

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BARI

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E NATURALI

Dipartimento di Fisica

MASTER UNIVERSITARIO DI II LIVELLO IN TECNOLOGIE PER IL
TELERILEVAMENTO SPAZIALE

Monitoraggio a 12h di aree sensibili con
l'ausilio di immagini satellitari SAR della
costellazione COSMO-SkyMed

Tutor aziendale

Dott. Luca Pietranera

Candidato

Ing. Giuseppe Cammarota

Tutor universitario

Prof. Luciano Guerriero

Indice

Introduzione	1
1 Il sistema COSMO-SkyMed	3
1.1 La costellazione	3
1.2 Il sensore SAR	5
1.2.1 Backscattering e speckle	6
1.3 Le modalità di acquisizione	8
1.3.1 Modalità ScanSAR	10
1.3.2 Modalità StripMap	10
1.3.3 Modalità Spotlight	11
2 Dati e prodotti COSMO-SkyMed	13
2.1 Classi di prodotti COSMO-SkyMed	13
2.2 Prodotti interferometrici multitemporali	17
2.2.1 Change Detection (CD) e Multi Temporal (MT)	17
2.2.2 Multi Temporal with Coherence (MTC) e Multi Coherence (MC)	18
3 Monitoraggio di tracce nel deserto a 12h	21
3.1 Concetti generali	22
3.2 Monitoraggio semplice	24
3.3 Monitoraggio avanzato	25
3.4 Composizione RGB ai fini dell'analisi temporale	29
4 Tindouf, caso di studio	37
4.1 Zona di interesse	38
4.2 Pianificazione	39
4.3 Analisi temporale degli intervalli singoli	42
4.3.1 Esempi di tracce individuate	43
Conclusioni	48
A Pianificazioni COSMO-SkyMed	49
B Schemi temporali per l'analisi degli intervalli	57
C Caratteristiche dei prodotti della costellazione COSMO-SkyMed	64

Acronimi	65
Bibliografia	67

Elenco delle figure

1.1	Sfasamenti dei satelliti COSMO-SkyMed sul piano orbitale	4
1.2	Schema di rivisita della costellazione COSMO-SkyMed	5
1.3	Immagine ottica con problemi di visibilità (a) e immagine radar (b) .	7
1.4	Meccanismi di riflessione (a) e diffusione (b)	8
1.5	Una foresta in Congo, immagine COSMO-SkyMed Spotlight-2 . .	9
1.6	Una immagine ottica e una radar a confronto	10
1.7	Modello di acquisizione <i>right-looking</i> di un sensore RADAR	11
2.1	Classi di prodotti COSMO-SkyMed	13
2.2	Prodotti SAR Standard di COSMO-SkyMed	14
2.3	Esempi dei 5 tipi di prodotti SAR Standard di COSMO-SkyMed .	15
2.4	Prodotti SAR Higher Level di COSMO-SkyMed	15
2.5	Confronto tra due immagini di coerenza (8gg) in due scenari diversi	16
2.6	Prodotti ausiliari SAR COSMO-SkyMed	17
2.7	Generazione di una MT	18
2.8	Generazione di una MTC	19
2.9	Combinazioni dei colori in una MTC	19
3.1	Opportunità di rivisite non interferometriche RD della costellazione COSMO-SkyMed	22
3.2	Andamento di ampiezza e coerenza in uno scenario con suolo arido in presenza di passaggio di veicoli	23
3.3	Esempio di immagine di coerenza nel deserto	24
3.4	Approccio classico al riconoscimento delle tracce	25
3.5	Tracce identificate riportate su Google Earth	26
3.6	Approccio di utilizzo delle coerenze con intervalli intersecati . . .	27
3.7	Esempio di utilizzo delle coerenze con intervallo incluso	28
3.8	Esempio di utilizzo di una tripletta coerenze	29
3.9	Ritagli di immagini di coerenza (a), incoerenza complementare (b) e incoerenza inversa (c) e istogrammi completi delle relative matrici (d,e,f)	30
3.10	Immagine Multi Coherence, monitoraggio semplice	31
3.11	Dettaglio immagine Multi Coherence, monitoraggio semplice . . .	32
3.12	Schema temporale per immagini in time series	32
3.13	Schema temporale per coerenze sovrapposte	33
3.14	Immagine Multi Coherence, monitoraggio avanzato	35
3.15	Tracce colorate in dettaglio	36

4.1	Tipico suolo della zona di Tindouf	37
4.2	Localizzazione dell'area di interesse e confini politici	38
4.3	Ground tracks dei satelliti COSMO-SkyMed	39
4.4	Zone per la simulazione di pianificazione	40
4.5	Footprints delle acquisizioni	41
4.6	Schema delle acquisizioni	42
4.7	Divisione in intervalli e loro durata	43
4.8	Esempi di tracce rosse, ciano e bianche	44
4.9	Traccia in composizioni RGB diverse	45
4.10	Traccia anomala e zoom	46
4.11	Traccia con ambiguità temporale	46
4.12	Esempio di meeting point	47
B.1	Schema temporale per l'intervallo T_1	57
B.2	Schema temporale per gli intervalli T_2	57
B.3	Schema temporale per gli intervalli T_3 e T_{14}	58
B.4	Schema temporale per gli intervalli T_4	58
B.5	Schema temporale per gli intervalli T_5	58
B.6	Schema temporale per gli intervalli T_6	59
B.7	Schema temporale per gli intervalli T_7 e T_9	59
B.8	Schema temporale per gli intervalli T_{10}	59
B.9	Schema temporale per gli intervalli T_{11} e T_{20}	60
B.10	Schema temporale per gli intervalli T_{12} e T_{20}	60
B.11	Schema temporale per gli intervalli T_{13} e T_{18}	60
B.12	Schema temporale per gli intervalli T_{14} e T_{16}	61
B.13	Schema temporale per gli intervalli T_{16} e T_{19}	61
B.14	Schema temporale per gli intervalli T_{17}	61
B.15	Schema temporale per gli intervalli T_{20} e T_{22}	62
B.16	Schema temporale per gli intervalli T_{21} e T_{23}	62
B.17	Divisione in intervalli e loro durata	63

Elenco delle tabelle

1.1	Caratteristiche orbitali della costellazione COSMO-SkyMed	4
1.2	Modalità di acquisizione della costellazione COSMO-SkyMed	12
2.1	Chiavi di interpretazione di una MTC	20
3.1	Combinazioni che non danno origine al bianco per cinque intervalli .	34
A.1	Pianificazione per la zona Kenya1	49
A.2	Pianificazione per la zona Kenya2	50
A.3	Pianificazione per la zona Kenya3	51
A.4	Pianificazione per la zona Algeria1	52
A.5	Pianificazione per la zona Algeria2	53
A.6	Pianificazione per la zona Algeria3	54
A.7	Pianificazione per la zona Russia1	55
A.8	Pianificazione per la zona Russia2	56
C.1	Prodotti COSMO-SkyMed e loro specifiche	64

Introduzione

La costellazione COSMO-SkyMed (COnstellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation), grazie ai sensori SAR (Synthetic Aperture Radar) e alle caratteristiche orbitali dei suoi satelliti, garantisce prodotti e servizi per applicazioni commerciali, istituzionali, legati alla difesa e di ricerca. Una importante caratteristica di questo sistema è quella di disporre di quattro satelliti e pertanto di assicurare un periodo di rivisita molto breve rispetto a quello fornito dalle altre missioni spaziali che usano sensori con tecnologia RADAR (RAdio Detection And Ranging). Questa peculiarità, insieme alla capacità dei sensori SAR di acquisire immagini sia di giorno che di notte a differenza dei satelliti ottici, ed in qualsiasi condizione metereologica, fanno sì che COSMO-SkyMed sia una costellazione molto indicata ad effettuare servizi di monitoraggio a breve intervallo di rivisita, sia in ambito civile che militare.

Per monitorare un'area è necessario disporre di una serie di immagini acquisite sulla zona critica a cavallo del periodo di interesse. Analizzando i cambiamenti riscontrabili tra una scena e le altre è possibile associare ad ogni cambiamento individuato l'intervallo di tempo in cui è avvenuto basandosi sulle date in cui le immagini sono state acquisite. La distanza temporale tra due acquisizioni stabilisce l'intervallo minimo di monitoraggio e, per come è stata progettata la costellazione, il tempo minimo da attendere per ottenere due immagini acquisite con la stessa geometria sulla stessa zona è pari a 24 ore.

Lo scopo di questo lavoro è quello di descrivere una tecnica di monitoraggio, basata sui prodotti forniti dai satelliti COSMO-SkyMed, nella fattispecie mappe di coerenza interferometrica e composizioni RGB di immagini di coerenza, che consenta il riconoscimento di tracce nel deserto, riconducibili a piste percorse, e permetta di risalire al periodo in cui sono state seguite con un'aggiornamento dell'informazione che avvenga sostanzialmente ogni 12 ore. È importante precisare come, anche se in questo lavoro si faranno alcuni esplicativi riferimenti al fatto che tali piste siano percorse da autovetture, le cause della formazione di tali tracce siano in realtà multiple e varie. Infatti, solo per portare un esempio, anche le carovane di cammelli tipiche della zona di studio presentata possono lasciare tali *segni* nella coerenza e non soltanto gli autoveicoli. In ogni caso, l'origine non è conoscibile con certezza e pertanto, da tenere sempre a mente, ci si riferirà alle piste come a delle *tracce di autoveicoli* solo per comodità di espressione.

La tesi è organizzata in quattro capitoli:

- nel capitolo I sono descritte le principali caratteristiche della costellazione

COSMO-SkyMed, riguardanti la sua orbita, i suoi sensori, alcuni principi alla base del funzionamento dei sensori e le modalità di acquisizione disponibili;

- il capitolo II presenta le tipologie di dati che la costellazione può fornire e descrive alcuni prodotti avanzati ricavabili dagli stessi introducendo i concetti su cui si basa l'analisi e l'utilizzo di questi prodotti a valore aggiunto;
- nel capitolo III sono introdotte la tecnica di monitoraggio semplice e di monitoraggio avanzato e il metodo per combinare opportunamente le immagini ai fini della tecnica proposta;
- il capitolo IV descrive un caso di studio mostrando alcuni dei risultati ottenuti applicando il metodo proposto sulla zona di Tindouf in Algeria.

Capitolo 1

Il sistema COSMO-SkyMed

COSMO-SkyMed (COnstellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation) è un sistema di telerilevamento spaziale finanziato dall’Agenzia Spaziale Italiana (ASI) e dal Ministero della Difesa ed è il più grande investimento italiano nei sistemi spaziali in ambito Earth Observation (EO) [1]. Concepito come sistema duale, è progettato pertanto per fornire a ciascuna classe di utenti, civile e militare, le performance adeguate secondo criteri di priorità stabiliti. La copertura a terra dei satelliti COSMO-SkyMed permette di acquisire dati su scala globale e fornire prodotti e servizi a utenti che operano nelle istituzioni, nel settore commerciale e in quello scientifico, nell’ambito dell’intelligence e nella difesa. Tra i campi di utilizzo più comuni in cui è possibile sfruttare questo sistema sono annoverati, tra gli altri, la cartografia, l’idrologia e la geologia, lo studio di zone marine, costiere, di aree forestali e agricole, nonché la gestione delle crisi e delle emergenze ambientali.

Obiettivo di questo capitolo è esporre, in linea generale, alcune peculiarità del sistema COSMO-SkyMed legate alla sua orbita e alle modalità di acquisizione dei sensori con cui la costellazione è equipaggiata. A queste caratteristiche, come si descriverà in seguito, sono strettamente legate il tempo di rivisita per acquisire immagini interferometriche e la risoluzione, nonché l’estensione, delle stesse immagini.

1.1 La costellazione

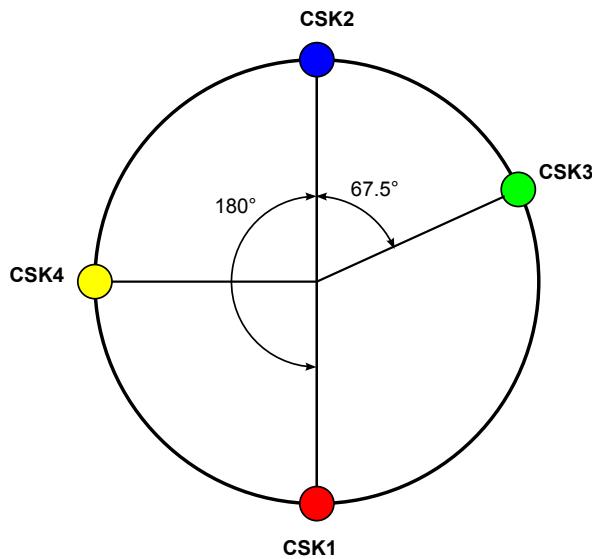
La costellazione COSMO-SkyMed è composta da quattro satelliti di medie dimensioni che ruotano su uno stesso piano orbitale seguendo un’orbita Low Earth Orbit (LEO) in configurazione Sun Synchronous Orbit (SSO) con quota media pari a 619.6 km e inclinazione di 97.86°. Tutti i dati relativi alle caratteristiche orbitali della costellazione sono riportati nella tabella 1.1 e si riferiscono alla configurazione nominale. Il ciclo dell’orbita è pari a 16 giorni e coincide con un’importante caratteristica dei satelliti RADAR per l’osservazione della Terra: il tempo di rivisita interferometrico. Tale periodo corrisponde all’intervallo di tempo tra due passaggi del sensore su uno stesso punto della superficie terrestre con identiche caratteristiche del fascio di illuminazione. Ogni satellite, in effetti, percorre un’orbita completa in circa 97 minuti, ma è solo dopo 16 giorni - e 237 rivoluzioni intorno

Orbit Type	LEO-SSO
Inclination	97.86°
Revolutions/day	14.8125
Orbit Cycle	16 days
Eccentricity	0.00118
Argument of Perigee	90°
Semi Major Axis	7003.52 km
Nominal Height	619.6 km
LTAN	6:00 AM
Number of Satellites	4
Phasing	90°
Deployment	Progressive

TABELLA 1.1: Caratteristiche orbitali della costellazione COSMO-SkyMed

alla Terra - che il satellite completa la sua periodicità ritornando ad illuminare lo stesso punto sulla superficie terrestre dalla stessa posizione iniziale.

La configurazione nominale prevede i quattro satelliti equisfasati di 90° l'uno dall'altro, il che corrisponde ad un tempo di rivisita costante di 4 giorni una qualsiasi coppia di satelliti consecutivi della costellazione. Da questo punto di vista, infatti, uno dei grandi vantaggi del sistema COSMO-SkyMed è dato dalla disposizione dei quattro satelliti sullo stesso piano orbitale. Questa caratteristica permette di ottenere un periodo di rivisita molto inferiore ai sedici giorni perché sfrutta tutti e quattro i satelliti che risultano, per l'appunto, in configurazione interferometrica. Ogni satellite COSMO-SkyMed, cioè, segue sulla stessa orbita il satellite che lo precede con un ritardo variabile a seconda della coppia di satelliti considerata. Gli sfasamenti effettivi tra i quattro sensori della costellazione COSMO-SkyMed, però, non sono quelli nominali e sono rappresentati nella figura 1.1.

**FIGURA 1.1:** Sfasamenti dei satelliti COSMO-SkyMed sul piano orbitale

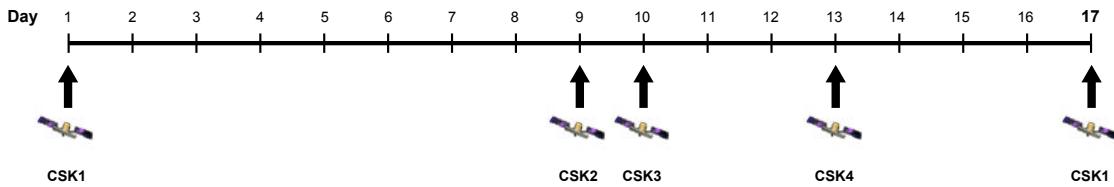


FIGURA 1.2: Schema di rivisita della costellazione COSMO-SkyMed

Uno dei satelliti presenta uno sfasamento diverso rispetto agli altri pari a 67.5° ; il sensore CSK3, infatti, è stato posizionato in orbita in modo da formare una configurazione *"tandem-like"* con il satellite CSK2. Una coppia di sensori si dice in configurazione *"tandem"* se essi si inseguono a brevissima distanza lungo la stessa orbita o su orbite parallele. Questa disposizione risulta molto efficace per acquisire immagini interferometriche in un intervallo di tempo estremamente ridotto, così da poter escludere la presenza di cambiamenti, ad esempio legati ad agenti atmosferici, avvenuti tra l'acquisizione della prima e della seconda immagine. Con il termine *"tandem-like"*, invece, ci si riferisce ad una condizione simile ma con tempi di rivisita più lunghi. La figura 1.2 mostra lo schema di rivisita interferometrica completa della costellazione COSMO-SkyMed fissato il fascio di illuminazione dell'antenna. Come risulta evidente dalla stessa figura 1.2 i satelliti in configurazione *"tandem-like"*, CSK2 e CSK3, hanno uno sfasamento temporale di 24 ore. A questa configurazione ci si riferisce anche con la locuzione *"tandem-like one-day interferometry"*. Se fissiamo come prima acquisizione quella effettuata dal satellite CSK1, la prima opportunità di rivisita con lo stessa geometria si ripresenterà dopo 8 giorni con il satellite CSK2; a questa opportunità ne seguirà una successiva dopo un solo giorno grazie a CSK3 e 72 ore dopo quest'ultima (12 giorni dopo la prima immagine) si potrà sfruttare il passaggio di CSK4. Il diciassettesimo giorno il ciclo orbitale della costellazione ricomincia. È importante ricordare come la periodicità rappresentata in figura 1.2 sia fissa a differenza del calendario delle acquisizioni periodiche che è definito al variare della geometria di acquisizione. Bisogna, però, tenere a mente che se non si necessita di immagini interferometriche ma si desidera il maggior numero di acquisizioni possibili su una determinata area, la costellazione COSMO-SkyMed offre, anche solo nel peggior dei casi e quindi a latitudini prossime all'equatore, fino a quattro immagini al giorno sfruttando, del singolo satellite, il breve tempo di rivoluzione e la capacità di orientare il fascio del sensore sia a destra che a sinistra rispetto alla direzione di percorrenza dell'orbita.

1.2 Il sensore SAR

Ognuno dei satelliti è equipaggiato con un sensore radar ad apertura sintetica o Synthetic Aperture Radar (SAR) in grado di acquisire immagini ad altissima risoluzione della superficie terrestre. Una descrizione approfondita della tecnologia del sensore e del suo funzionamento esulano dall'obiettivo di questo lavoro e pertanto verranno presentati solo alcuni concetti fondamentali utili nell'analisi e nell'interpretazione dei dati. Per approfondire i concetti teorici alla base del funzionamento di un sensore SAR si veda [2] e [3].

I sensori montati sui satelliti lavorano in banda X (frequenza: 8.0-12.5 GHz, lunghezza d'onda: 3.8-2.4 cm; frequenza COSMO-SkyMed: 9.6 ± 0.2 GHz) acquisendo, di volta in volta, immagini secondo una precisa modalità, tra quelle disponibili, che verranno brevemente descritte nel paragrafo 1.3. Un'importante caratteristica del sistema COSMO-SkyMed è quella di poter acquisire immagini sia di giorno che di notte e in presenza di qualsiasi condizione atmosferica. I suoi sensori, infatti, sono attivi ed inviano il segnale che permette la formazione del dato ogni volta che è richiesto. Inoltre, operando in banda X, la costellazione riesce a vedere la superficie della Terra, come anticipato, anche attraverso lo strato nuvoloso poiché la lunghezza dell'onda elettromagnetica utilizzata non interagisce con le molecole, più piccole, che compongono l'atmosfera e le nubi e pertanto esse non compaiono nell'immagine RADAR, a differenza di quanto avverrebbe per un'immagine ottica. In realtà, la banda X non è totalmente insensibile all'acqua presente nelle nubi e pertanto, in condizioni molto sfavorevoli, è possibile riscontrare degli artefatti atmosferici nell'immagine RADAR che consistono sostanzialmente nel segnale di ritorno proveniente dalle nuvole e dalla corrispondente zona d'ombra a terra. In figura 1.3 un'immagine ottica con problemi di visibilità legati a fattori metereologici ed un esempio di immagine RADAR.

L'antenna RADAR trasmette impulsi elettromagnetici modulati a frequenza variabile, un segnale noto come *chirp*, che investono la superficie della Terra e da essa la loro energia elettromagnetica viene riflessa. Una parte dell'energia re-irradiata viene captata dal sensore che misura sia l'ampiezza che la fase del segnale ricevuto. Gli oggetti a terra sono discriminati nella direzione congiungente sensore-target, perpendicolare all'orbita, analizzando i ritardi tra l'istante di trasmissione del segnale e quello di ricezione del segnale riflesso; lungo la direzione di volo del satellite, invece, l'immagine viene formata sfruttando l'effetto Doppler, legato alla velocità relativa tra satellite e target a terra, e gli shift di frequenza che esso induce sul segnale riflesso.

1.2.1 Backscattering e speckle

Il meccanismo alla base del funzionamento del sistema RADAR è quello della riflessione e della retrodiffusione o *backscattering*. L'onda elettromagnetica interagisce con oggetti di dimensioni paragonabili alla lunghezza d'onda che riflettono parte dell'energia indietro verso il sensore. Il meccanismo di riflessione e backscattering è rappresentato in figura 1.4. Superficie lisce, che non presentano irregolarità dell'ordine di grandezza della lunghezza d'onda, rifletteranno specularmente la maggior parte dell'energia via dal sensore e pertanto appariranno come zone scure nell'immagine RADAR. Al contrario, superfici rugose ed irregolari come ad esempio un campo agricolo arato o coperto con vegetazione, risulteranno generalmente più brillanti. In figura 1.5 è riportata un'immagine COSMO-SkyMed Spotlight-2 acquisita su una foresta in una zona settentrionale del Congo in cui è presente anche un corso d'acqua. È evidente come la superficie liscia del fiume risulti molto meno brillante nell'immagine RADAR rispetto a quella più irregolare del fogliame della foresta.



(a) immagine ottica



(b) immagine RADAR

FIGURA 1.3: Immagine ottica con problemi di visibilità (a) e immagine radar (b)

Un fattore da tenere sempre in considerazione nell'analisi è l'effetto dello speckle, un rumore granulare che appare come disturbo *sale e pepe* anche nelle zone in cui ci si aspetterebbe una risposta omogenea. Questo è legato alla presenza di numerosi scatteratori all'interno di ogni singola cella di risoluzione i cui ritorni si sommano casualmente in ampiezza e fase per generare pixel più o meno luminosi. Il valore assunto da ogni pixel, infatti, rappresenta la somma delle risposte dei singoli contributi di una cella a terra, la cui dimensione cambia in base alla risoluzione dell'immagine. Un confronto tra un'immagine ottica ed una RADAR per evidenziare l'effetto dello speckle è riportato in figura 1.6.

È un disturbo che degrada la qualità visiva dell'immagine e la riconoscibilità degli oggetti ma cercare di ridurne gli effetti corrisponde ad un peggioramento della risoluzione dell'immagine. Infatti, i metodi per diminuire l'effetto speckle prevedono o un filtraggio dell'immagine con una finestra a scorrimento oppure,

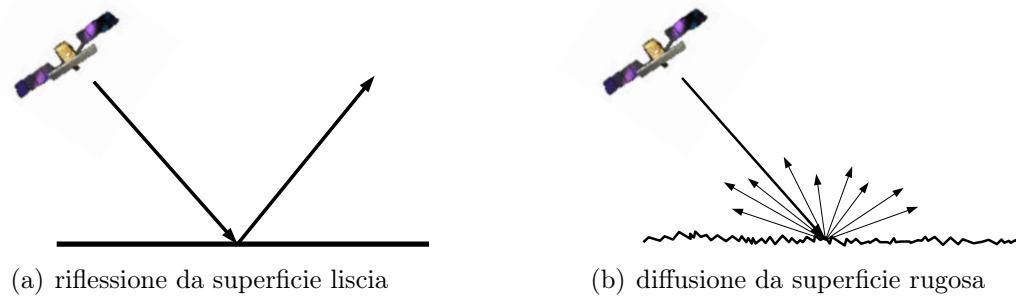


FIGURA 1.4: Meccanismi di riflessione (a) e diffusione (b)

nel dominio delle frequenze, una divisione del fascio d'antenna in sotto-aperture seguita da una media delle immagini risultanti: in entrambi i casi la risoluzione peggiora.¹

1.3 Le modalità di acquisizione

In figura 1.7 è riportato il modello che rappresenta in linea generale la geometria di acquisizione dei satelliti RADAR e sono mostrati alcuni parametri fondamentali per la comprensione del funzionamento del sistema COSMO-SkyMed. L'antenna a bordo del satellite può acquisire il segnale di ritorno corrispondente ad una striscia a terra, a cui ci si riferisce con il termine *swath*, parallela all'orbita del satellite; la direzione di volo del satellite è detta direzione *azimuth*. La direzione congiungente il sensore con il punto a terra è la Line Of Sight (LOS) e prende il nome di direzione di *slant range*, mentre la sua proiezione sul piano rappresentante la superficie terrestre è detta di *ground range*. Nella configurazione di default il fascio del sensore è ortogonale alla direzione di *azimuth* e orientato alla sua destra (*right-looking*), inclinato rispetto al nadir del satellite di un angolo detto di *off-nadir* o *look-angle*. Il *look-angle*, che si misura tra la direzione del nadir del satellite e il raggio centrale del fascio, può assumere valori discreti compresi tra 18° e 51° circa. Il sensore, infatti, non acquisisce mai al nadir poiché in questo modo si presenterebbero delle ambiguità nel segnale di ritorno. Il sistema essenzialmente distingue i vari echi discriminandoli in base ai tempi di ritorno, ma acquisendo al nadir non ci sarebbe modo di distinguere gli impulsi riflessi da oggetti posizionati alla stessa distanza dall'antenna ma in punti diametralmente opposti del fascio. Per questa ragione l'orientamento dell'antenna è sempre *side-looking*.

I sensori, con cui i quattro satelliti sono equipaggiati, possono operare in base alle necessità e alle richieste secondo diverse modalità che determinano la risoluzione e l'estensione dell'immagine. Le modalità di acquisizione implementate sono:

- ScanSAR

¹Nel processo di filtraggio la risoluzione finale sarà pari a quella della finestra di scorrimento; nel secondo processo, detto *multi-looking* sarà pari a quella garantita dalla dimensione della singola sotto-apertura nella modalità di acquisizione considerata.

