Rilievo con sensore Radar Interferometrico a scansione laterale (IFSAR) sul territorio della Regione Piemonte

Hugh MacKay(*), Mauro Mason(**), Carlo Perugi (***), Sébastien Saur (****)

(*) Intermap Technologies GmbH, Munich, Germany, **hmackay@intermap.com** **www.intermap.com**
(**) Air Data S.r.l., Padova, Italia info@airdata-it.com www.airdata-it.com
(***) Istituto Geografico Militare Italiano, Firenze, Italia dir2prod@geomil.esercito.difesa.it, www.igmi.org
(****) Institut Geographique National, Paris, France, **sebastien.saur@ign.fr**, **www.ign.fr**

Abstract

Intermap Technologies GmbH di Monaco e Air Data S.r.l. di Padova hanno recentemente completato il rilievo di 5.600 chilometri quadrati di territorio della Regione Piemonte, con la tecnica del Radar Interferometrico a Scansione Laterale aviotrasportato (IFSAR). Il progetto, parzialmente sponsorizzato dall'Istituto Geografico Militare Italiano, è risultato essere il più accurato ed omogeneo rilievo tridimensionale del territorio alpino e della prima pianura alluvionale del fiume Pò finora realizzato.

Il rilievo IFSAR ha generato due set di dati: un modello digitale di elevazione (DEM) e un'immagine radar ortorettificata (ORI). I dati saranno ora utilizzati per una vasta gamma di applicazioni, dalla modellazione degli eventi alluvionali, all'analisi della stabilità dei versanti, alla modellazione tridimensionale di corridoi stradali e ferroviari, alla visualizzazione tridimensionale del territorio, oppure all'analisi della propagazione dei campi elettromagnetici per la trasmissione voce e dati. Questa presentazione intende illustrare in dettaglio le fasi di acquisizione ed elaborazione dei dati, nonché le loro applicazioni in particolare dei modelli digitali di elevazione. I rigorosi collaudi e le verifiche condotte dall'Istituto Geografico Militare hanno confermato come le precisioni planimetriche ed altimetriche del rilievo siano risultate migliori di quelle dichiarate nelle specifiche di progetto. Tali risultati saranno presentati in dettaglio alla conferenza ASITA, assieme alle valutazioni dell' IGN, Institut Geographique National di Parigi.

Il progetto Piemonte costituisce la copertura iniziale del programma NEXTMap Italia, volto al rilievo dell'intero territorio nazionale, a sua volta inserito nel più vasto programma NEXTMap Europe, che prevede il completamento del rilievo omogeneo e ad alta risoluzione dell'intera Europa occidentale, entro la fine del 2008.

Le ragioni del progetto

Alla fine del 2005 l'Istituto Geografico Militare Italiano (IGMI) ha coinvolto le società Intermap Technologies e Air Data S.r.l. nella realizzazione di un rilievo IFSAR multifunzionale, a copertura di un'area di circa 5.600 km^2 nell'Italia nord occidentale. Il progetto è servito quale prototipo e banco di prova di un'iniziativa molto più importante quale la realizzazione di un modello digitale del terreno omogeneo e ad alta definizione

dell'intero territorio nazionale. Scopo di IGMI era infatti anche quello di valutare l'interferometria radar da aereo IFSAR (InterFerometric Synthetic Aperture Radar) quale potenziale soluzione alle sfide tecnologiche legate alla realizzazione di un modello digitale del terreno (DTM) polifunzionale ed allargato a tutto il territorio nazionale. Due importanti requisiti di tale programma erano identificati nella velocità di esecuzione e nell'economicità.

L'area di studio comprende le località scelte per ospitare i Giochi Olimpici Invernali "Torino 2006". Il rilievo IFSAR, reso disponibile assieme ad altri dati su base geografica, quale supporto alla logistica e alla security dell'evento olimpico, include anche una porzione dell'alta pianura alluvionale nel bacino del fiume Po, area storicamente esposta al rischio alluvionale.
L'area di progetto include pertanto territori alpini ad orografia estremamente accentuata, aree pianeggianti con totale assenza di rilievo ed aree di transizione tra questi due ambienti estremi, caratterizzate però anche da profonde incisioni vallive. La tipologia di copertura del suolo va quindi dai ghiacciai, a ripidi ed articolati affioramenti rocciosi, alle brulle aree erbose oltre il limite della vegetazione, alle foreste di conifere e cedui, finoalle aree collinose coltivate, a comprendere anche centri urbanizzati e la stessa città di Torino.Il progetto costituisce pertanto un test esaustivo delle potenzialità offerte dalla tecnologia IFSAR. I dati IFSAR sono stati oggetto di collaudi e studi di validazione condotti sulla base dei dati cartografici esistenti, di sistematiche comparazioni con la tecnica fotogrammetrica classica e di fitte campagne di misure GPS, da parte di IGMI e dell'autorità cartografica francese IGN. Questa relazione riassume i risultati di tali studi.

