat tot això no deixa de ser una aproximació i com es pot apreciar en les gràfiques, és en aquestes zones on hi ha una millora més dràstica. De fet, el filtre de mediana és el responsable de la forma ovalada que prenen les zones de millora (de fet és rodona sense la relació d'aspecte canviada)

Per altra banda, en el gràfic de l'esquerra s'observa que bona part de l'histograma tendeix al zero (color vermell) i els empitjoraments generalment són de petita magnitud (al voltant del color groc). Les zones on es detecta un empitjorament més gran coincideixen en les parts de la imatge amb *foreshortening*, és a dir, zones amb pendent, cosa normal ja que és en aquestes zones on s'espera un error més gran, tant per possibles errors en el DEM utilitzat durant l'alineament com pel propi algorisme de geocodificació inversa, que és menys eficient en aquest tipus de zones. A més, aquestes zones presenten un contrast més elevat degut a les franges que crea el propi *foreshortening*, i per tant el mètode per correlació d'amplitud funciona més correctament.

Malgrat tot, en mitjana s'obtenen uns resultats lleugerament millors amb el nou mètode respecte l'antic. Això es pot comprovar comparant els histogrames de ambdues coherències. Tot seguit es mostra la comparació.

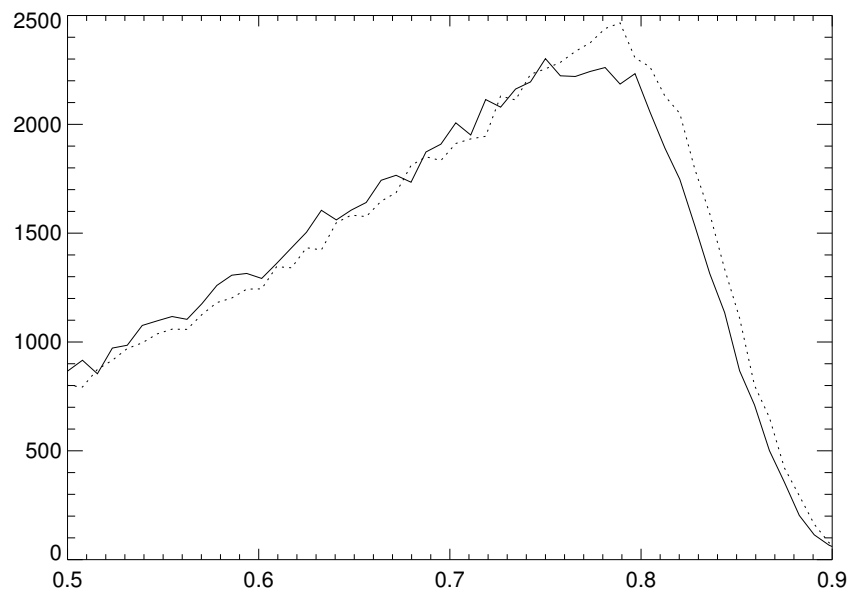


Fig. 7.4 Comparació dels dos histogrames de coherència. La funció puntejada representa l'histograma amb el nou algorisme i la contínua l'antic.

Com es pot observar en la gràfica anterior, l'histograma de coherència diferencial obtingut a partir de l'alineament amb DEM extern està més esbiaixat cap als valors positius que el de l'algorisme antic. Així doncs, globalment els valors de coherència del nou algorisme són més grans que els de l'antic.

7.3.2 Gardanne: Càlcul de la coherència diferencial

En aquest cas hem realitzat les proves amb les següents imatges:

Data	Satèl·lit
01-09-1995	ERS-1
02-09-1995	ERS-2
20-03-1999	ERS-2

Seguint amb la tònica de la prova anterior també s'ha utilitzat un tàndem per tal de minimitzar els errors que no tinguin a veure amb el nostre càlcul.

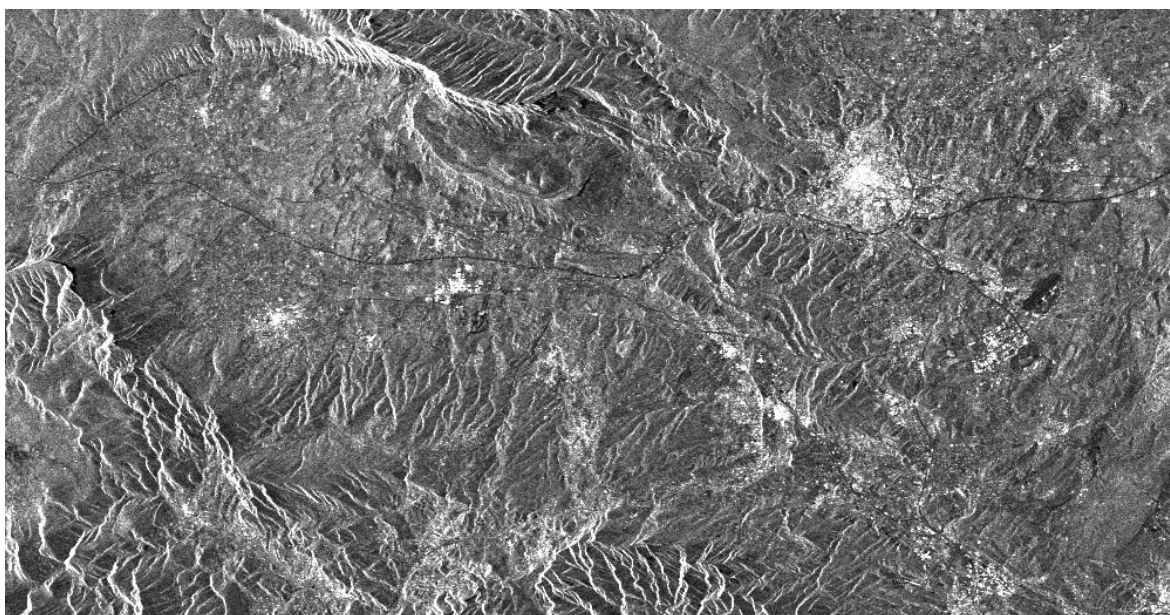


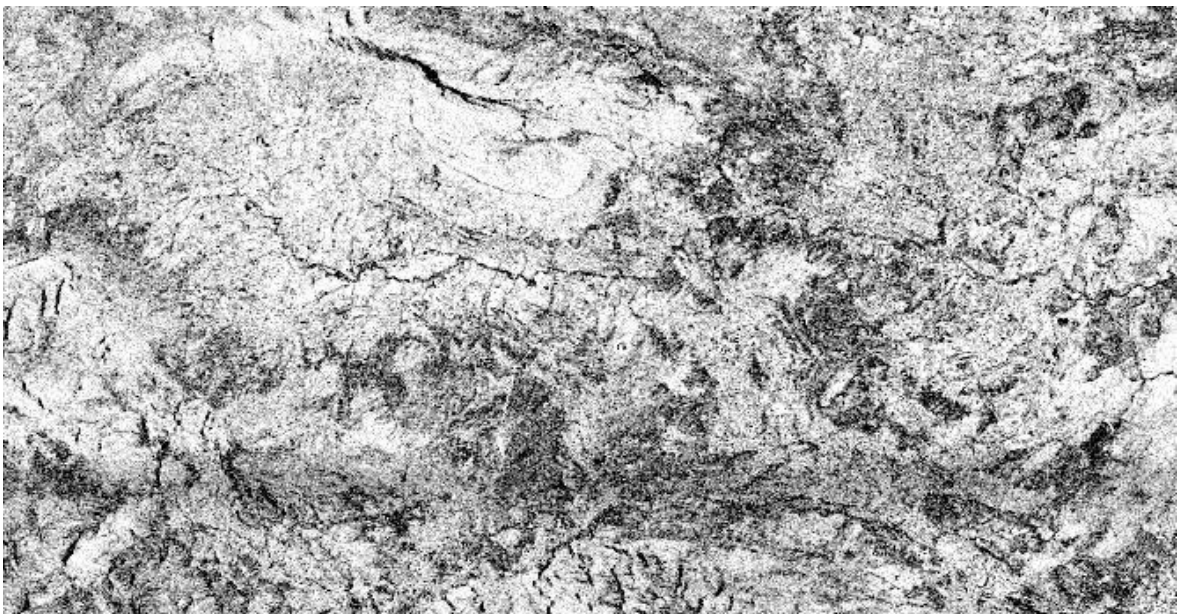
Fig. 7.5 Imatge d'amplitud d'alta resolució de la zona al voltant de la ciutat de Gardanne.

El DEM que s'ha utilitzat cobreix la zona de retall amb una resolució de 25 metres. Per tal d'adequar-lo a les nostres necessitats s'ha interpolat fins a obtenir una mida de píxel de 10 metres. S'ha calculat la coherència amb un multilook de 15x3 (promitjant 15 línies en la direcció *azimuth* i 3 mostres en la direcció *range*).

Així doncs, s'han obtingut els següents mapes de coherència diferencial:



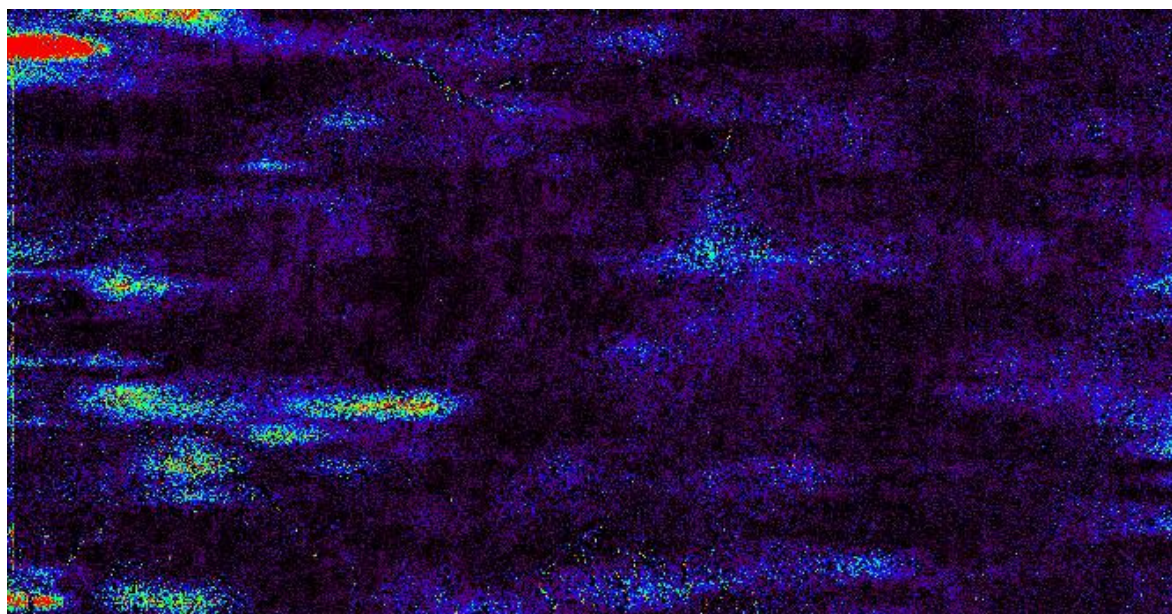
a)



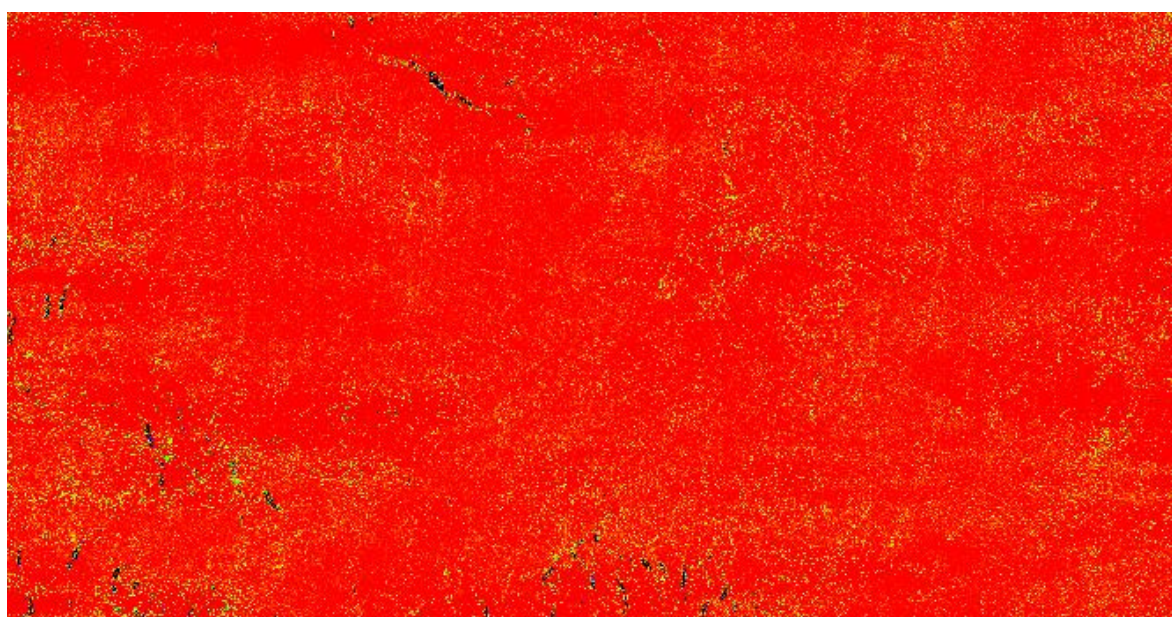
b)

Fig. 7.6 Mapes de coherència diferencial utilitzant el mètode d'alineament fi per correlació d'amplitud (a) i el mètode d'alineament amb DEM extern (b)

Un cop més, per ressaltar les millores i els empitjoraments entre els dos mètodes, s'ha realitzat la diferència entre els dos mapes de coherència i se n'ha observat les parts positiva i negativa de l'histograma, obtenint els següents resultats:



(a)



(b)

Fig. 7.7 Diferència entre els 2 mapes de coherència diferencial. És mostren diferents parts de l'histograma. El gràfic (a) mostra les millores i el (b) els empitjoraments de la coherència.

És un cas molt similar al del Bages. Com s'observa en el gràfic (a) tornen a haver-hi zones amb una millora dràstica de coherència. En la gràfica (b) es torna a comprovar que els empitjoraments són mínims. En aquest cas, però, es posa de manifest les zones on és més feble l'algorisme. Aquestes zones són les petites franges que es veuen de color més fosc.