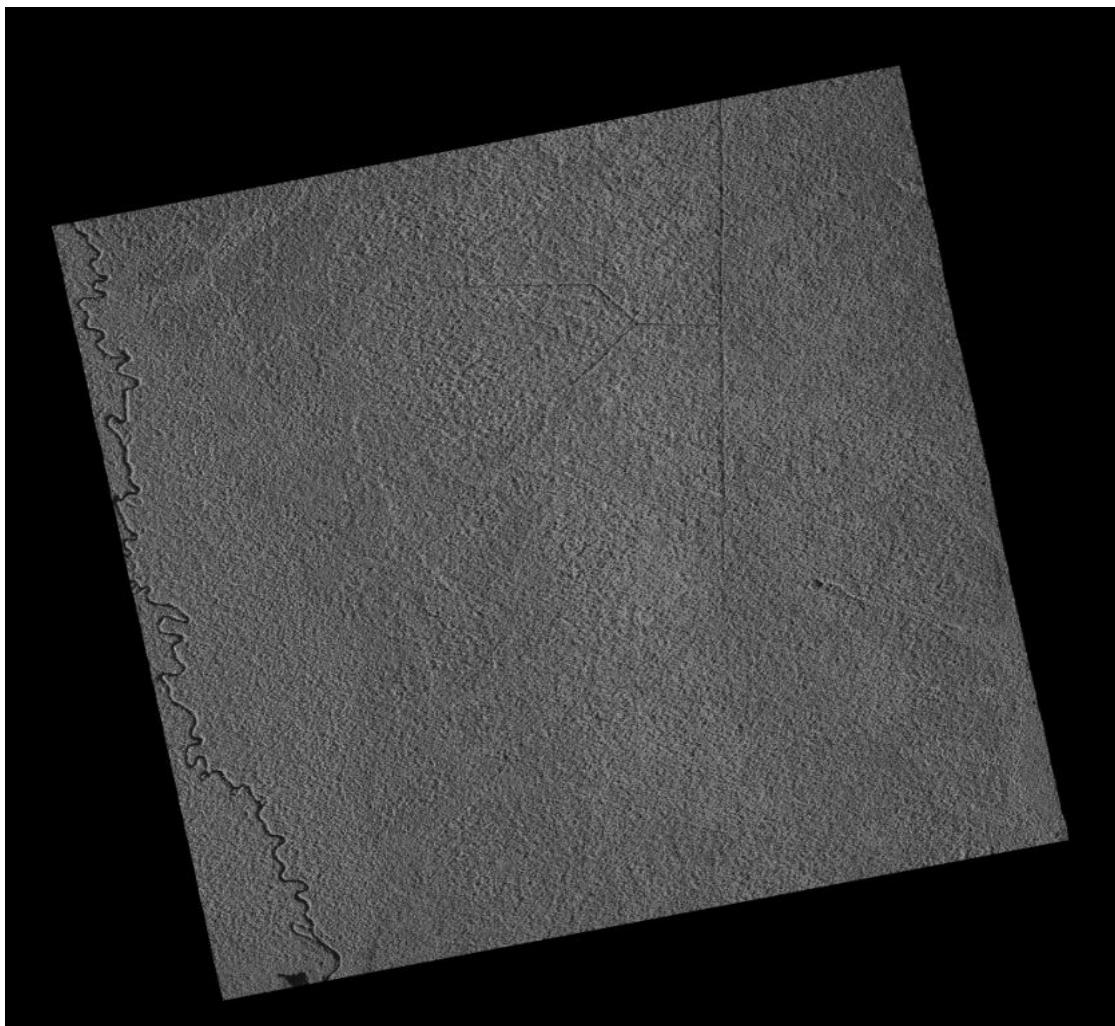


FIGURA 1.5: Una foresta in Congo, immagine COSMO-SkyMed Spotlight-2, Date: 5 Set 2011, Incidence-Angle: 40.83° , Look direction and Pass: Right Ascending, Polarization: HH

- WideRegion
- HugeRegion
- StripMap
 - Himage
 - Pingpong
- Spotlight
 - Spotlight-1
 - Spotlight-2

e ognuna di esse viene utilizzata per scopi e in settori diversi in base alle prestazioni che garantiscono. In tabella 1.2 sono riassunte le modalità di acquisizione fornite dalla costellazione e le caratteristiche nominali delle immagini acquisite con le



FIGURA 1.6: Una immagine ottica e una radar a confronto

corrispondenti modalità. La combinazione del valore di *look-angle* con la modalità di acquisizione definisce il fascio di illuminazione o geometria di acquisizione.

1.3.1 Modalità ScanSAR

È la modalità che permette di ottenere la maggiore estensione dello swath in range ma, di contro, fornisce l'immagine con la risoluzione minore. In questà modalità di funzionamento l'inclinazione dell'antenna viene periodicamente guidata affichè essa punti progressivamente sui diversi *sub-swath* adiacenti. Si effettua il cosiddetto *elevation beam steering*, cioè l'aumento progressivo del *look-angle* durante l'acquisizione.

Nella modalità ScanSAR WideRegion i *sub-swath* adiacenti interessati sono quattro, per un totale di superficie acquisita pari a 100 km, sia in direzione *range* che in *azimuth*, ad una risoluzione di 30 m in entrambe le direzioni. Nella modalità ScanSAR HugeRegion il sensore acquisisce per un tempo prossimo ai 30 secondi spostandosi su 6 *sub-swath*, corrispondenti ad una copertura a terra di circa 200x200 km² ad una risoluzione di 100x100 m² [5]. La modalità ScanSAR, quindi, è principalmente utilizzata per osservare zone molto ampie e per servizi in cui non è richiesto il riconoscimento di bersagli molto piccoli. Un esempio importante è dato nella sorveglianza marina da servizi come la localizzazione di imbarcazioni fuori rotta o l'identificazione di perdite di petrolio da navi o piattaforme off-shore.

1.3.2 Modalità StripMap

In questa modalità l'antenna SAR punta in una direzione fissa rispetto alla direzione di *azimuth* e il sensore acquisisce una strisciata a terra che man mano avanza seguendo il volo del satellite. È la modalità più comune per l'acquisizione di immagini satellitari. Anche per questa sono disponibili due diverse implementazioni: Himage e Pingpong.

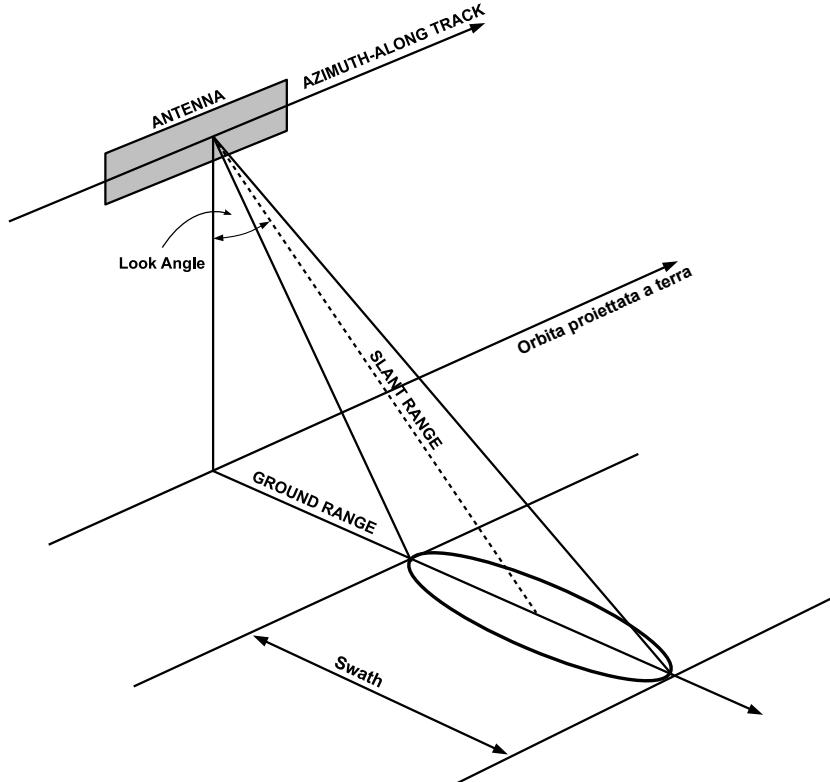


FIGURA 1.7: Modello di acquisizione right-looking di un sensore RADAR

Una immagine StripMap Himage è caratterizzata da una estensione di circa $40 \times 40 \text{ km}^2$ ripresa con una risoluzione geometrica di 3 m, sia in direzione *azimuth* che in *range*. La modalità StripMap Pingpong permette di generare un'immagine utilizzando l'antenna in due diverse condizioni di polarizzazione indipendenti per la trasmissione e la ricezione. In questa modalità, quindi, è possibile scegliere una coppia tra le quattro possibili combinazioni di trasmissione/ricezione: VV, HH, HV e VH. In realtà due combinazioni non sono disponibili: VV-HV e HH-VH. L'area coperta da questa immagine è leggermente inferiore, $30 \times 30 \text{ km}^2$, e siccome solo una parte dell'antenna è attiva in questa modalità, anche la risoluzione scende fino a $15 \times 15 \text{ m}^2$.

1.3.3 Modalità Spotlight

Questa modalità garantisce le immagini con la risoluzione più spinta, anche se con l'estensione minore. Il beam dell'antenna, in questo caso, subisce uno *steering* azimuthale in modo da prolungare l'intervallo di tempo durante il quale la scena viene osservata; in questo modo l'intervallo di tempo in cui i dati vengono integrati aumenta e quindi migliora la risoluzione, a discapito della copertura.

La Spotlight mode 1 è una modalità classificata, riservata a scopi di tipo difensivo-militare e pertanto non sarà descritta o trattata in questo lavoro. La modalità Spotlight mode 2, invece, permette immagini che coprono zone estese fino a $10 \times 10 \text{ km}^2$ con un pixel a terra di $1 \times 1 \text{ m}^2$. Questa categoria di immagine è utile, ad esempio, nel riconoscimento e nello studio di piccoli target o nella carto-

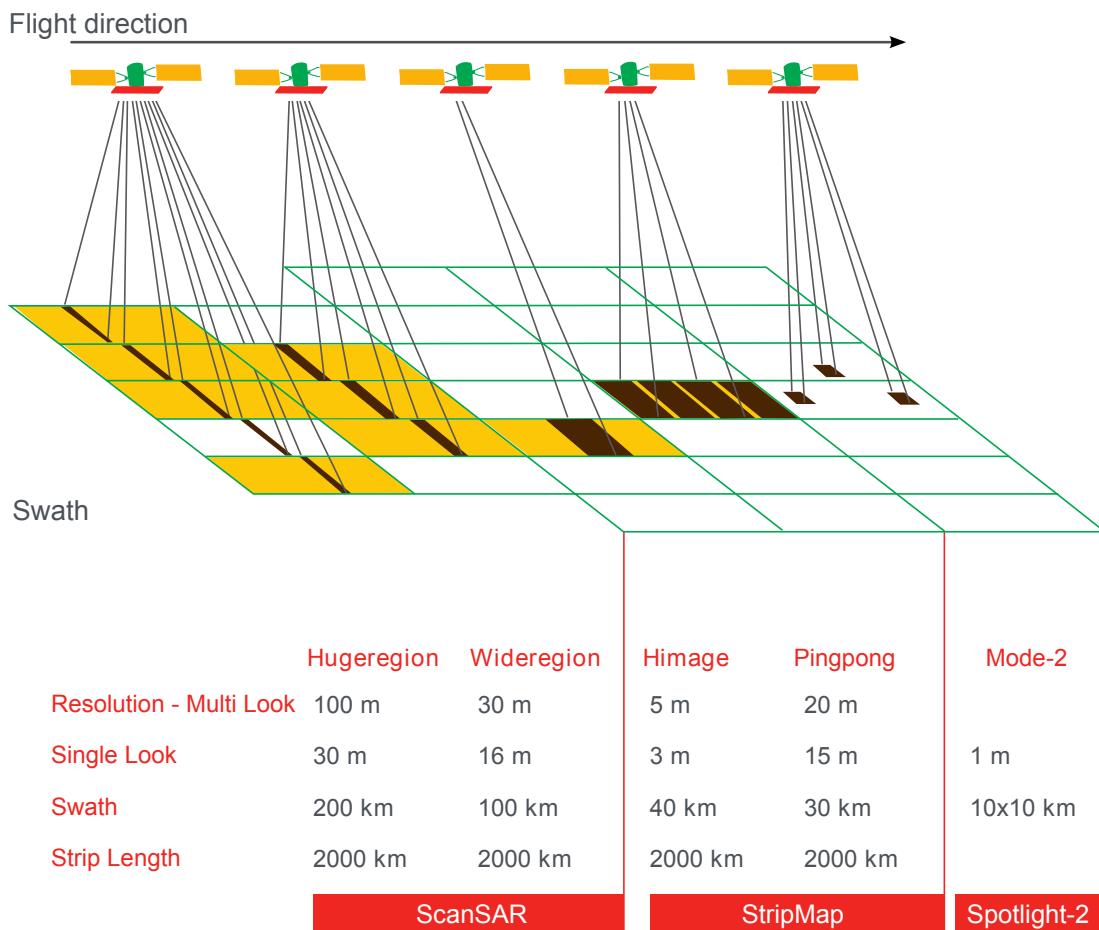


TABELLA 1.2: Modalità di acquisizione della costellazione COSMO-SkyMed [4]

grafia a scale ridotte. Le immagini utilizzate in questo lavoro, per la maggior parte e dove non diversamente indicato, sono state acquisite in questa modalità.

Capitolo 2

Dati e prodotti COSMO-SkyMed

I sensori SAR, come accennato nel capitolo precedente, forniscono dati generati secondo diverse modalità di acquisizione e a diverse risoluzioni. Questi dati subiscono una serie di processamenti alla fine dei quali si ottengono prodotti differenti che presentano caratteristiche legate tanto al dato originario quanto alla catena di elaborazione che lo stesso ha subito.

Per acquisire maggiore dimestichezza con le immagini utilizzate per questo lavoro, in questo capitolo si presenta una panoramica sui livelli di processamento e una descrizione delle tipologie di prodotti che la costellazione COSMO-SkyMed può fornire.

2.1 Classi di prodotti COSMO-SkyMed

I prodotti della costellazione COSMO-SkyMed sono divisi in tre classi principali secondo lo schema di figura 2.1.

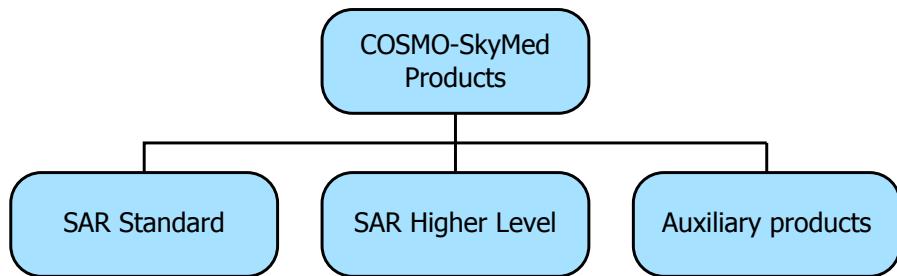


FIGURA 2.1: Classi di prodotti COSMO-SkyMed

I prodotti SAR standard che la costellazione produce seguono una classificazione comune per i sistemi di osservazione della Terra basati su sistemi SAR, riportata in figura 2.2, e in base a questa sono divisi in quattro differenti livelli:

Livello 0, sono dati raw, una serie temporale di misurazioni in formato complesso, distribuita a valle di operazioni di decrittazione, decompressione, calibrazione interna e compensazione degli errori. Includono i dati ausiliari, come i vettori delle velocità e delle posizioni del satellite, necessari per generare i prodotti di livelli successivi e classi diverse.

Livello 1A, Single-look Complex Slant (SCS), dati raw riportati in geometria *slant range-azimuth* a zero-doppler. Sono divisi in dati in fase e in quadratura (I e Q) opportunamente pesati ed equalizzati radiometricamente. È il livello di dati che viene fornito agli utenti che subisce il minore grado di elaborazione. Il livello 0, infatti, pur essendo meno trattato, non viene distribuito.

Livello 1B, Detected Ground Multi-look (DGM), dati reali, derivati dai livelli precedenti, proiettati in geometria *ground range-azimuth* a zero-doppler. Subiscono, ad eccezione dei dati acquisiti in modalità Spotlight, un processo di multi-looking che riduce l'effetto dello speckle sull'immagine.

Livello 1C/1D, Geocoded Ellipsoid Corrected (GEC) e Geocoded Terrain Corrected (GTC), dati reali, derivati sempre dai livelli 0 o 1A, che hanno subito un processo di multi-look e sono georeferenziati; i primi rispetto ad un ellissoide di riferimento terrestre¹, e gli altri rispetto ad un Digital Elevation Model (DEM), in pratica una versione digitalizzata delle altezze del terreno della zona.

La figura 2.3[5] rappresenta esempi dei diversi tipi di prodotti SAR standard della costellazione COSMO-SkyMed.

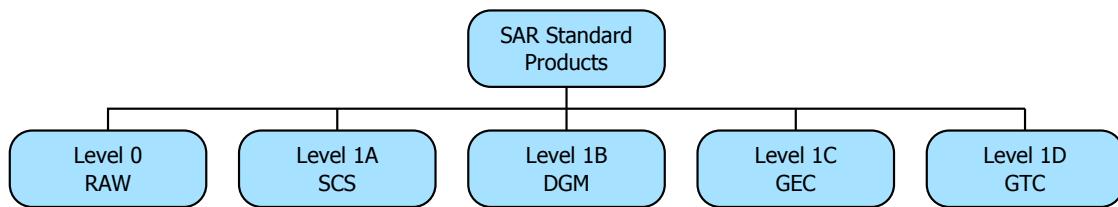


FIGURA 2.2: Prodotti SAR Standard di COSMO-SkyMed

I prodotti descritti finora sono considerati come classi piuttosto che come tipologie di prodotti visto che ognuna delle modalità in cui può operare il sensore a bordo dei satelliti può dare origine al relativo prodotto di livello 1A/B/C/D. Come rappresentato in figura 2.4, invece, tra i prodotti SAR higher level sono compresi i seguenti prodotti:

Quicklook, un'immagine in proiezione *ground range* a bassa risoluzione spaziale e di dimensioni ridotte che viene generata come ausilio alla ricerca in archivio dei dati originari, fornisce una panoramica subito accessibile e facilmente navigabile dell'immagine a piena risoluzione;

Co-registered, un set di prodotti co-registrati composto da immagini sovrapposte, una *master* di riferimento nella cui geometria vengono ricampionate tutte le immagini *slave*, che è utilizzato per Change Detection e interferometria;

Mosaikded, un'immagine composta assemblando più immagini con parziale sovrapposizione, viene fornita per grandi coperture spaziali;

¹Tipicamente rispetto al World Geodetic System - 1984 (WGS84).

Speckle, prodotti che subiscono una riduzione dell'effetto dello speckle grazie alla tecnica del multi-looking;

Interferometric, prodotti interferometrici, tipicamente mappe di coerenza e di *wrapped phase*, ottenuti processando immagini co-registrate di livello 1A e utilizzati per vari tipi di applicazioni;

DEM, prodotti derivati da quelli interferometrici, consistono in una mappa delle altezze dell'ellissoide e in una mappa degli errori associati a tali altezze.

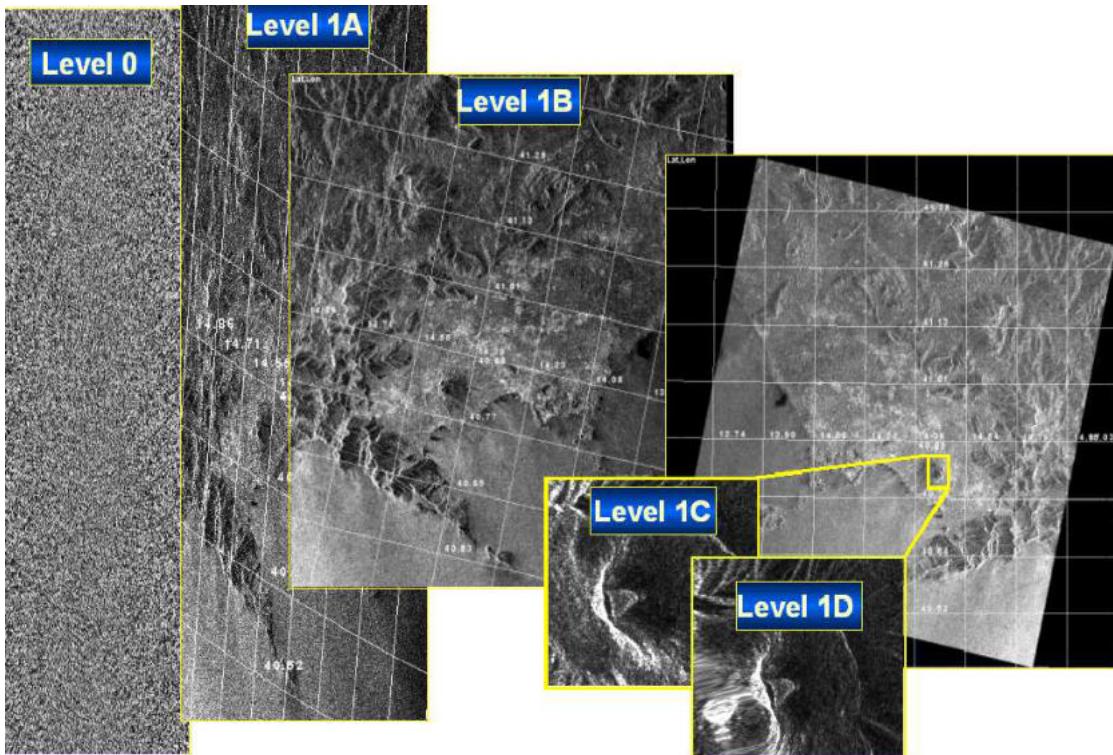


FIGURA 2.3: Esempi dei 5 tipi di prodotti SAR Standard di COSMO-SkyMed

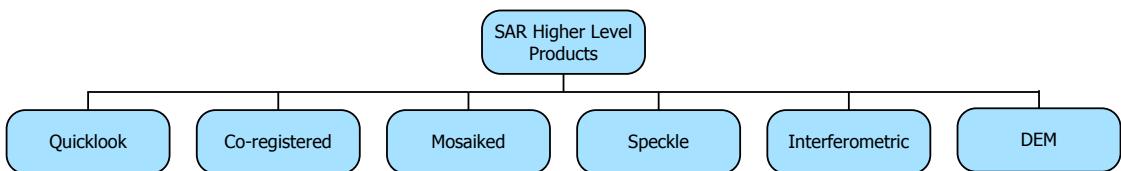
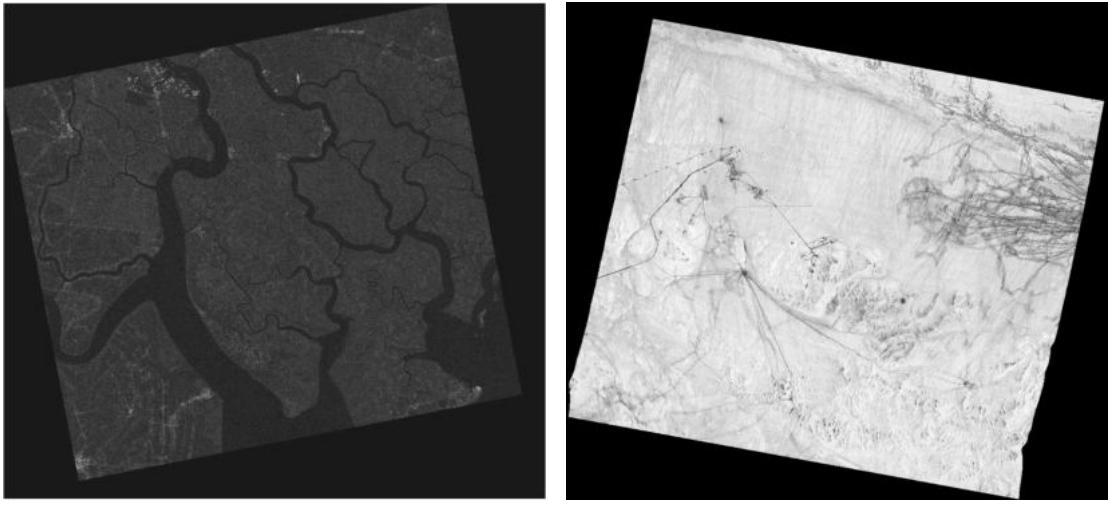


FIGURA 2.4: Prodotti SAR Higher Level di COSMO-SkyMed

Il prodotto più interessante ai fini dello studio presentato in questo lavoro è sicuramente la mappa di coerenza che si calcola a partire da due immagini SAR complesse e co-registrate (S_1 e S_2) secondo la formula:

$$\gamma = \frac{|\sum s_1(x) \cdot s_2(x)^*|}{\sqrt{\sum |s_1(x)|^2 \cdot \sum |s_2(x)|^2}}.$$



(a) Delta del Mekong, Vietnam, *Date: 5-13 Set 2010* (b) Qom, Iran, *Date: 26 Gen-3 Feb 2010*

FIGURA 2.5: Confronto tra due immagini di coerenza (8gg) in due scenari diversi

Dal confronto in figura 2.5[6] si nota subito come a due zone con diverse caratteristiche fisiche corrispondano due immagini di coerenza sensibilmente differenti. Nella 2.5(a) è rappresentata una parte del delta del fiume Mekong, in Vietnam, zona molto umida e con presenza diffusa di campi coltivati e vegetazione e nella 2.5(b), invece, è raffigurata una zona nei pressi di Qom, in Iran, caratterizzata da una vasta superficie arida. Le superfici d'acqua e i continui movimenti della vegetazione fanno sì che la coerenza tra le due immagini acquisite sul Vietnam abbia un valor medio più basso di quello ricavabile dalla mappa di coerenza sul deserto. La zona di Qom è molto più stabile e, pertanto, la coerenza è mediamente più alta e la mappa di coerenza più brillante.

Oltre che dalle caratteristiche fisiche della scena ripresa, i valori della coerenza sono influenzati da numerosi fattori tra i quali, ad esempio, gli effetti atmosferici, il rumore additivo intrinseco e la dimensione della baseline tra le orbite delle due acquisizioni che introduce una decorrelazione spaziale sistematica. Ulteriori componenti che concorrono a determinare la mappa di coerenza, più interessanti alla luce del significato del loro effetto sull'immagine, sono la decorrelazione temporale e l'attività umana intercorse tra le due scene. In pratica, proprio questi ultimi sono legati effettivamente ai cambiamenti che la zona ha subito tra le due acquisizioni.

L'ultima classe, quella dei prodotti ausiliari, comprende due tipologie di dati come schematizzato in figura 2.6:

prodotti orbitali, necessari per georeferenziare l'immagine SAR, sono forniti in modo da poter effettuare questa operazione a diversi livelli di accuratezza;

prodotti per il controllo di qualità, dati di uso interno che, insieme anche ai prodotti orbitali, sono utilizzati per valutare la qualità delle immagini generate.

