



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica

Tesi di dottorato in Energia e Ambiente

Habitat Spaziale e Telerilevamento

**SVILUPPO DI UN SISTEMA OTTIMIZZATO
PER LA INDIVIDUAZIONE DI INCENDI BOSCHIVI
DA SATELLITI SU ORBITE GEOSTAZIONARIE**

Tutore:

Prof. Giovanni Laneve

Candidato:

Valeria Di Biase

XXIX CICLO

INDICE

INTRODUZIONE	IV
1. REMOTE SENSING: GENERALITÀ	1
1.1 ENERGIA ELETTROMAGNETICA	1
1.1.1 MECCANISMI DI INTERAZIONE	2
1.1.2 ENERGIA EMESSA (LEGGE DI PLANCK)	3
1.1.3 SPETTRO ELETTROMAGNETICO	5
1.1.4 CARATTERISTICHE DI EMISSIONE	6
1.2 SISTEMI DI TELERILEVAMENTO	8
1.2.1 SENSORI PASSIVI	8
1.2.2 SENSORI ATTIVI	10
1.3 ORBITE PER IL TELERILEVAMENTO	10
1.3.1 ORBITE IN FASE CON LA ROTAZIONE TERRESTRE	11
1.3.2 QUOTE PER IL TELERILEVAMENTO	14
1.3.3 ORBITA ELIOSINCRONA	16
1.4 IMMAGINI TELERILEVATE	18
1.4.1 SISTEMI DI ACQUISIZIONE IMMAGINI	20
1.4.2 TRATTAMENTO DATI	21
1.4.2.1 CORREZIONI RADIOMETRICHE	22
1.4.2.2 CORREZIONI ATMOSFERICHE	22
1.4.2.3 CORREZIONI GEOMETRICHE	23
1.4.2.4 CORREZIONI D'ILLUMINAZIONE	25
2. ELEMENTI DI FIRE-DETECTION	26
2.1 PRINCIPALI SENSORI PER FIRE-DETECTION	30
2.2 ALGORITMI DI FIRE-DETECTION	37
2.2.1 CLOUD-MASK	39
2.2.2 SOGLIE DI FIRE-DETECTION	42
2.2.2.1 ALGORITMI A SOGLIE FISSE	43
2.2.2.2 ALGORITMI CONTESTUALI	45
2.2.3 ELIMINAZIONE FALSI ALLARMI: SUN-GLINT	47
2.2.4 CARATTERIZZAZIONE DEL PUNTO-FUOCO	48
2.2.4.1 PORZIONE DI PIXEL E TEMPERATURA DEL FUOCO	48
2.2.4.2 FIRE RADIATIVE POWER	50
2.2.5 CONFIDENCE LEVEL	53
2.2.6 CREAZIONE E DIFFUSIONE DEI REPORT	54
3. IL PROGETTO SIGRI	56