Es tracta de les zones amb *foreshortening*, és a dir, zones amb pendent. Com s'ha vist repetidament, el *foreshortening* crea franges molt brillants sobre la imatge SLC, amb la qual cosa s'obté un contrast elevat que facilita la feina a l'algorisme de correlació per amplitud. Així i tot, en la imatge radar, aquestes zones representen la acumulació de la informació de tot un pendent, i per tant resulten poc fiables de cara als resultats finals.

Com s'ha fet en el cas del Bages, es realitzarà una comparació dels histogrames per observar la millora del nou algorisme de forma global.

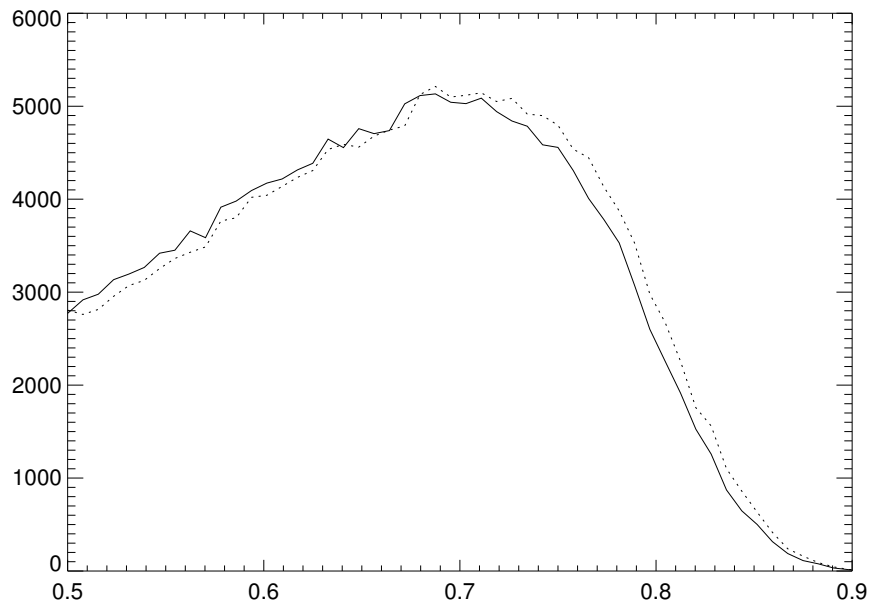


Fig. 7.8 Comparació dels dos histogrames de coherència. La funció puntejada representa l'histograma amb el nou algorisme i la contínua l'antic.

Efectivament, també s'observa una millora global de la coherència del nou algorisme d'alineament respecte el vell.

7.4 Càlcul de la subsidència

Per tal de tenir una visió més global de la utilitat de les millores realitzades, s'ha realitzat un estudi de subsidència global. Aquest estudi s'ha realitzat al voltant del poble de Súria, situat a la comarca del Bages, on s'hi realitza explotació minera de sal. El motiu de l'estudi és observar la possible subsidència del terreny provocada per la existència de les galeries subterrànies de les mines, una zona particularment difícil ja que es troba en terreny rural, és a dir, amb un nivell de coherència molt baix. D'aquesta manera es posarà a prova les limitacions del mètode utilitzat i es comprovarà la validesa de les noves rutines implementades, en principi més robustes en aquest tipus de zones.

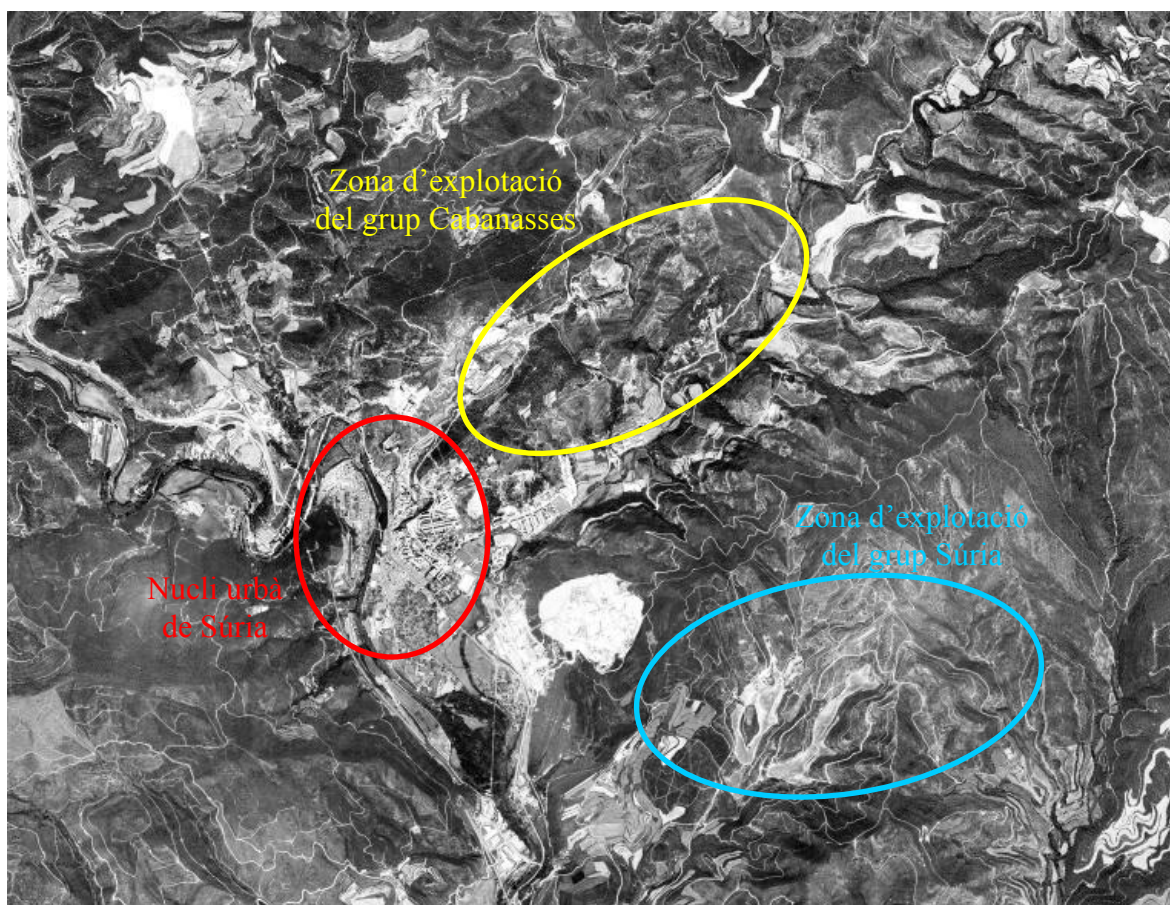


Fig. 7.9 Ortofoto de la zona d'estudi. S'indica la posició del nucli urbà de Súria i les dues principals zones d'explotació.

Degut a l'existència d'una falla, l'explotació minera es va veure obligada a dividir-se en dos trams principals, mostrats en la figura. L'estudi es centrarà principalment en aquestes dues zones, calculant la possible subsidència del terreny.

Per tal de realitzar el processament d'aquesta zona s'ha utilitzat un *stack* de 50 imatges SLC que cobreixen la zona central de Catalunya, obtingudes pels satèl·lits ERS-2 i ENVISAT. La Taula B-1 de l'annex B llista la informació de les SLC.

Com s'observa en la llista es cobreix un total de 12 anys. Malgrat tot hi ha un període de 3 anys (entre el 2000 i el 2003) dels quals no es té informació, ja que és l'etapa en la qual el satèl·lit ERS-2 tenia problemes amb els giroscopis. Aquest fet feu aconsellable dividir el processament final en dues parts, com es veurà posteriorment.

La *MASTER-MASTER* utilitzada és la captada el 1998/08/28 pel satèl·lit ERS-2. Es va escollir com a *MASTER-MASTER* mitjançant un estudi que es basava en trobar la imatge més semblant a tot el conjunt d'SLC, tant en termes temporals (línia de base temporal), espectrals (Doppler) com geomètrics (línia de base temporal).

El DEM extern utilitzat en els càlculs cobreix la zona de la comarca del Bages amb una resolució de 25 metres. Per tal d'adequar-lo a les nostres necessitats s'ha interpolat fins a obtenir una mida de píxel de 10 metres. Esta georeferenciat en coordenades UTM en el datum WGS-84. La informació orbital prové de les òrbites precises proporcionades per la ESA.

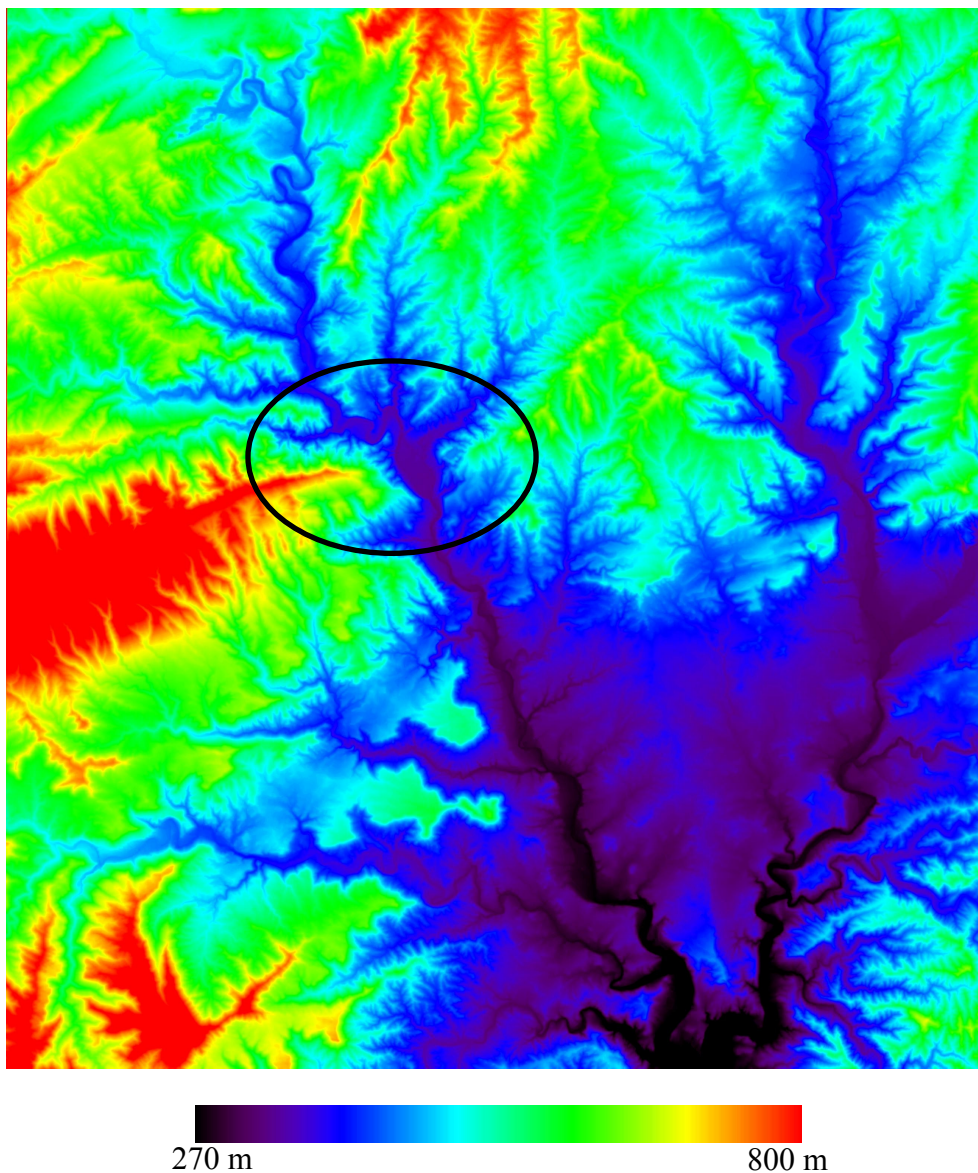


Fig. 7.10 DEM utilitzat en el processament. S'ha encerclat la posició de Súria.

El retall escollit de la *MASTER-MASTER* cobreix les poblacions de Manresa, Sallent i Súria. S'escull una zona més ampla que la que interessa en l'estudi per tenir més punts de referència fiables en el processament posterior (les poblacions, en aquest cas, degut a la seva alta coherència), ja que es tracta d'una zona bastant poc coherent. Tot seguit es mostra una imatge d'amplitud d'alta resolució del retall.

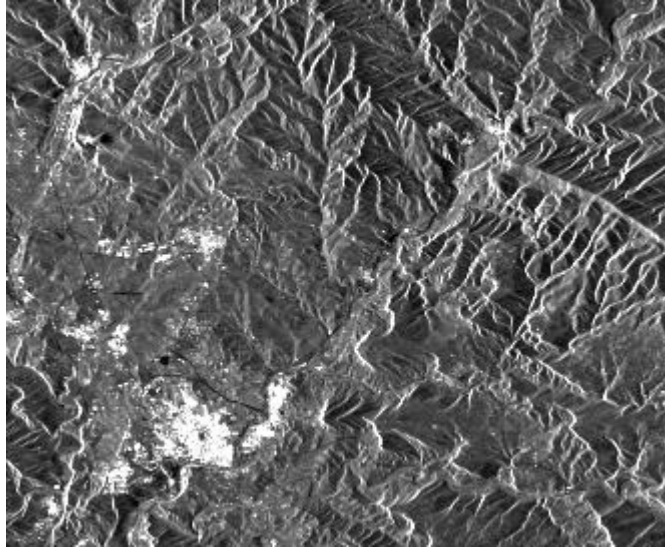


Fig. 7.11 Imatge d'amplitud alta resolució del retall utilitzat. S'observa Manresa a la part inferior-esquerra, Sallent a la part superior-esquerra i Súria a la part superior dreta. S'ha aplicat un multilook de 3x15.

En el DEM s'aprecia que la zona d'estudi està marcada per un cert relleu. Així doncs és possible l'ús de la generació automàtica de punts de control. Per tant es realitza la correcció orbital amb aquest mètode.

Un cop obtinguts els punts de control es procedeix a l'alineament de les imatges. Com es pot observar en la llista, es duen a terme tant alineaments directes (ERS-ERS) com creuats (ERS-ENVISAT). Durant l'alineament també es genera la base linealment independent d'interferogrames sintètics.

Arribats a aquest punt es poden generar els interferogrames a partir de la combinació de les imatges. Es genera la següent llista d'interferogrames, basada en una triangulació de Delaunay dels mateixos situats en un espai tridimensional on els eixos són la línia de base espacial, la línia de base temporal i la diferència Doppler. S'apliquen les següents restriccions:

- Línia de base temporal màxima: 1000 dies.
- Línia de base espacial màxima: 300 metres.
- Diferència Doppler màxima: 500 Hz.