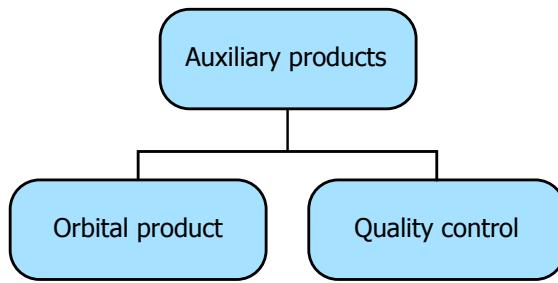


FIGURA 2.6: Prodotti ausiliari SAR COSMO-SkyMed

2.2 Prodotti interferometrici multitemporali

Oltre ai quelli finora descritti, è possibile identificare una classe di prodotti avanzati, a valore aggiunto, ottenuti come composizione dei prodotti che la costellazione fornisce. Sostanzialmente ogni dato viene utilizzato come uno dei tre livelli che compongono un’immagine Red-Green-Blue (RGB) e il modo in cui vengono disposti e le caratteristiche dei dati utilizzati a questo scopo determinano l’ambito di utilità del nuovo prodotto e guidano l’approccio alla sua analisi. Associando opportunamente i colori alle immagini, sfruttando le proprietà interferometriche della costellazione e analizzando, oltre alle variazioni delle immagini, anche quelle della coerenza, si ottengono degli strumenti di analisi per estrarre dai dati informazioni ulteriori che non si sarebbero potute ottenere dall’analisi singola delle immagini che compongono il prodotto multitemporale. Combinando in una sola immagine i cambiamenti temporali nell’ampiezza del segnale e le variazioni della fase grazie alla coerenza, i prodotti interferometrici multitemporali sono utilizzati per attività di *thematic mapping*, cioè generazione di mappe cartografiche e di uso del suolo o caratterizzazione del territorio a seconda della classe di appartenenza (area urbana, forestale, costiera, arida, nevosa e altre) o, ancora, realizzazione di mappe di siti sensibili, e per Change Detection (CD) analysis, cioè come supporto avanzato al monitoraggio e all’identificazione di cambiamenti in aree importanti o in occasioni di crisi.

2.2.1 Change Detection (CD) e Multi Temporal (MT)

Una immagine Change Detection (CD) è un prodotto multitemporale a falsi colori ottenuto dalla composizione di una coppia di immagini SAR interferometriche; se si utilizzano tre immagini prende il nome di Multi Temporal (MT). Tutte le modalità di acquisizione COSMO-SkyMed sono supportate e la risoluzione finale dipende da queste, cioè dalla risoluzione delle immagini adoperate. Le immagini da utilizzare devono essere co-registrate e presentate con l’immagine *master* nel canale del rosso e le due *slave*, o la stessa se si utilizzano solo due immagini, nel canale del verde e del blu. In figura 2.7 è schematizzato il processo di generazione di una MT. L’immagine ottenuta permette di identificare, per esempio, i cambiamenti del territorio avvenuti per cause antropiche o naturali, la costruzione di nuove strutture o la demolizione delle vecchie e individuare, tramite i colori, per ognuna di queste attività il periodo di tempo in cui sono avvenute.

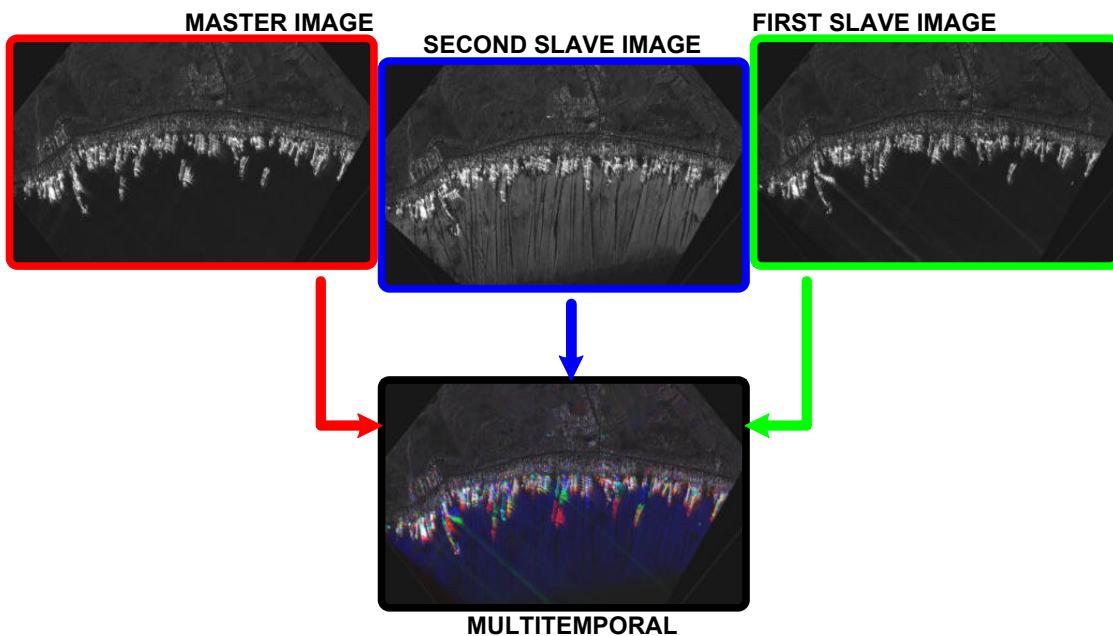


FIGURA 2.7: Generazione di una MT, Date: 10 Mag 2009 (R), 26 Mag 2009(G), 3 Giu 2009(B)

2.2.2 Multi Temporal with Coherence (MTC) e Multi Coherence (MC)

Una immagine Multi Temporal with Coherence (MTC) è un ulteriore prodotto multitemporale che si ottiene con lo stesso procedimento con cui si genera la CD con l'unica differenza che nel canale del blu non è ripetuta l'immagine *slave* ma è inserita la mappa di coerenza ottenuta dalle due immagini nel rosso e nel verde. In figura 2.8 è schematizzato il processo di generazione di una MTC. Le applicazioni per le quali può essere utilizzata una MTC, le grandi branche del *thematic mapping* e dell'*enhanced change detection*, dipendono strettamente dalla durata dell'intervallo temporale tra la *master* e la *slave* scelte. Ad esempio un breve intervallo temporale tra le acquisizioni sarebbe preferibile per scopi cartografici così da ridurre le ambiguità legate a cambiamenti dell'area di interesse; un periodo più lungo è indicato se l'obiettivo dello studio è proprio l'individuazione di cambiamenti antropici. In ogni caso la giusta distanza temporale tra le immagini è strettamente legata al fenomeno per osservare il quale il prodotto viene generato.

Una prima indicazione a riguardo l'interpretazione di questo prodotto è riassunta in figura 2.9 in cui, in linea generale, i colori sono associati alle loro relative chiavi di lettura. Solo per fare un esempio il rosso e il verde indicano cambiamenti tra le ampiezze di due acquisizioni e il blu, invece, un'alta coerenza, quindi stabilità della zona e nessun cambiamento. Solo rosso o solo verde, pertanto, non possono essere presenti contemporaneamente al blu in una stessa area in quanto hanno significati associati opposti, per questo motivo il magenta, combinazione di rosso e blu, e il ciano, unione tra verde e blu, non sono colori interpretabili alla luce dell'evoluzione della scena e non è prevista la loro presenza in una MTC. Alcune chiavi generali di interpretazione di questo prodotto, però legate ad una immagine di esempio, che associano feature e colori riconosciuti nell'immagine ad un significato più pratico

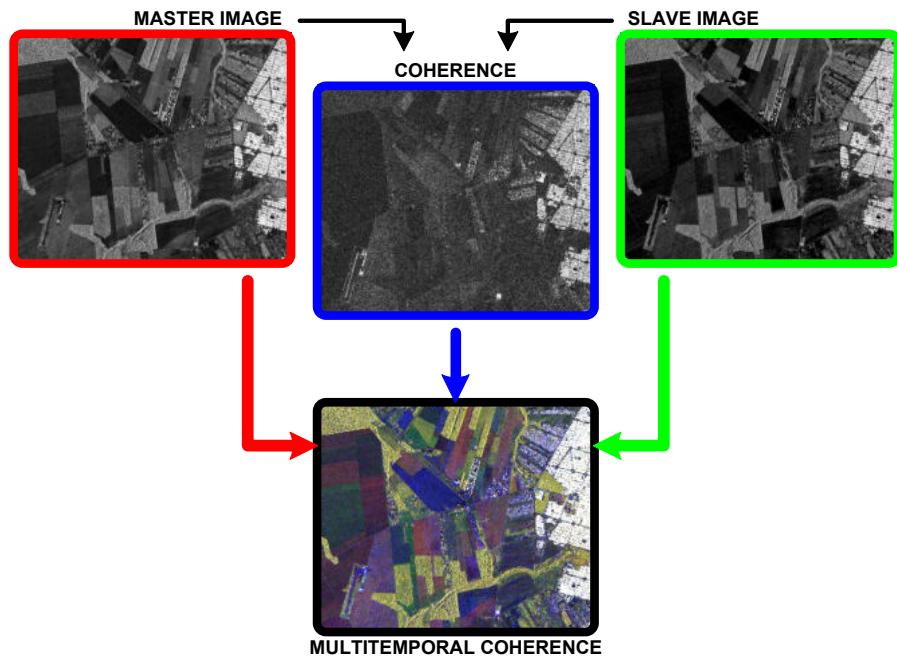


FIGURA 2.8: Generazione di una MTC, Date: 19 Set 2011 (R), 5 ott 2008 (G)

e concreto, sono descritte in tabella 2.1.

L'immagine Multi Coherence (MC), invece, è il prodotto di cui si è fatto un uso massiccio per il lavoro presentato e si ottiene componendo nei tre canali RGB solo immagini di coerenza. Come descritto meglio nel capitolo successivo, questo prodotto è a tutti gli effetti interpretabile come una immagine Multi Temporal (MT) della coerenza, una serie temporale di mappe di coerenze

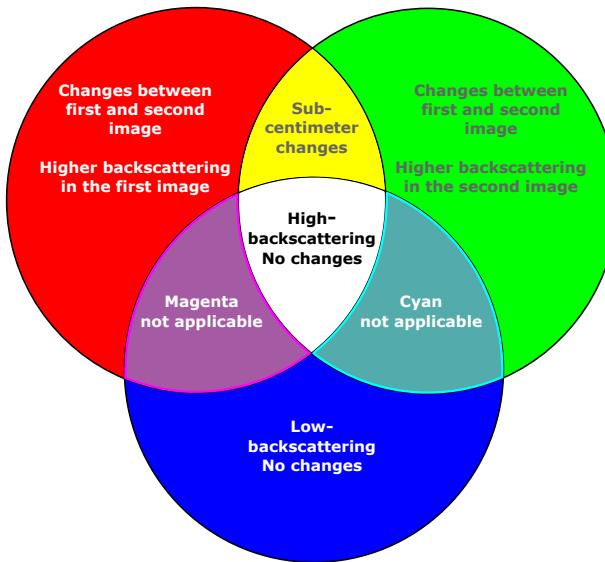


FIGURA 2.9: Combinazioni dei colori in una MTC

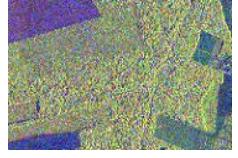
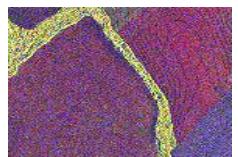
Master Amplitude	Slave Amplitude	Coherence	Color	Example	Interpretation
High	High	Low	Yellow		<ul style="list-style-type: none"> • natural vegetation (e.g. grass) • trees (identified by texture)
High	High	High	White		<ul style="list-style-type: none"> • building (corners) • railways / power lines • • infrastructures • very rough bare soil • flat/rough bare soil • sealed flat surfaces (roads, flat rooftops, airport runway)
Low/medium	Low/medium	High	Dark/light blue		<ul style="list-style-type: none"> • fast growing vegetation (agriculture) • changes in soil roughness • changes in soil humidity • changes in soil roughness • changes in soil humidity • harvesting of cultures
Low	High	Low	Green		<ul style="list-style-type: none"> • water bodies
High/medium	Low	Low	Red		
Low	Low	Low	Dark gray/black		

TABELLA 2.1: Chiavi di interpretazione di una MTC

Capitolo 3

Monitoraggio di tracce nel deserto a 12h

In ambito intelligence e sicurezza è di cruciale importanza disporre di strumenti che consentano di avere informazioni per monitorare la situazione in una particolare zona, ad esempio interessata da una crisi, e che, ancora meglio, permettano un'aggiornamento a breve intervalli di tale conoscenza. Come accennato nei capitoli precedenti, COSMO-SkyMed da un lato fornisce immagini satellitari fino ad una risoluzione di $1 \times 1 \text{ m}^2$ per pixel che consentono una analisi dei dettagli ad un livello molto spinto¹, e dall'altro è studiato per fornire quattro immagini interferometriche, di una stessa area e con la stessa geometria di acquisizione, ogni sedici giorni. Si intuisce, però, che se si decide di rinunciare al requisito di interferometria si può sfruttare a pieno la capacità di acquisizione della costellazione. Infatti, fissata l'area di interesse (AOI), i satelliti riescono ad acquisire su di essa, nel peggior caso, fino a quattro immagini al giorno con l'inconveniente, però, di non conservare gli stessi parametri di acquisizione.

In figura 3.1 sono riportate solo le opportunità di aquisizione con passo Right-Descending (RD) su una ben determinata AOI, sottoraggruppate con colori diversi per distinguere i differenti dataset interferometrici. La possibilità di acquisire mediamente più di un'immagine al giorno, evidente nella stessa figura 3.1, aumenta sensibilmente se si tengono presenti le limitazioni derivanti dall'aver rappresentato solo le immagini telerilevabili con passaggio RD².

Le caratteristiche orbitali della costellazione COSMO-SkyMed, insieme a quelle del sensore SAR, rendono quindi, almeno potenzialmente, questo sistema un ottimo strumento di monitoraggio di cambiamenti o di controllo di attività in zone che necessitano di questi servizi. Queste stesse peculiarità, inoltre, lasciano intravedere la possibilità di diminuire la durata dell'intervallo su cui viene effettuata l'analisi al di sotto delle 24 ore.

In questo capitolo si descriverà una metodologia che permette l'individuazione di attività, nello specifico la percorrenza o meno di alcune strade, con una unità temporale di monitoraggio che diminuisce fino ad un limite di 12 ore.

¹Per rendere l'idea con alcuni esempi: sono riconoscibili singoli edifici e strade, con opportuni processamenti è anche possibile identificare veicoli in movimento ecc.

²Ci sono, infatti, anche RA, LA e LD.

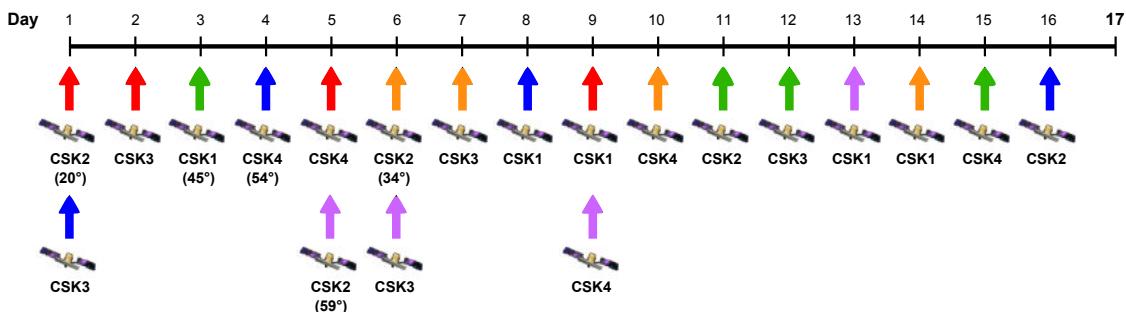


FIGURA 3.1: Opportunità di rivisite non interferometriche RD della costellazione COSMO-SkyMed

3.1 Concetti generali

In un'area naturale scarsamente vegetata, ad esempio il deserto o le zone ghiacciate, è possibile seguire non solo percorsi segnalati e abituali ma anche liberi e decisi al momento da chi li sta percorrendo. Un'immagine di ampiezza RADAR è in grado di mostrare la presenza di percorsi abituali; la mappa di coerenza, invece, ci informa sulle piste effettivamente percorse nel periodo analizzato e, pertanto, risulta efficace nello riconoscimento di tracce non comuni, anomale. Ancora meglio, l'intento che ci si propone in questo lavoro è quello di riuscire ad assegnare, alle tracce degli spostamenti di veicoli riconosciute, l'intervallo di tempo più piccolo possibile in cui sono state percorse. Per fare questo si utilizzano solo mappe di coerenza, poiché l'analisi è focalizzata sul distinguere zone in cui c'è stata attività da zone in cui non è accaduto nulla, piuttosto che sul distinguere particolari feature presenti nell'immagine o cambiamenti a lungo termine.

Alla base del funzionamento del metodo proposto c'è l'idea che ogni attività intercorsa tra due immagini sarà identificata, sulla zona in cui è avvenuta, da una perdita di coerenza dovuta ai cambiamenti che l'attività avrà provocato.³ Chiaramente, tanto più la zona riesce a mantenere, in mancanza di eventi esterni, la propria intrinseca coerenza nel tempo, tanto più facile sarà notare le incoerenze legate ad attività avvenute sulla scena. A questo punto è utile descrivere come le caratteristiche delle immagini RADAR analizzate sono interpretate nel contesto specifico scelto e alla luce delle caratteristiche fisiche dell'area ripresa dal satellite.

Nello scenario analizzato, un'area desertica del Sahara, il terreno è arido e mediamente rugoso⁴ e caratterizzato dalla presenza di sabbia e dune. Il deserto roccioso risulta brillante in una immagine di ampiezza mentre la sabbia, attenuando molto il segnale, appare invece più scura. D'altro canto nella mappa di coerenza generata da due acquisizioni, sotto l'ipotesi che non avvengano cambiamenti naturali della zona tra le due date in cui le immagini sono acquisite, i valori risulteranno mediamente alti nelle aree corrispondenti al suolo arido e piuttosto bassi per le dune, sempre modificate dal vento e molto incoerenti a differenza delle zone più

³Bisogna sempre tener presente che il sensore è sensibile, al limite, a cambiamenti di dimensioni paragonabili a quella della lunghezza d'onda; nel caso di COSMO-SkyMed i minimi spostamenti riconoscibili sono pari a circa 2 cm.

⁴Sempre in funzione della lunghezza d'onda del sistema.

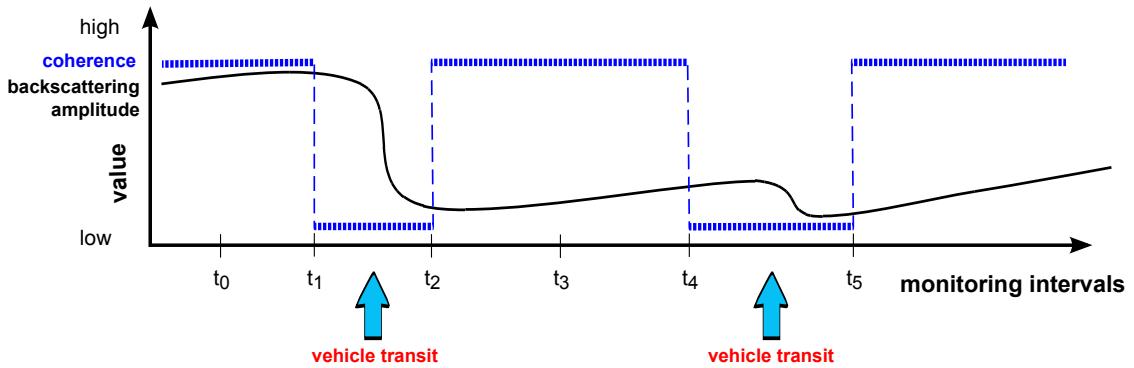


FIGURA 3.2: Andamento di ampiezza e coerenza in uno scenario con suolo arido in presenza di passaggio di veicoli

stabili che rimangono uguali a loro stesse molto più a lungo. Se nel periodo che intercorre tra le due acquisizioni avviene il passaggio di un veicolo, questo provoca un cambiamento nella seconda immagine con effetti differenti a seconda del suolo su cui è avvenuto:

suolo nudo Il passaggio di un veicolo rende la superficie osservata più liscia provocando in questo modo una diminuzione del backscattering. Il risultato nell’immagine di ampiezza è una linea leggermente più scura. La linea scura da questo momento in poi risulterà visibile nelle acquisizioni successive anche in mancanza di ulteriori passaggi di veicoli e fino a quando la superficie perderà compattezza e tornerà ad essere maggiormente rugosa. Queste considerazioni restano invariate per un’analisi su terreni ghiacciati;

sabbia Un veicolo che avanza sulla sabbia ne compatta la superficie riducendo l’assorbimento del segnale, aumentando quindi il ritorno misurato dal sensore SAR e risultando come un aumento della brillantezza dell’immagine.

Il paragone tra l’andamento dell’ampiezza e quello della coerenza in corrispondenza del passaggio di veicoli nello scenario considerato è mostrato in figura 3.2. La cosa interessante da notare è che l’effetto del passaggio di un veicolo nella coerenza è indipendente dal tipo di suolo su cui avviene se questo risulta anche solo minimamente coerente, semplificando, così, l’approccio al problema e il riconoscimento delle piste in questa tipologia di scenario. Infatti, in entrambi i casi, sia su suolo molto coerente che su superfici meno brillanti, la mappa di coerenza subisce una netta diminuzione in corrispondenza delle pista percorsa. Anche per questo motivo si è ritenuto più utile e conveniente sfruttare l’immagine di coerenza, piuttosto che le singole immagini acquisite, per realizzare lo studio presentato in questo lavoro.

In figura 3.3 è riportato un ritaglio di una immagine di coerenza, ricavata da acquisizioni sul deserto del Sahara temporalmente distanti 4 giorni, in cui è evidente come alcune tracce (lineari) ed alcune dune (a chiazze), poiché presentano una più bassa coerenza, sono in risalto sullo sfondo molto coerente della superficie rocciosa desertica.



FIGURA 3.3: Esempio di immagine di coerenza nel deserto, Date: 12-16 Gen 2012, Incidence-Angle: 40.83° , Look direction and Pass: Left Descending, Polarization: HH

3.2 Monitoraggio semplice

Un primo approccio per assegnare ad ogni traccia l'intervallo di tempo in cui è stata percorsa è del tipo *time series*. Presa una sequenza di immagini interferometriche, si processano a coppie successive in modo da ottenere un'immagine di coerenza per ogni coppia. Con questa serie di coerenze successive è possibile monitorare l'attività nella zona interessata con divisione degli intervalli temporali definita dalle date di acquisizione delle immagini.

La figura 3.4 schematizza l'approccio appena descritto con tre ritagli di coerenza di esempio. Le tracce identificate nella prima immagine saranno avvenute tra il 16 e il 17 Gennaio 2012, quelle presenti nella seconda saranno state percorse tra il 17 ed il 20 e le piste ricavate dall'ultima coerenza, invece, tra il 20 e il 24 dello stesso mese. I tre intervalli a cui è possibile assegnare la percorrenza delle strade hanno durata differente e, come anticipato, specificata dalle date singole acquisizioni. Tale durata, quindi, è variabile e al limite può scendere fino a 24 ore, durata che coincide con il minimo tempo di rivisita interferometrico della costellazione COSMO-SkyMed.

In figura 3.5 le tracce estratte dai tre ritagli di coerenza sono state riportate sul software Google Earth in modo da sovrapporle all'immagine ottica della zona.⁵ Mentre da un lato alcune delle tracce riconosciute con il RADAR ricalcano le piste

⁵Le tracce estratte dal primo ritaglio, quindi percorse nel primo intervallo, sono in rosso, sono di colore verde quelle ricavate dalla seconda immagine di coerenza e in blu sono riportate le piste seguite nel terzo intervallo.

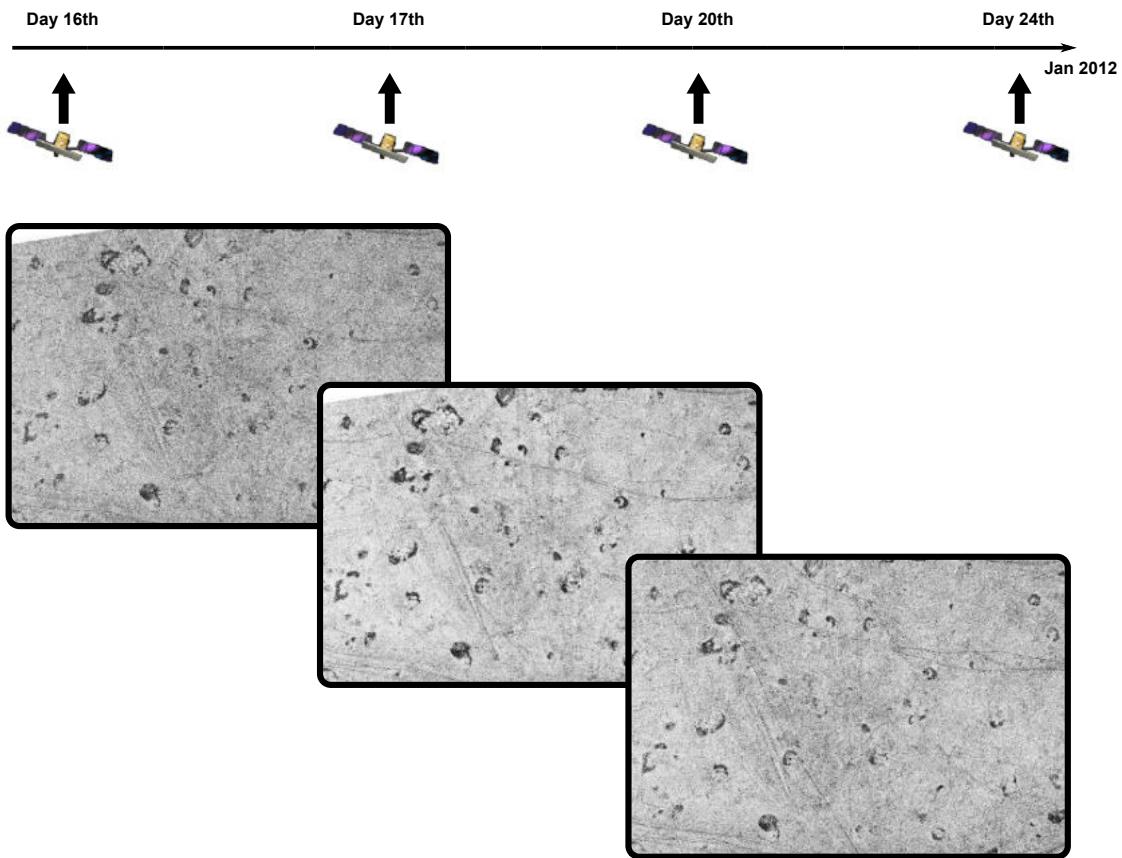


FIGURA 3.4: Approccio classico al riconoscimento delle tracce

visibili anche nell'immagine ottica, dall'altro alcune delle strade presenti nell'ottico non sono state rilevate con il SAR, il che non sta ad indicare che non sono visibili dallo spazio ma, piuttosto, che non sono state percorse nel periodo considerato. Esaminando le tracce trasversali risulta chiara, infine, l'utilità del satellite in banda X per esaminare quei tragitti che non seguono le strade principali evidenti nella immagine ottica.