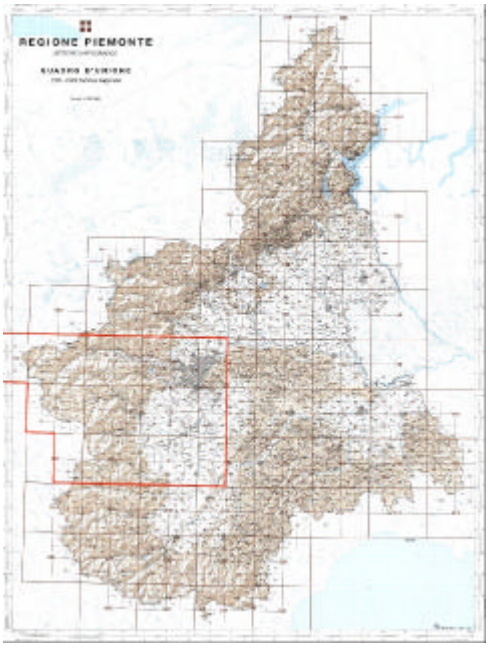


Figura 1. Area di progetto Reg. Piemonte

Pianificazione ed esecuzione del progetto

Intermap ha eseguito l'acquisizione dei dati IFSAR nel Novembre 2005 utilizzando il sistema Radar STAR-4, alloggiato su un aeromobile tipo King Air B200. Il sistema è composto da un Radar in banda X che lavora alla frequenza di 135 Mhz con polarizzazione HH nelle 4 direzioni di presa/emissione. Il volo è stato eseguito ad una quota nominale di 22.000 piedi sul livello del mare, con una separazione massima tra strisciate parallele di 5.6 km. Sono state inoltre volate strisciate ortogonali in corrispondenza dei rilievi per colmare le ombre generate dall'orografia e contrastare i fenomeni di de-correlazione generati dalla geometria di emissione "laterale" del sistema.

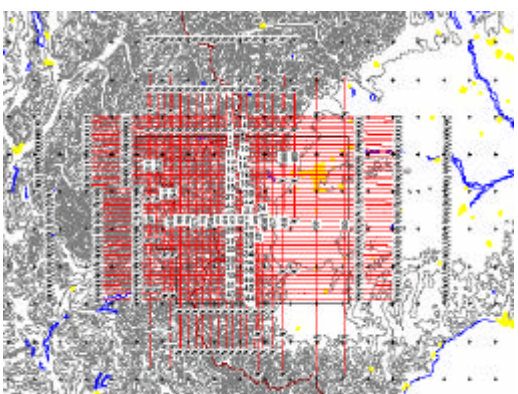


Figura 2. La piattaforma STAR-4 King

Figura 3. Progetto di volo

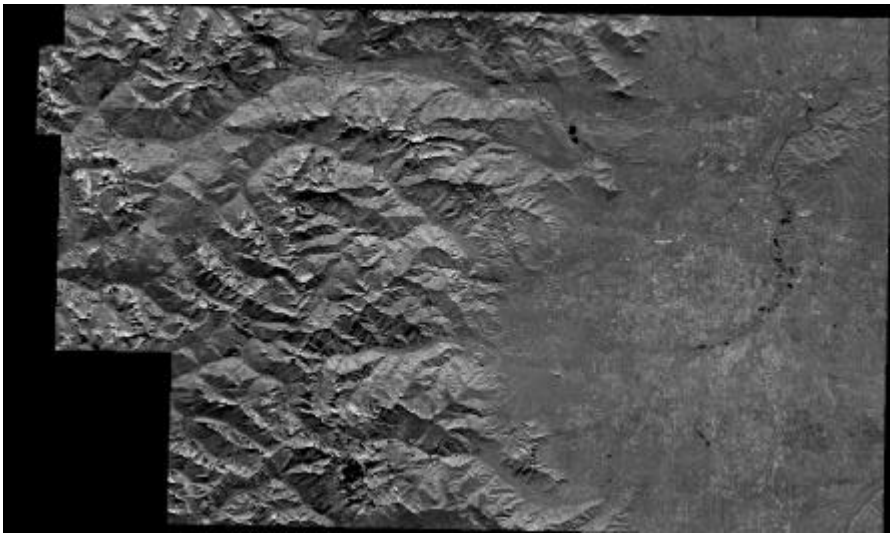
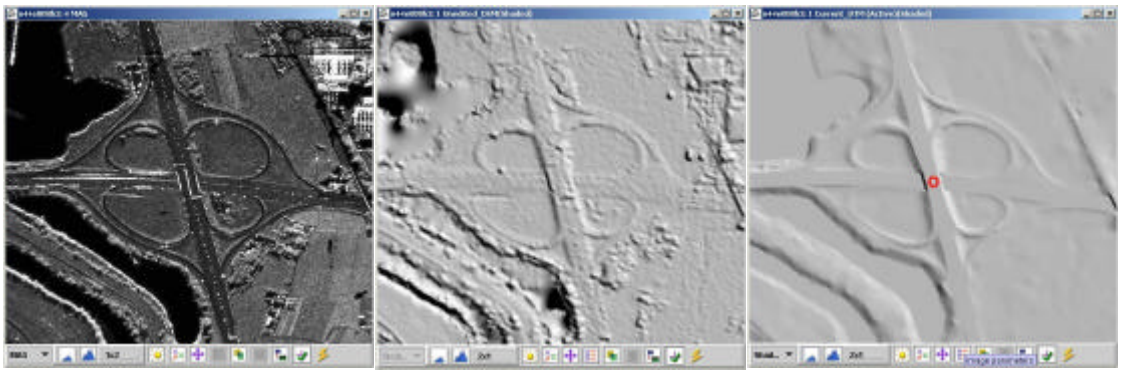


Figura 4. Mosaico Radar ortorettificato dell'area di progetto.

Obiettivo del progetto era la produzione di un'immagine radar ortorettificata (ORI) con risoluzione di 1.25m e di un modello digitale della prima superfice (DSM) con griglia di 5m sul terreno. Entrambi i prodotti garantiscono tra le specifiche tecniche una precisione planimetrica di 2m RMS, mentre il DSM è dimensionato per ottenere una precisione verticale di 1m RMS. E' stata inoltre prevista la redazione di un modello digitale del terreno (DTM), derivato dal DSM attraverso la rimozione da quest'ultimo della vegetazione e delle opere antropiche.