Amb aquestes restriccions s'obtenen un total de 120 interferogrames, llistats en la taula B-2 de l'annex B.

Un cop es tenen els interferogrames cal extreure'ls la component de fase topogràfica. Aquesta component es pot generar simplement combinant els interferogrames sintètics corresponents de la base linealment independent. D'aquesta manera s'obtenen els

interferogrames diferencials, dades que seran la base pel càlcul de subsidència que es durà a terme tot seguit.

Abans però caldrà seleccionar els píxels sobre els quals es realitzaran els càlculs. En aquest cas la selecció es farà en termes de coherència i per tant, també es calcula la coherència diferencial per a cada interferograma. El *multilook* utilitzat en aquest cas és de 3x15.

En aquest punt l'estudi es divideix en dues parts. Com mostra la llista d'imatges processades, hi ha un buit temporal important entre l'any 2000 i el 2003, la qual cosa fa aconsellable processar els dos períodes de forma separada, ja que si es processessin juntes es podrien obtenir components de deformació inexistents degut a la falta de mostres. Així doncs es realitzaran els càlculs pel període comprès entre els anys 1995-2000 i pel comprès entre els anys 2003-2007.

Els paràmetres de processament són els següents:

- Processament *multilayer* de tres capes: llindars de coherència a 0.4, 0.3 i 0.25.
- Percentatge d'interferogrames necessari que superin els llindars: 45%
- Màxima distància de connexió entre punts coherents: 2000 m.
- Coherència de model: 0.

S'han col·locat llavors de velocitat lineal zero als nuclis de Manresa, Sallent, Súria i Callús (un petit poble entre Súria i Manresa), on no es té constància de subsidència.

Es tracta de paràmetres bastant permissius, ja que la zona que es processa és força complicada en termes de coherència. S'ha ajustat el paràmetre de coherència de model a zero ja que s'espera que els moviments siguin bàsicament lineals. Realitzant el processament amb aquests paràmetres s'obtenen els següents resultats, obtinguts amb la següent escala. Aquesta està definida a trams per a poder observar millor els diferents nivells de deformació:



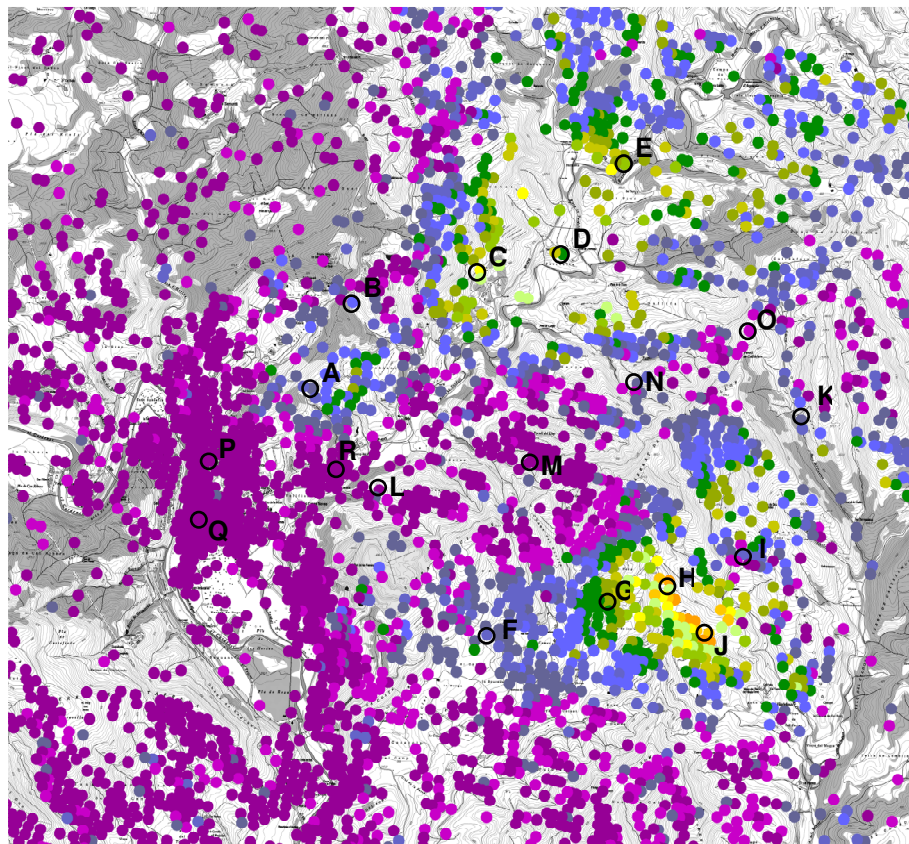
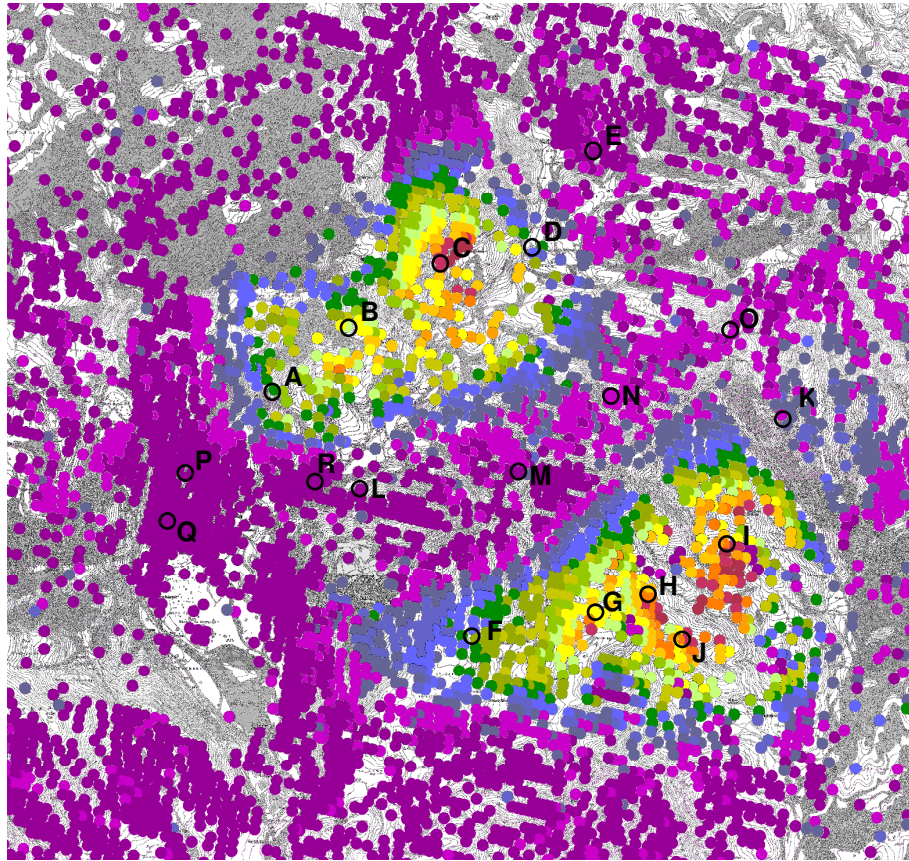


Fig. 7.12 Resultats del processament 1 per al període 1995-2000 (superior) i pel 2003-2007 (inferior). S'indiquen diferents punts dels quals es donarà la evolució temporal

A simple vista s'observen clarament dues zones importants de deformació a l'est de la població, tant en un període com en l'altre. Ambdues zones corresponen a explotacions mineres de sals potàssiques. Són zones amb un baix nivell de coherència, ja que són bàsicament boscos i camps de cultiu, amb algunes masies aïllades. En tot cas s'observa amb facilitat el gradient de deformació, el qual dóna una idea de la direcció d'avançament de l'explotació de la mina. A trets generals es pot observar que la mina ha avançat la seva explotació cap al nord-est, ja que la zona de màxima deformació s'ha desplaçat entre els dos períodes. El següent gràfic mostra l'avançament real de les mines. Es pot comprovar com hi ha una correlació amb els resultats obtinguts.

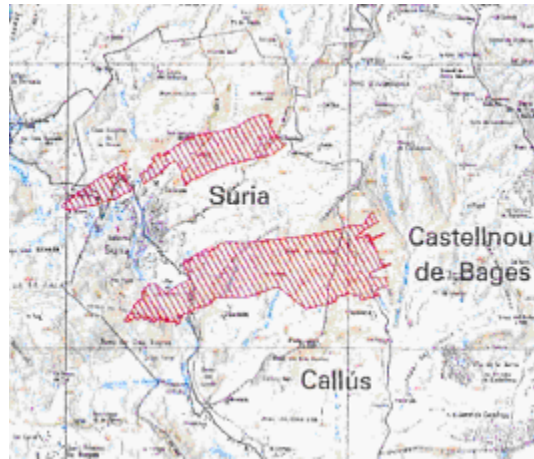


Fig. 7.13 Localització de les activitats de la mineria realitzades prop del terme de Súria. En ratllat vermell, les àrees de subsòl minat i amb una creu vermella es situen els diferents pous miners.

Tot seguit s'estudiaran diferents punts en concret per tal de visualitzar-ho millor. Per tal de mostrar-ho de forma ordenada, es dividiran el punts en diferents zones:

a) **Zona d'explotació del grup Cabanasses:** Es tracta de la zona d'explotació minera del nord, que correspon als punts A, B, C, D i E.

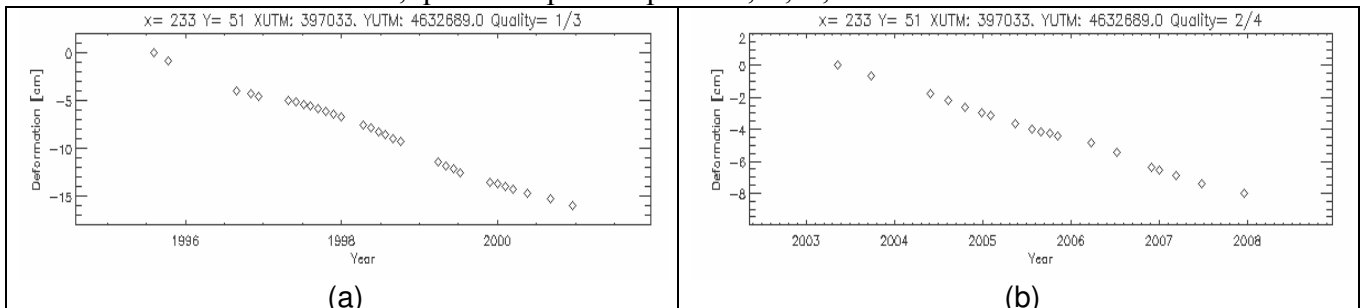


Fig. 7.14 Evolució de la deformació al punt A. 1995-2000 (a), 2003-2007 (b)

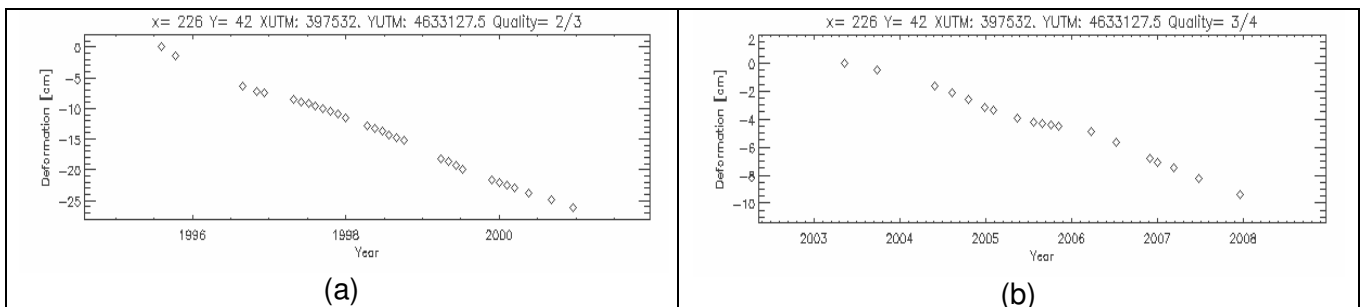


Fig. 7.15 Evolució de la deformació al punt B. 1995-2000 (a), 2003-2007 (b)

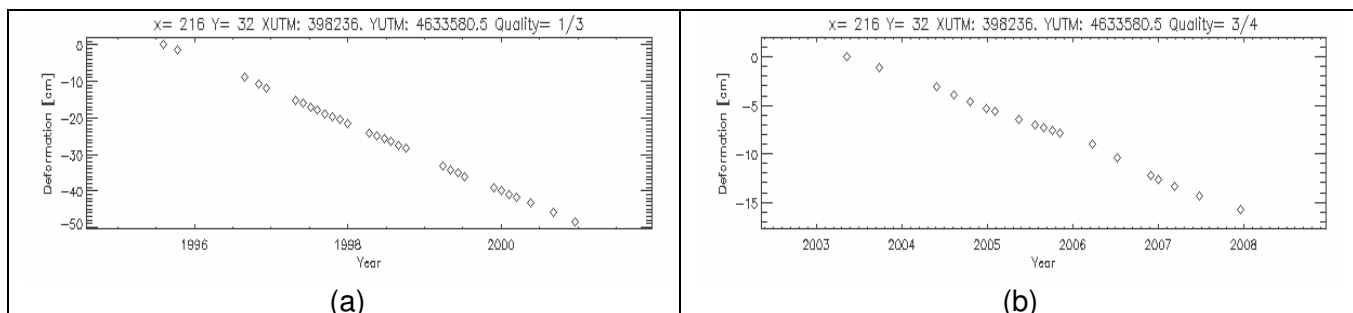


Fig. 7.16 Evolució de la deformació al punt C. 1995-2000 (a), 2003-2007 (b)