3.3 Monitoraggio avanzato

Per stringere l'intervallo minimo di monitoraggio sotto le 24 ore è necessario utilizzare anche più immagini acquisite lo stesso giorno e con fasci di illuminazione diversi. In questo modo si ha a disposizione una serie di coerenze non più successive ma in qualche modo intersecate.

Se scelte opportunamente le date delle immagini, le coerenze che si ottengono possono essere associate ad intervalli di tempo accavallati. Tra gli aspetti positivi, oltre ad aver ottenuto dei sotto-intervalli di analisi ridotti, c'è anche da considerare che gli stessi mini intervalli di 12 ore sono stati ricavati da due coppie interferometriche ognuna con acquisizioni distanti anche fino a 16 giorni. Un schema semplificativo è riportato in figura 3.6. In questo esempio, da due coerenze ad otto giorni è stato possibile suddividere il periodo di analisi complessivo (8 giorni e 12 ore circa) in tre possibili intervalli di analisi: due della durata di 12 ore agli



FIGURA 3.5: Tracce identificate riportate su Google Earth

estremi del periodo (tra le 6 a.m. e le 6 p.m. sia del 13 che del 21 Gennaio) e uno centrale, più grande, di 7 giorni circa. Chiaramente, avendo a disposizione quattro satelliti e tempi di rivisita variabili per ogni coppia di satelliti, le combinazioni di possibili intersezioni degli intervalli coperti dalle mappe di coerenza sono numerose e differenti. In figura 3.7 è portato l'esempio di una diversa configurazione degli intervalli, ottenuto semplicemente sostituendo la seconda immagine di coerenza, in cui il periodo rappresentato nella seconda immagine è completamente incluso in quello relativo alla prima coerenza; anche in questo caso è possibile distinguere tre intervalli.

Con questo approccio è quindi possibile sia ottenere intervalli inferiori alle 24 ore sia, altrettanto utile, ricavare periodi di analisi inferiori al periodo coperto dalle immagini di coerenza prese singolarmente. È possibile suddividere ulteriormente il lasso di tempo sotto esame utilizzando una tripletta di immagini di coerenza al posto di una coppia come schematizzato in figura 3.8.

Per estrarre intervalli più piccoli rispetto alla singola coerenza bisogna, quindi, sovrapporre due o tre immagini di coerenza a formare una classica composizione RGB, cioè un'immagine a falsi colori in cui ogni banda associata ai colori fondamentali corrisponde ad una delle mappe di coerenza considerate. Inoltre, per associare i colori e le loro combinazioni alle tracce e rendere più evidente l'identificazione dell'intervalle di percorrenza, si deve lavorare su una matrice di coerenza modificata, cosiddetta *incoerenza*, la cui utilità è, appunto, invertire la scala dei valori di coerenza per avere le tracce chiare su sfondo scuro. Questa trasformazione dell'immagine di coerenza originale può avvenire principalmente in due modi:

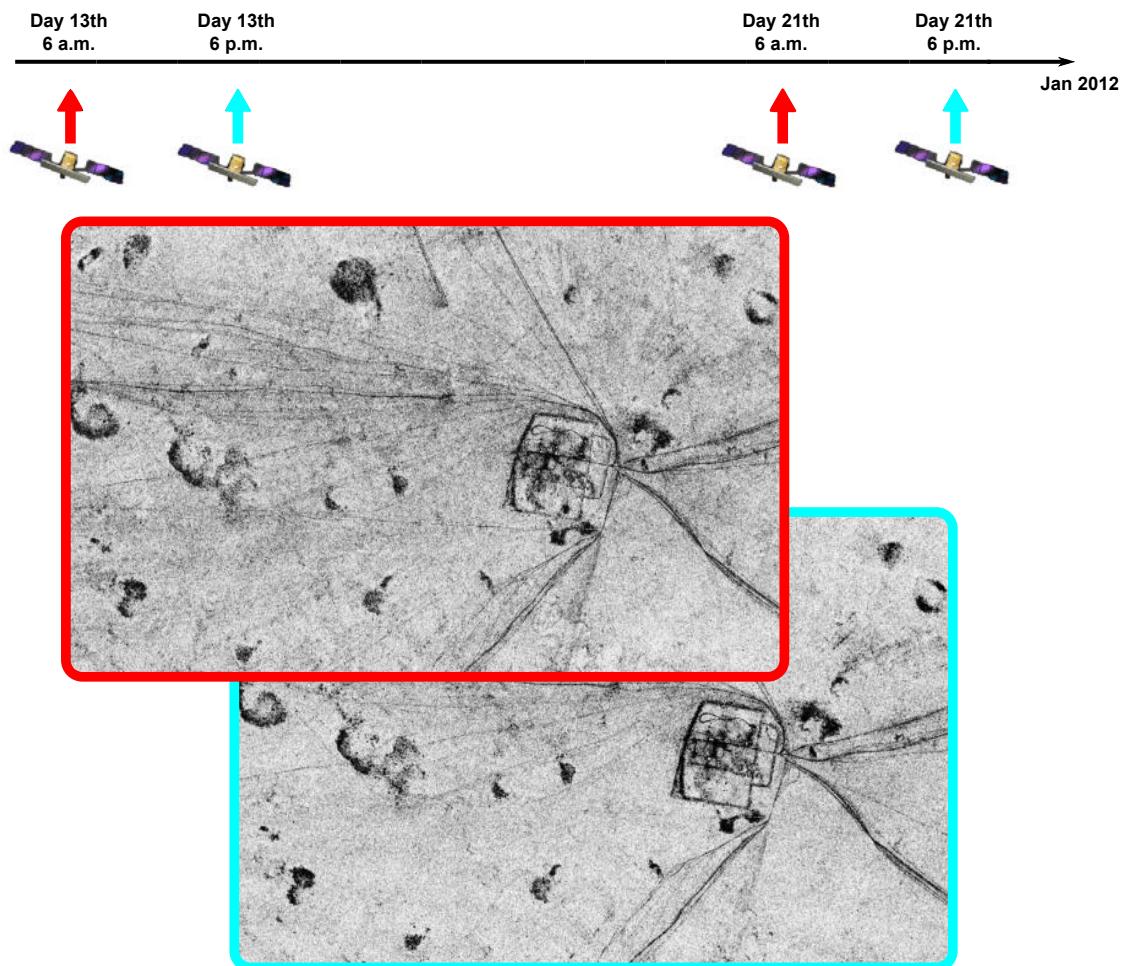


FIGURA 3.6: Approccio di utilizzo delle coerenze con intervalli intersecati

complemento a uno, con cui l’istogramma dell’immagine di coerenza viene semplicemente flippato rispetto al valor mediano delle ascisse in modo tale da avere valori alti per corrispondenti livelli di coerenza bassi e viceversa;

inversione, il cui risultato, oltre al ribaltamento dell’istogramma, fornisce un leggero stretching che nella trasformazione enfatizza maggiormente il contrasto sui valori più bassi rispetto a quelli più alti.⁶

Dalla figura 3.9 si notano gli effetti grafici della trasformazione da coerenza a *incoerenza* e dell’ulteriore stretching dell’immagine nel caso di *incoerenza* ottenuta tramite matrice inversa. Per questo stage si è lavorato su immagini di *incoerenza*, ottenute come matrici inverse delle matrice di coerenza, a valor medio nullo. Infatti, essendo le immagini raccolte da quattro sensori differenti e, in seguito, ottenute tramite processamento di coppie di acquisizioni a distanza temporale molto variabile, gli istogrammi coprono intervalli e scale differenti per ogni combinazione. Per rendere ad occhio comparabili le immagini è stato sottratto il valor medio ad ogni mappa di coerenza in maniera tale che le statistiche di tutte le immagini fossero, supponendole identicamente distribuite, centrate intorno ad un valor comune. In

⁶Ci si riferisce ai valori della matrice di coerenza.

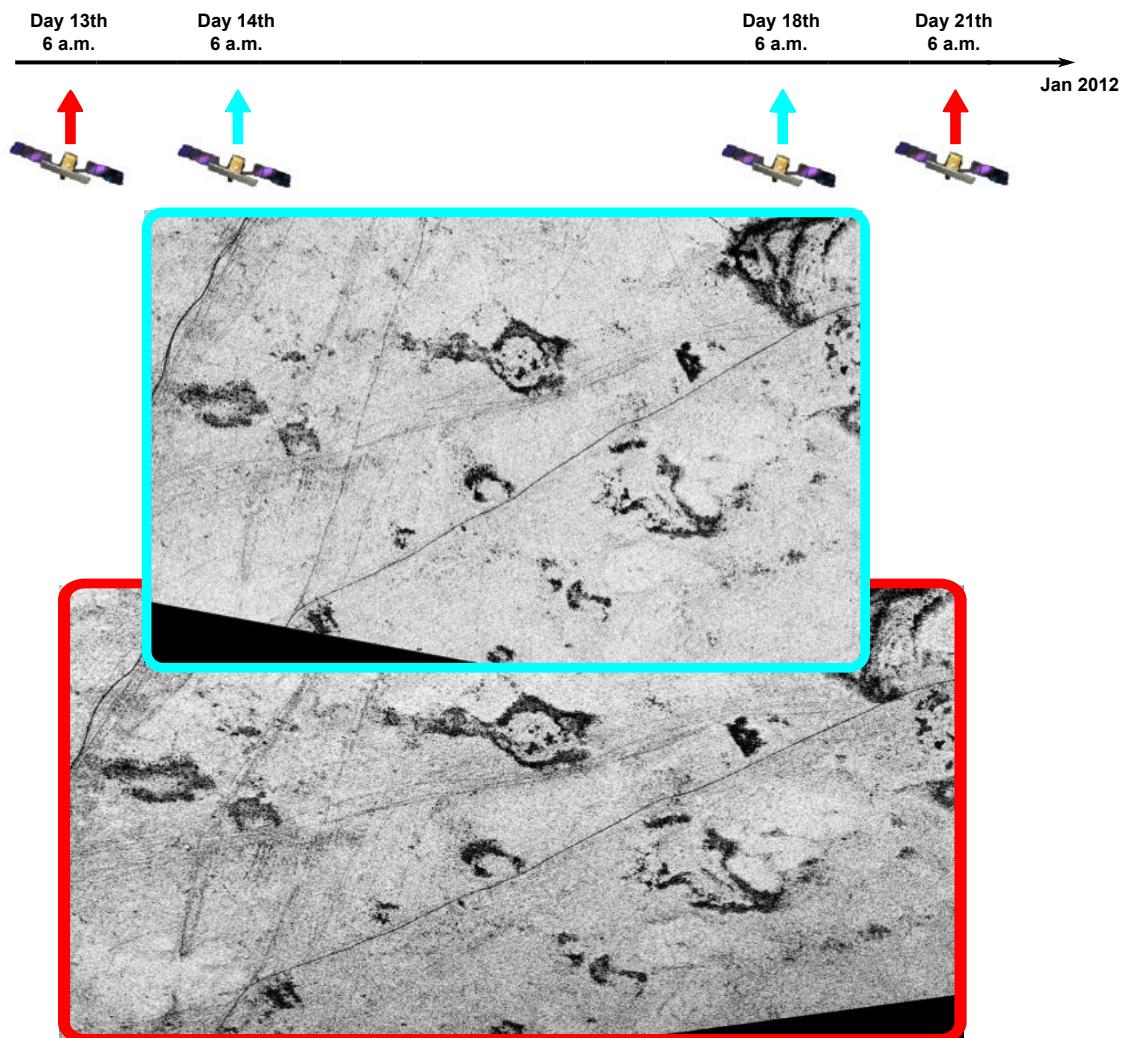


FIGURA 3.7: Esempio di utilizzo delle coerenze con intervallo incluso

ogni caso, nella pratica è comunque servito uno stretching manuale di volta in volta per il tuning finale delle composizioni RGB.

Un'immagine MC esemplificativa generata da acquisizioni COSMO-SkyMed Spotlight-2, ed un suo dettaglio, sono riportati rispettivamente nelle figure 3.10 e 3.11; qui di seguito è indicata l'associazione delle immagini di coerenza utilizzate alle bande:

Rosso 28 Maggio - 5 Giugno 2011;

Verde 3 Luglio - 6 Luglio 2011;

Blu 6 Luglio - 10 Luglio 2011.

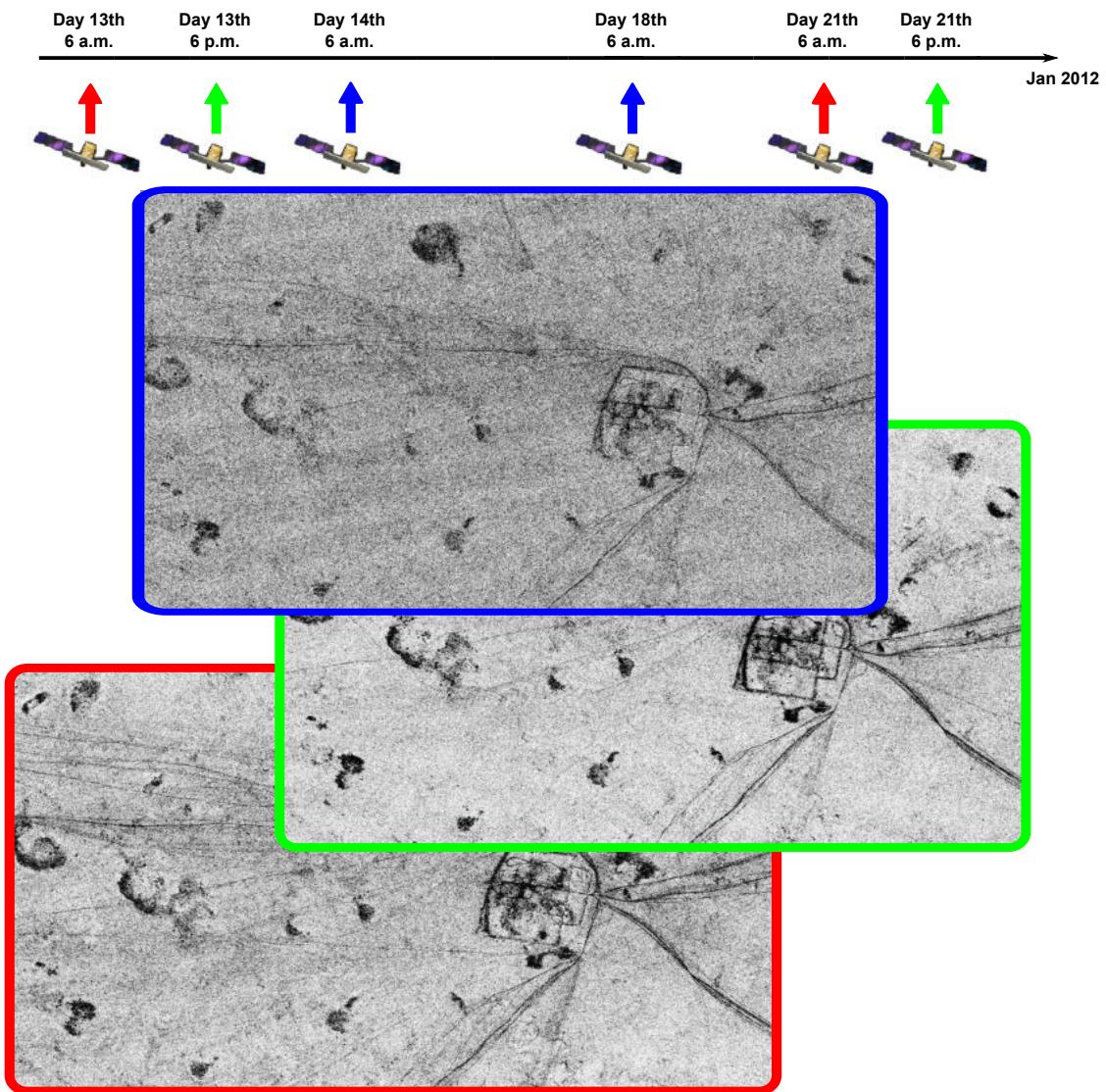


FIGURA 3.8: Esempio di utilizzo di una tripletta coerenze

3.4 Composizione RGB ai fini dell'analisi temporale

Quello che risulta subito evidente dalla 3.10, oltre al rilevamento dell'attività avvenuta nella zona, è la diversa colorazione che le piste associate assumono. Il ragionamento di base da seguire è sempre uguale ma alcuni dettagli cambiano in base alla composizione RGB utilizzata che, di volta in volta, è descritta da uno schema temporale differente. Proviamo ad analizzare questo esempio di figura 3.10 tenendo presente che i colori risultanti varieranno di conseguenza da immagine ad immagine. È utile ricordare che, lavorando con le cosiddette *incoerenze*, le perdite di coerenza risulteranno chiare e le zone molto stabili, invece, scure. Questo permette che le tracce risultino colorate e che si possa risalire al periodo in cui sono state percorse a seconda del colore che assumono. La zona in cui è concentrato il blu, ad esempio, si può dire sia stata interessata da cambiamenti avvenuti tra il 6

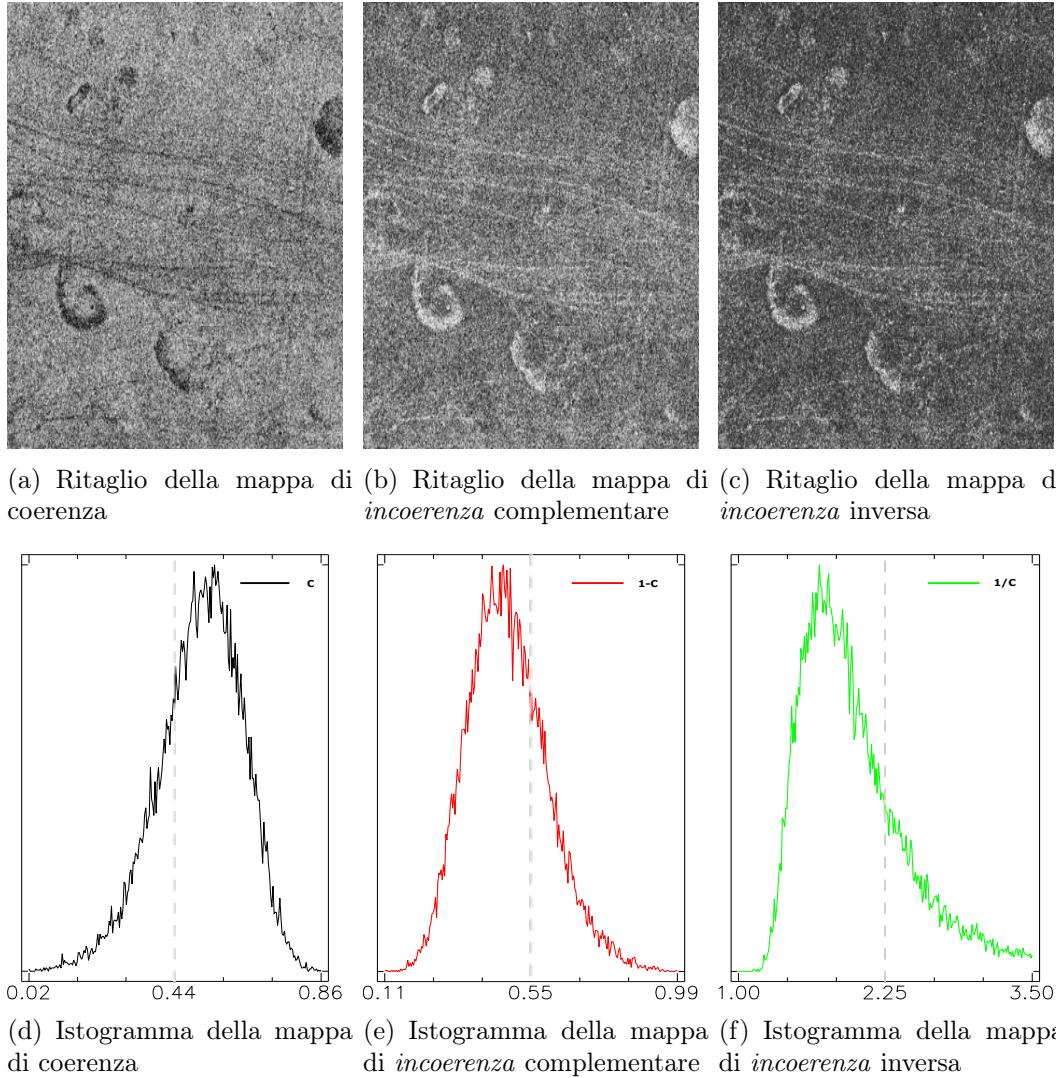


FIGURA 3.9: Ritagli di immagini di coerenza (a), incoerenza complementare (b) e incoerenza inversa (c) e istogrammi completi delle relative matrici di origine(d,e,f)

Luglio 2011 e il 10 Luglio 2011 proprio perchè la perdita di coerenza, risultando di colore blu, si è verificata nella mappa di coerenza associata al canale blu. Seguendo questo tipo di ragionamento è possibile riassumere l'analisi di un'immagine con uno schema del tipo in figura 3.12, in cui compaiono le date di acquisizione a scandire gli intervalli e, nell'ultima riga, l'analisi temporale conclusiva della scena sotto esame, in cui è riportata un'indicazione circa il colore che le tracce, se percorse nel periodo associato, devono assumere nell'immagine. Il grigio, che non si troverà nelle immagini, indica un periodo di tempo sul quale non si possiede nessuna informazione disponibile e, pertanto, non si può fare alcuna ipotesi. Questa schematizzazione risulta molto utile soprattutto in quello che abbiamo definito monitoraggio *avanzato*, cioè quando i periodi coperti dalle singole coerenze non sono disgiunti come nel caso precedente, ma sono almeno in parte sovrapposti. Un'immagine esempio di questo tipo è riportato in figura 3.14 composta da 3 mappe di coerenza composte come segue:

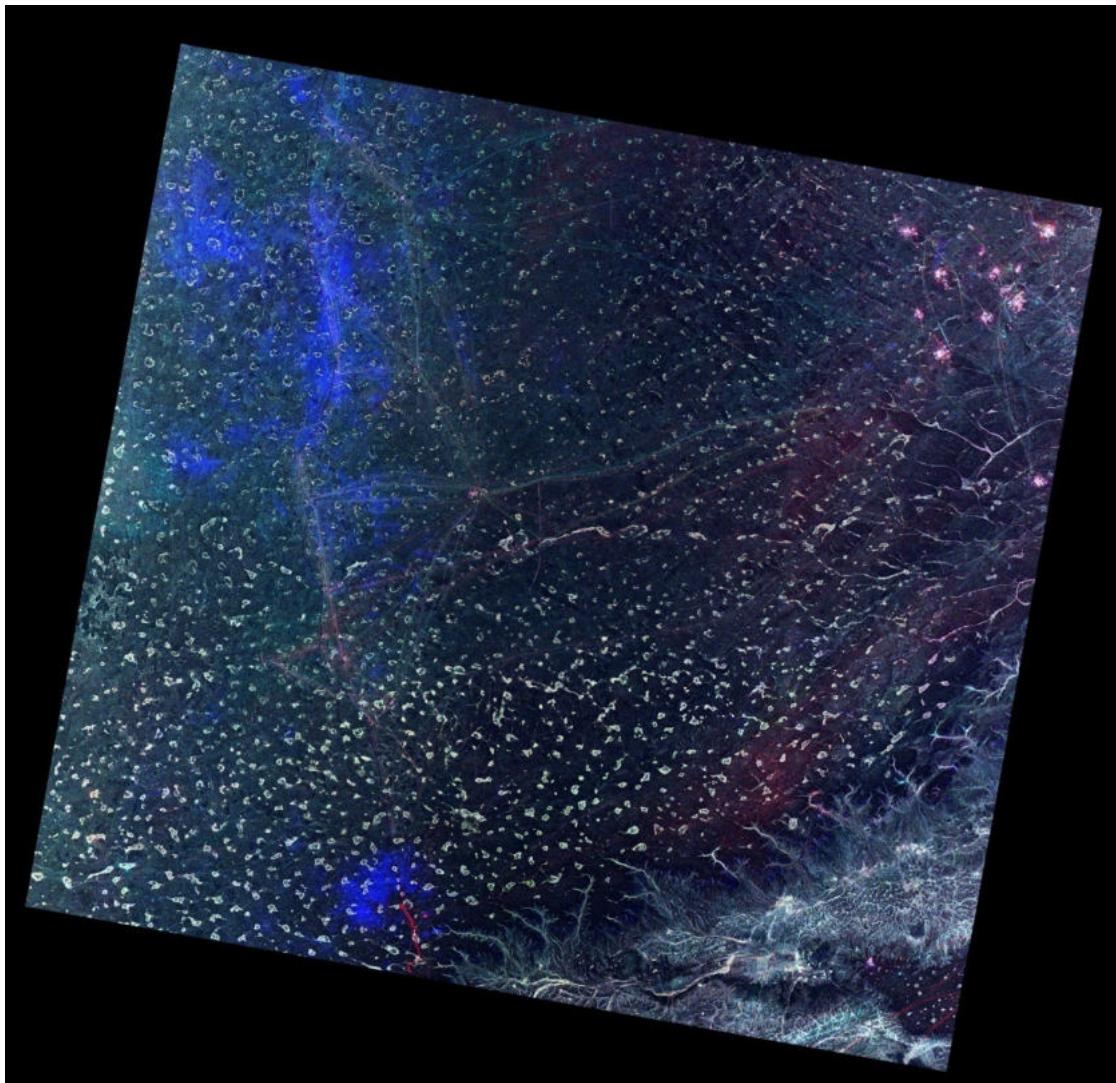


FIGURA 3.10: Immagine Multi Coherence, monitoraggio semplice

Rosso 20 Gennaio - 24 Gennaio 2012, ore 6 a.m.⁷ circa;

Verde 22 Gennaio - 25 Gennaio 2012, ore 6 a.m. circa;

Blu 22 Gennaio - 25 Gennaio 2012, ore 6 p.m. circa.