Number of VCP's	24
Mean	-0.31
Max +	0.61
Max -	-1.76
Std dev	0.50
RMSE	0.58
95 Percentile	1.01
Blunder (3x Std dev)	1.51

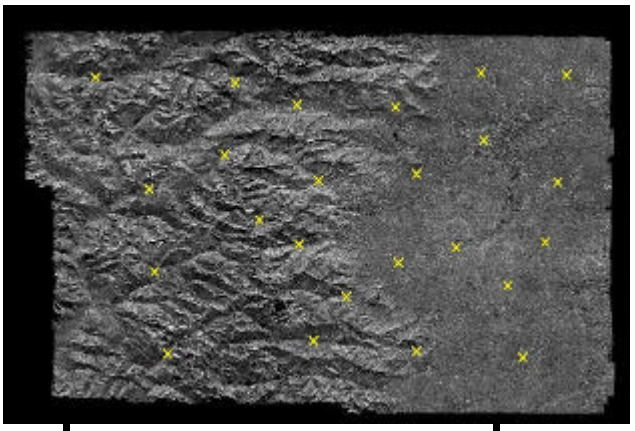
Figura 5. Immagine Radar, DSM non editato, e DTM editato.

Il 6 dato radar è stato georeferito con l'ausilio di punti di controllo a terra, materializzati nell'immagine radar dalla presenza di altrettanti riflettori radar. Tre stazioni GPS in trasmissione continua hanno generato la base di elaborazione dei dati GPS differenziali che descrivono la posizione nello spazio dell'aeromobile durante la fase di acquisizione.
I dati sono stati proiettati nel sistema di coordinate UTM Fuso 32, computate sul geoide IGM95, versione ETRS89. Le quote ortometriche sono invece riferite al geoide ITALGEO95 e, nonostante la vicinanza della consistente massa delle Alpi, non sono state riscontrate anomalie gravimetriche significative nella loro misurazione.

Verifica preliminare

Quale controllo preliminare dell'accuratezza dei dati sono stati selezionati, all'interno dell'area, 24 punti di controllo, chiaramente identificabili nell'immagine radar. I punti sono scelti in modo che la loro distribuzione comprenda le diverse tipologie di terreno e di copertura del suolo e che, allo stesso tempo, risultino distribuiti a quote diverse. La comparazione delle misure altimetriche eseguite in loco con i rispettivi valori estratti dal modello, è riassunta nella tabella 1.

Figura 6. Localizzazione dei punti di controllo



95 Percentile	0.80
Blunder (3x Std dev)	1.22

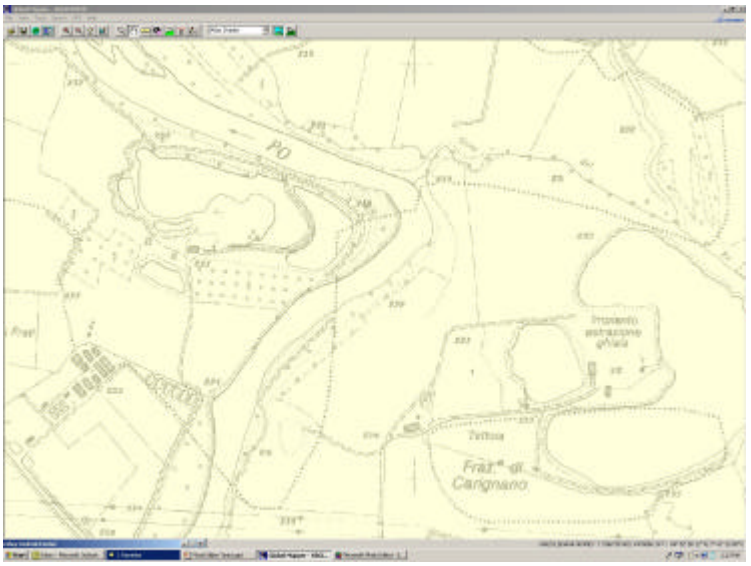
All Check Points **One Blunder Removed**

Tavola 1. Verifica preliminare delle precisioni verticali

Ogni punto di controllo è scelto in funzione alla sua identificabilità radar, in modo da facilitarne la misura sia sul piano orizzontale che su quello verticale. Le coordinate planimetriche sono verificate attraverso il confronto delle coordinate interne al modello radar con quelle desunte dalla descrizione dei punti di controllo. Non si è proceduto

infine ad una rigorosa analisi quantitativa, dal momento che tutti i punti misurati sembrano discostarsi di un valore massimo inferiore alla dimensione fisica di 1/2 pixels e quindi inferiore al valore di 2,5m.
Ulteriori test sono stati condotti confrontando i dati radar con la cartografia vettoriale in scala 1:10.000 della Regione Piemonte. La comparazione ha evidenziato con chiarezza la qualità intrinseca del dato vettoriale, ma ha anche messo in luce evidenti modifiche del tessuto territoriale intervenute nell'intervallo temporale tra i due rilievi.

Figura 7. Sovrapposizione dell'immagine ORI alla cartografia 1:10.000 del Piemonte