3.1	GENERALITÀ E FUNZIONALITÀ	57
3.2	PRODOTTI SIGRI	59
3.2.1	HOT-SPOT	61
3.2.2	MAPPE DELLE AREE BRUCIATE	62
3.2.3	INDICE DI RISCHIO E MAPPE DI VULNERABILITA'	65
3.2.4	MAPPE DI PERICOLOSITA'	67
3.2.5	SIMULAZIONE DELLA PROPAGAZIONE DEGLI INCENDI	69
3.3	ALGORITMO SFIDE	70
4.	L'ALGORITMO "SFIDE"	73
4.1	OPERAZIONI PRELIMINARI	77
4.1.1	SELEZIONE DEI PIXEL UTILI	77
4.1.2	CALIBRAZIONE, TEMPERATURE DI BRILLANZA E RIFLETTANZE	79
4.2	CLOUD-MASK E PIXEL AD ELEVATA RIFLETTANZA	81
4.3	SOGLIA FISSA SULLA TEMPERATURA NEL CANALE 4	83
4.4	INDIVIDUAZIONE POTENZIALI HOT-SPOT	84
4.5	CONFERMA DEGLI HOT-SPOT	88
4.5.1	CHANGE-DETECTION	89
4.5.1.1	VARIAZIONI TERMICHE NEI QUINDICI MINUTI	90
4.5.1.2	VARIAZIONI TERMICHE NEI TRENTA MINUTI	92
4.5.1.3	SOGLIE DI INNESCO	94
4.5.2	ANALISI CONTESTUALE	97
4.6	CARATTERIZZAZIONE HOT-SPOT	98
4.6.1	FRP, TEMPERATURA DI FUOCO ED ESTENSIONE DEGLI INCENDI	99
4.6.2	LAND SURFACE TEMPERATURE	100
4.7	CONTROLLO QUALITÀ	104
4.8	PREPARAZIONE E DIFFUSIONE DEI REPORT	105
4.9	ALGORITMO ORE NOTTURNE	106
5.	VALIDAZIONE DELL'ALGORITMO	112
5.1	CONFRONTO CON LE PERIMETRAZIONI IN SITU	113
5.2	ANALISI DEI RISULTATI	118
5.3	ANALISI DEI FALSI-ALLARMI	123
5.4	CONFRONTO CON ALGORITMI MODIS	125
6.	STIMA DELLA BIOMASSA COMBUSTA	128
6.1	FRP E FRE	129
6.2	BIOMASSA COMBUSTA	131

CONCLUSIONI

134

BIBLIOGRAFIA

137

INTRODUZIONE

In questo lavoro sarà presentata una completa revisione dell'algoritmo SFIDE (*System for Fire Detection*), sviluppato nell'ambito del progetto SIGRI (*Sistema Integrato per la Gestione del Rischio Incendi*) finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), e dedicato all'individuazione di incendi (*fire-detection*) nella regione mediterranea, mediante l'utilizzo delle immagini acquisite dallo spettro-radiometro SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager*) posto a bordo dei satelliti meteorologici della serie MSG (*Meteosat Second Generation*)- del consorzio europeo EUMETSAT (*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*)- in orbita geostazionaria.

L'uso di dati da satellite geostazionario nell'ambito della *fire-detection*, permette un monitoraggio costante, consentendo l'individuazione in tempo reale dei nuovi incendi. Al contrario, facendo ricorso ai dati da satelliti in orbita bassa, saranno possibili soltanto due osservazioni al giorno di una stessa area, e l'individuazione degli incendi sarà limitata ai ristretti intervalli in cui il satellite è in vista. D'altro canto, però, le immagini acquisite da orbita geostazionaria presentano una risoluzione inferiore, in genere 3-4 km, ponendo limitazioni circa le minime dimensioni di un incendio individuabile, rispetto ai sistemi di *fire-detection* basati su immagini da satelliti in orbita bassa, con risoluzioni anche al di sotto di 1 km. In ogni caso, la possibilità di individuare, in tempi ridottissimi dal suo innesco, un nuovo focolaio, permettendo il tempestivo intervento delle forze addette al contrasto, costituisce un vantaggio in grado di rendere, quella basata su dati da satellite in orbita geostazionaria, la metodologia preferibile se l'intento del sistema di *fire-detection* è quello di intervenire con tempestività limitando i danni di natura ambientale, economica e sociale. Inoltre, il monitoraggio in tempo reale, consente anche una miglior valutazione a posteriori dei danni ambientali causati da un evento incendiario in termini di biomassa combusta

(dunque di vegetazione bruciata) e quindi di immissione in atmosfera dei gas di combustione.