Lo schema temporale associato, così come è mostrato in figura 3.13, necessita di alcune precisazioni. I colori, grigio escluso, della *time/track analysis* indicano le possibili combinazioni cromatiche, non sempre tutte, che le tracce possono assumere nell'immagine. Alcuni colori non sono logicamente ammissibili, come in questo caso il verde,⁸ e se riscontrati nell'immagine non sono associabili a tracce ma indicano la presenza di fenomeni di altra natura dovuti, ad esempio, ad artefatti

⁷Tutti gli orari indicati in questo lavoro si riferiscono al fuso orario di riferimento Coordinated Universal Time (UTC).

⁸Se c'è una traccia nella seconda coerenza questa deve essere per forza presente, dato lo schema, o anche nella prima o anche nella seconda o in tutte e tre.

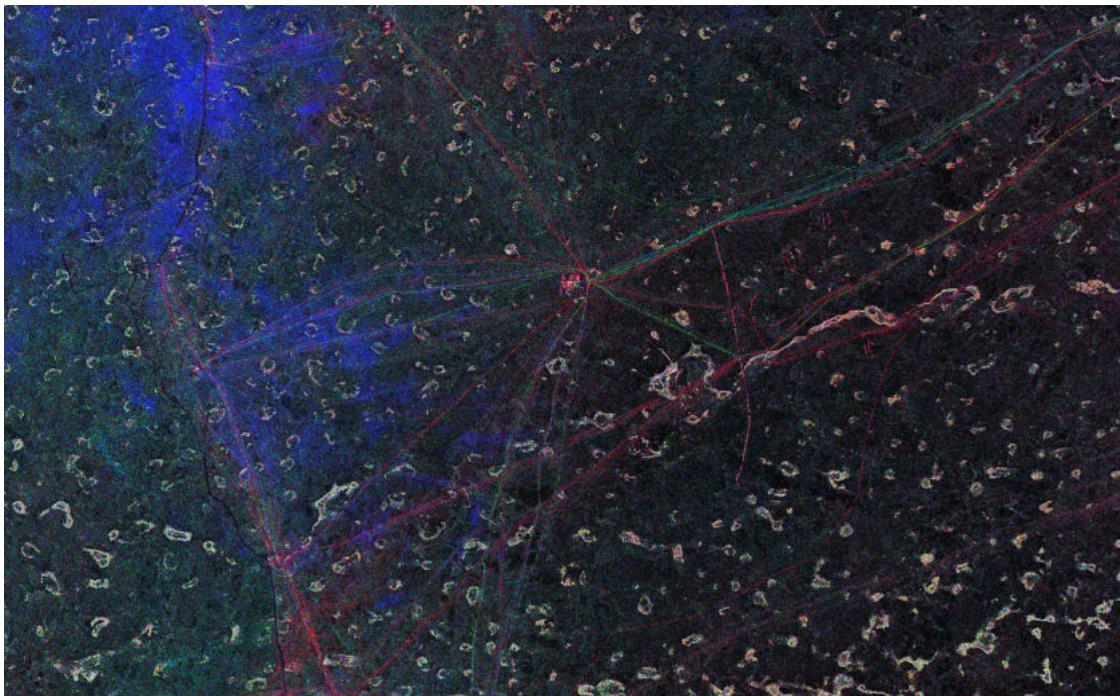


FIGURA 3.11: Dettaglio immagine Multi Coherence, monitoraggio semplice

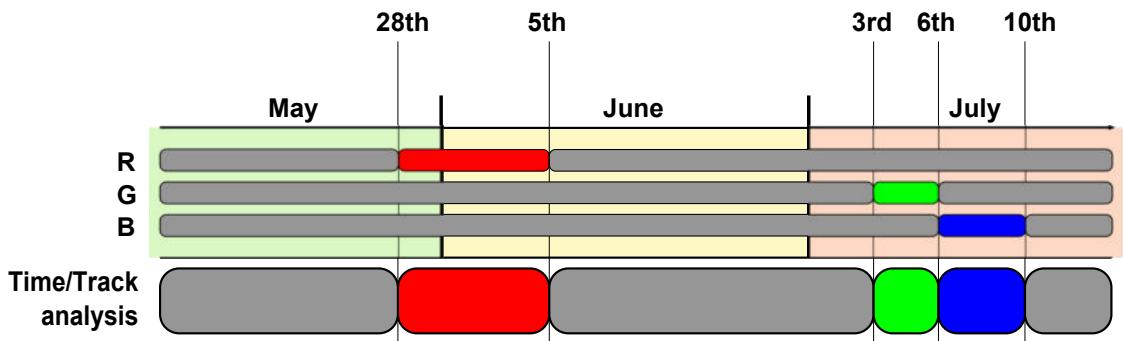


FIGURA 3.12: Schema temporale per immagini in time series

atmosferici o ad errori avvenuti durante la coregistrazione della coppia interferometrica utilizzata per generare la coerenza del canale verde. Per quanto riguarda le tracce riconosciute, bisogna fare una distinzione tra tracce a cui è possibile associare un intervallo certo e tracce ambigue, cioè a cui non è sempre attribuibile un intervallo di percorrenza. Per chiarire e comprendere meglio questa distinzione partiamo sempre dallo schema di figura 3.13.

Diciamo, innanzitutto, che all'interno di ogni singolo intervallo T_i non si distinguerà tra passaggio singolo o multiplo, ma si potrà solo dire se il passaggio c'è stato o meno. Le tracce, a cui nel caso analizzato è univocamente assegnabile il periodo in cui sono state percorse, sono quelle di colore rosso e quelle di colore blu ed esse saranno state percorse rispettivamente tra il 20 e il 22 Gennaio e tra le ore 6 e le ore 18 del 25 Gennaio. Infatti, le tracce rosse, ad esempio, pur comparando nella immagine di coerenza tra il 20 e il 24 non potrebbero essere state percorse più tardi delle ore 6 del 22 Gennaio poiché, in questo caso, dovrebbero comparire anche

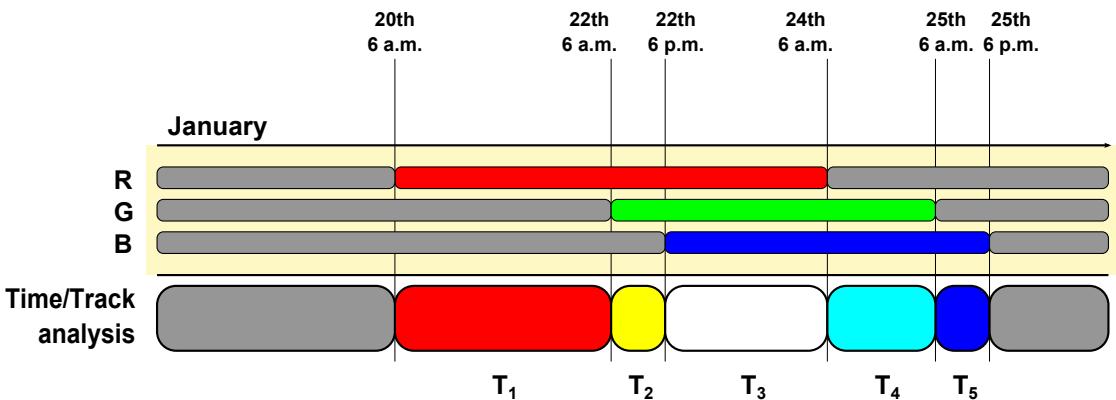


FIGURA 3.13: Schema temporale per coerenze sovrapposte

nella mappa di coerenza nel canale verde e risultare così di colore giallo o, addirittura, bianche se presenti anche nella coerenza del canale blu cioè percorse oltre le 18 del 22 Gennaio. Con questo criterio, quindi, siamo sicuri di poter affermare che le tracce rosse sono da assegnare all'intervallo rosso della *Time/Track analysis* e, seguendo lo stesso ragionamento, che le tracce di colore blu sono state battute nell'intervallo di 12 ore del 25 Gennaio. La conclusione a cui si giunge seguendo questa logica è che sarà possibile assegnare un intervallo certo di percorrenza alle tracce che appariranno con i colori principali. Partendo da tre coerenze a 3 e a 4 giorni, si è riusciti, in questo modo, a ridurre gli intervalli di appartenenza a 2 giorni per le rosse e, al limite, a 12 ore per le blu.

Alla luce di questa metodologia, potrebbe essere facile estendere il ragionamento alle tracce di colori non principali e affermare che le tracce gialle siano state percorse tra le 6 e le 18 del 22 Gennaio, le bianche tra il 22 e il 24 Gennaio e le piste color ciano tra il 24 e il 25 dello stesso mese. In questo caso, però, l'approccio non risulterebbe corretto. Infatti, per le tracce di colori composti non sono sufficienti le tre immagini a disposizione per stabilire il lasso di tempo preciso in cui sono state percorse. Cerchiamo di capire perché: se qualcuno percorresse una strada tra il 20 e il 22 alle 6 e, successivamente la stessa strada fosse riutilizzata tra le 6 e le 18 sempre del 22, questa apparirebbe di colore giallo essendo presente sia nella prima che nella seconda coerenza. Seguendo il metodo visto in precedenza si dovrebbe assumere essere stata percorsa nell'intervallo indicato con il giallo nella riga di analisi, ma si commetterebbe un errore visto che abbiamo supposto essere stata battuta sia in quell'intervallo che in quello precedente. Il dubbio si potrebbe risolvere avendo a disposizione un'ulteriore mappa di coerenza il cui periodo copra l'intervallo tra il 20 e il 22 alle 6 senza sfociare nel periodo relativo alla coerenza verde. La presenza della strada anche in questa ulteriore coerenza starebbe ad indicare che la pista è stata percorsa in entrambi gli intervalli, al contrario la sua assenza assegnerebbe il passaggio per quella strada al solo intervallo di 12 ore del 22 Gennaio. Il discorso resta fondamentalmente invariato, in questo esempio, per le tracce di colore ciano.

Nella tabella 3.1 sono riportate, sempre per la configurazione sotto esame, alcune delle possibili combinazioni di passaggio e non passaggio (rispettivamente P e x) per i cinque intervalli ricavati e ad ognuna di esse è associato il colore con il

T₁	T₂	T₃	T₄	T₅	Colore traccia
x	x	x	x	x	Nero
P	x	x	x	x	Rosso
x	x	x	x	P	Blu
P	x	x	x	P	Magenta
x	P	x	x	x	Giallo
P	P	x	x	x	Giallo
x	x	x	P	x	Ciano
x	x	x	P	P	Ciano

TABELLA 3.1: Combinazioni che non danno origine al bianco per cinque intervalli

quale la traccia apparirebbe nella composizione RGB. Le altre 24 possibili combinazioni non elencate danno origine a tracce di colore bianco. In figura 3.15 sono mostrati due dettagli con tracce evidenti che assumono colorazioni differenti. Evidentemente, come risulta dalla tabella 3.1, alcuni colori indicano univocamente la combinazione di percorrenza associata (rosso, blu e magenta) e altri (giallo e ciano) necessitano, come affermato in precedenza, di un' ulteriore informazione affinchè si risolva l'ambiguità. Decidere delle tracce bianche, infine, risulta molto laborioso in quanto le combinazioni che possono dare origine a questo colore sono numerose e non è sempre possibile risalire con certezza all'unica che corrisponde realmente a ciò che è successo. Infatti, l'uso di ulteriori immagini di coerenza se da un lato può aiutare a risolvere l'ambiguità, dall'altro spesso introduce nuovi intervalli all'analisi aumentandone il numero e introducendo, pertanto, nuove possibili configurazioni da risolvere. Inoltre, l'unica informazione certa legata al bianco è che la strada è stata percorsa in almeno due intervalli mentre con il giallo ed il ciano si è sicuri che le strade corrispondenti sono state battute sicuramente nell'intervallo T_2 e T_4 rispettivamente e, solo da verificare, anche in T_1 e T_5 .

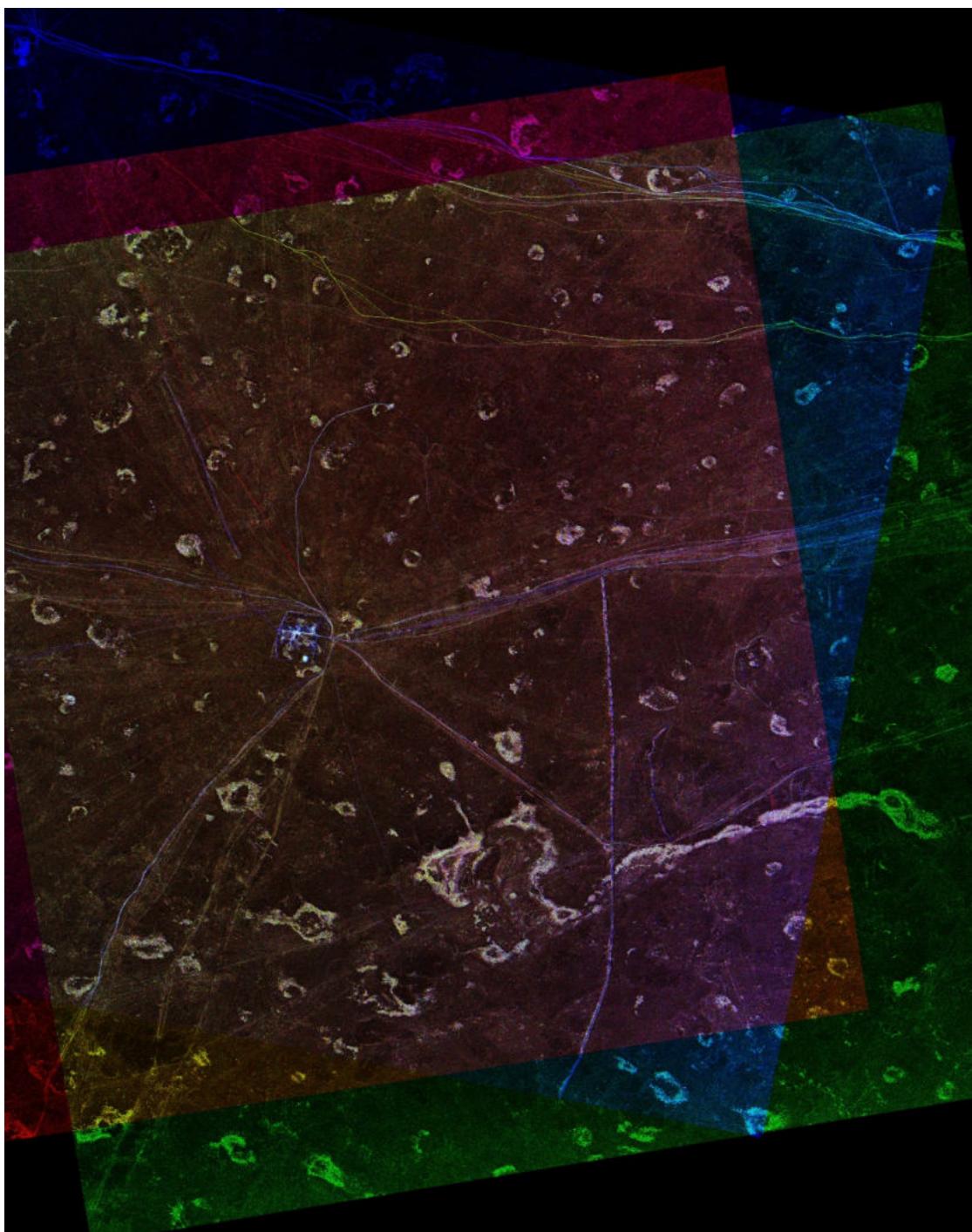
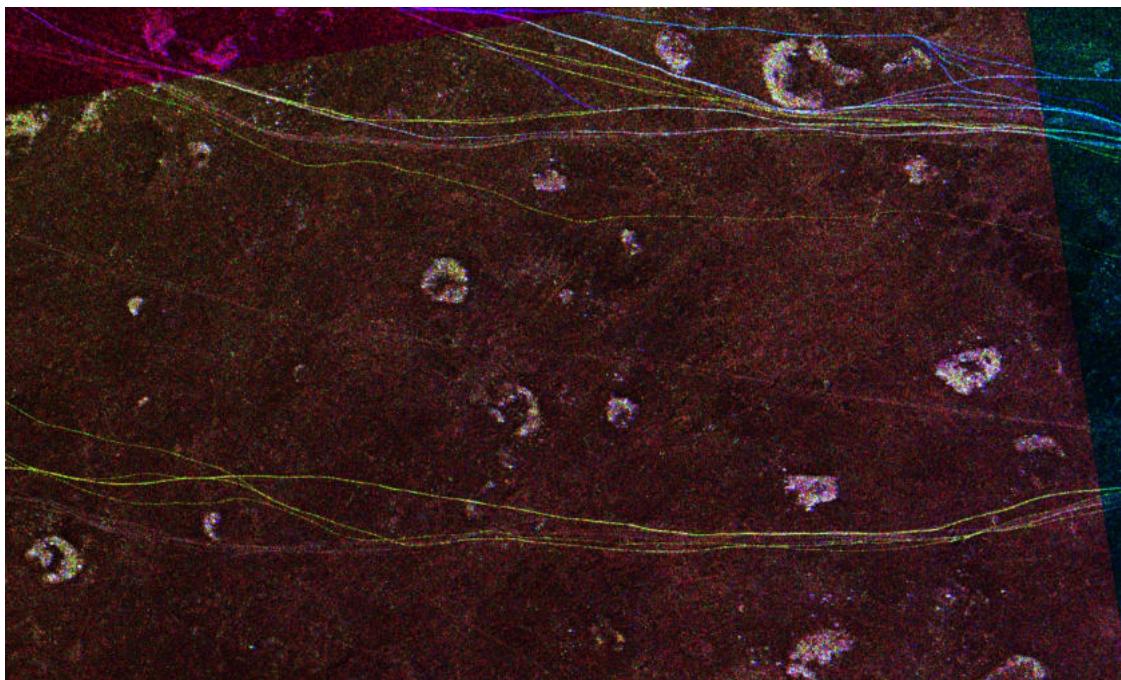
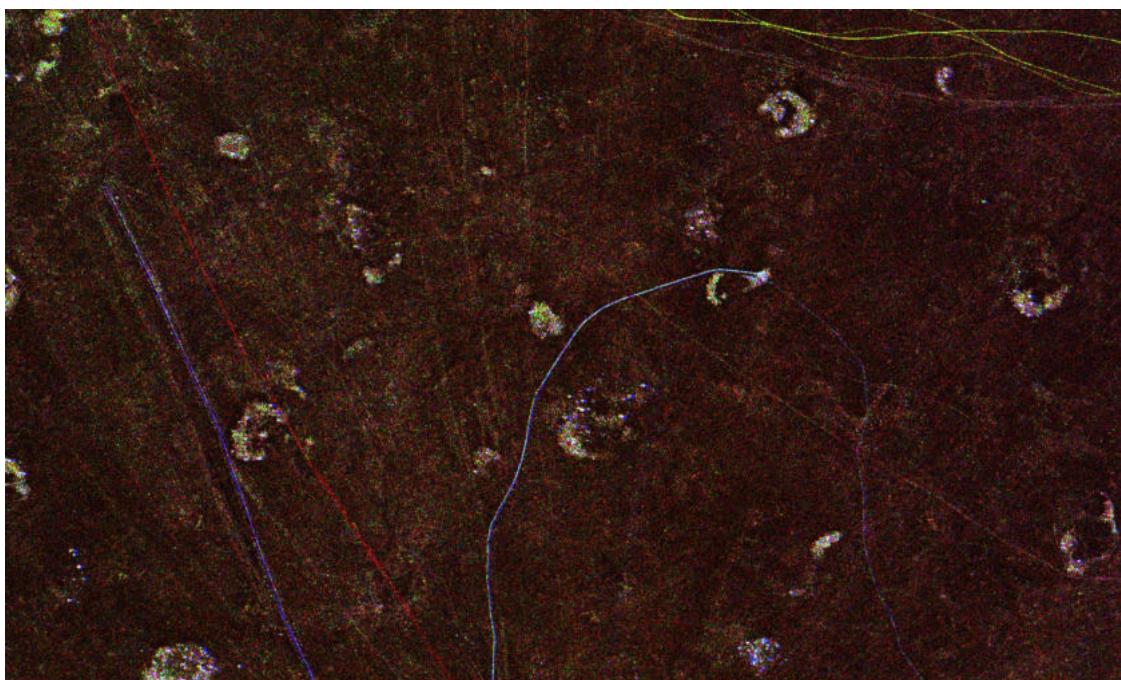


FIGURA 3.14: Immagine Multi Coherence, monitoraggio avanzato, *Spotlight-2*, Incidence-Angles: 57.93° (R), 52.31° (G), 24.55° (B), Look direction and Pass: Right Ascending(R-G), Right (B) Descending, Polarization: HH



(a) Tracce gialle, blu, ciano e bianche



(b) Tracce rosse e ciano

FIGURA 3.15: Tracce colorate in dettaglio

Capitolo 4

Tindouf, caso di studio

In questo capitolo verranno proposti e discussi alcuni esempi di una analisi effettuata su una zona di interesse in Africa settentrionale. Lo scopo è quello di verificare se, effettivamente, la tecnica proposta consenta un monitoraggio continuo, il cui aggiornamento temporale dell'informazione avvenga ogni dodici ore, e che copra un periodo di sedici giorni, la durata del ciclo orbitale, e quindi, data la periodicità del sistema, teoricamente possa essere indefinitivamente esteso nel tempo.



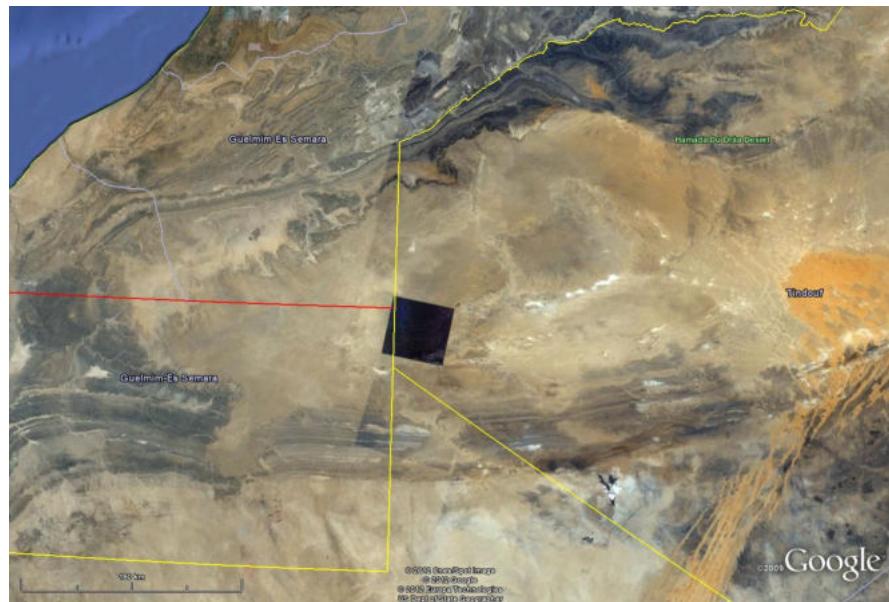
FIGURA 4.1: Tipico suolo della zona di Tindouf

4.1 Zona di interesse

La cosiddetta Area Of Interest (AOI) selezionata si trova, come mostrato in figura 4.2, nei pressi di Tindouf, una città algerina situata nella zona nord-occidentale del deserto del Sahara. La sua posizione è nevralgica e considerata di importanza strategica perché situata vicino a basi militari algerine e anche alle zone autonome della Repubblica Araba Sahrawi Democratica, il governo in esilio del Sahara Occidentale. Nella zona sono presenti campi per rifugiati Sahrawi, un popolo organizzato in gruppi tribali tradizionalmente residenti nel Sahara Occidentale, per il quale rivendica l'indipendenza dal Marocco e dalla Mauritania[7] e [8].



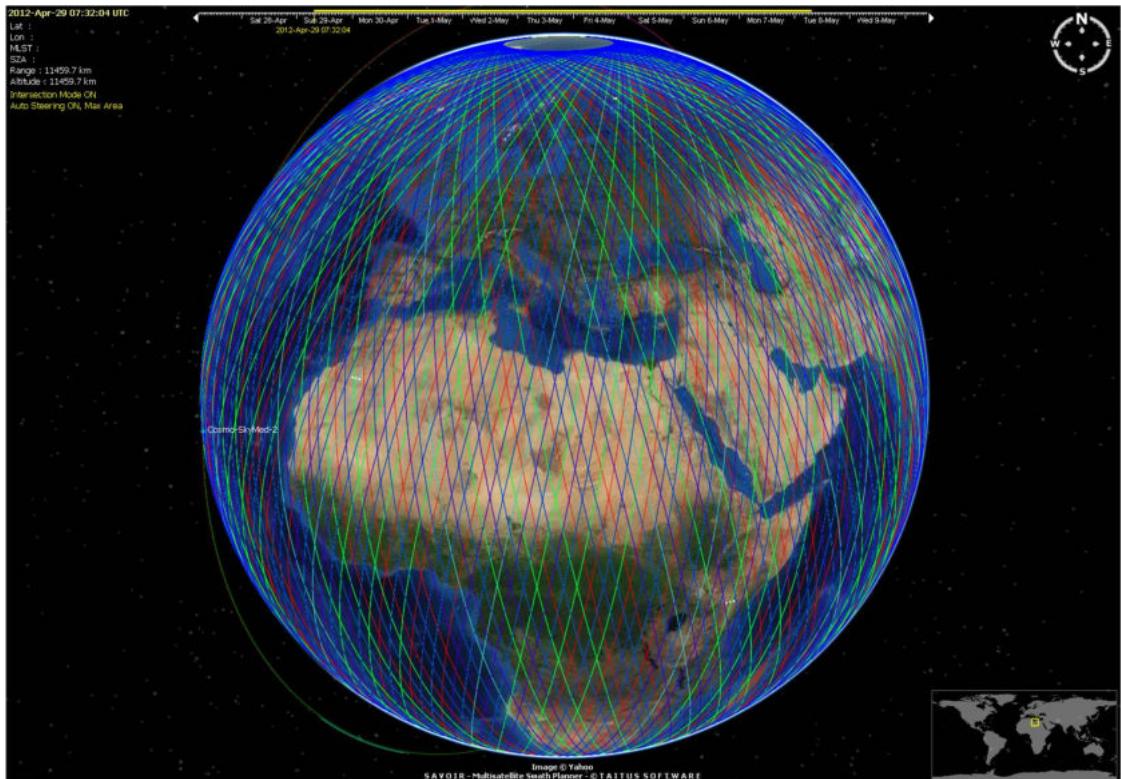
(a) Posizionamento nel Sahara



(b) Zoom

FIGURA 4.2: Localizzazione dell'area di interesse e confini politici

È una zona che si presta perfettamente al tipo di studio proposto sia perché interessante dal punto di vista del monitoraggio (è un crocevia strategico e molto frequentato quindi dovrebbero essere visibili numerose piste), ma soprattutto poiché presenta un terreno desertico altamente coerente, perfetto per l'identificazione delle tracce che per loro natura, come abbiamo visto nei capitoli precedenti, sono incoerenti. La foto in figura 4.1 mostra il suolo tipico della zona sahariana in cui è ubicata la città di Tindouf e, in particolare, i segni di alcune piste percorse da autoveicoli.