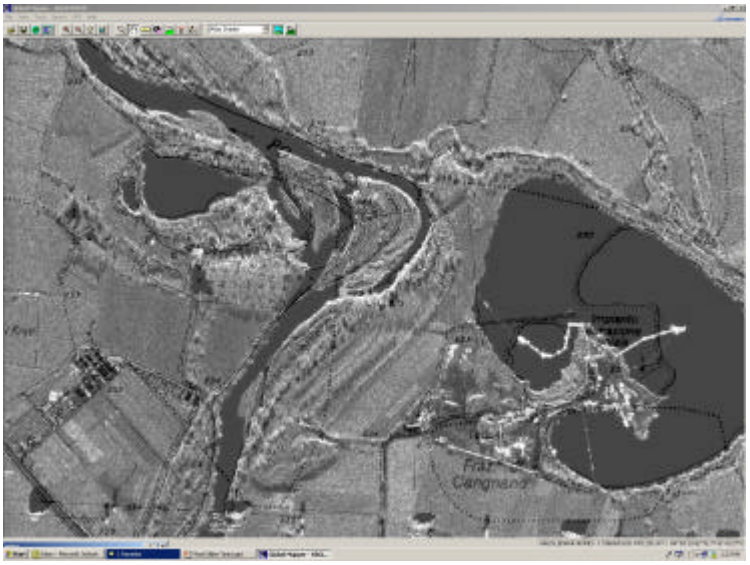


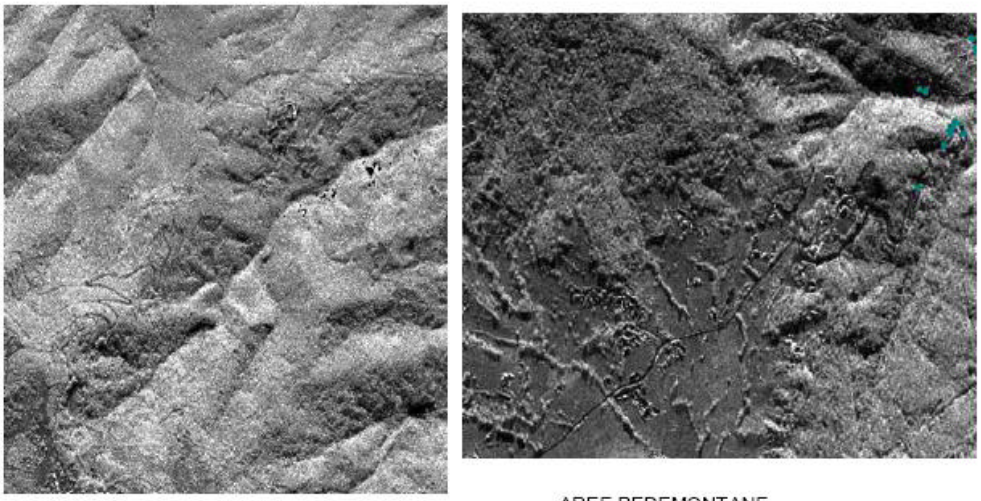
Figura 8. Cartografia 1:10,000 a confronto con l'attuale dato IFSAR

I risultati di questa comparazione dimostrano chiaramente che il rilievo IFSAR può essere usato per l'aggiornamento della carta tecnica regionale 1:10,000. L'immagine radar con risoluzione di 1,25m, utilizzata all'interno di una stazione fotogrammetrica digitale, consente una facile interpretazione degli oggetti e l'estrazione dei corrispondenti vettori.

Validazione dell'Istituto Geografico Militare Italiano

Nei primi mesi del 2006, dopo la presa in consegna dei dati, l'Istituto Geografico Militare ha eseguito un collaudo estensivo sui modelli di elevazione e le immagini radar. Le prime verifiche del dato sono state condotte generando modelli digitali del terreno da una restituzione fotogrammetrica classica, eseguita sui fotogrammi di un volo alla scala 1:22.000 messo a disposizione dall'Ufficio Cartografico della Regione Piemonte, attraverso la correlazione d'immagine. Le misure desunte dalla restituzione fotogrammetrica era previsto si attestassero su valori di accuratezza di circa 1,2m. RMS su aree aperte. I DTM generati dal rilievo IFSAR e quelli estratti con metodo fotogrammetrico si sovrapponevano con ottima precisione e pertanto I tecnici di IGM sono passati ad una verifica più rigorosa.

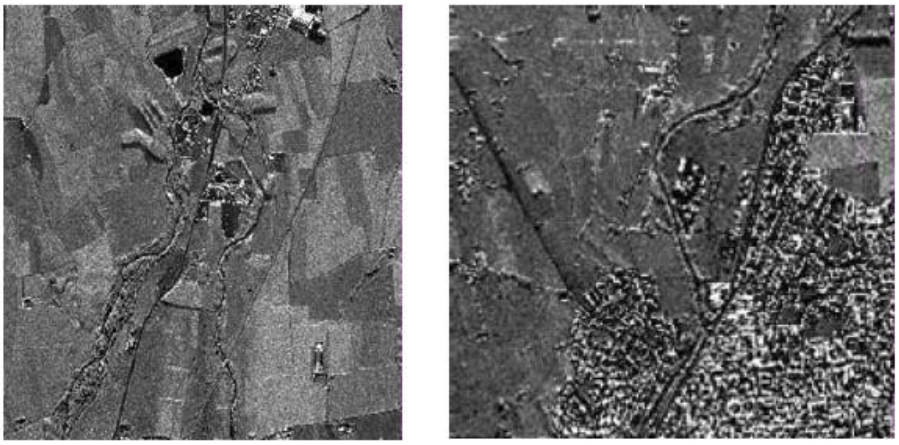
Sono stati quindi rilevati più di 5.000 punti con GPS in modalità cinematica. I punti rilevati si trovano lungo la viabilità primaria e secondaria su un'area di circa 1000 km^2. Il 20% dei punti è localizzato in aree montane forestate in the forested, mentre l' 80% in aree urbane o prive di vegetazione.



AREE MONTUOSE CON BOSCO

AREE PEDEMONTANE

Figura 9. Aree di test in zone montane o collinari.



AREE DI PIANURA SCOPERTE

AREE URBANE

Figura 10. Aree di test in zone pianeggianti ed urbanizzate.

Si è verificata così un'accuratezza planimetrica di circa 1.25m RMS, basata sulla comparazione dei punti GPS con gli assi stradali, come illustrato in Figura.