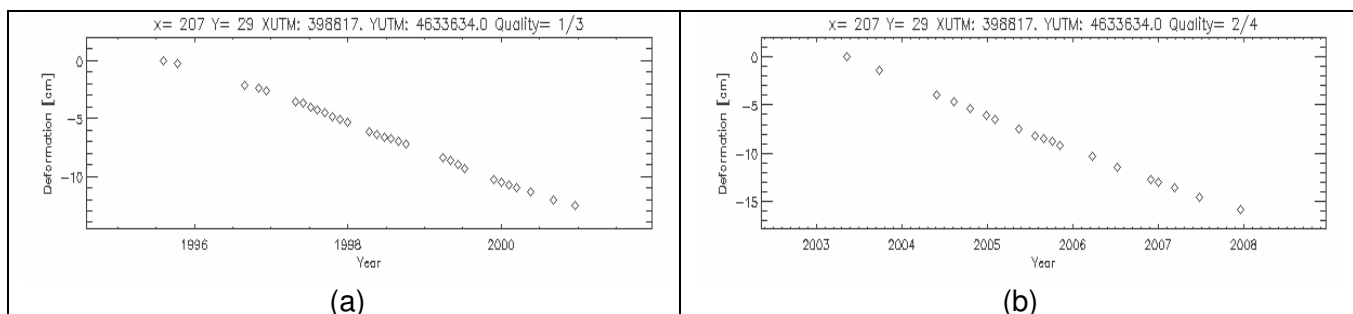


Fig. 7.17 Evolució de la deformació al punt D. 1995-2000 (a), 2003-2007 (b)

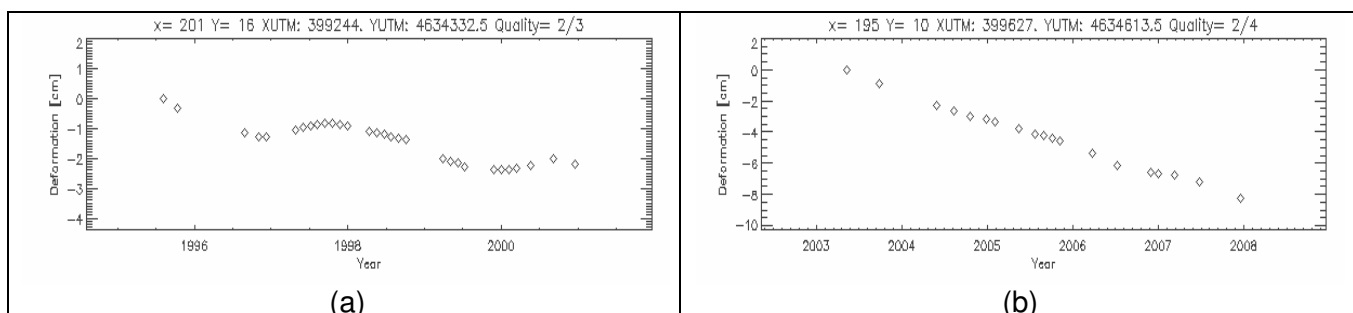


Fig. 7.18 Evolució de la deformació al punt E. 1995-2000 (a), 2003-2007 (b)

	Velocitat de deformació (cm/any)		Deformació acumulada (cm)	
	1995-2000	2003-2007	1995-2000	2003-2007
A	3.00	1.75	-16	-8
B	4.75	1.75	-26	-9
C	8.75	3.25	-49	-16
D	2.25	3.25	-13	-16
E	0.35	3.5	-2	-17

Taula 7-1 Velocitat lineal de deformació i deformació acumulada en la zona d'exploració del grup Cabanasses pels dos períodes d'estudi

S'observa com efectivament la zona de màxima deformació acumulada s'ha anat desplaçant en direcció nord-est, coincidint amb l'avançament de la explotació minera.

b) **Zona d'exploració del grup Súria:** Aquesta zona fa referència a la explotació minera de més al sud, que inclou els punts F, G, H, I, J i K.

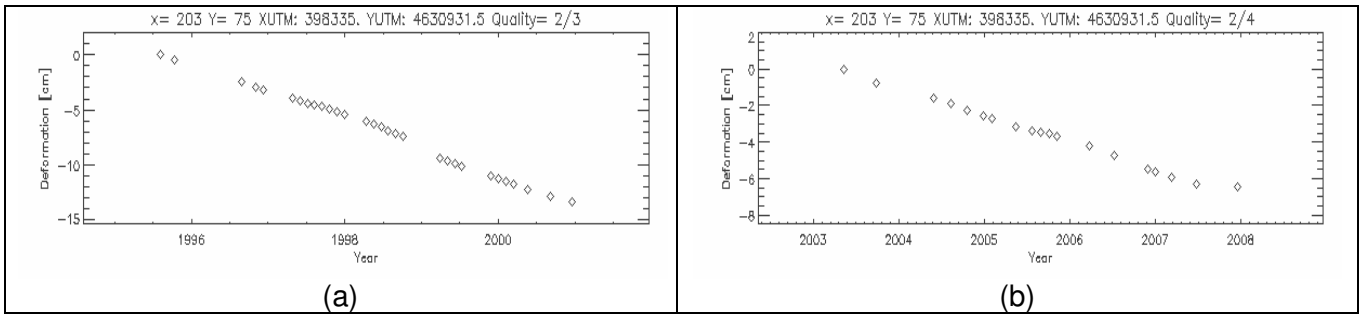


Fig. 7.19 Evolució de la deformació al punt F. 1995-2000 (a), 2003-2007 (b)

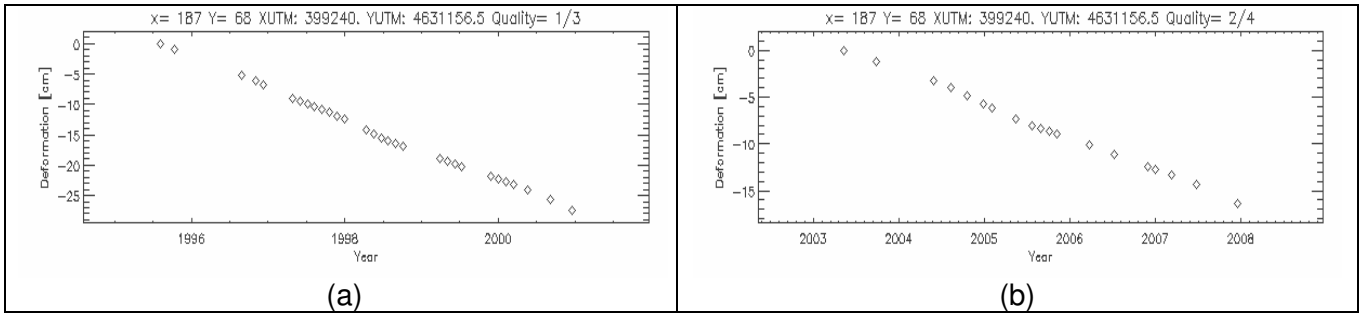


Fig. 7.20 Evolució de la deformació al punt G. 1995-2000 (a), 2003-2007 (b)

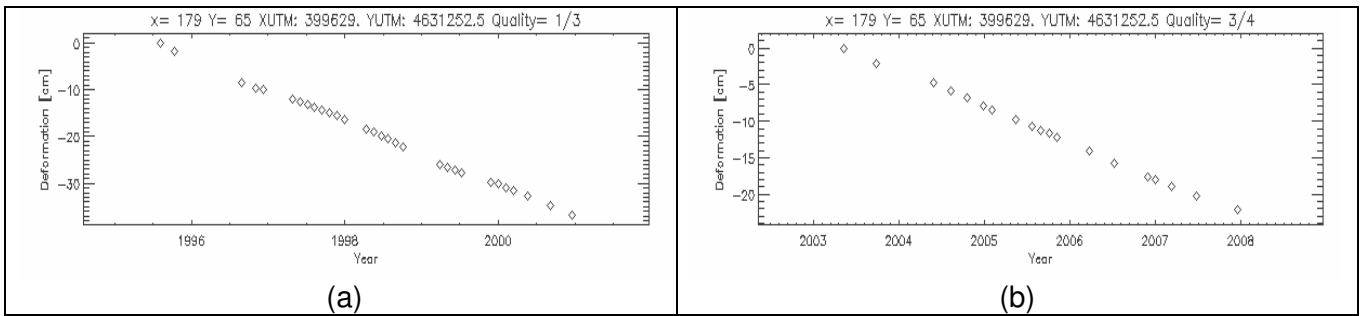


Fig. 7.21 Evolució de la deformació al punt H. 1995-2000 (a), 2003-2007 (b)

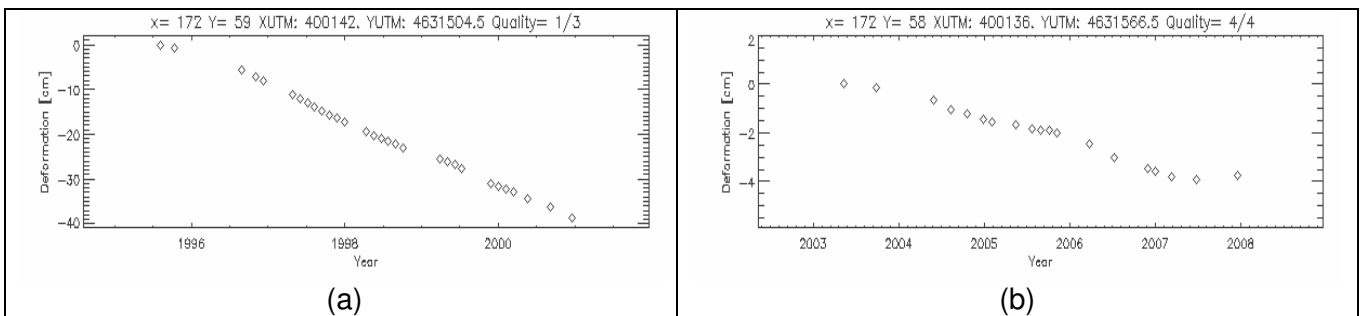


Fig. 7.22 Evolució de la deformació al punt I. 1995-2000 (a), 2003-2007 (b)

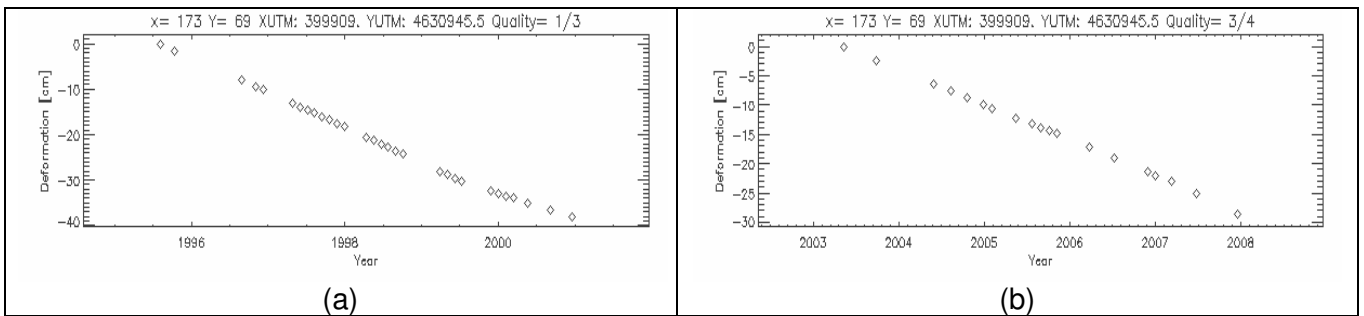


Fig. 7.23 Evolució de la deformació al punt J. 1995-2000 (a), 2003-2007 (b)

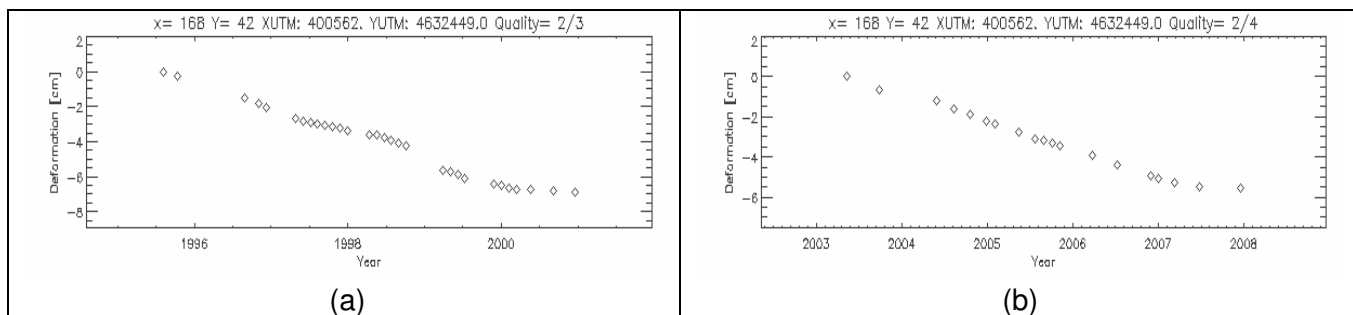


Fig. 7.24 Evolució de la deformació al punt K. 1995-2000 (a), 2003-2007 (b)

	Velocitat del deformació (cm/any)		Deformació acumulada (cm)	
	1995-2000	2003-2007	1995-2000	2003-2007
F	2.50	1.25	-14	-6
G	5.25	3.40	-29	-17
H	7.00	4.75	-39	-23
I	7.50	0.75	-40	-4
J	8.75	5.75	-48	-29
K	1.25	1.25	-7	-6

Taula 7-2 Velocitat lineal de deformació i deformació acumulada en la zona d'exploració del grup Súrria pels dos períodes d'estudi

En aquest cas, la mina no ha avançat entre els dos períodes de temps. Més aviat es detecta una disminució de la velocitat de deformació. La zona al voltant del punt I s'ha obtingut segurament de forma errònia, ja que mostra un decreixement brutal de la deformació.

c) **Zona entre explotacions:** Aquesta zona, de comportament més estable que les anteriors, està situada entre les dues mines. Comprèn els punts L, M, N i O.