(a) Ground track

FIGURA 4.3: *Ground tracks dei satelliti COSMO-SkyMed*

4.2 Pianificazione

La pianificazione delle acquisizioni della costellazione è il primo step da effettuare, in modo da verificare la quantità di fasci disponibili sulla la AOI e capire la disposizione temporale delle immagini da selezionare per l'acquisizione. A questo scopo è stato utilizzato il software SaVoir[9], con cui si sono simulate le orbite della costellazione, e i relativi footprint delle immagini da acquisire, dal 9 al 25 Gennaio 2012. In figura 4.3 sono mostrate le tracce a terra delle orbite percorse dai satelliti nel periodo selezionato.

Per verificare le capacità del sistema su scala globale la simulazione è stata lanciata, oltre che sulla zona di interesse scelta, anche su altri punti del globo a diverse latitudini. Le tracce a terra, infatti, sono più fitte a grandi latitudini e più

rade all'equatore, quindi le possibilità di acquisizione vanno diminuendo con l'avvicinarsi alla latitudine dell'equatore. Le zone scelte per la verifica della copertura sono tre:

Kenya - tre zone del Kenya orientale, ad una latitudine prossima allo zero e distanziate in direzione longitudinale di circa 50 km l'una dall'altra a coprire l'intero swath tra una ground track e la successiva, figura 4.4(a);

Algeria - tre zone posizionate alla stessa latitudine di Tindouf, circa 30° , anche qui distanziate in direzione longitudinale di circa 50 km l'una dall'altra a coprire l'intero swath tra due orbite successive, figura 4.4(b);

Russia - qui, ad una latitudine di oltre 67° , due zone nella penisola di Murnmansk, distanziate di circa 30 km in longitudine, sono bastate a coprire l'intero swath tra due passaggi consecutivi, figura 4.4(c).

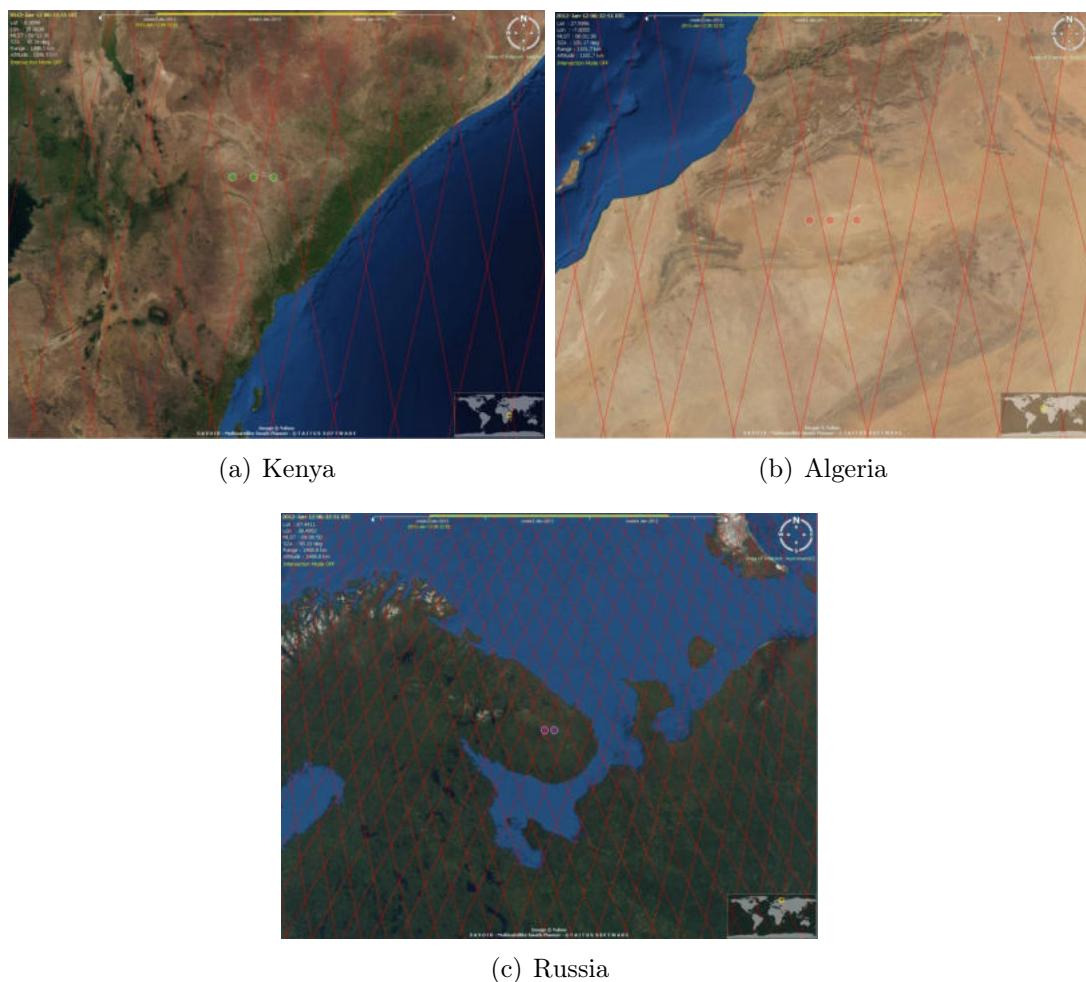


FIGURA 4.4: Zone per la simulazione di pianificazione

L'immagine 4.5 raffigura, nel periodo scelto, tutte le acquisizioni possibili e la loro estensione per le varie zone considerate, divise per colore in base al satellite che le ha acquisite. Come accennato in precedenza le possibilità di acquisizione, dette

Data Take Opportunity (DTO), aumentano sensibilmente all'aumentare della latitudine per l'infittirsi delle orbite rendendo così accessibile la stessa zona da orbite diverse. Bisogna sempre tener presente che le simulazioni di pianificazione hanno verificato le capacità teoriche della costellazioni che corrisponde alla condizione ottimale per pianificare. Nella realtà, invece, le operazioni di pianificazione delle acquisizioni devono sempre fare i conti con la possibilità concreta di acquisire spesso limitata dalla coda di operazioni già programmate o a priorità maggiore e dai vincoli tecnici legati, ad esempio, alla gestione dei movimenti delle apparecchiature.

Verificata la fattibilità del monitoraggio alle diverse latitudini¹, l'analisi vera e propria è avvenuta, in realtà, su immagini già acquisite, tra il 12 e il 27 Gennaio, sulla zona descritta all'inizio di questo capitolo. Si tratta di 31 immagini Spotlight-2, captate da 10 fasci di illuminazione diversi di orbite discendenti e ascendenti, tutti con direzione di looking *right* tranne uno. La disposizione temporale delle immagini utilizzate è riportata nella figura 4.6.

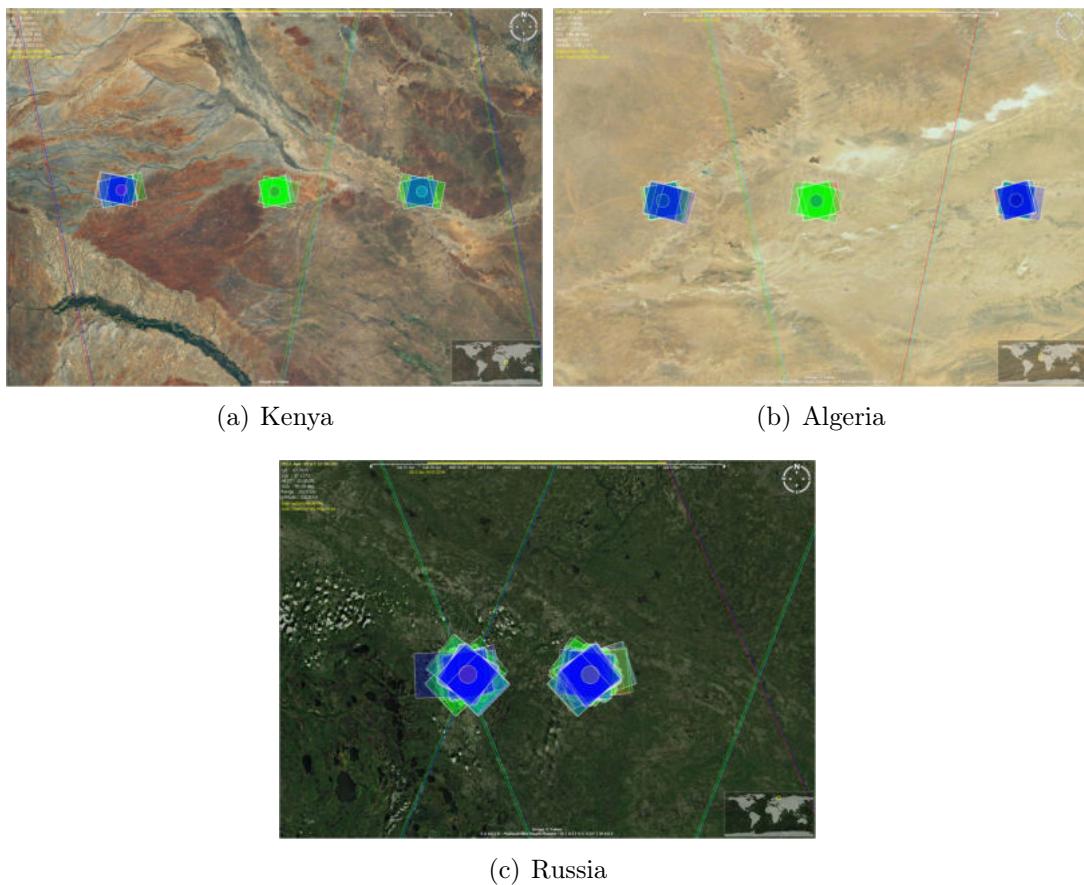


FIGURA 4.5: *Footprints delle acquisizioni*

Ogni pallino corrisponde ad una acquisizione; immagini raccolte con stessa geometria di acquisizione sono sistematate sulla stessa riga e colori diversi corrispondono,

¹Per ogni zona di test erano disponibili almeno due immagini ogni giorno, a circa dodici ore di distanza, per la quasi totalità del periodo considerato. Si vedano le tabelle delle DTO in Appendice A.

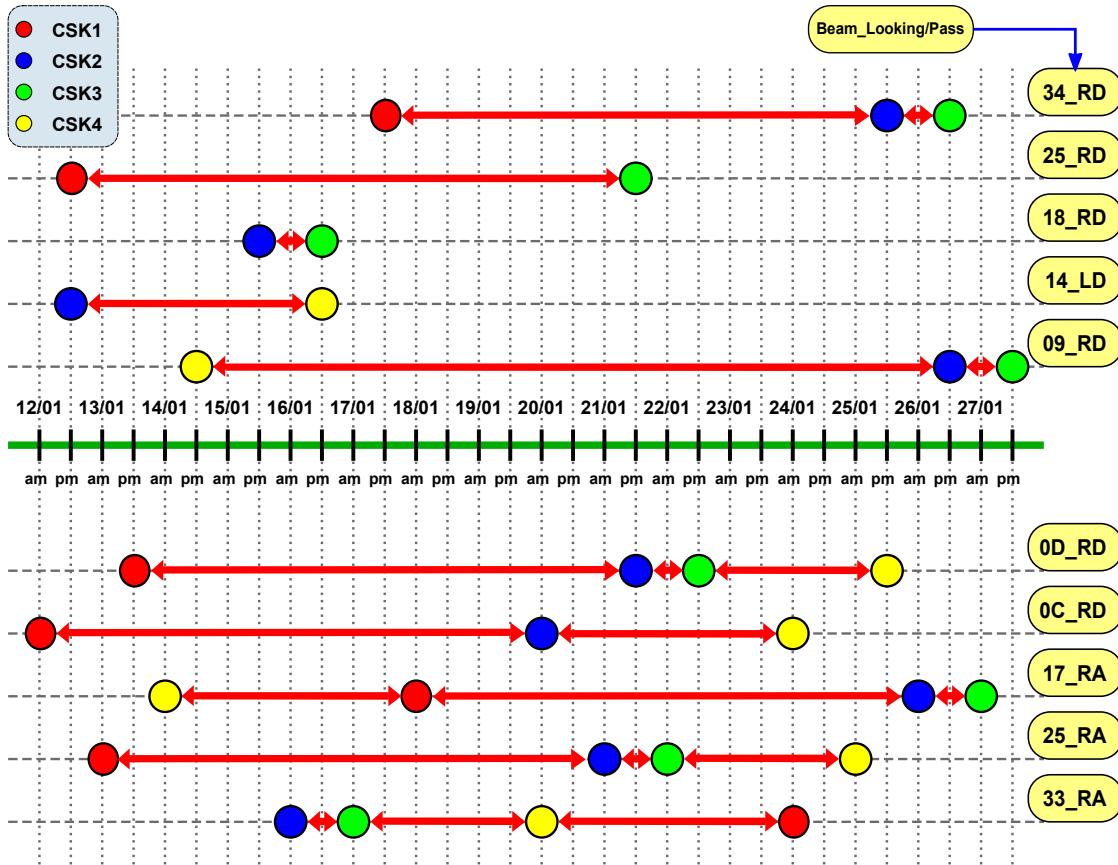


FIGURA 4.6: Schema delle acquisizioni

anche qui, ad acquisizioni effettuate da sensori diversi. Le coppie sottoposte a processamento interferometrico per generare le 21 mappe di coerenza utilizzate sono indicate con frecce rosse. Nell'immagine 4.7, è mostrata la divisione in intervalli di monitoraggio. Il periodo di 15 giorni è stato diviso in 23 intervalli di cui solo 5 sono risultati di durata superiore alle 12 ore con una durata massima di 48 ore.

4.3 Analisi temporale degli intervalli singoli

Con l'opportuna composizione RGB di due o più immagini, è possibile isolare i singoli intervalli partendo, ad esempio, dall'intervallo T_1 . Essendo gli intervalli individuati numerosi, ne analizzeremo solo alcuni che presentano delle peculiarità da evidenziare. In Appendice sono riportati tutti gli schemi temporali utilizzati che descrivono come le coerenze sono state utilizzate per comporre le immagini composte necessarie per questo tipo di analisi. Lo schema temporale in figura B.1 descrive come ricavare l'immagine da cui analizzare l'intervallo T_1 . Tutte le tracce che, nella composizione così ottenuta, risulteranno di colore rosso saranno state percorse in questo primo intervallo. In questo caso sono state utilizzate solo due immagini di coerenza, una delle quali ripetuta nei canali del verde e del blu. Può capitare, a volte, che nel costruire una RGB si riesca ad isolare più di un intervallo come nel caso schematizzato in figura B.3. Nell'immagine così ottenuta, ad esempio, tutte le piste rosse saranno state percorse in T_3 mentre quelle di color

ciano in T_{14} . Infatti, a differenza dell'immagine B.1, in cui il ciano è associato ad un periodo di tempo diviso in due intervalli T_{13} e T_{14} , sia il rosso che il ciano della figura B.3 coprono entrambi due intervalli singoli. Un ulteriore e particolare esempio di composizione RGB è riportato in B.10 in cui le tracce rosse avrebbero potuto essere state percorse sia nell'intervallo T_{12} che nell'intervallo T_{20} . Questa ambiguità è possibile ridurla se si ha a disposizione un'ulteriore composizione RGB in cui è isolato uno solo di quei due intervalli, ad esempio T_{20} , così da poter fare una prima distinzione tra le tracce sicuramente percorse solo in T_{12} , e cioè quelle che non compaiono nell'analisi del solo T_{20} , e quelle percorse sicuramente in T_{20} ma, è possibile, anche in T_{12} .

Proseguendo in questo modo, combinando immagini di coerenza opportunamente sfasate, è stato possibile realizzare 17 immagini RGB con le quali analizzare senza ambiguità 20 dei 23 intervalli fissati. Questo non significa che è sempre possibile distinguere tracce in ognuno degli intervalli ma, piuttosto, che quando dell'attività è presente nell'intervallo è possibile individuarla.

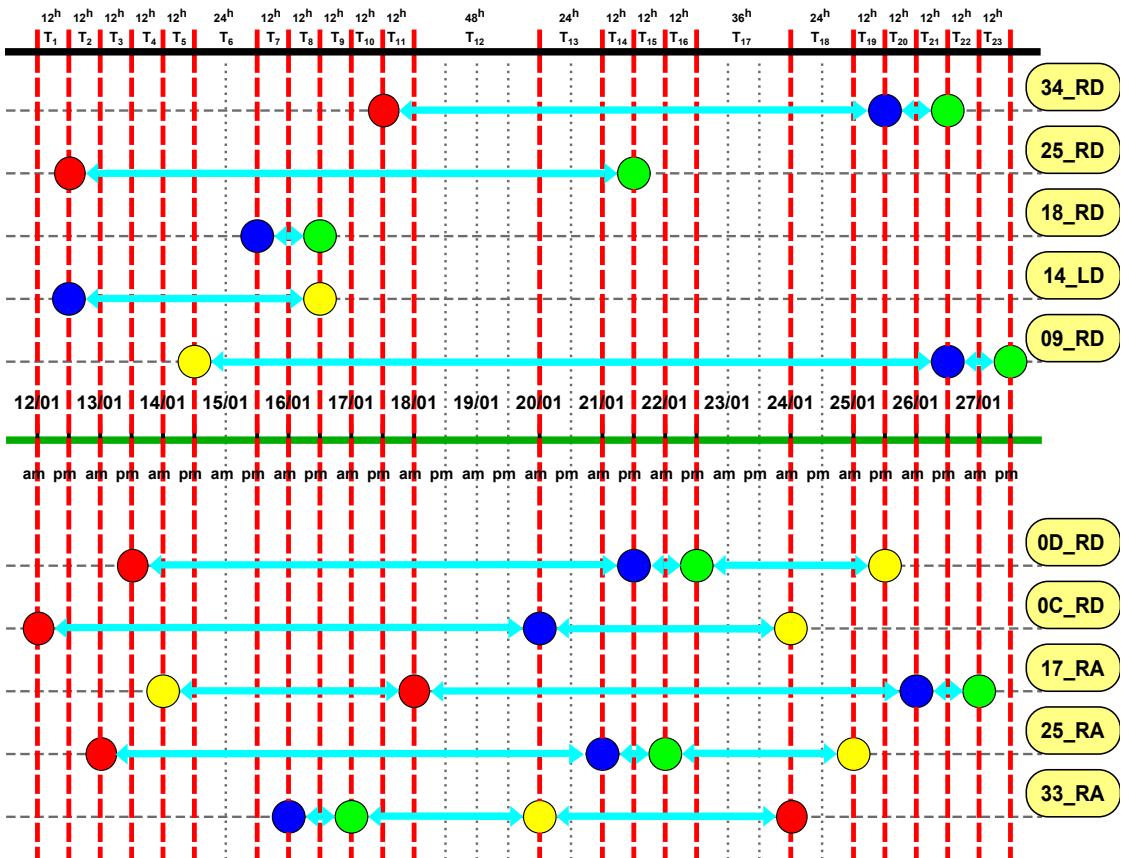


FIGURA 4.7: Divisione in intervalli e loro durata

4.3.1 Esempi di tracce individuate

In figura 4.8 è riportato un ritaglio dell'immagine RGB composta caricando nel canale del rosso la mappa di coerenza del periodo 22–25 Gennaio acquisite alle 6 p.m. e nei canali verde e blu quella calcolata da immagini prese gli stessi giorni

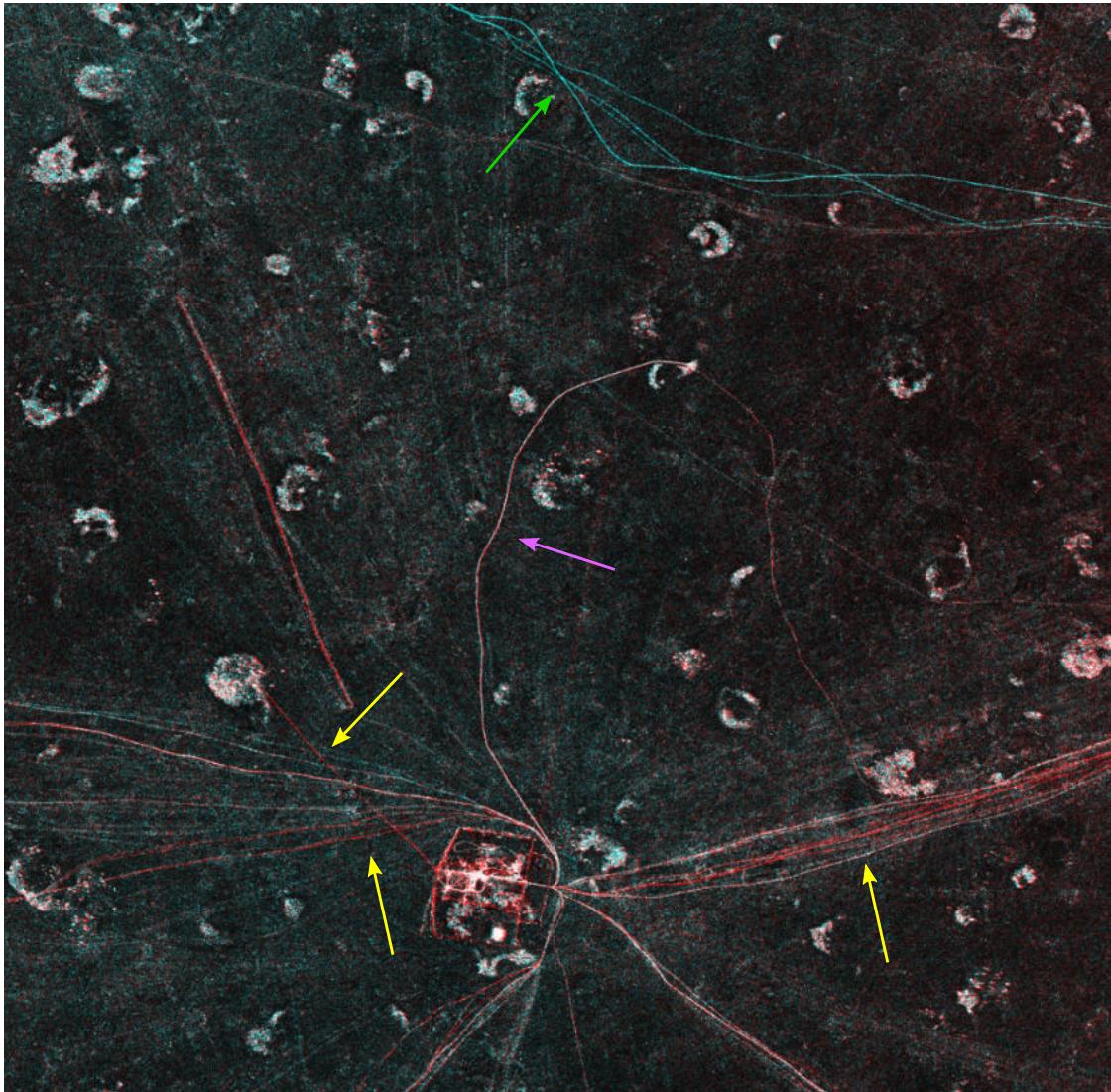


FIGURA 4.8: Esempi di tracce rosse, ciano e bianche

ma alle 6 di mattina, vedi figura B.13. Il metodo resta invariato: tutte le tracce di colore ciano, come quelle indicate dalla freccia verde, sono state percorse nell'intervallo T_{16} ; le tracce rosse, alcune delle quali indicate da frecce gialle, sono state percorse, invece, nell'intervallo T_{19} . Per quanto riguarda la traccia bianca, indicata dalla freccia rosa, non è possibile determinare con precisione quando è stata percorsa utilizzando solo questa immagine. Utilizzando però un'altra immagine RGB è possibile approfondire l'informazione. Infatti, scegliendo altre immagini di coerenza per comporre una RGB per l'analisi degli intervalli intermedi T_{17} e T_{18} si può notare come la traccia bianca sia stata percorsa proprio in T_{17} . Questo è evidente se, basandosi sullo schema temporale di figura B.14 che associa all'intervallo T_{17} il colore blu, si osserva la figura 4.9(b). Anche se molto rumorosa come immagine, si nota benissimo come la traccia bianca nella composizione di figura 4.9(a) risulti blu nella seconda composizione.

Utilizzando una immagine RGB in più è stato possibile disambiguare una pista di colore composto. Allo stesso modo è teoricamente possibile ridurre l'ambiguità

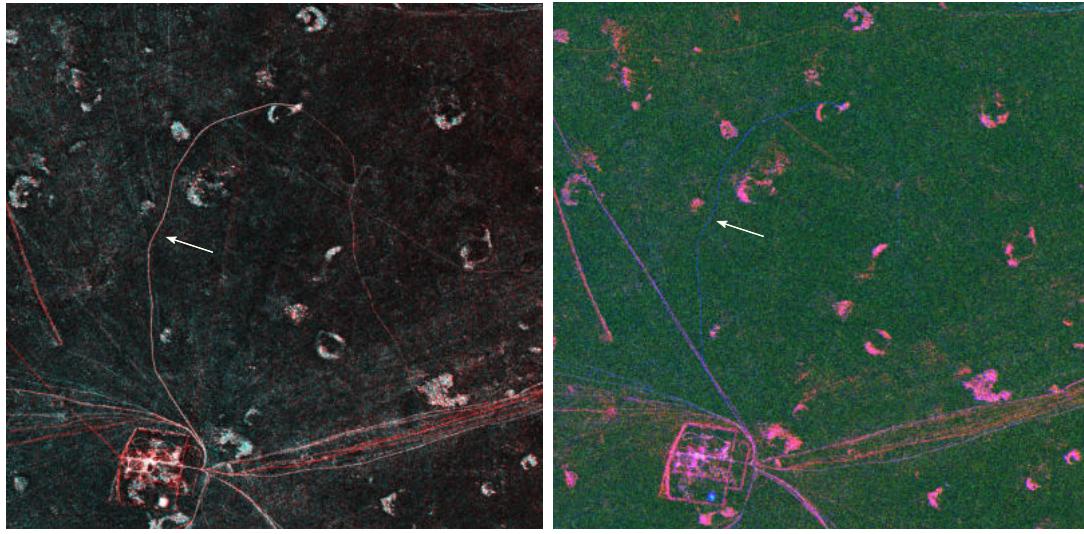
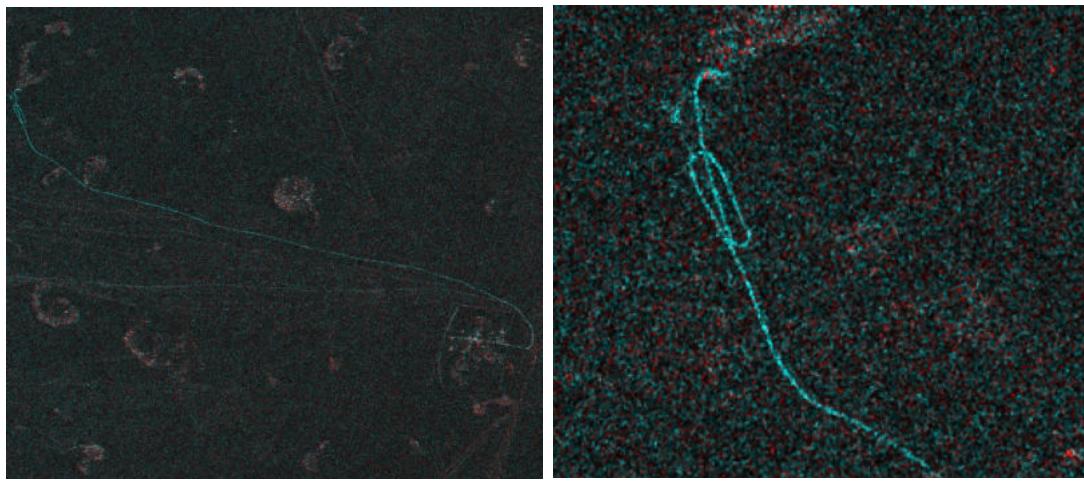


FIGURA 4.9: Traccia in composizioni RGB diverse

di quelle tracce che, pur risultando di colore primario, a causa della configurazione temporale utilizzata possono essere associate a più di un intervallo. Un esempio di questo tipo è possibile farlo studiando gli schemi temporali di figura B.10 e ?? e le immagini corrispondenti in figura 4.11. Nella 4.11(a) la traccia in rosso segnalata con frecce rosse, può essere stata percorsa, tenendo presente lo schema temporale associato all'immagine, in due intervalli: T_{12} e T_{20} . Abbiamo bisogno, quindi, di un'immagine in più riportata in figura 4.11(b). Se in quest'ultima la traccia fosse risultata ancora rossa, sempre basandosi sullo schema temporale associato, si sarebbe potuto concludere che la pista era stata seguita dopo le 18 del 25 Gennaio e prima delle 6 del 26 Gennaio, cioè nell'intervallo T_{20} . La pista, evidenziata con frecce gialle, nel secondo ritaglio risulta bianca e pertanto l'ambiguità resta.