Avendo focalizzato l'attenzione sull'individuazione degli incendi in area mediterranea e, in particolare, sulla Sardegna, è stato necessario affrontare tutte le problematiche che caratterizzano la *fire-detection* da satellite su territori caratterizzati da disomogeneità nella copertura e dalla forte antropizzazione; problematiche spesso eluse dalla letteratura corrente sulla materia, in cui è possibile riscontrare un'ampia casistica di lavori inerenti l'individuazione di incendi da satellite per regioni caratterizzate da vasta e omogenea copertura boschiva, come le grandi foreste pluviali o le aree boschive del Nord-America. Infatti, l'individuazione di incendi nel caso in cui la superficie boschiva copra solo una parte del pixel, quindi si abbia copertura disomogenea dello stesso, ed è questo il caso che solitamente si riscontra in area mediterranea, espone ad un maggior rischio d'errore, siano essi di commissione (falsi-allarmi) o di omissione (incendi non rilevati).

Come evidenziato, uno degli aspetti più importanti secondo cui valutare le prestazioni di un sistema di *fire-detection* che si proponga di contrastare attivamente i fenomeni incendiari, è quello della tempestività nell'individuazione dei nuovi focolai. Per tale ragione, in questo lavoro sono state sviluppate una serie di metodologie innovative, rispetto alla letteratura corrente, quali:

- *Change-detection*: confronto tra variazioni temporali delle temperature di brillantezza nei diversi canali, al fine di individuarne eventuali anomalie;
- Nuove soglie: ottenute mediante un'analisi statistica e introdotte sui parametri termici e descritte mediante funzioni di terzo grado dell'angolo di elevazione solare;
- Introduzione del canale 2 (0.8 μm): ha permesso di migliorare la definizione dei pixel con copertura nuvolosa e affetti dalla riflessione solare;

- Angolo di elevazione solare media: introdotto per la distinzione tra orari diurni e notturni (e le rispettive condizioni di fire-detection) per la regione Sardegna;
- Stima della LST: per fornire un'ulteriore caratterizzazione dei punti fuoco.

La *change-detection* si basa sul confronto tra le variazioni temporali delle temperature di brillanza calcolate nei canali 4 ($3.9 \mu m$) e 9 ($10.8 \mu m$) del sensore SEVIRI, rispetto a valori attesi, in funzione dell'elevazione solare, stimati mediante un'analisi statistica sulla regione d'interesse. Qualora su un pixel il confronto tra variazioni termiche reali ed attese evidenzia particolari anomalie, ovvero superi dei valori di soglia espressi da funzioni dipendenti dall'elevazione solare, esso verrà considerato come interessato da un incendio (*hot-spot*). Com'è evidente, un approccio di questo tipo può essere considerato solo nel caso in cui si possano conoscere le temperature di brillanza ad intervalli regolari e ravvicinati nel tempo, facendo emergere, ancora una volta, il vantaggio che in tal senso è offerto dall'uso di satelliti geostazionari; ad esempio, MSG-SEVIRI fornisce immagini telerilevate ogni 15'.

Oltre all'introduzione della metodologia basata sulla *change-detection*, le principali modifiche apportate all'algoritmo SFIDE consistono nell'introduzione di soglie sui parametri termici descritte mediante funzioni di terzo grado- anch'esse una novità rispetto allo stato dell'arte- ottenute, ancora una volta, mediante analisi statistica.

Sono poi state rideterminate tutte le tecniche di confronto contestuali, in cui i parametri termici di un potenziale *hot-spot* sono comparati a quelli dei pixel limitrofi.

Inoltre, è stato introdotto l'uso delle immagini nel canale 2 di SEVIRI ($0.8 \mu m$): la stima della riflettanza in questo canale ha permesso di migliorare la definizione dei pixel caratterizzati da copertura nuvolosa e affetti dal fenomeno di riflessione solare (o *Sun-glint*).

È stata introdotta la valutazione di un angolo di elevazione solare media sull'area studio (Sardegna) come variabile per la distinzione tra orari diurni e notturni e, conseguentemente, per l'applicazione delle rispettive condizioni di *fire-detection*.