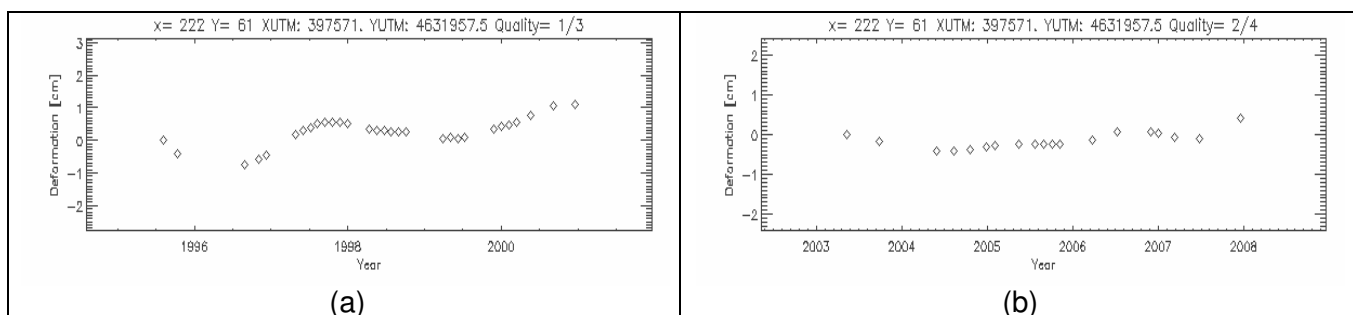


Fig. 7.25 Evolució de la deformació al punt L. 1995-2000 (a), 2003-2007 (b)

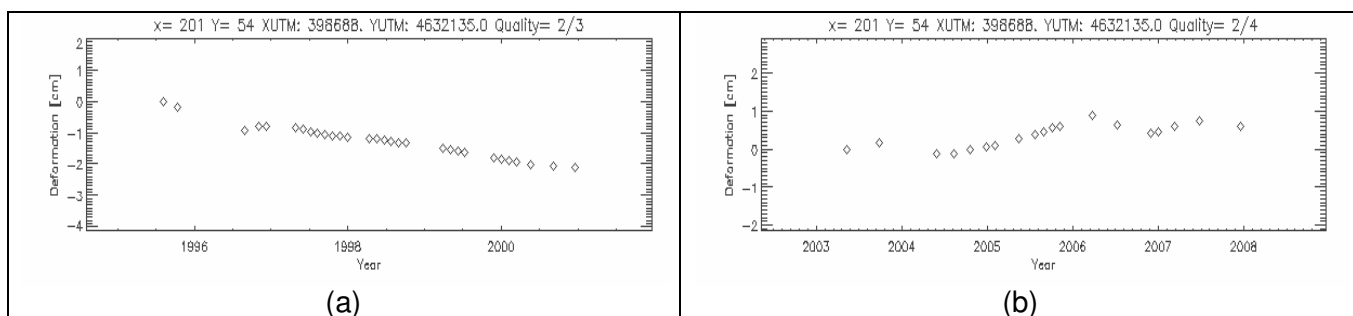


Fig. 7.26 Evolució de la deformació al punt M. 1995-2000 (a), 2003-2007 (b)

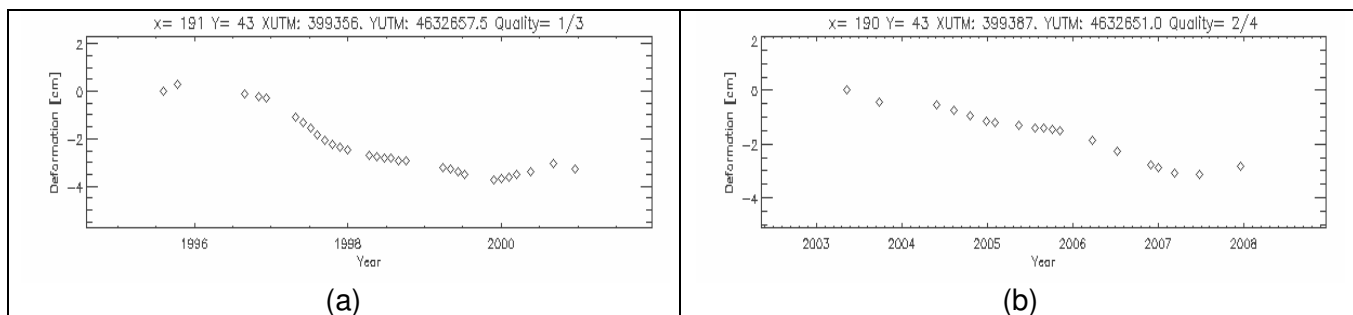


Fig. 7.27 Evolució de la deformació al punt N. 1995-2000 (a), 2003-2007 (b)

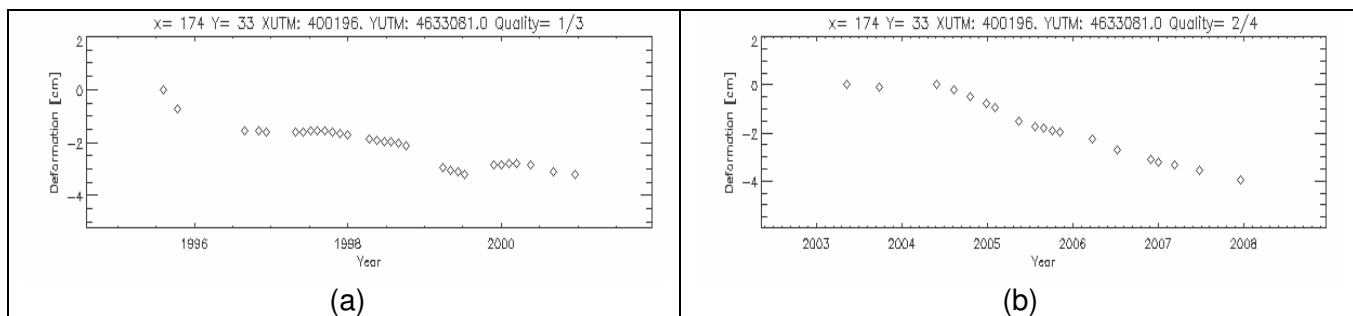


Fig. 7.28 Evolució de la deformació al punt O. 1995-2000 (a), 2003-2007 (b)

	Velocitat del moviment (cm/any)		Assentament acumulat (cm)	
	1995-2000	2003-2007	1995-2000	2003-2007
L	-0,2	-0,1	1	0,5
M	0,4	-0,15	-2,2	0,8
N	0.75	0.75	-4	-3
O	0.75	1	-3	-4

Taula 7-3 Velocitat lineal de deformació i deformació acumulada en la zona entre explotacions pels dos períodes d'estudi

Com es pot veure, la magnitud de la deformació és molt menor. Algunes gràfiques mostren un comportament no lineal. No s'atribueix en principi a la deformació real, sinó als paràmetres permissius seleccionats, els quals provoquen una mala estimació del moviment no lineal.

d) **Zona urbana de Súria:** Aquesta zona engloba el nucli urbà de Súria, de la qual es seleccionen molts més punts, ja que el nivell mig de coherència és més elevat pel fet de tractar-se de zona edificada. De tots ells s'han seleccionat els punts P, Q i R.

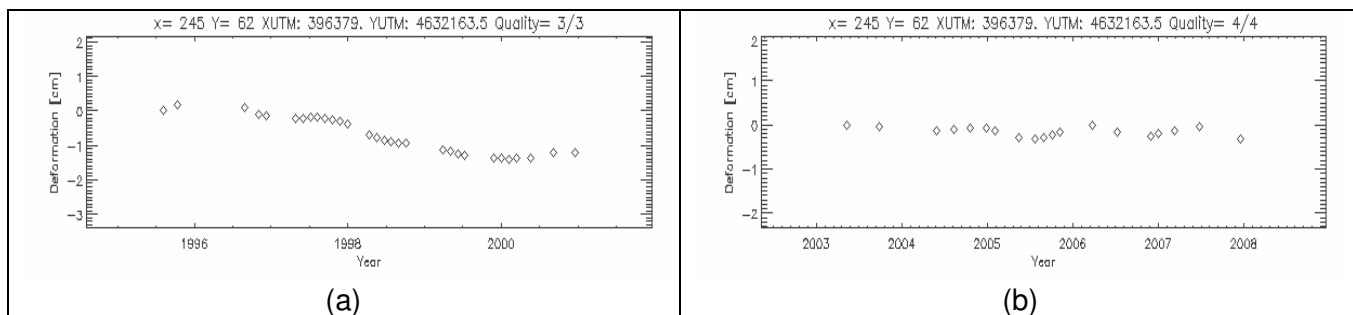


Fig. 7.29 Evolució de la deformació al punt P. 1995-2000 (a), 2003-2007 (b)

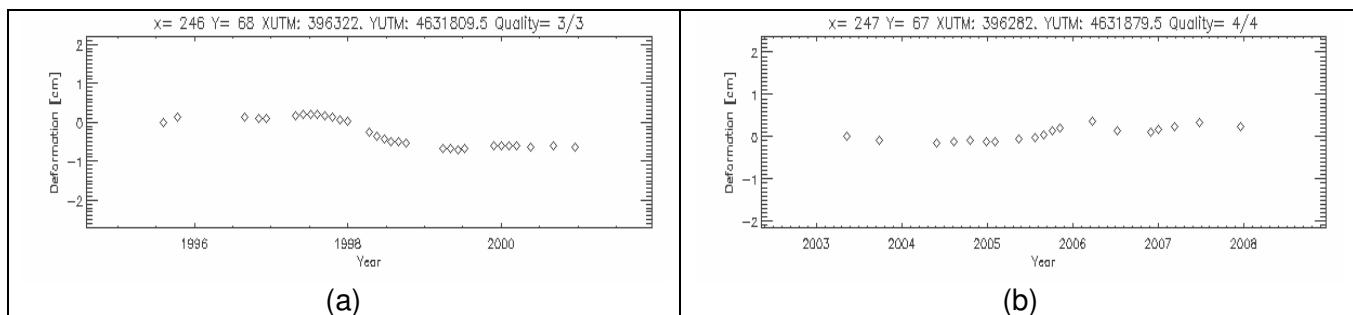


Fig. 7.30 Evolució de la deformació al punt Q. 1995-2000 (a), 2003-2007 (b)

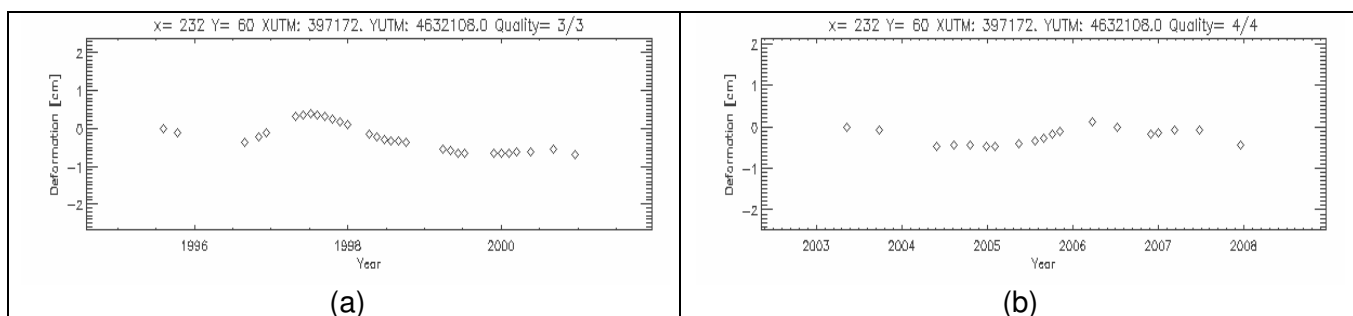


Fig. 7.31 Evolució de la deformació al punt R. 1995-2000 (a), 2003-2007 (b)

Aquesta zona és encara més estable que la anterior, i no s'hi detecta tant el moviment no lineal fals, ja que la qualitat dels píxels d'aquesta zona es molt més alta.

Així doncs s'ha aconseguit realitzar un estudi prou satisfactori en una zona realment molt complicada. Com ja s'ha dit però, els valors obtinguts no són del tot fiables, ja que degut a l'ús de paràmetres poc estrictes, el càlcul del moviment no lineal i la extracció de l'atmosfera es realitzen de forma incorrecta. Malgrat tot, el tipus de deformació existent en aquesta zona s'espera que sigui en bona part lineal i per tant aquest efecte negatiu queda pal·liat.

La part més positiva de l'estudi és que s'ha aconseguit una gran densitat de punts amb un gran nivell de relació entre ells que ha permès treure una tendència global de la deformació en una zona molt extensa, amb la qual cosa pot servir com a base i promoció d'estudis més rigorosos sobre el terreny.

8 CONCLUSIONS I LÍNIES FUTURES

La interferometria diferencial SAR és una tècnica a partir de la qual es pot realitzar una monitorització de les deformacions del terreny a gran escala. A partir d'imatges SLC obtingudes per un radar d'obertura sintètica embarcat en un satèl·lit es poden obtenir interferogrames, els quals donen informació del relleu observat. Mitjançant informació topogràfica externa (un DEM) es pot extreure la component fixa de fase topogràfica i obtenir els interferogrames diferencials, que aporten informació únicament de deformació. A partir d'un conjunt d'interferogrames diferencials i mitjançant tècniques com el CPT (*Coherent Pixels Technique*) es pot extreure una evolució temporal de la deformació del terreny.

Les tècniques de generació d'interferogrames diferencials, concretament una de les parts més importants que és l'alineament, depenien intrínsecament de les característiques de la pròpia SLC, ja sigui del nivell de coherència o de la amplitud dels seus píxels. Això dona lloc a un tractament no homogeni de la imatge, realitzant un processament millor en les zones de la imatge amb unes característiques més adients. Per exemple, el mètode d'alineament per amplitud s'adapta molt bé a zones urbanes. Hom pot pensar que la majoria dels casos les zones d'estudi compleixen aquest requisit, ja que es de suposar que és més propici l'estudi de llocs habitats per l'ésser humà. Això moltes vegades no és cert, ja que certs fenòmens de caire geològic (com per exemple desprendiments del terreny, volcans, terratrèmols, etc ...) poden afectar les persones a llarg o curt termini sense estar situats directament en una zona poblada. Aquesta és la motivació de la nova tècnica desenvolupada: realitzar un alineament completament independent de la informació de reflectivitat de les SLC i que per tant, tractarà per igual totes les zones de la imatge. Això s'aconsegueix mitjançant tècniques de geocodificació i fent servir com a dades externes un DEM i la informació orbital dels satèl·lits, és a dir, un sistema basat en la geometria d'adquisició de les imatges i no en les pròpies imatges. D'aquesta manera és realitza un processament més homogeni i més potent en zones de baixa coherència, cosa que permet un estudi més fructuós en zones complicades, com per exemple les rurals.

Les dades de partida del processament actual provenen de dues fonts lleugerament diferents: per una banda els satèl·lits ERS-1 i ERS-2 i per altra banda el satèl·lit ENVISAT. Les característiques d'ambdós tipus de satèl·lit són lleugerament diferents, la qual cosa fa necessària una adaptació de les imatges per a poder treballar conjuntament. Les rutines existents realitzaven aquesta adaptació mitjançant tècniques de remostreig. Aquestes tècniques se segueixen utilitzant en les noves rutines, adaptant-les per tal de poder treballar tant amb casos directes (mateix tipus de sensor) com creuats (sensors diferents).