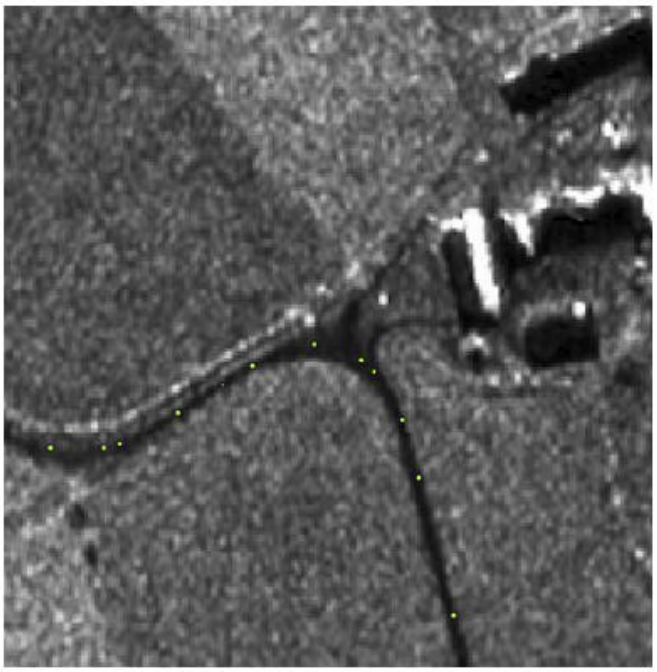


Figura 11. I punti GPS indicano che il veicolo ha viaggiato da sud a nord, per poi curvare a sinistra, occupando la parte destra della carreggiata.

La verifica dei valori di quota deriva dall'interpolazione del piano che attraversa i tre punti del DTM più vicini al punto GPS rilevato sul terreno.

L'80% dei punti di controllo sono stati acquisiti nella piana alluvionale del Po, su terreni caratterizzati da pendenze moderate, il restante 20% ricade invece in territorio tipicamente alpino. Le verifiche planimetriche hanno evidenziato che l'accuratezza del rilievo è risultata molto superiore alle specifiche tecniche dichiarate. Le verifiche sulle misure di quota indicano inoltre che il 90% dei punti misurati in terreni con pendenze moderate stanno si discostano di valori inferiori al metro dalla quota effettiva misurata sul terreno con modalità cinematica. In aree con orografia di tipo alpino il 94% dei punti stanno entro 3m dal valore delle quote misurate con modalità cinematica.

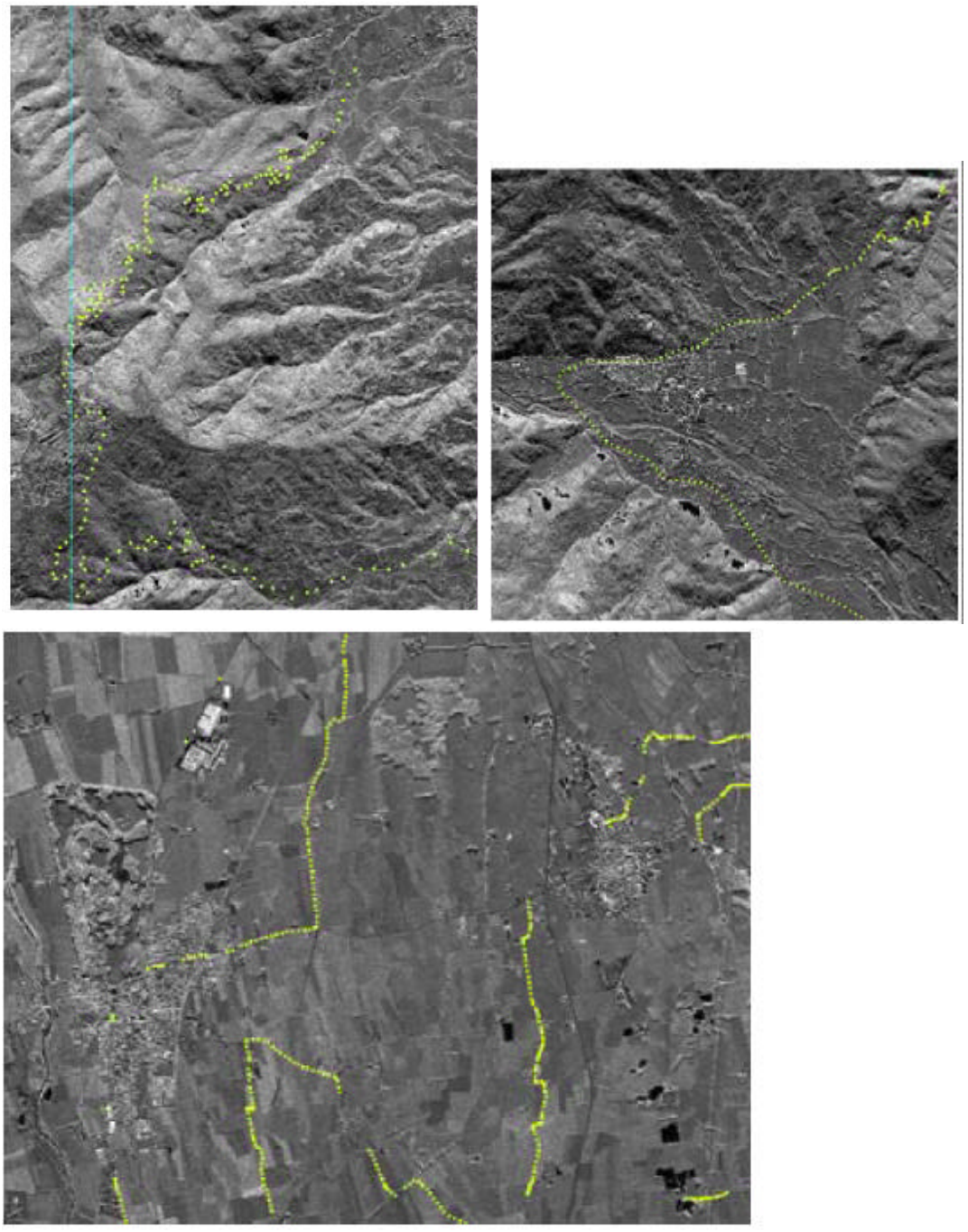


Figura 12. Tre esempi di punti GPS rilevati in modalità cinematica.