La persistenza dell'ambiguità è spesso dovuta al fatto che la traccia in questione è relativa ad una strada percorsa di frequente e pertanto associabile a numerosi intervalli e spesso contigui o vicini. Infatti, almeno teoricamente, le tracce che invece vengono battute in un unico intervallo, o comunque sporadicamente e a grande distanza temporale tra due passaggi consecutivi, sono sempre identificabili e riconducibili all'esatto intervallo di percorrenza. Il metodo risulta molto efficace per monitorare, quindi, tracce anomale e percorse raramente. È, però, possibile pensare di sfruttare questa caratteristica per distinguere strade a percorrenza frequente da strade secondarie o, al limite, percorse solo una volta. In figura 4.10 un esempio di traccia anomala e uno zoom sullo strano percorso seguito.

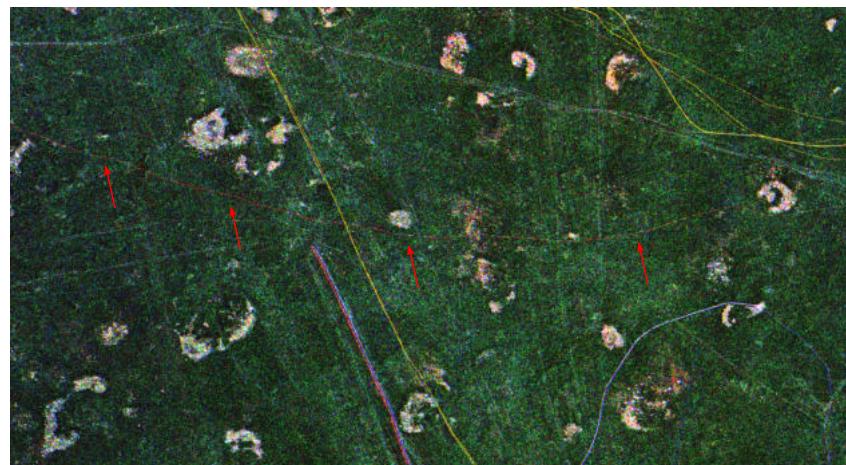
Un'altra feature che è possibile riconoscere sono i cosiddetti *meeting point*, aree concentrate in cui è possibile riconoscere la presenza di attività. Nella figura 4.12, ad esempio, è riportato uno ritaglio di una RGB raffigurante un villaggio vicino Tindouf in cui è presente una concentrazione di attività nel cerchio rosso indicato dalla freccia. Essendo questa immagine descritta dallo schema B.3 è possibile dire che l'attività che ha generato questa macchia rossa è avvenuta nell'intervallo T_3 .



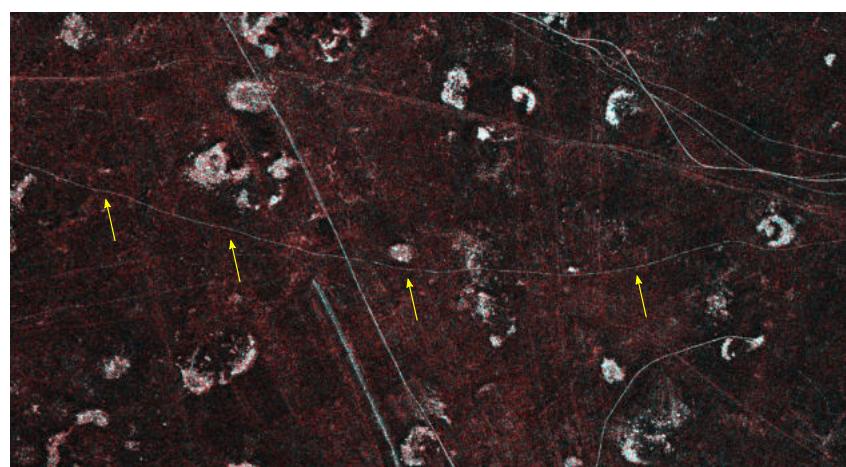
(a) Immagine RGB relativa allo schema temporale B.16

(b) Particolare della traccia

FIGURA 4.10: Traccia anomala e zoom



(a) Immagine RGB relativa allo schema temporale B.10



(b) Immagine RGB relativa allo schema temporale B.9

FIGURA 4.11: Traccia con ambiguità temporale

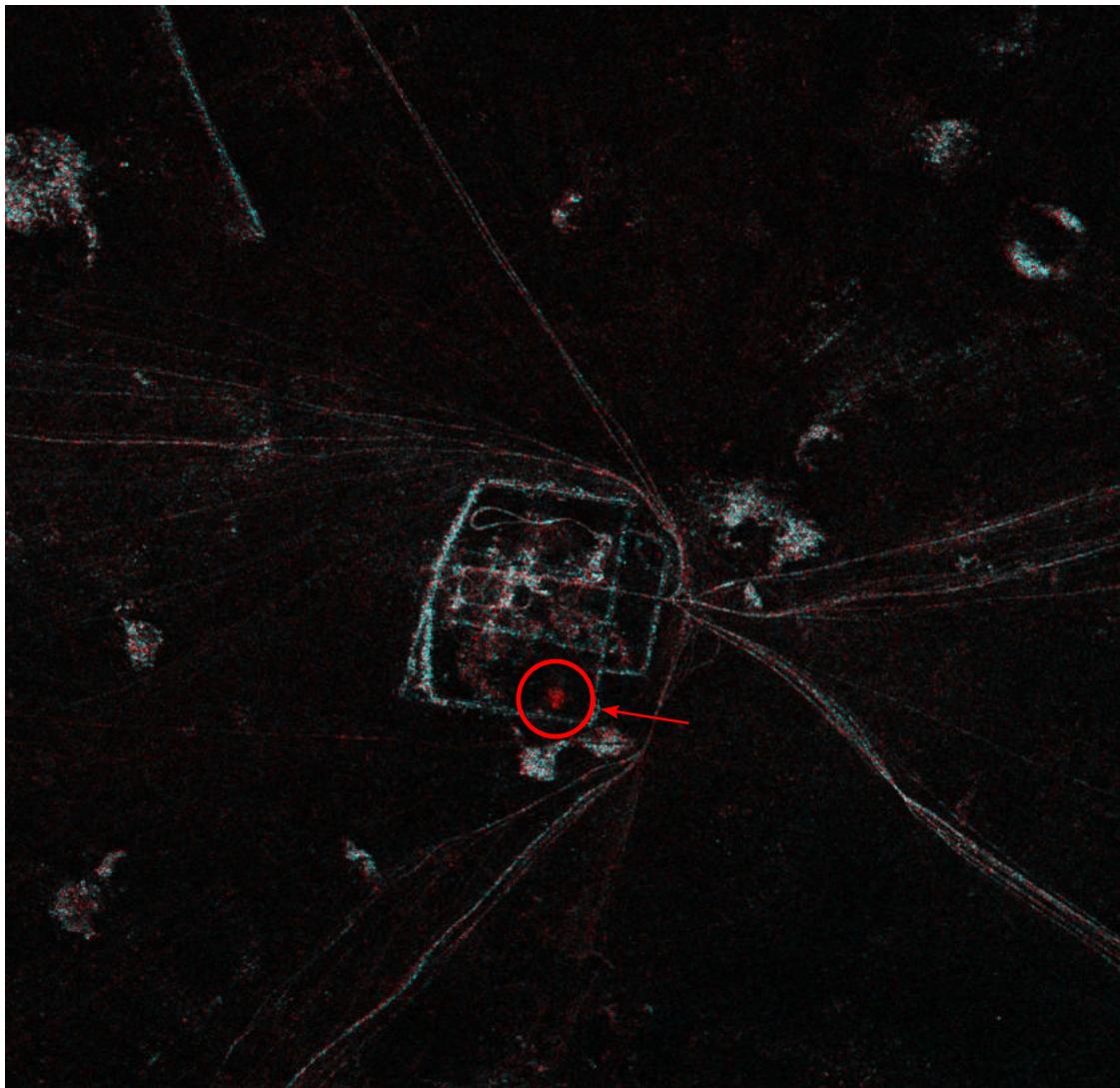


FIGURA 4.12: Esempio di meeting point

Conclusioni

In questa tesi è stata introdotta una tecnica che utilizza la composizione RGB di immagini di coerenza interferometrica consentendo l'individuazione di piste nel deserto e la possibilità di riconoscere l'intervallo di tempo in cui sono state percorse. L'intervallo di tempo minimo a cui è associabile la traccia è pari a 12 ore. La tecnica è stata testata su dati acquisiti sulla zona di Tindouf, nel Sahara occidentale, e ne è stato verificato il funzionamento. Con i dati a disposizione è stato possibile confermarne la fattibilità su un periodo lungo 15 giorni, circa pari al ciclo orbitale, diviso interamente in intervalli di monitoraggio pari a dodici ore eccenzion fatta per cinque di essi di durata maggiore fino a 48 ore. Con il simulatore SaVoir è stata, inoltre, verificata la fattibilità di questo tipo di monitoraggio a diverse latitudini riscontrando una copertura sufficiente a garantirne il funzionamento anche a latitudini critiche per quanto riguarda la capacità di rivisita della costellazione, come quelle intorno all'equatore. Sono stati portati, infine, esempi sia di tracce individuate, di cui è stato ricavato l'intervallo di 12 ore in cui sono state percorse, sia di piste per le quali risalire al singolo intervallo di percorrenza non è stato possibile.

A seguito di queste considerazioni, i possibili sviluppi futuri di questo lavoro dovrebbero:

- studiare la risolvibilità dell'ambiguità sull'intervallo di percorrenza delle tracce;
- verificare la possibilità di integrare le tecniche con l'estrazione automatica delle piste.

Appendice A

Pianificazioni COSMO-SkyMed

Look		Right							Left						
Date\Beam		ES-0C	ES-07	ES-09	ES-16	ES-19	ES-25	ES-34	ES-0D	ES-04	ES-10	ES-14	ES-20	ES-22	ES-28
9	AM														
	PM	4									1				
10	AM							1							2
	PM			2						4					
11	AM				4									3	
	PM			3											4
12	AM		2												
	PM												2		
13	AM		3					2					1		
	PM	1											3		
14	AM							3							4
	PM			4					1						
15	AM				1										
	PM					2									1
16	AM		4							2					
	PM					3							4		
17	AM							4			3				
	PM										2				
18	AM						2								1
	PM			1							3				
19	AM						3								
	PM					4									
20	AM		1							4					
	PM												1		
21	AM						1					2			
	PM	2									4				
22	AM						4					3			
	PM	3													
23	AM				2										
	PM					1			3						2
24	AM				3					1					
	PM														3
25	AM											4			
	PM														

TABELLA A.1: Pianificazione per la zona Kenya1

Look		Right								Left						
		ES-0C	ES-06	ES-10	ES-16	ES-19	ES-24	ES-28	ES-34	ES-0C	ES-04	ES-10	ES-14	ES-19	ES-28	ES-32
9	AM															
	PM								2				1			
10	AM								1					2		
	PM		2							3		4				
11	AM					4								3		
	PM		3												4	
12	AM			2												
	PM						1									
13	AM			3									1			
	PM									4						
14	AM													4		
	PM		4									1				
15	AM					1								2		
	PM				2										1	
16	AM			4							2				3	
	PM				3											
17	AM	2									3			2		
	PM								1							
18	AM	3						2						1		
	PM		1										3			
19	AM							3						4		
	PM				4											
20	AM			1							4					
	PM						2									
21	AM	4											2			
	PM						3						4			
22	AM							4					3			
	PM										2					
23	AM					2								1		
	PM				1							3			2	
24	AM					3					1					
	PM						4								3	
25	AM	1														
	PM															

TABELLA A.2: Pianificazione per la zona Kenya2

Look		Right				Left			
Date\Beam		ES-03	ES-13	ES-22	ES-31	ES-07	ES-17	ES-25	ES-35
9	AM								
	PM				2		1		
10	AM				1		2		
	PM	2			3	4			
11	AM			4			3		
	PM	3							4
12	AM		2						1
	PM							2	
13	AM		3			1			
	PM				4				
14	AM						4		
	PM	4				1			
15	AM			1				2	
	PM		2						1
16	AM		4					3	
	PM		3						
17	AM	2							
	PM				1		2		
18	AM	3			2		1		
	PM	1					3		
19	AM				3			4	
	PM		4						
20	AM		1						2
	PM								
21	AM	4				2			3
	PM						4		
22	AM				4	3			
	PM					2			
23	AM			2				1	
	PM		1			3			2
24	AM			3					4
	PM								3
25	AM	1				4			
	PM								

TABELLA A.3: Pianificazione per la zona Kenya3

Look	Date\Beam	Right												Left												
		0B	1	8	10	17	18	24	26	33	35	05	07	13	15	21	22									
9	AM									1	3															
	PM									4																3
10	AM	4								2																
	PM									2																
11	AM									3																
	PM									3																
12	AM									4																4
	PM									2																
13	AM	1								1																
	PM									3																
14	AM									1																
	PM	1								4																3
15	AM									4																3
	PM									2																
16	AM									2																1
	PM									4																
17	AM									3																
	PM									3																2
18	AM									1																
	PM									1																
19	AM									1																
	PM									4																3
20	AM									1																3
	PM									4																
21	AM									2																
	PM									3																
22	AM									2																
	PM	2								3																4
23	AM									3																
	PM	3								1																2
24	AM									4																3
	PM									4																1
25	AM									PM																

TABELLA A.4: Pianificazione per la zona Algerial

Look		Right												Left											
		ES-04	ES-05	ES-13	ES-14	ES-21	ES-29	ES-30	ES-0D	ES-01	ES-09	ES-10	ES-18	ES-25	ES-26	ES-33	ES-34								
9	AM	4																							
	PM																								
10	AM								4																
	PM								2																
11	AM								2																
	PM								3																
12	AM								3																
	PM								3																
13	AM								1																
	PM								1																
14	AM								1																
	PM								4																
15	AM								4																
	PM								4																
16	AM								2																
	PM								2																
17	AM								3																
	PM								3																
18	AM								AM																
	PM								PM																
19	AM								AM																
	PM								PM																
20	AM								AM																
	PM								PM																
21	AM								AM																
	PM								PM																
22	AM								AM																
	PM								PM																
23	AM								AM																
	PM								PM																
24	AM								AM																
	PM								PM																
25	AM								AM																
	PM								PM																

TABELLA A.5: Pianificazione per la zona Algeria2

Look		Right												Left													
		ES-0B	ES-01	ES-08	ES-10	ES-16	ES-18	ES-24	ES-26	ES-32	ES-33	ES-35	ES-0A	ES-04	ES-07	ES-13	ES-21	ES-15	ES-23	ES-28	ES-31						
Date\Beam	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	
9	AM				4														2								
9	PM																			3							
10	AM	2																	3								
10	PM																			1							
11	AM	3																		1							
11	PM	2																		4							
12	AM																		4								
12	PM	3																		4							
13	AM																		2								
13	PM																			2							
14	AM	4																		2							
14	PM																			3							
15	AM																			3							
15	PM	4																		1							
16	AM																			1							
16	PM																			1							
17	AM																		1								
17	PM																		4								
18	AM	1																		4							
18	PM																			2							
19	AM																		1								
19	PM	1																	4								
20	AM																			4							
20	PM																			3							
21	AM																			2							
21	PM																			1							
22	AM																			4							
22	PM																			3							
23	AM																			1							
23	PM																			2							
24	AM																			1							
24	PM																			3							
25	AM																			4							
25	PM																			3							

TABELLA A.6: Pianificazione per la zona Algeria3

Look	Date\Beam	Right										Left													
		ES-0C	ES-04	ES-07	ES-11	ES-15	ES-18	ES-21	ES-24	ES-28	ES-32	ES-0B	ES-02	ES-03	ES-06	ES-09	ES-12	ES-13	ES-16	ES-18	ES-21	ES-23	ES-26	ES-29	ES-32
9	AM																								
	PM	2															3								4
10	AM																1								1
	PM	3															3								3
11	AM																3								2
	PM																4								4
12	AM	4															4								3
	PM																2								3
13	AM	2															3								1
	PM	4															2								1
14	AM	3															4								3
	PM																3								3
15	AM																4								4
	PM																1								2
16	AM	1															1								1
	PM																4								4
17	AM	4															1		1						3
	PM																4		1						3
18	AM																2								2
	PM																3								3
19	AM																3								1
	PM																3								1
20	AM																1								4
	PM																2								4
21	AM	1															1								3
	PM																3								3
22	AM																1								2
	PM																3								2
23	AM																2								2
	PM																3								1
24	AM																1		3						3
	PM																3		3						2
25	AM																2								3
	PM																3								1

TABELLA A.7: Pianificazione per la zona Russia1

Look	Date\Beam	Right																		Left																	
		ES-0A	ES-01	ES-05	ES-09	ES-12	ES-13	ES-16	ES-19	ES-20	ES-23	ES-26	ES-30	ES-33	ES-34	ES-0D	ES-01	ES-04	ES-05	ES-08	ES-11	ES-14	ES-17	ES-19	ES-20	ES-22	ES-25	ES-28	ES-30	ES-33							
9	AM																																				
	PM			2																																	
10	AM	1																																			
	PM	3																																			
11	AM		1																																		
	PM					1																															
12	AM			4																																	
	PM	1																																			
13	AM		2																																		
	PM			4																																	
14	AM				3																																
	PM				2																																
15	AM					3																															
	PM					3																															
16	AM						1																														
	PM	3																																			
17	AM							1																													
	PM								1																												
18	AM									4																											
	PM									4																											
19	AM									2																											
	PM	4									2																										
20	AM										3																										
	PM	2										3																									
21	AM											3																									
	PM	3										2																									
22	AM												1																								
	PM													1																							
23	AM													4																							
	PM	1													4																						
24	AM														2																						
	PM	4														4																					
25	AM																3																				
	PM																	2																			