El fet de realitzar l'alineament a partir de dades externes fa que la seva qualitat depengui al mateix temps de la qualitat d'aquestes dades. El DEM sol ser una dada completament externa i se suposa ideal durant l'alineament. En canvi, es duu a terme una correcció de la

informació orbital. El mètode utilitzat es basa en punts de control que relacionen la geometria radar amb la geometria real. Partint d'aquesta relació es pot obtenir la correcció mitjançant tècniques de geocodificació. Aquest punts de control es troben de forma manual, amb la qual cosa entra en joc el factor humà amb el consegüent error que comporta. Si la qualitat de l'alineament depèn en part de la qualitat de les òrbites generades, cal que aquestes siguin el màxim de correctes possible. Per aquest motiu s'ha generat un mètode automàtic de generació de punts de control el qual ha demostrat donar uns resultats molt òptims, a part de ser un sistema molt més còmode i pràctic. L'única restricció és que es un sistema que depèn de la topografia i per tant no es pot aplicar en una zona majoritàriament plana. Malgrat tot, en la majoria dels casos, les zones planes en estudi solen ser zones poblades i per tant, trobar bons punts de control de forma manual és més senzill. En tot cas sempre que es pugui cal reduir la intervenció humana al mínim possible i fer ús d'aquesta nova eina.

El nou sistema d'alineament fa possible la generació simultània dels interferogrames sintètics, que no són res més que la component topogràfica que cal extreure dels interferogrames per generar els interferogrames diferencials. De fet es genera una base linealment independent d'interferogrames sintètics que, degut a les característiques geomètriques del sistema, fa que es pugui generar qualsevol interferograma sintètic a partir de la combinació lineal dels components de la base. S'ha demostrat que és un mètode factible i que no presenta un increment global de l'error respecte a si es generés l'interferograma sintètic directament, però en canvi fa que el processament sigui computacionalment més òptim, ja que només caldrà generar la base d'interferogrames sintètics, procés com ja s'ha dit integrat en l'alineament i que per tant no representa un augment molt significatiu del temps de processament del mateix.

Així doncs, s'han desenvolupat un seguit d'algoritmes que fan més robusta la cadena interferomètrica, complementant les mancances que tenia fins els moment i fent el seu processament més òptim.

El 15 de juny del 2007 es posà en òrbita el TerraSAR-X fruit de la col·laboració del Centre Aeroespacial Alemany (DLR) i Astrium. Es tracta d'un satèl·lit que embarca un radar d'obertura sintètica que opera en la banda X. Així doncs, permet la obtenció de productes de gran qualitat, arribant a obtenir resolucions espacials de 1,5 metres. Això dona lloc a un nou món de possibilitats en la teledetecció espacial, ja que permet una detecció de blancs molt més acurada. Un de les línies futures possibles seria integrar en la cadena interferomètrica la interfície necessària per acollir el processament de les SLC de TerraSAR-X.

En el cas del TerraSAR-X caldrà comprovar si és necessària la correcció orbital, tal com passa amb els satèl·lits ERS i ENVISAT. En teoria la qualitat de les òrbites ja és molt alta i per tant no caldria. En tot cas es pot realitzar la comprovació i si fos necessària, s'haurà de validar l'ús del mètode automàtic d'obtenció de punts de control, ja que al tenir una millor resolució a la SLC, aquesta és més sensible als efectes de distorsió i segurament apareixerien molts més efectes en la SLC sintètica apart de les franges de *foreshortening*, la qual cosa podria dur a un càlcul erroni de la correcció orbital necessària.

També es posaran en òrbita altres satèl·lits, com el Radarsat-2 (espanyol), que treballa en banda C, i l'ALOS/PALSAR (japonès), que treballa en banda L, amb la qual cosa les vies d'estudi queden obertes a moltes propostes.

ANNEX A: DESCRIPCIÓ DE LES RUTINES GENERADES

En aquest annex es presentaran les noves rutines desenvolupades, tot indicant les entrades i sortides. També s'indicaran els nous paràmetres creats.

Generació automàtica de punts de control

Aquesta rutina esta dividida en dues parts programades en C, ja que hi ha una part central que esta en IDL. Tot seguit es mostra cada una de les parts

auto_PC_gen1.c

Rutina que s'encarrega de trobar l'altura sobre l'el·lipsoide de referència i la posició en coordenades cartesianes (X,Y,Z) per a cada píxel del DEM.

a) Crida de la rutina:

auto_PC_gen1 param_PC.par

on *param_PC.par* és el fitxer de paràmetres per la cerca dels PC's automàtics.

b) Fitxers d'entrada:

- DEM indicat en el fitxer *XXX.par* (LOC_DEM).
- Fitxers geomètrics i orbitals generats per la rutina *orbits* (XXX.ran i XXX.so1) referents a la imatge *MASTER-MASTER* d'alineament.

c) Fitxers de sortida:

- *param_PC.mat_az1.dat*: Matriu que indica les posicions azimuth sobre la geometria *MASTER-MASTER* de cada píxel del DEM. Tipus de dades *float*. Les dimensions son indicades al fitxer *param_PC.log* (GROUD_SAMPLES, GROUND_LINES).
- *param_PC.mat_rgl.dat*: Matriu que indica les posicions range sobre la geometria *MASTER-MASTER* de cada píxel del DEM. Les dimensions son indicades al fitxer *param_PC.log* (GROUD_SAMPLES, GROUND_LINES).
- *param_PC.mat_dem.dat*: Matriu que indica la altura de cada píxel del DEM. Les dimensions son indicades al fitxer *param_PC.log* (GROUD_SAMPLES, GROUND_LINES).
- *param_PC.mat_x.dat*: Matriu que indica la coordenada cartesiana X de cada píxel del DEM. Les dimensions son indicades al fitxer *param_PC.log* (GROUD_SAMPLES, GROUND_LINES).
- *param_PC.mat_y.dat*: Matriu que indica la coordenada cartesiana Y de cada píxel del DEM. Les dimensions son indicades al fitxer *param_PC.log*

(GROUD_SAMPLES, GROUND_LINES).

- param_PC.mat_z.dat: Matriu que indica la coordenada cartesiana Z de cada píxel del DEM. Les dimensions son indicades al fitxer param_PC.log (GROUD_SAMPLES, GROUND_LINES).

Arribats a aquest punt es realitza la interpolació de les matrius anteriors mitjançant rutines d'IDL. El que es fa bàsicament és una interpolació de les altures i les coordenades cartesianes, que es troben en una malla irregular (indicada per les posicions range i azimuth de les matrius param_PC.mat_az1.dat i param_PC.mat_rg1.dat) per tal de passar-les a matrius regulars. Un cop feta l'interpolació s'obtenen les següents matrius:

- slant_x.dat: Matriu amb la coordenada X cartesiana per cada píxel de la imatge *master*. Tipus de dades *float*. Té les dimensions del retall escollit (LIN_INTERF, MOS_INTERF).

- slant_y.dat: Matriu amb la coordenada Y cartesiana per cada píxel de la imatge *master*. Tipus de dades *float*. Té les dimensions del retall escollit (LIN_INTERF, MOS_INTERF).

- slant_z.dat: Matriu amb la coordenada Z cartesiana per cada píxel de la imatge *master*. Tipus de dades *float*. Té les dimensions del retall escollit (LIN_INTERF, MOS_INTERF).

- slant_dem.dat: Matriu amb l'altura sobre l'el·lipsoide de referència per cada píxel de la imatge *master*. Tipus de dades *float*. Té les dimensions del retall escollit (LIN_INTERF, MOS_INTERF).

auto_PC_gen2.c

Aquesta rutina crea una "SLC sintètica" i la compara amb la SLC original per tal de trobar la correcció orbital i generar punts de control en conseqüència. Els punts de control se situaran en les zones amb més contrast de la imatge.

a) Crida de la rutina:

```
auto_PC_gen2 param_PC.par
```

on *param_PC.par* és el fitxer de paràmetres per la cerca dels PC's sintètics.

b) Fitxers d'entrada:

- cut_master_complex.dat: Retall utilitzat de la *MASTER_MASTER*.

-slant_dem.dat: Matriu amb l'altura generada previament. Tipus de dades *float*. Té les dimensions del retall escollit (LIN_INTERF, MOS_INTERF). Serveix de base per generar la SLC sintètica.

- slant_x.dat: Matriu amb la coordenada X cartesiana generada previament. Tipus de dades *float*. Té les dimensions del retall escollit (LIN_INTERF, MOS_INTERF). Serveix per saber la posició geogràfica dels punts de control que es generen.

- slant_y.dat: Matriu amb la coordenada Y cartesiana generada previament. Tipus de dades *float*. Té les dimensions del retall escollit (LIN_INTERF, MOS_INTERF). Serveix per saber la posició geogràfica dels punts de control que es generen.

- slant_z.dat: Matriu amb la coordenada Z cartesiana generada previament.

Tipus de dades *float*. Té les dimensions del retall escollit (LIN_INTERF, MOS_INTERF). Serveix per saber la posició geogràfica dels punts de control que es generen.

c) Fitxers de sortida:

- *slc_sint.dat*: SLC sintètica generada. Tipus de dades *float*.
- *slc_sint_complex.dat*: SLC sintètica generada. Tipus de dades *complex*. És necessari que estigui en aquest format per tal de realitzar l'alieament amb la SLC real.
- *PC_sint_file.dat*: Fitxer de text amb la informació dels punts de control generats.

Alineament

Fins ara, les rutines d'alineament eren gestionades per 2 scripts: un per l'alineament entre imatges del mateix sensor (*script_registration1*) i un altre per l'alineament entre sensors diferents (*script_registration2*). Degut a que part del nou alineament està desenvolupat en IDL no ha estat possible utilitzar scripts per a la seva gestió, sinó que s'han usat funcions en IDL per a tal fi, *reg_corr_DEM_direct* per al cas de sensors iguals i *reg_corr_DEM_cross* pel cas de sensors diferents. Ambdues funcions es troben al directori *reg_intf_coher_dif* del *SUBSIDENCE*. La part generada en IDL és la que interpola les matrius en *ground-range* per passar-les a *slant-range*.

- Rutines en C desenvolupades (per ordre d'execució):

regist_coarse_PC.c

Rutina que realitza un alineament gruixut centrat en cada punt de control, necessari per a un millor refinament de les orbites.

a) Crida de la rutina:

regist_coarse_PC XXX.par

on *XXX.par* és el fitxer de paràmetres d'alineament.

b) Fitxers d'entrada:

- Els retalls resultat de l'alineament gruixut (*regist_coarse*) però en format complex, *XXX.sub1.float.dat* i *XXX.sub2c.dat*.

c) Fitxers de sortida:

- Es modificarà el fitxer de paràmetres *XXX.par* i s'afegirà al final els offsets per a cada punt de control, indicant l'offset en mostres i en línies per a cada punt de control amb la següent forma:

- PC_X_OFF_LIN: Offset en línies del PC número X.
- PC_X_OFF_MOS: Offset en mostres del PC número X.

orbits_corr.c

Modificació de la rutina *orbits.c*. S'encarrega de generar els paràmetres orbitals necessaris durant l'alineament de les imatges.

a) Crida de la rutina:

orbits_corr XXX.par <flag_sensors>

on *XXX.par* és el fitxer de paràmetres d'alineament i *flag_sensors* és igual a 0 si els sensors de les dues imatges és el mateix (alineament directe) i 1 si són diferents (alineament creuat)

b) Fitxers d'entrada:

- El fitxer de paràmetres *XXX.par*.

c) Fitxers de sortida:

-*XXX.ob1*: Vector de posicions del satèl·lit (metres) per cada línia de la SLC *master* completa. Es tracta d'una matriu de (3,LIN_SLC1) on LIN_SLC1 són les línies de la SLC *master*. El tipus de dades és *double*.

-*XXX.ob2*: Vector de posicions del satèl·lit (metres) per cada línia de la SLC *slave* completa. Es tracta d'una matriu de (3,LIN_SLC2) on LIN_SLC2 són les línies de la SLC *slave*. El tipus de dades és *double*.

-*XXX.so1*: Vector de posicions del satèl·lit (metres) per cada línia del retall del la SLC *master*. Es tracta d'una matriu de (3,LIN_REC1) on LIN_REC1 són les línies del retall de la SLC *master* més el marge de guarda deixat durant l'alineament (128 línies). El tipus de dades és *double*.

-*XXX.so2*: Vector de posicions del satèl·lit (metres) per cada línia del retall del la SLC *slave*. Es tracta d'una matriu de (3,LIN_REC2) on LIN_REC2 són les línies del retall de la SLC *slave* més el marge de guarda deixat durant l'alineament (128 línies). El tipus de dades és *double*.

- *XXX.ran*: Distància range pel retall *master* de la SLC en metres. El tipus de dades és *float*.

- *XXX.ran2*: Distància range pel retall *slave* de la SLC en metres. El tipus de dades és *float*.

Els 2 últims fitxers estan delmats per un factor 10, amb les següents dimensions:

$$\begin{aligned} \text{lin_geom} &= (\text{lin}+2M)/10 + 1 \\ \text{mos_geom} &= (\text{mos}+2M)/10 + 1 \end{aligned}$$

on *lin* i *mos* són les línies i les mostres del retall i *M* el marge de guarda.

regist_fine_DEM1.c

Rutina que s'encarrega de trobar per a cada punt del DEM les dimensions que li pertocuen en *slant-range* tant per la geometria de la imatge *master* com per la de l'*slave*.

a) Crida de la rutina:

regist_fine_DEMI XXX.par

on *XXX.par* és el fitxer de paràmetres d'alineament.

b) Fitxers d'entrada:

- DEM indicat en el fitxer *XXX.par* (LOC_DEM).
- Fitxers geomètrics i orbitals generats per la rutina *orbits_corr* (*XXX.ran*, *XXX.ran2*, *XXX.so1*, *XXX.so2*).

c) Fitxers de sortida:

- *XXX.mat_az1.dat*: Matriu que indica les posicions azimut sobre la geometria *master* de cada píxel del DEM. Tipus de dades float. Les dimensions son indicades al fitxer *XXX.log* (GROUD_SAMPLES, GROUND_LINES).
- *XXX.mat_rg1.dat*: Matriu que indica les posicions range sobre la geometria *master* de cada píxel del DEM. Tipus de dades float. Les dimensions son indicades al fitxer *XXX.log* (GROUD_SAMPLES, GROUND_LINES).
- *XXX.mat_incr_az.dat*: Matriu que indica els offsets en la direcció azimut entre la geometria *master* i la geometria *slave* per cada píxel del DEM. Tipus de dades float. Les dimensions son indicades al fitxer *XXX.log* (GROUD_SAMPLES, GROUND_LINES).
- *XXX.mat_incr_rg.dat*: Matriu que indica els offsets en la direcció range entre la geometria *master* i la geometria *slave* per cada píxel del DEM. Tipus de dades float. Les dimensions son indicades al fitxer *XXX.log* (GROUD_SAMPLES, GROUND_LINES).
- *XXX.mat_delta_range.dat*: Matriu que en indica la diferència de distàncies range (entre el satèl·lit i el píxel en qüestió) entre les geometries *master* i *slave*. Aquesta matriu serà útil per generar l'interferograma sintètic que formarà part de la base d'interferogrames sintètics. Tipus de dades float. Les dimensions son indicades al fitxer *XXX.log* (GROUD_SAMPLES, GROUND_LINES).