I risultati della comparazione dei punti quota estratti dal DTM con quelli rilevati con il GPS sono riassunti nella tabella seguente:

	Media (m)	Deviazione Standard (m)
Montagna forestata	-3.20	4.52
Terreni collinari	0.51	1.79
Piane alluv. senza vegetaz.	0.43	0.50
Terreni non veg./urbanizzati	0.99	1.78

Tavola 2. Valori medi e Deviazione Standard rispetto alle misure GPS in funzione di pendenza e copertura del suolo.

I collaudi e le verifiche dell'Istituto Geografico Militare Italiano hanno portato alle seguenti conclusioni:

- Notevole accuratezza planimetrica.
- Accuratezza altimetrica variabile a seconda del contesto, valutabile per il 90% dei punti intorno al metro.
- Accuratezza altimetrica attorno ai 50 cm. in zone pianeggianti o leggermente acclivi con poca copertura arborea.
- Sistematicità variabile, da alti valori con segno negativo in zone boscose e montuose a valori più bassi e di segno positivo man mano che ci si muove verso zone più pianeggianti.
- Gli andamenti dell' sqm e del valore della media nei vari contesti lasciano intendere una coerenza intrinseca (alta precisione) dei dati aventi un basso grado di dispersione (precisione minore del mezzo metro in zone pianeggianti e scoperte)
- Non vi sono notevoli differenze fra il DSM ed il DTM, fatto già noto a IGM, dovuto ad un limitato lavoro di editing nel passaggio dal DSM al DTM, affinabile attraverso più stretti protocolli di editing.

IGM ha quindi verificato che i modelli di elevazione IFSAR sono di notevole interesse, in particolar modo in terreni a moderata pendenza con scarsa vegetazione, quelli più esposti al rischio, dove avvengono i principali fenomeni di esondazione e subsidenza.

Validazione dell' Institut Geographique National (IGN)

Institut Geographique National (IGN) con sede a Parigi ha portato a termine una validazione dei modelli di elevazione IFSAR generati per estensione oltre il confine

italiano del rilievo sulla Regione Piemonte. IGN ha inizialmente utilizzato I dati derivati per autocorrelazione da un rilievo aerofotogrammetrico alla scala 1:25,000 dimensionato per ottenere una precisione planimetrica di 1.5 / 2.0m. In corrispondenza di versanti dalla pendenza regolare lo scostamento medio tra I valori dei 2 set di dati è risultato essere di 0.7m con un RMS di 1.3m e valori estremi pari a -6.0 and + 4.0m rispettivamente. Le due metodologie hanno portato alle stesse conclusioni in termini di precisione geometrica e di risoluzione del modello digitale.

Sulla base di questi risultati nella comparazione con la tecnica fortogrammetrica, IGN ha deciso di procedere ad una valutazione più rigorosa, basata su operazioni di livellazione sul campo, a partire da punti geodetici noti.

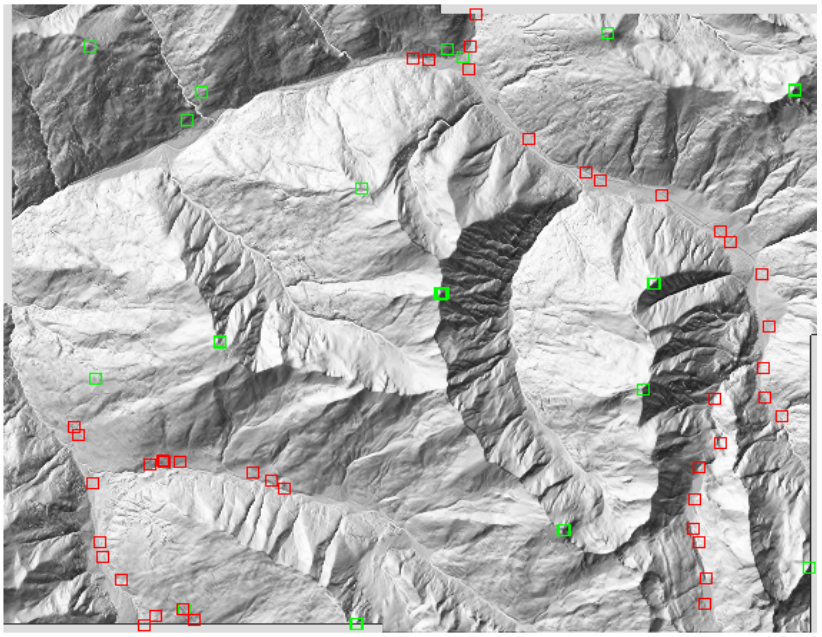


Figura 13. Vertici geodetici (in verde) e punti di livellazione (in rosso).

I risultati della comparazione del DTM con I punti di livellazione sono riassunti nella tavola seguente:

	Differenza media	Standard Deviation	Differenze Min/Max
Punti geodetici (13)	2.7m	3.2m	-3.8 / +9.4
Punti di livellaz. (33)	0.3m	2.4m	-5.5 / +5.1
Tutti i punti (46)	0.9	2.9	-5.5/ +9.4

Tavola 3. Media e deviazione standard del DTM rispetto ai punti di controllo.

Risulta evidente dalla loro disposizione che i punti geodetici non hanno la migliore collocazione per essere utilizzati quali punti di controllo, in quanto tendono a cadere lungo la sommità degli spartiacque, immediatamente adiacenti ad aree ad elevata pendenza.