TABELLA A.8: Pianificazione per la zona Russia2

Appendice B

Schemi temporali per l'analisi degli intervalli

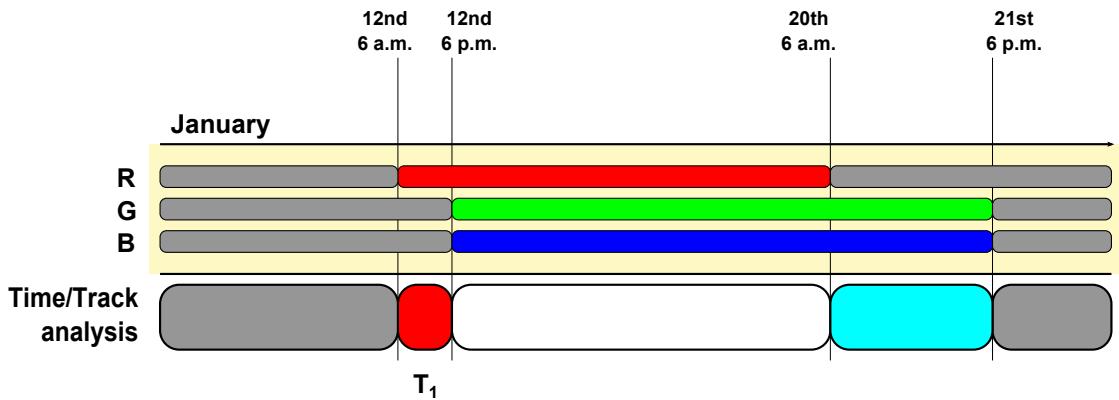


FIGURA B.1: Schema temporale per l'intervallo T_1

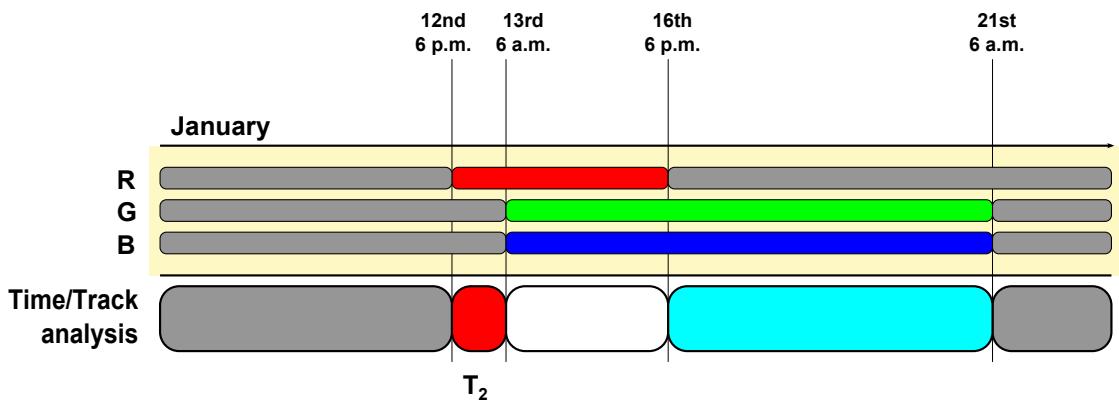
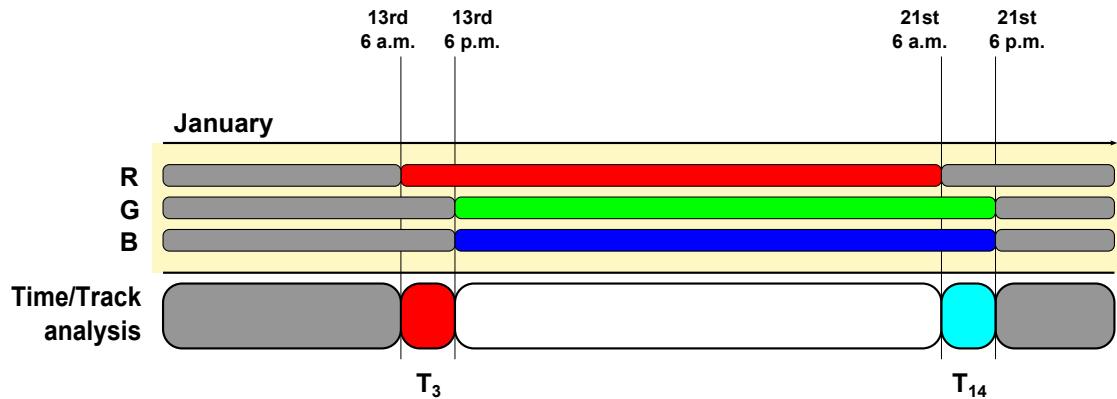
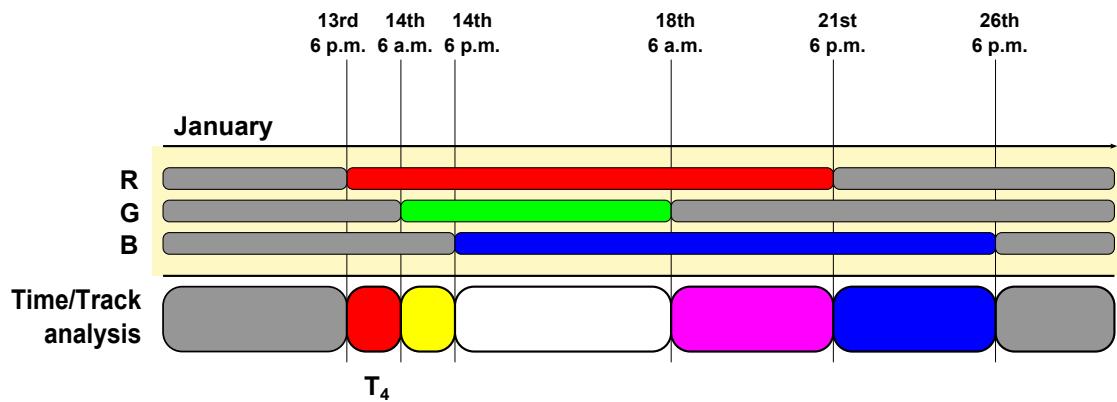
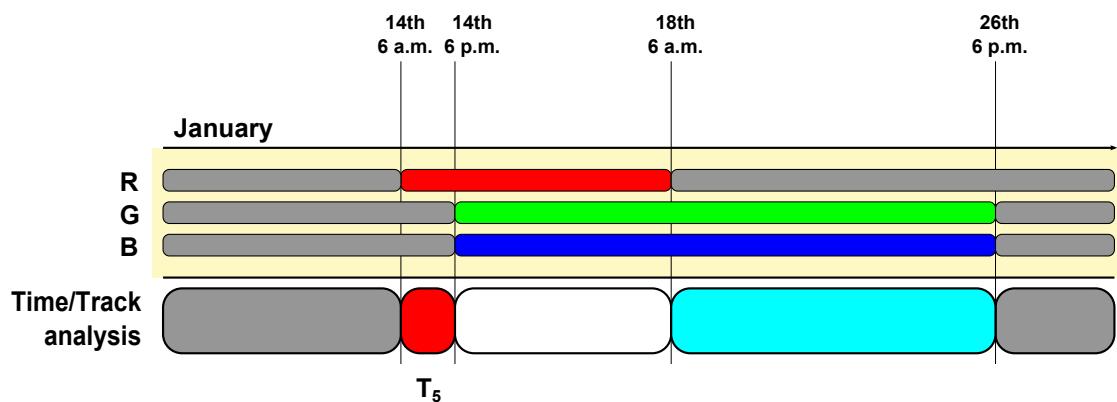
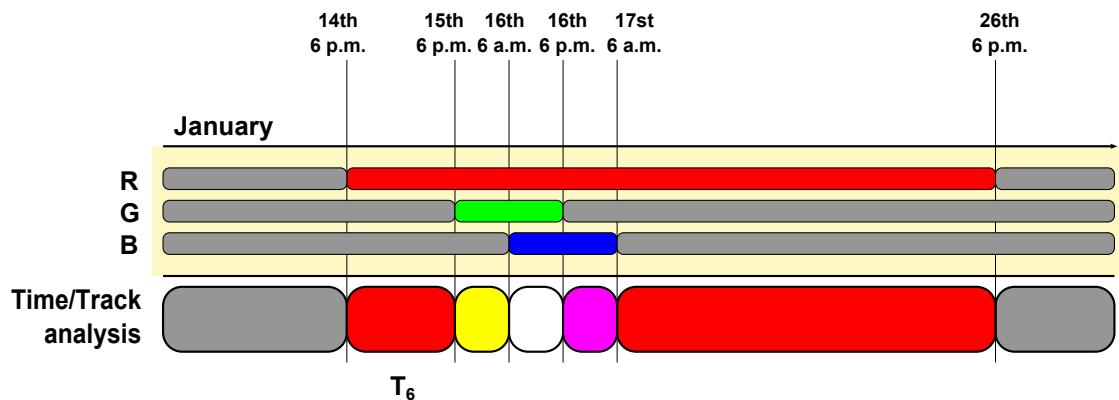
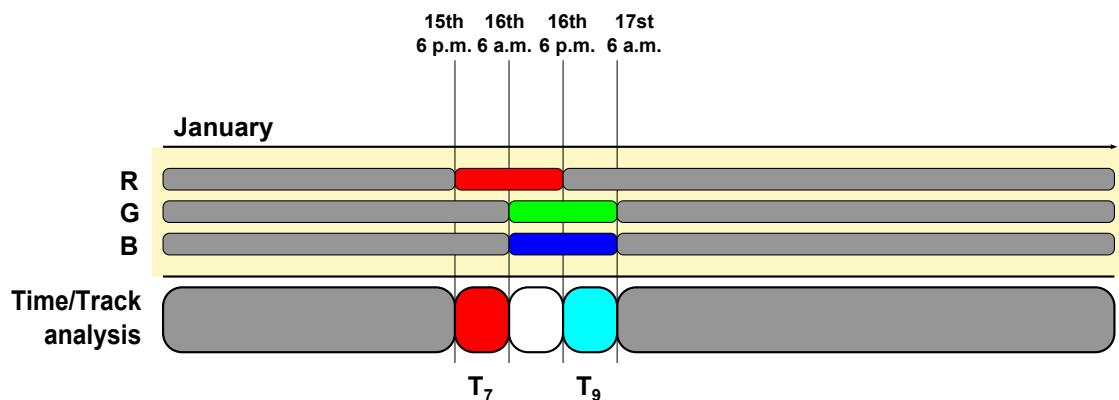
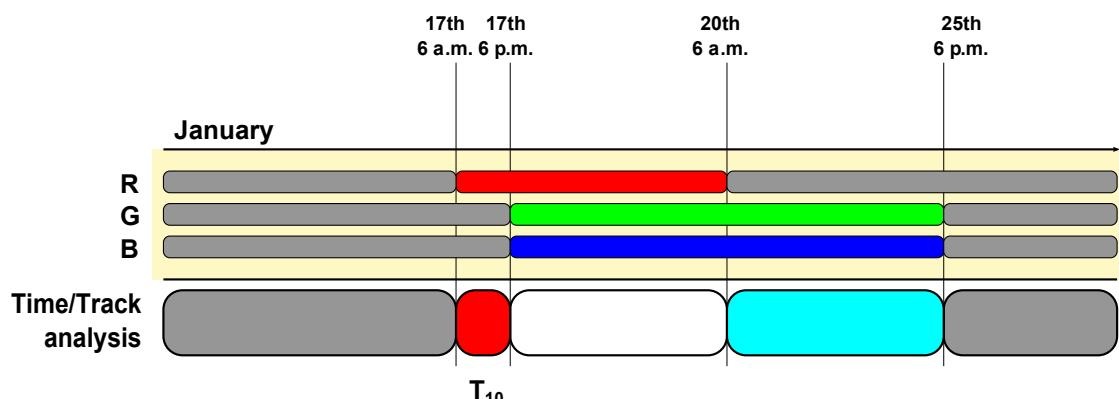
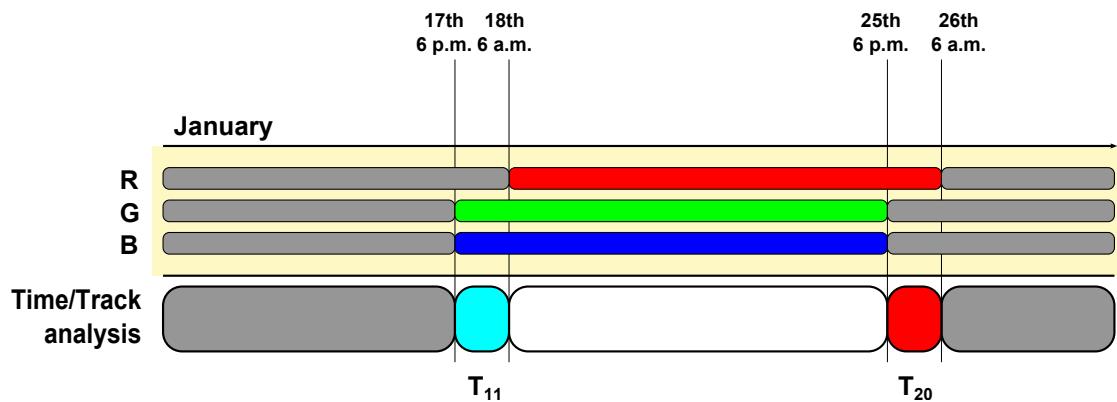
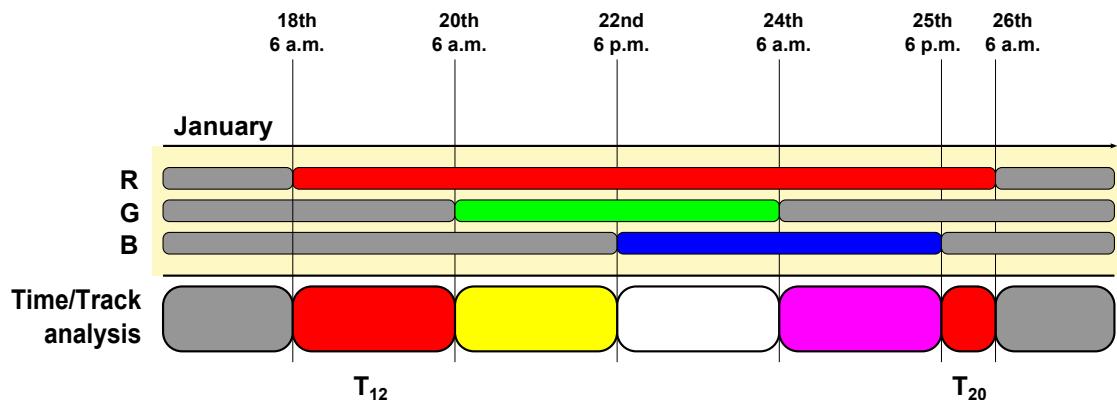
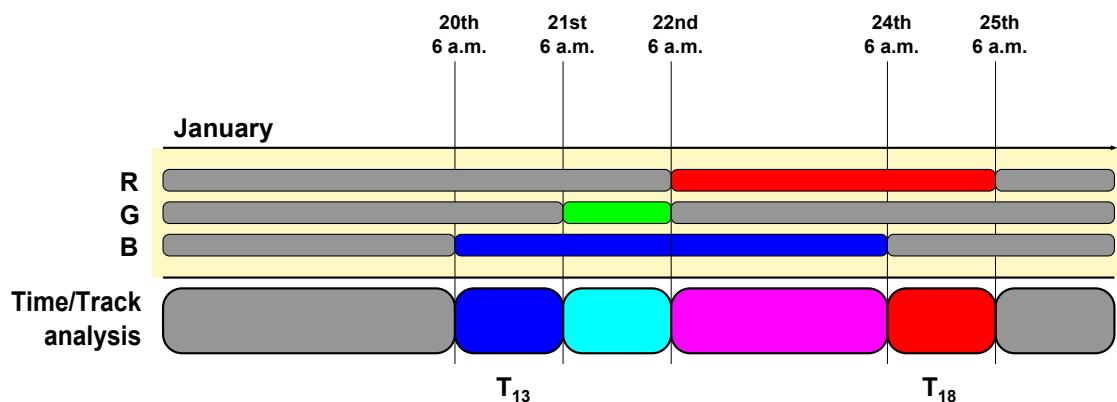
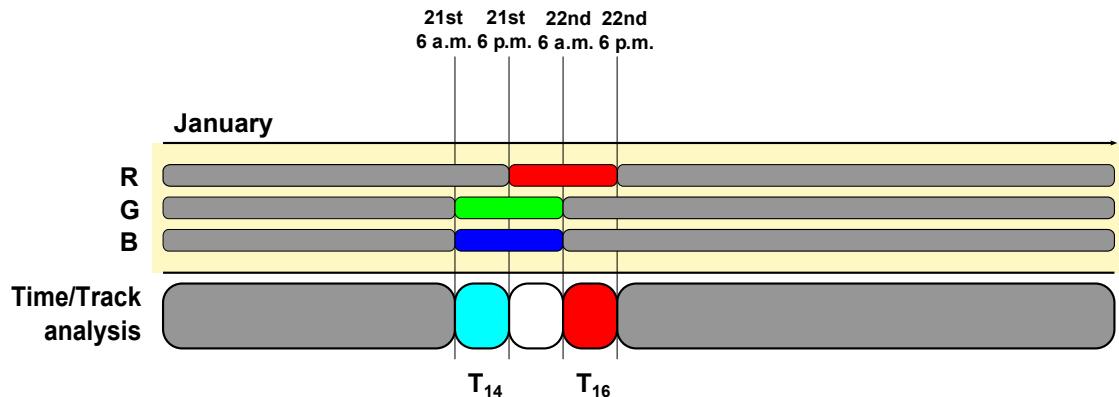
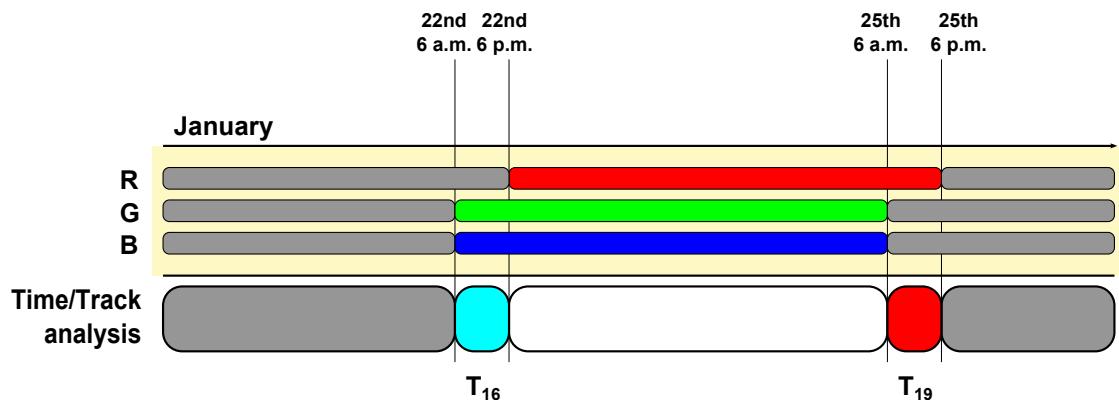
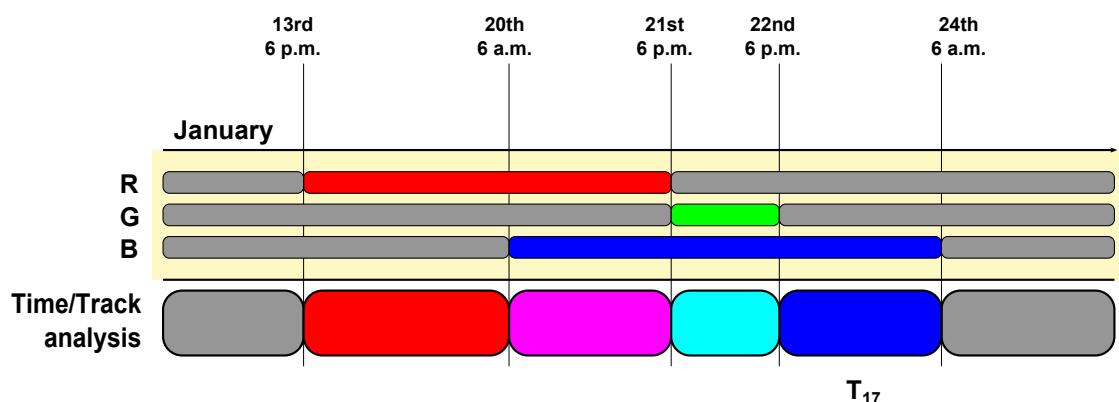


FIGURA B.2: Schema temporale per gli intervalli T_2

FIGURA B.3: Schema temporale per gli intervalli T_3 e T_{14} FIGURA B.4: Schema temporale per gli intervalli T_4 FIGURA B.5: Schema temporale per gli intervalli T_5

FIGURA B.6: Schema temporale per gli intervalli T_6 FIGURA B.7: Schema temporale per gli intervalli T_7 e T_9 FIGURA B.8: Schema temporale per gli intervalli T_{10}

FIGURA B.9: Schema temporale per gli intervalli T_{11} e T_{20} FIGURA B.10: Schema temporale per gli intervalli T_{12} e T_{20} FIGURA B.11: Schema temporale per gli intervalli T_{13} e T_{18}

FIGURA B.12: Schema temporale per gli intervalli T_{14} e T_{16} FIGURA B.13: Schema temporale per gli intervalli T_{16} e T_{19} FIGURA B.14: Schema temporale per gli intervalli T_{17}

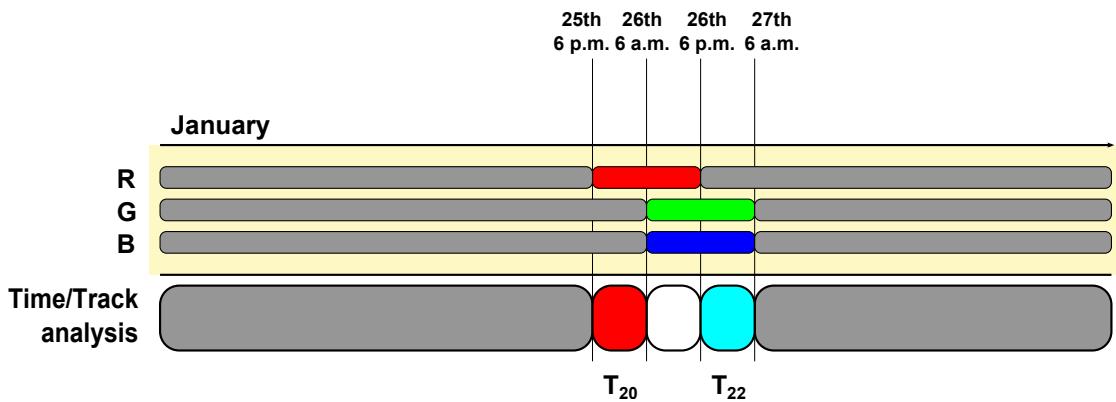


FIGURA B.15: Schema temporale per gli intervalli T_{20} e T_{22}

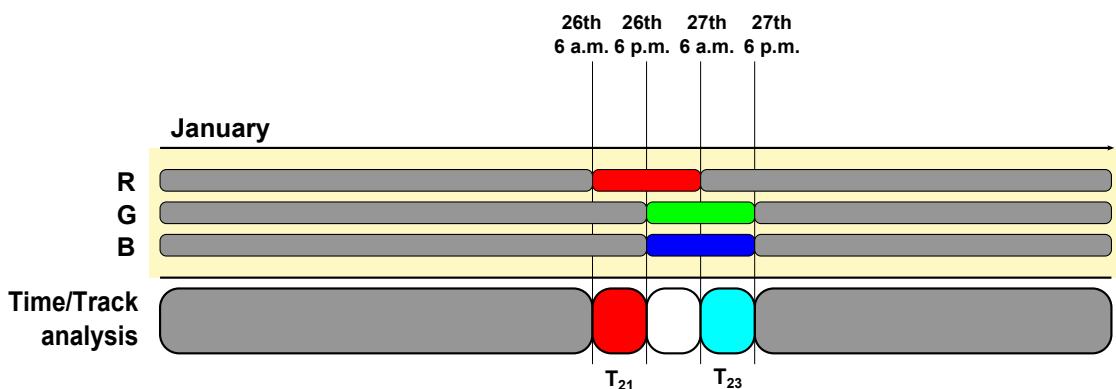


FIGURA B.16: Schema temporale per gli intervalli T_{21} e T_{23}

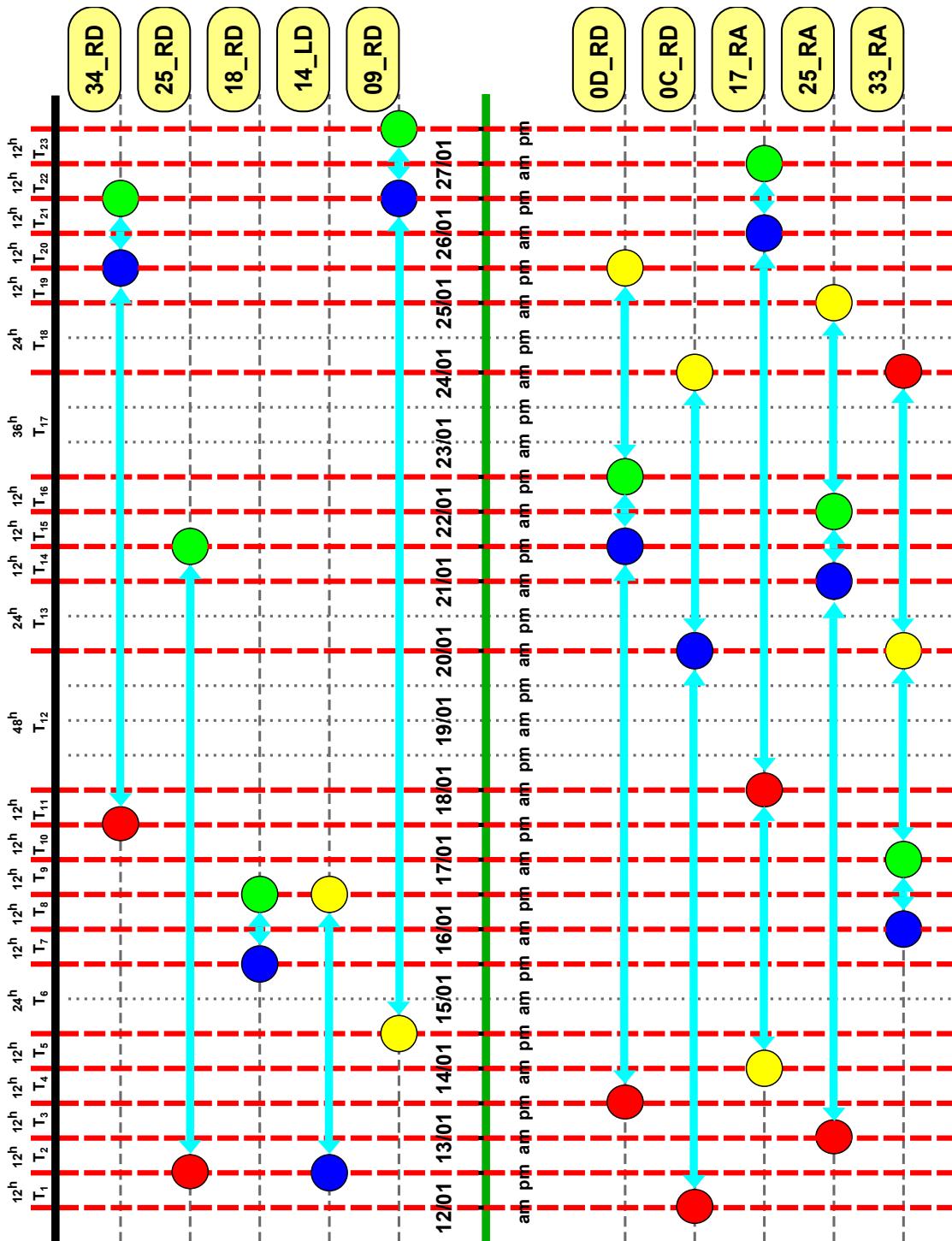


FIGURA B.17: Divisione in intervalli e loro durata

Appendice C

Caratteristiche dei prodotti della costellazione COSMO-SkyMed



COSMO-SkyMed Product Details

Acquisition Mode	Processing levels:	Level 1A (SCS)	Level 1B (DGM)	Level 1C (GEC)	Level 1D (GTC)
SPOTLIGHT	Line Spacing (m)	0.7	0.5	0.5	0.5
	Pixel Spacing (m)	0.3 ± 0.4	0.5	0.5	0.5
	Ground Range resolution (m)	1	1	1	1
	Azimuth resolution (m)	1	1	1	1
	Range x Azimuth scene size (km)		10 x 10		
	Scene duration (sec)			3	
	Geolocation ±3s accuracy (m)		25	25	15
	Number of looks		1	1	1
StripMap HIMAGE	Line Spacing (m)	2 ± 2	2.5	2.5	2.5
	Pixel Spacing (m)	1 ± 2	2.5	2.5	2.5
	Ground Range resolution (m)	3	5	5	5
	Azimuth resolution (m)	3	5	5	5
	Range x Azimuth scene size (km)		40 x 40		
	Scene duration (sec)			7	
	Geolocation ±3s accuracy (m)		25	25	15
	Number of looks		~ 3	~ 3	~ 3
StripMap PINGPONG	Line Spacing (m)	2 ± 2.5	10	10	10
	Pixel Spacing (m)	3 ± 8	10	10	10
	Ground Range resolution (m)	15	20	20	20
	Azimuth resolution (m)	15	20	20	20
	Range x Azimuth scene size (km)		30 x 30		
	Scene duration (sec)			6	
	Geolocation ±3s accuracy (m)		25	25	20
	Number of looks		~ 2.8	~ 2.8	~ 2.8
ScanSAR WIDE REGION	Line Spacing (m)	10	15	15	15
	Pixel Spacing (m)	2 ± 4	15	15	15
	Ground Range resolution (m)	15.0	30.0	30.0	30.0
	Azimuth resolution (m)	27.0	30.0	30.0	30.0
	Range x Azimuth scene size (km)		100 x 100		
	Scene duration (sec)			15	
	Geolocation ±3s accuracy (m)		30	30	30
	Number of looks		~ 4	~ 4	~ 4
ScanSAR HUGE REGION	Line Spacing (m)	15	50	50	50
	Pixel Spacing (m)	7 ± 10	50	50	50
	Ground Range resolution (m)	22	100	100	100
	Azimuth resolution (m)	45	100	100	100
	Range x Azimuth scene size (km)		200 x 200		
	Scene duration (sec)			30	
	Geolocation ±3s accuracy (m)		100	100	100
	Number of looks		~ 18	~ 18	~ 18

For more information please contact: info.cosmo@e-geos.it

TABELLA C.1: Prodotti COSMO-SkyMed e loro specifiche [10]

Acronimi

AOI	Area Of Interest;
ASI	Agenzia Spaziale Italiana;
CD	Change Detection;
COSMO-SkyMed	COstellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation;
CSK1	COSMO-SkyMed, satellite n. 1;
CSK2	COSMO-SkyMed, satellite n. 2;
CSK3	COSMO-SkyMed, satellite n. 3;
CSK4	COSMO-SkyMed, satellite n. 4;
DEM	Digital Elevation Model;
DGM	Detected Ground Multi-look;
DTO	Data Take Opportunity;
EO	Earth Observation;
GEC	Geocoded Ellipsoid Corrected;
GTC	Geocoded Terrain Corrected;
LA	Left-Ascending;
LD	Left-Descending;
LEO	Low Earth Orbit;
LOS	Line Of Sight;
LTAN	Local Time of Ascending Node;
MC	Multi Coherence;
MT	Multi Temporal;
MTC	Multi Temporal with Coherence;

RA	Right-Ascending;
RADAR	RAdio Detection And Ranging;
RD	Right-Descending;
RGB	Red-Green-Blue;
SAR	Synthetic Aperture Radar;
SCS	Single-look Complex Slant;
SSO	Sun Synchronous Orbit;
UTC	Coordinated Universal Time;
WGS84	World Geodetic System - 1984.

Bibliografia

- [1] Agenzia Spaziale Italiana. «*COSMO-SkyMed System Description & User Guide*». 2007.
- [2] John C. Curlander e Robert N. McDonough. *Synthetic Aperture Radar - Systems and Signal Processing*. John Wiley & Sons, Inc, 1991.
- [3] Giorgio Franceschetti e Riccardo Lanari. *Synthetic Aperture Radar processing*. CRC Press LLC, 1999.
- [4] *e-GEOS Product Sheet*. 2009. URL: http://www.e-geos.it/products/pdf/e-GEOS_COSMO-SkyMed.pdf.
- [5] Agenzia Spaziale Italiana. «*COSMO-SkyMed SAR Products Handbook*». 2007.
- [6] Luca Pietranera et al. «The COSMO-SkyMed Very High Resolution SAR Satellites Constellation for Earth Observation and its Applications in Support of Monitoring Activities». In: *Preparing for Future Verification Challenges*. A cura di IAEA Symposium on International Safeguard. Wien International Centre (Austria), November 2010.
- [7] *Tindouf - Wikipedia*. 2012. URL: <http://it.wikipedia.org/wiki/Tindouf>.
- [8] *Tindouf - Wikipedia, the free encyclopedia*. 2012. URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Tindouf>.
- [9] *SaVoir - Taitus Software Italia*. 2011. URL: <http://www.tatussoftware.com/savoir>.
- [10] *e-GEOS Product Detail*. 2009. URL: http://www.e-geos.it/products/pdf/COSMO-SkyMed_Products.pdf.