Arribats a aquest punt es realitza la interpolació de les matrius anteriors mitjançant rutines d'IDL. El que es fa bàsicament és una interpolació dels valors dels offsets (range i azimut) i les diferències de distàncies range, que es troben en una malla irregular (indicada per les posicions range i azimut de les matrius *XXX.mat_az1.dat* i *XXX.mat_rg1.dat*) per tal de passar-les a matrius regulars. Un cop feta l'interpolació s'obtenen les següents matrius:

- *slant_az_int.off*: Matriu amb l'offset en azimut entre la imatge *master* i la imatge *slave* per a cada píxel de la imatge *master*. Tipus de dades float. Té les dimensions del retall escollit més els marges de guarda (LIN_INTERF+2M, MOS_INTERF+2M).
- *slant_rg_int.off*: Matriu amb l'offset en range entre la imatge *master* i la imatge *slave* per a cada píxel de la imatge *master*. Tipus de dades float. Té les dimensions del retall escollit més els marges de guarda (LIN_INTERF+2M, MOS_INTERF+2M).

- *slant_delta_range.dat*: Matriu amb la diferència de distàncies range per a cada píxel de la imatge *master*. Tipus de dades *float*. Té les dimensions del retall escollit més els marges de guarda (*LIN_INTERF+2M*, *MOS_INTERF+2M*).

regist_fine_DEM2.c

Aquesta rutina s'encarrega d'aplicar els offsets fins obtinguts per la rutina anterior sobre la imatge *slave* per tal d'alinejar-la a nivell de subpíxel. Realitza també una correcció amb un offset constant basada en l'algoritme de correlació de l'amplitud per tal de millorar l'alineament. Per acabar calcula l'interferograma sintètic que s'inclourà en la base.

a) Crida de la rutina:

```
regist_fine_DEM2 XXX.par <flag_sensors>
```

on *XXX.par* és el fitxer de paràmetres d'alineament i *flag_sensors* indica si les imatges tenen el mateix sensor (alineament directe) o tenen sensors diferents (alineament creuat)

b) Fitxers d'entrada:

- *XXX.sub1.float.dat* i *XXX.sub2c.dat*: Retalls *master* i *slave* de les SLC alineats a nivell de píxel amb els marges de guarda *M*. Tipus de dades *complex*.
- *slant_az_int.off* i *slant_rg_int.off*: Offsets de subpíxel en azimuth i range obtinguts anteriorment. Tipus de dades *float*.
- *slant_delta_range*: Diferència de distàncies range obtinguda anteriorment. Tipus de dades *float*.

b) Fitxers de sortida:

- *XXX.sub1.float.dat* i *XXX.sub2.fi.dat*: Retalls finals alineats a nivell de subpíxel de les imatges *master* i *slave*. Tenen el tamany de retall escollit (*MOS_INTERF,LIN_INTERF*) sense els marges de guarda. Tipus de dades *complex*.
- *XXX.sub2.fi.dat.pre*: Matriu alineada a nivell de subpíxel sense aplicar l'offset constant. Tipus de dades *complex*.
- *XXX.off_const.log*: Fitxer de text amb informació de l'offset constant aplicat.
- *XXX.interf_sint.dat*: Interferograma sintètic entre *master* i *slave* que formarà part de la base. Tipus de dades *float*.

DESCRIPCCIÓ DELS NOUS PARÀMETRES

registration.par: Fitxer de paràmetres d'alineament.

BLOC_SIZE_AZ, BLOC_SIZE_RG: Aquests dos paràmetres indiquen la mida dels blocs quan es realitza la correcció constant de l'alineament fi (veure apartat 4.5.2). Uns valors de referència serien 512 en la direcció *azimuth* i 128 en la direcció *range*.

geo.par: Fitxer amb la informació geomètrica necessària.

SLOPE_THERS: Aquest paràmetre serveix per indicar de forma manual el llindar de pendent per calcular la SLC sintètica durant la generació automàtica de punts de control. La pendent es calcula segons la expressió 6.1. Si es deixa a 0, calcula automàticament aquesta pendent com la mitjana de les pendents positives.

subsidence.par: Fitxer de paràmetres de control de tot el procés.

DO_GEN_PC_SINT: Paràmetre que indica si cal generar els punts de control automàtics.

1: Si.
0: No.

PC_SINT_DONE: Paràmetre que indica si els punts de control automàtics ja han estat generats.

1: Si
0: No

Si aquest paràmetre està a 1, cal que el DO_GEN_PC_SINT estigui a 0.

REG_TYPE: Paràmetre que indica el tipus d'alineament utilitzat.

1: Alineament amb DEM extern.
0: Alineament per amplitud.

ANNEX B: DADES REFERENTS A L'ESTUDI DE SÚRIA

En aquest annex es donarà la informació utilitzada durant l'estudi de la subsidència de Síria desenvolupat al capítol 7.4.

LLISTAT D'SLC's

DATA	LINIES	MOSTRES	SENSOR
1995/08/04	29630	4904	ERS-2
1995/10/13	29060	4904	ERS-2
1996/08/23	28997	4904	ERS-2
1996/11/01	28364	4904	ERS-2
1996/12/06	29593	4904	ERS-2
1997/04/25	29089	4904	ERS-2
1997/05/30	28566	4904	ERS-2
1997/07/04	28639	4904	ERS-2
1997/08/08	28711	4904	ERS-2
1997/09/12	29491	4904	ERS-2
1997/10/17	29643	4904	ERS-2
1997/11/21	29113	4904	ERS-2
1997/12/26	29319	4904	ERS-2
1998/04/10	29624	4904	ERS-2
1998/05/15	28856	4904	ERS-2
1998/06/19	28788	4903	ERS-2
1998/07/24	29642	4904	ERS-2
1998/08/28	29511	4904	ERS-2
1998/10/02	28949	4904	ERS-2
1999/03/26	29636	4904	ERS-2
1999/04/30	29640	4904	ERS-2
1999/06/04	29625	4904	ERS-2
1999/07/09	29534	4904	ERS-2
1999/08/13	29193	4903	ERS-2
1999/11/26	29641	4904	ERS-2
1999/12/31	29446	4904	ERS-2
2000/02/04	29074	4904	ERS-2
2000/03/10	28832	4904	ERS-2
2000/05/19	29614	4904	ERS-2
2000/09/01	29246	4903	ERS-2
2000/12/15	28739	4904	ERS-2
2003/05/09	26883	5179	ENVISAT
2003/09/26	26888	5180	ENVISAT
2004/05/28	26895	5180	ENVISAT

2004/08/06	26899	5180	ENVISAT
2004/10/15	26196	5179	ENVISAT
2004/12/24	26882	5179	ENVISAT
2005/01/28	26876	5179	ENVISAT
2005/05/13	26908	5180	ENVISAT
2005/07/22	26905	5180	ENVISAT
2005/08/26	25954	5180	ENVISAT
2005/09/30	26882	5179	ENVISAT
2005/11/04	26889	5179	ENVISAT
2006/03/24	26864	5179	ENVISAT
2006/07/07	26892	5179	ENVISAT
2006/11/24	26882	5179	ENVISAT
2006/12/29	26880	5179	ENVISAT
2007/03/09	26886	5179	ENVISAT
2007/06/22	26909	5179	ENVISAT
2007/12/14	26890	5179	ENVISAT

Taula B-1 Llista d'imatges SLC utilitzades en el processament. Les dates estan indicades en format any/mes/dia

LLISTAT D'INTERFEROGRAMES SEL·LECCIONATS

Data MASTER	Sensor MASTER	Data SLAVE	Sensor SLAVE	Línia de base espacial (m)	Línia de base temporal (dies)	Diferència Doppler (Hz)
1995/08/04	ERS-2	1997/11/21	ERS-2	-105.377	840	0.0213068
1995/08/04	ERS-2	1997/10/17	ERS-2	159.310	805	0.00128347
1995/08/04	ERS-2	1997/09/12	ERS-2	78.6274	770	0.0289262
1995/08/04	ERS-2	1997/08/08	ERS-2	237.985	735	0.0128057
1995/10/13	ERS-2	1996/11/01	ERS-2	-65.7202	385	0.00352053
1996/08/23	ERS-2	1999/03/26	ERS-2	-188.941	945	0.0632189
1996/08/23	ERS-2	1996/12/06	ERS-2	-73.3497	105	0.00918754
1996/08/23	ERS-2	1997/04/25	ERS-2	-280.174	245	0.0275207
1996/12/06	ERS-2	1999/03/26	ERS-2	-120.155	840	0.0540313
1996/12/06	ERS-2	1997/04/25	ERS-2	-212.012	140	0.0183332
1997/04/25	ERS-2	1998/04/10	ERS-2	-123.741	350	0.00241949
1997/04/25	ERS-2	1997/05/30	ERS-2	-125.735	35	0.0234422
1997/04/25	ERS-2	1999/03/26	ERS-2	91.8674	700	0.0356981
1997/04/25	ERS-2	1998/07/24	ERS-2	-131.351	455	0.00157280
1997/04/25	ERS-2	1997/07/04	ERS-2	-192.895	70	0.00115252
1997/05/30	ERS-2	1998/04/10	ERS-2	12.2573	315	0.0258617
1997/05/30	ERS-2	1997/07/04	ERS-2	-67.2696	35	0.0222897
1997/07/04	ERS-2	1997/12/26	ERS-2	-304.182	175	0.00590227
1997/07/04	ERS-2	1999/11/26	ERS-2	-293.159	875	0.0387977
1997/07/04	ERS-2	1998/04/10	ERS-2	72.2699	280	0.00357201
1997/07/04	ERS-2	1998/07/24	ERS-2	68.4710	385	0.000420280
1997/07/04	ERS-2	1999/03/26	ERS-2	284.843	630	0.0368507
1997/07/04	ERS-2	1999/04/30	ERS-2	8.79605	665	0.0120305
1997/07/04	ERS-2	1999/07/09	ERS-2	65.0390	735	0.0240291
1997/08/08	ERS-2	1998/08/28	ERS-2	-102.447	385	0.0186608
1997/08/08	ERS-2	1997/10/17	ERS-2	-86.4713	70	0.0140892
1997/08/08	ERS-2	1997/12/26	ERS-2	73.8482	140	0.0179282
1997/08/08	ERS-2	1997/09/12	ERS-2	-164.286	35	0.0161205
1997/09/12	ERS-2	1998/08/28	ERS-2	80.3264	350	0.00254030
1997/09/12	ERS-2	1997/12/26	ERS-2	205.013	105	0.00180776

1997/09/12	ERS-2	1999/11/26	ERS-2	194.217	805	0.0465077
1997/09/12	ERS-2	1997/11/21	ERS-2	-179.887	70	0.00761938
1997/09/12	ERS-2	1997/10/17	ERS-2	97.5867	35	0.0302097
1997/10/17	ERS-2	1997/11/21	ERS-2	-264.639	35	0.0225903
1997/10/17	ERS-2	2000/05/19	ERS-2	-223.880	945	0.156225
1997/10/17	ERS-2	2000/03/10	ERS-2	240.465	875	0.154987
1997/10/17	ERS-2	1998/08/28	ERS-2	-18.4358	315	0.0327500
1997/10/17	ERS-2	1997/12/26	ERS-2	108.293	70	0.0320174
1997/11/21	ERS-2	1999/12/31	ERS-2	-106.039	770	0.0313663
1997/11/21	ERS-2	1998/05/15	ERS-2	-206.448	175	0.0263349
1997/11/21	ERS-2	1998/08/28	ERS-2	246.463	280	0.0101597
1997/12/26	ERS-2	1998/08/28	ERS-2	-125.456	245	0.000732541
1997/12/26	ERS-2	1999/11/26	ERS-2	69.3419	700	0.0447000
1998/04/10	ERS-2	2000/03/10	ERS-2	-233.760	700	0.196479
1998/04/10	ERS-2	2000/02/04	ERS-2	88.4978	665	0.00364143
1998/04/10	ERS-2	1999/03/26	ERS-2	216.062	350	0.0332786
1998/04/10	ERS-2	1999/04/30	ERS-2	-63.6826	385	0.00845854
1998/04/10	ERS-2	1998/07/24	ERS-2	-45.7807	105	0.00399229
1998/05/15	ERS-2	1999/12/31	ERS-2	145.432	595	0.00503143
1998/05/15	ERS-2	1998/06/19	ERS-2	-64.0518	35	0.0291540
1998/05/15	ERS-2	1998/10/02	ERS-2	-112.258	140	0.0148948
1998/06/19	ERS-2	1999/12/31	ERS-2	203.897	560	0.0241226
1998/06/19	ERS-2	1999/06/04	ERS-2	-95.3600	350	0.0427723
1998/06/19	ERS-2	1998/10/02	ERS-2	-61.4028	105	0.0142592
1998/07/24	ERS-2	1999/03/26	ERS-2	221.577	245	0.0372709
1998/07/24	ERS-2	1999/04/30	ERS-2	-62.6572	280	0.0124508
1998/07/24	ERS-2	1999/07/09	ERS-2	-55.6975	350	0.0244494
1998/07/24	ERS-2	2000/02/04	ERS-2	63.8391	560	0.00763372
1998/08/28	ERS-2	1999/11/26	ERS-2	130.959	455	0.0439674
1998/10/02	ERS-2	1999/06/04	ERS-2	-53.7177	245	0.0285131
1998/10/02	ERS-2	1999/12/31	ERS-2	229.032	455	0.00986340
1999/03/26	ERS-2	2000/02/04	ERS-2	-169.225	315	0.0296372
1999/03/26	ERS-2	1999/07/09	ERS-2	-230.217	105	0.0128215
1999/04/30	ERS-2	2000/02/04	ERS-2	128.631	280	0.00481711
1999/04/30	ERS-2	1999/07/09	ERS-2	54.3917	70	0.0119986
1999/06/04	ERS-2	1999/12/31	ERS-2	283.236	210	0.0186497
1999/06/04	ERS-2	2000/12/15	ERS-2	293.800	560	0.0702866
1999/07/09	ERS-2	2000/02/04	ERS-2	107.911	210	0.0168157
1999/12/31	ERS-2	2000/12/15	ERS-2	15.1841	350	0.0889363
2000/05/19	ERS-2	2000/12/15	ERS-2	-163.570	210	0.121246
2000/05/19	ERS-2	2000/09/01	ERS-2	-186.260	105	0.0677052
2003/05/09	ENVI	2005/11/04	ENVI	170.483	910	0.0320333
2003/05/09	ENVI	2005/07/22	ENVI	159.479	805	0.0508830
2003/05/09	ENVI	2005/08/26	ENVI	146.446	840	0.0466431
2003/09/26	ENVI	2004/12/24	ENVI	-153.406	455	0.0703140
2003/09/26	ENVI	2005/01/28	ENVI	-58.6115	490	0.0728443
2003/09/26	ENVI	2005/09/30	ENVI	144.024	735	0.0704918
2003/09/26	ENVI	2004/08/06	ENVI	-156.272	315	0.0533538
2004/05/28	ENVI	2005/07/22	ENVI	-176.463	420	0.00303651
2004/05/28	ENVI	2005/08/26	ENVI	-193.013	455	0.00120334
2004/05/28	ENVI	2004/10/15	ENVI	30.1555	140	0.0163472
2004/05/28	ENVI	2005/05/13	ENVI	-69.9496	350	0.00638403
2004/08/06	ENVI	2004/12/24	ENVI	6.94918	140	0.0169602
2004/08/06	ENVI	2005/01/28	ENVI	128.904	175	0.0194905
2004/08/06	ENVI	2005/09/30	ENVI	292.012	420	0.0171380
2004/10/15	ENVI	2006/03/24	ENVI	103.348	525	0.0138997
2004/10/15	ENVI	2005/11/04	ENVI	-174.975	385	0.000534013
2004/10/15	ENVI	2005/08/26	ENVI	-206.839	315	0.0151439