IGN conclude quindi che, in aree caratterizzate da elevata orografia, il DTM IFSAR può essere considerato equivalente ad un DTM generato con tecnica fotogrammetrica da fotogrammi alla scala 1:25.000.

Valutazione di ARPA Piemonte

Anche l'Agenzia Regionale per la Prevenzione e l'Ambiente del Piemonte ed il Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche hanno condotto un test su alcune tavole del rilievo IFSAR relativa alla Bassa Val di Susa. La loro valutazione, focalizzata sul modello digitale del terreno, ha esaminato 4 aree di interesse:

- Accuratezza del DTM in relazione a quelli già disponibili
- Eventuali anomalie del dato intrinseche alla tecnologia utilizzata
- Compatibilità del dato con i sistemi informativi in uso nell'amministrazione
- Vantaggi rispetto agli altri dati disponibili nelle diverse aree di interesse.

L'Aagenzia regionale per l'Ambiente definisce il lavoro condotto non un vero e proprio collaudo, quanto un'utile serie di verifiche da approfondire negli applicativi specifici. Una valutazione complessiva conferma che il livello di accuratezza riscontrato nel modello IFSAR soddisfa pienamente le aree di applicazione e di ricerca di ARPA.

La valutazione conferma un'evidente accuratezza del dato planimetrico, chef a sì che ogni elemento morfologico coincida perfettamente con la loro descrizione vettoriale nella cartografia tecnica regionale.

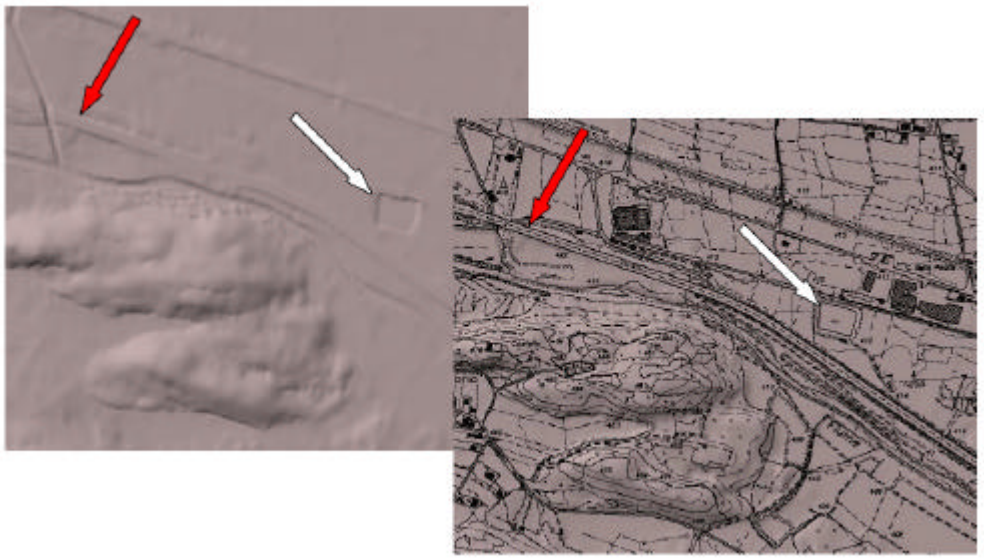


Figura 14. Evidente corrispondenza con la Carta Tecnica Regionale.

ARPA ha inoltre condotto un confronto delle misurazioni di quota dal DTM IFSAR con i vertici geodetici IGM, verificandone una consistente sovrapponibilità in corrispondenza di orografia non accentuata. Tale confronto non è stato fatto su terreni a pendenza elevata, non avendo avuto a disposizione dati comparativi.

Non sono state riscontrate anomalie macroscopiche nel DTM, pur evidenziando alcune depressioni del modello, di difficile interpretazione secondo un criterio morfologico, assieme ad alcune aree lungo i versanti che risultano più smussate e sfumate rispetto alle aree circostanti.

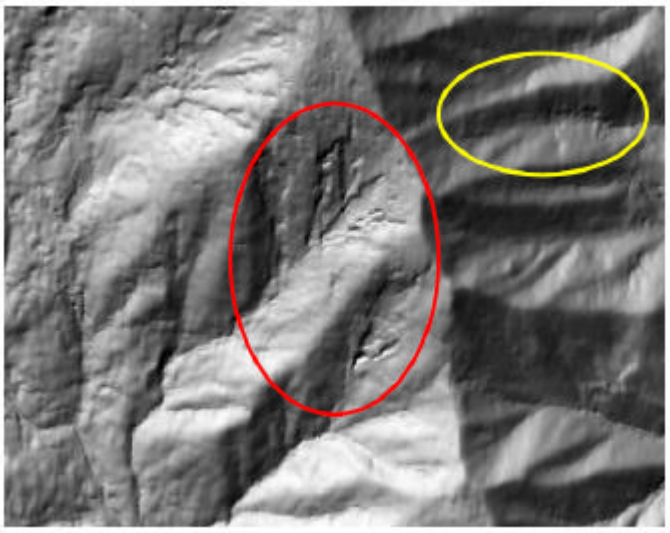


Figura 15. Depressioni e sfumature anomale

Tali osservazioni sono state utili per introdurre qualche modifica nelle routines utilizzate in fase di editing. Le anomalie sono infatti riconducibili al processo di riduzione dal DSM al DTM. La prima è un effetto residuale di una non completa rimozione della vegetazione dal DSM, mentre la seconda è il risultato di un eccessivo arrotondamento dovuto ad una locale interpolazione per la redazione del DTM. Anomalie come queste sono riconducibili al fatto che il processo di riduzione da DSM a DTM come anche il controllo di qualità del dato non possono essere eseguiti completamente da routines automatiche, ma dipendono, per una percentuale ridotta ma ancora significativa, dall'interpretazione dell'operatore, che naturalmente è fallibile.