Infine, nella caratterizzazione degli *hot-spot*, è stata stimata la temperatura superficiale, o *Land Surface Temperature (LST)*, con l'intento di introdurre tale grandezza, in futuri aggiornamenti dell'algoritmo, tra quei parametri utili all'individuazione degli incendi.

Tutte le novità apportate rispetto alle precedenti versioni di SFIDE saranno ulteriormente dettagliate all'interno del Capitolo 4, dedicato alla descrizione dell'algoritmo.

La validazione della nuova versione di SFIDE è stata effettuata mediante un confronto tra gli incendi individuati mediante l'algoritmo qui presentato sulla Sardegna in alcuni giorni dei mesi di luglio ed agosto del 2014, con le perimetrazioni al suolo effettuate dal *Corpo forestale e vigilanza ambientale (CFVA)* della regione Sardegna relative agli incendi realmente sviluppatisi negli stessi giorni.

La tesi è stata organizzata come segue:

- *Capitolo 1:* sono presentati i principi base dell'emissione radiativa e del *remote sensing*. Sono presentate le orbite caratteristiche del telerilevamento. Infine è offerta una panoramica delle operazioni di acquisizione e trattamento delle immagini telerilevate;
- *Capitolo 2:* sono presentati gli elementi essenziali della *fire-detection*. In primo luogo, sono illustrate le ragioni che spingono alla realizzazione di sistemi per l'individuazione di incendi mediante l'uso di immagini telerilevate. È poi proposta una panoramica dei principali sensori utilizzati, relativi sia a satelliti in orbita bassa che geostazionaria. È dunque presentato un quadro storico e lo stato dell'arte circa le principali metodologie di *fire-detection* disponibili in letteratura (algoritmi basati su soglie fisse e/o valutazioni

contestuali), e sono riassunte le principali cause degli errori di omissione e commissione. Infine, sono presentate le modalità che permettono di caratterizzare un *hot-spot* e, in particolare, di calcolare la potenza radiante di fuoco (FRP), per poi stimare la biomassa combusta (BB) in un incendio giungendo ad una valutazione dell'impatto ambientale dello stesso;

- *Capitolo 3*: è presentato nel dettaglio il progetto SIGRI, all'interno di cui si inserisce l'algoritmo SFIDE. In particolare, ne sono analizzati i prodotti più rilevanti, il cui destinatario principale è il dipartimento della Protezione Civile, e la cui utilità deriva dall'elevata frequenza di aggiornamento che permette di supportare la gestione degli incendi attraverso: individuazione dell'evento, simulazione della propagazione e generazione di mappe di vulnerabilità.
- *Capitolo 4*: viene proposta una descrizione dettagliata dell'algoritmo SFIDE per le ore diurne e notturne. Particolare evidenza viene posta agli elementi di nuova introduzione, sia rispetto alle precedenti versioni dell'algoritmo, che rispetto alla letteratura corrente. Sono inoltre presentati degli esempi dei report che vengono diffusi alle autorità competenti in caso di individuazione di un incendio.
- *Capitolo 5*: è illustrata la validazione dell'algoritmo mediante una comparazione tra gli *hot-spot* rilevati da SFIDE nei giorni 2-8 luglio e 31 luglio-6 agosto 2014 sulla Sardegna, con gli incendi censiti e perimetrati in situ dal CFVA della regione Sardegna negli stessi giorni. Sono analizzati i risultati ottenuti e sono state valutate le principali cause all'origine degli errori di omissione (incendi non individuati) e commissione (falsi-allarmi). Infine, le prestazioni ottenute da SFIDE sono state comparate con quelle di un sistema di *fire-detection* basato sull'uso di dati MODIS;
- *Capitolo 6*: per uno dei principali incendi individuati nella validazione, è stata valutata, attraverso l'integrazione temporale della potenza radiante di

fuoco (FRP), la quantità di biomassa combusta (BB), al fine di valutare l'impatto ambientale dell'evento incendiario.