2004/10/15	ENVI	2005/07/22	ENVI	-186.707	280	0.0193837
2004/10/15	ENVI	2005/05/13	ENVI	-82.4114	210	0.0227313
2004/12/24	ENVI	2007/06/22	ENVI	29.6868	910	0.00451991
2004/12/24	ENVI	2005/01/28	ENVI	130.222	35	0.00253029
2005/01/28	ENVI	2005/09/30	ENVI	165.376	245	0.00235249
2005/01/28	ENVI	2007/06/22	ENVI	-98.9181	875	0.00705020
2005/01/28	ENVI	2006/11/24	ENVI	109.756	665	0.00983538
2005/05/13	ENVI	2006/03/24	ENVI	138.201	315	0.0366310
2005/05/13	ENVI	2005/11/04	ENVI	-97.7752	175	0.0221972
2005/05/13	ENVI	2005/07/22	ENVI	-106.245	70	0.00334752
2005/05/13	ENVI	2006/12/29	ENVI	48.0667	595	0.0318141
2005/05/13	ENVI	2005/08/26	ENVI	-123.369	105	0.00758737
2005/05/13	ENVI	2007/03/09	ENVI	37.2898	665	0.0311317
2005/07/22	ENVI	2006/07/07	ENVI	-198.952	350	0.0163809
2005/07/22	ENVI	2005/11/04	ENVI	19.5516	105	0.0188497
2005/07/22	ENVI	2007/03/09	ENVI	139.418	595	0.0277841
2005/07/22	ENVI	2006/12/29	ENVI	150.687	525	0.0284666
2005/07/22	ENVI	2005/08/26	ENVI	-26.7594	35	0.00423986
2005/08/26	ENVI	2005/11/04	ENVI	50.3385	70	0.0146099
2005/08/26	ENVI	2006/07/07	ENVI	-193.006	315	0.0121410
2005/08/26	ENVI	2007/03/09	ENVI	152.757	560	0.0235443
2005/09/30	ENVI	2007/12/14	ENVI	65.5754	805	0.0104900
2005/09/30	ENVI	2006/11/24	ENVI	-69.0124	420	0.0121879
2005/11/04	ENVI	2006/12/29	ENVI	144.214	420	0.00961687
2005/11/04	ENVI	2006/07/07	ENVI	-205.667	245	0.00246887
2005/11/04	ENVI	2007/03/09	ENVI	132.934	490	0.00893441
2005/11/04	ENVI	2006/03/24	ENVI	233.268	140	0.0144337
2006/03/24	ENVI	2006/12/29	ENVI	-90.1355	280	0.00481686
2006/03/24	ENVI	2007/03/09	ENVI	-101.134	350	0.00549932
2006/11/24	ENVI	2007/12/14	ENVI	130.820	385	0.00169782
2006/11/24	ENVI	2007/06/22	ENVI	-199.199	210	0.0168856
2006/12/29	ENVI	2007/03/09	ENVI	-11.3131	70	0.000682458

Taula B-1 Llista dels interforogrames generats. Les dates estan indicades en format any/mes/dia

FITXERS DE PARÀMETRES UTILITZATS

PRISAR

registration.par

```

NUM_IMG          50
LIN_PISO         4096
MOS_PISO         1024
L0_PISO          2500
M0_PISO          2100
L0_OUT           8245
M0_OUT           3000
MAX_OFF_LIN      2000
MAX_OFF_MOS      1000
FLAG_XCORR_AUTO  0
FLAG_GRAB_GROS   1
FLAG_GRAB_XCORR  0
LIMIT_RAM        2000
LIN_INTERF       4400

```

MOS_INTERF	1000
INDEX_INTERP_AMPL_V	1
INDEX_INTERP_AMPL_H	1
INDEX_INTERP_FINE	16
F_FINE_REG_MANUAL	0
VER_POINTS_FINE_REG_AUTO	10
HOR_POINTS_FINE_REG_AUTO	5
SAMPLES_SINC	6
SIZE_BLOCK_OFFSET	128
MAX_ERROR_OFFSET	20
B_SIZE_X	256
B_SIZE_Y	256
BLOC_SIZE_AZ	512
BLOC_SIZE_RG	128

geo.par

GEO_SEMIAXIS_A	6378137
GEO_SEMIAXIS_B	6356752.31425
IGEO_SEMIAXIS_A	6378137
IGEO_SEMIAXIS_B	6356752.31425

ORBIT_REFINEMENT	1
------------------	---

ALIN_FDC	1
PRECISION	50

MAX_HEIGHT	500
DEM_HEI	200

DELTA_UTM_X	10
DELTA_UTM_Y	10

LOC_DEM	/home/sar-db2/dades/Dades_ERS/Bages_desc/DEM/bages_wgs84_10m.dat
DEM_LIN	2848
DEM_SAM	2643
Y_NORTH	4643433.5
Y_SOUTH	4614983.5
X_EAST	411993.53
X_WEST	385593.53
DELTA	10

NUM_SINT_PC	10
-------------	----

PC_SINT_0_LONGITUDE	1.790380
PC_SINT_0_LATITUDE	41.734104
PC_SINT_0_LINE	3520
PC_SINT_0_SAMPLE	448
PC_SINT_0_HEIGHT	370.783539
PC_SINT_1_LONGITUDE	1.845105

PC_SINT_1_LATITUDE	41.716137
PC_SINT_1_LINE	3776
PC_SINT_1_SAMPLE	192
PC_SINT_1_HEIGHT	376.423126
PC_SINT_2_LONGITUDE	1.819741
PC_SINT_2_LATITUDE	41.724813
PC_SINT_2_LINE	3648
PC_SINT_2_SAMPLE	320
PC_SINT_2_HEIGHT	292.806030
PC_SINT_3_LONGITUDE	1.846099
PC_SINT_3_LATITUDE	41.720664
PC_SINT_3_LINE	3648
PC_SINT_3_SAMPLE	192
PC_SINT_3_HEIGHT	387.525391
PC_SINT_4_LONGITUDE	1.879382
PC_SINT_4_LATITUDE	41.832499
PC_SINT_4_LINE	448
PC_SINT_4_SAMPLE	192
PC_SINT_4_HEIGHT	341.953064
PC_SINT_5_LONGITUDE	1.843392
PC_SINT_5_LATITUDE	41.711723
PC_SINT_5_LINE	3904
PC_SINT_5_SAMPLE	192
PC_SINT_5_HEIGHT	392.975952
PC_SINT_6_LONGITUDE	1.857784
PC_SINT_6_LATITUDE	41.756289
PC_SINT_6_LINE	2624
PC_SINT_6_SAMPLE	192
PC_SINT_6_HEIGHT	332.904785
PC_SINT_7_LONGITUDE	1.759763
PC_SINT_7_LATITUDE	41.841879
PC_SINT_7_LINE	704
PC_SINT_7_SAMPLE	704
PC_SINT_7_HEIGHT	447.943756
PC_SINT_8_LONGITUDE	1.904755
PC_SINT_8_LATITUDE	41.823820
PC_SINT_8_LINE	576
PC_SINT_8_SAMPLE	64
PC_SINT_8_HEIGHT	433.153717
PC_SINT_9_LONGITUDE	1.862848
PC_SINT_9_LATITUDE	41.778904
PC_SINT_9_LINE	1984
PC_SINT_9_SAMPLE	192
PC_SINT_9_HEIGHT	384.880005

images.par

NUM_IMG	50
MASTER_MASTER	19980828.ers2
19950804.ers2	
19951013.ers2	
19960823.ers2	
19961101.ers2	
19961206.ers2	
19970425.ers2	
19970530.ers2	
19970704.ers2	
19970808.ers2	
19970912.ers2	
19971017.ers2	
19971121.ers2	
19971226.ers2	
19980410.ers2	
19980515.ers2	
19980619.ers2	
19980724.ers2	
19980828.ers2	
19981002.ers2	
19990326.ers2	
19990430.ers2	
19990604.ers2	
19990709.ers2	
19990813.ers2	
19991126.ers2	
19991231.ers2	
20000204.ers2	
20000310.ers2	
20000519.ers2	
20000901.ers2	
20001215.ers2	
20030509.envi	
20030926.envi	
20040528.envi	
20040806.envi	
20041015.envi	
20041224.envi	
20050128.envi	
20050513.envi	
20050722.envi	
20050826.envi	
20050930.envi	
20051104.envi	
20060324.envi	
20060707.envi	
20061124.envi	

20061229.envi
20070309.envi
20070622.envi
20071214.envi

SUBSOFT

subparam.par

Images dimensions (pixels)

SAMPLES	1000
LINES	4400
ORIGINAL_SAMPLES	1000
ORIGINAL_LINES	4400
INI_SAMPLE	0
INI_LINE	0
DIEZMADO_RG	10
DIEZMADO_AZ	10
FACTOR_INTERP_RANGE	1.0
M_LOOK_SAMPLES	3
M_LOOK_LINES	15

Pixel's size (metres)

PIXEL_SIZE_SAMPLE	60
PIXEL_SIZE_LINE	60

Selection of PS by means of coherence

LEVELS	3
THRESHOLD_1	0.4
THRESHOLD_2	0.3
THRESHOLD_3	0.25
PERCENT	45
MIN_THRESHOLD	0.000001

Thershold for model coherence refinement

THRESHOLD_COHER	0.000001
-----------------	----------

Maximum distance allowed between neighboring pixels (meters)

MAXIMUM_DISTANCE	2000
------------------	------

Common minimization parametres

VMIN	-2e-2
VMAX	2e-2
DEMMIN	-30.
DEMMAX	30.
AMIN	-4.
AMAX	4.

Particular parameters cgm method

FTOL	1.0e-7
INC_V_CGM	0.05e-2
INC_DEM_CGM	2
INC_A_CGM	0.1

Control point(s) for velocity integration (v = 0 cm/year)

NSEED	4
SAMPLE_1	292
LINE_1	3530
SAMPLE_2	540
LINE_2	2245
SAMPLE_3	736
LINE_3	1070
SAMPLE_4	111
LINE_4	580

Control point(s) for DEM error integration (error=0 m)

SAMPLE_DEM	292
LINE_DEM	3530

Masking parametres

XWINDOW	1
YWINDOW	1
NPSC	1

Maximum unwrapping velocity error

MAX_UNW_ERROR	0.007
---------------	-------

Triangular filter parameters

DELTA_T_FILT_DEF 0.5

TEMP_MARGIN_DEF 2.

MIN_SAMPLES_DEF 3

Zoom for visualization of results

ZOOM_VISUAL 2

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

[Bará '96]

M. Bará. "Processador multilook d'imatges SAR". Projecte Final de Carrera. UPC-ETSETB, 1996.

[Carrasco '98]

D. Carrasco. "Interferometry for Digital Elevation Model Generation and Differential applications". Tesi Doctoral. UPC. Barcelona, 1998.

[Curlander '91]

J.C. Curlander, R. N. McDonough. "Synthetic Aperture Radar". John Wiley & Sons, 1991.

[Delaunay '34]

B. Delaunay. "Sur la sphere vide". Bulletin of Academy of Sciences of the USSR, pp. 793-800, 1934.

[Elachi '88]

C. Elachi. "Spaceborne Radar Remote Sensing Applications and Techniques". New York Institute of Electrical and Electronics, 1988.

[Ferreti '00]

A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca. "Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in SAR interferometry". IEEE Trans. On Geosc. And Remote Sensing, vol. 38, no. 5, pp. 2202-2212, September 2000.

[Ferretti '01]

A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca. "Permanent scatterers in SAR interferometry" IEEE Trans. On Geosc. And Remote Sensing, vol. 39, no. 1, pp. 8-20, January 2001.

[Hanssen '98]

R. Hanssen: "Atmospheric heterogeneities in ERS Tandem SAR Interferometry". Delft, The Netherlands: Delft Univ. Press, 1998.

[Hanssen '01]

R. Hanssen: "Radar Interferometry". Kluwer Academic Publishers. Delft, The Netherlands, 2001.

[Mora '04]

O. Mora. "Advanced Differential Interferometric SAR techniques for detection of terrain and building displacements". Tesi Doctoral. UPC. Barcelona, 2004.

[Prati '94]

C. Prati, F. Rocca, A. Monti Guarnieri, P. Pasquali. "Final report on ERS-1 SAR interferometric techniques and applications". ESA Study Contract Reporte. June 1994.

[Schreier'93]

G. Schreier. "SAR Geocoding: Data and Systems". Wichmann, 1993.

[Torrents '93]

S. Torrents. "Altimetría interferométrica con satélite radar de apertura sintética (SAR)". Projecte Final de Carrera. UPC-ETSETB, 1993.

[Usai '02]

S. Usai: "A Least-Squares Approach for Long-Term Monitoring of Deformations with Differential SAR Interferometry", Proc. IGARSS 2002, Vol. 2, pp. 1247-1250, Toronto (Canada), June 2002.