I modelli IFSAR sono risultati infine completamente compatibili con i softwares GIS in uso ad ARPA. La compatibilità si estende alla georeferenziazione ed ai formati del dato.

In conclusione: "…poter disporre di un DTM di elevata precisione che copre ampie porzioni di territorio costituisce un indubbio vantaggio. I modelli altimetrici esaminati possiedono caratteristiche di precisione ed accuratezza che sicuramente rispondono in maniera più adeguata alle necessità relative ai progetti di ricerca dell'Agenzia, in quanto consentono di compiere elaborazioni su ampie zone di territorio, (cosa che con l'hardware attualmente disponibile sul mercato non è possibile fare con DTM più precisi, derivanti ad esempio da Laserscanner), senza dover penalizzare eccessivamente il fattore precisione".

Conclusioni

Lo scopo del Progetto Piemonte era quello di accreditare o meno la tecnologia IFSAR quale metodologia idonea a produrre un DTM omogeneo sull'intero territorio nazionale. Il progetto è stato infatti verificato e collaudato in ogni sua fase, data la volontà di IGM di valutarne non solo l'accuratezza, ma anche la congruità con molte applicazioni e tematismi su scala nazionale. Inoltre il costo associato alla tecnologia ed i tempi di esecuzione di una copertura nazionale sono stati parametri fondamentali di valutazione.

Da un punto di vista tecnico, i tre ambienti di più complessa modellazione sono quelli di alta montagna, della pianura alluvionale e quello degli agglomerati urbani. L'area di progetto comprende tutti gli scenari ricordati, sommati ad un'estrema varietà di coperture del suolo. Tali scenari sono infatti in grado di mettere in evidenza ogni eventuale criticità della tecnologia. La spiccata orografia dell'ambiente alpino ha richiesto infatti la pianificazione di strisciate ortogonali per garantire una copertura uniforme. Strisciate che sono dovute confluire in un singolo modello, internamente coerente. I bruschi cambi di quota dell'ambiente alpino hanno rappresentato un test estremamente importante dell'integrità del sistema di elaborazione del dato radar. Le geometrie di acquisizione hanno inoltre stressato gli algoritmi oltre il loro normale contesto di utilizzo. Il processo di elaborazione del dato si è dimostrato infine più complesso di quello applicabile a terreni con orografia più moderata.

Quest'area ha innescato anche criticità di tipo operativo, trovandosi al confine degli spazi aerei di tre diverse nazioni e necessitando di un coordinamento delle operazioni di volo piuttosto complesso.

IGM ha necessariamente affrontato il collaudo di un progetto di questo tipo come un esercizio scientifico, guardando alle specifiche tecniche e al dato stesso con un certo salutare scetticismo. In effetti il team di collaudo di IGM, pur impostando il proprio lavoro sulla ricerca dei punti deboli della tecnologia, è giunto a verificare che la precisione e la qualità del dato sono risultati essere migliori, non solo di quanto ci si potesse aspettare, ma anche delle specifiche tecniche inizialmente dichiarate. Si è inoltre constatato che progetto è stato inoltre ultimato nei tempi previsti e nei limiti di budget prefissati.
A conclusione del lavoro, IGM ha partecipato con Intermap ed Air Data alla presentazione dei risultati alla comunità scientifica e agli operatori italiani del settore delle geotecnologie. Il convegno si è tenuto a Roma presso la prestigiosa sede della Società Geografica Italiana.

Il progetto ha avuto infine una funzione trainante per NEXTMap Europe, il vasto ed importante programma di acquisizione iniziato da Intermap nel 2006, che condurrà alla realizzazione di un omogeneo modello di elevazione ad alta risoluzione dell'intera Europa occidentale entro la fine del 2008. Il progetto Piemonte ha infatti permesso di testare i sensori radar nei più complessi ambienti morfologici e di affrontare la complessità dei percorsi autorizzativi delle autorità europee per l'aviazione civile,

innescando allo stesso tempo l'interesse delle amministrazioni e delle aziende italiane per questa tecnologia.
L'obiettivo ultimo del programma NEXTMap Europe rimane comunque quello di mettere a disposizione degli utilizzatori finali del continente la possibilità di acquistare la licenza d'uso di modelli di elevazione del territorio europeo accurati e a basso costo.

La gamma delle possibili applicazioni è immensa. Alcune aree di pubblica utilità comprendono:

- Contenimento del rischio alluvionale e di esondazione dei corsi d'acqua.
- Valutazione e mitigazione dei processi di inquinamento atmosferico.
- Miglioramento di efficenza e sicurezza dei veicoli.
- Supporto e coordinamento alle operazioni di Protezione Civile.
- Studi sul cambiamento climatico
- Progettazione di sistemi eolici per la generazione di energia elettrica.
- Progettazione delle reti di trasporto.
- Modellazione di propagazione delle radiofrequenze.

Vi è inoltre un gran numero di altre applicazioni commerciali e scientifiche che potranno trarre vantaggio da un'accurata ed omogenea modellazione del territorio europeo. Tali applicazioni agiscono alla fine quali "motori economici" per lo sviluppo delle geotecnologie in Europa. NEXTMap Europe costituirà inoltre un data base cartografico senza precedenti, in considerazione del fatto che mai singole nazioni europee, né tantomeno l'intero continente, è stato rilevato in modo omogeneo nell'arco temporale di un solo anno.

Bibliografia:

"Collaudo e validazione del rilievo IFSAR "Torino 2006, Metodologia adottata e risultati." IGM

"Analisi del DTM realizzato con tecnologia IFSAR relative al territorio della bassa val Susa." ARPA

"Evaluation of Radar DTM" Institut Geographique National, France, Internal Presentation, September 12th, 2006