REMOTE SENSING: GENERALITÀ

1.1 ENERGIA ELETTROMAGNETICA

Il telerilevamento è la scienza di ottenere informazioni riguardo un oggetto, area o fenomeno, attraverso l'analisi di dati acquisiti tramite strumenti (sensori) che non sono in contatto con essi. Il sensore misura l'energia elettromagnetica riflessa o emessa dalla superficie terrestre e il risultato di tale interazione è, in genere, un'immagine.

L'energia elettromagnetica può essere descritta mediante la sua:

- *Velocità (c)*: pari a quella della luce ($3 \cdot 10^8$ m/s);
- *Lunghezza d'onda (λ)*: la distanza di qualsiasi posizione in un ciclo dalla stessa nel ciclo successivo (Fig. 1.1), misurata con il sistema metrico standard (millimetro, 10^{-3} m, micrometro, 10^{-6} m, o nanometro, 10^{-9} m).
- *Frequenza (n)*: pari al numero di creste d'onda che passano per un punto dato in una specifica unità di tempo, e misurata in hertz.

Lunghezza d'onda e frequenza sono dipendenti tra loro mediante la relazione:

$$c = \lambda \cdot n.$$

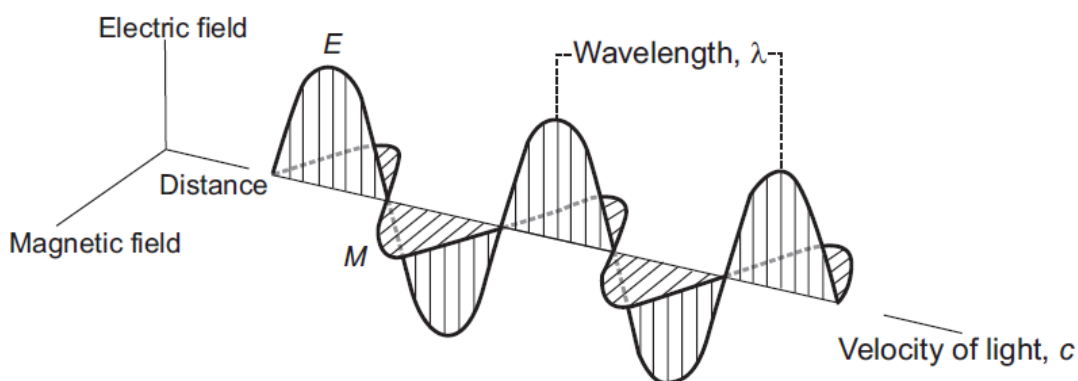


Figura 1.1: Lunghezza d'onda e frequenza [Kerle, 2004].

1.1.1 MECCANISMI DI INTERAZIONE

Possiamo riconoscere una serie d'interazioni tra l'energia elettromagnetica e la materia che incontra, sia essa solida, liquida o gassosa. Tali interazioni possono essere a livello superficiale, oppure di volume se riguardano la penetrazione dell'energia attraverso la superficie. Le interazioni di superficie e di volume con la materia possono produrre una serie di variazioni sull'energia elettromagnetica incidente: in primo luogo ne variano modulo, direzione, lunghezza d'onda, polarizzazione e fase.

Possono verificarsi le seguenti interazioni (Fig. 1.2):

- La radiazione può essere *trasmessa*, passando attraverso l'oggetto e variando la sua velocità;
- La radiazione può essere *assorbita* dal corpo, aumentandone il calore;
- La radiazione può essere *emessa* dal corpo, in funzione della sua struttura e della sua temperatura; infatti, tutti i corpi al di sopra di 0 K emettono energia.
- La radiazione può essere *diffratta*, ovvero deflessa in tutte le direzioni (fenomeno altrimenti detto *scattering*).
- La radiazione può essere *riflessa*. Se, dopo il contatto con il corpo, essa ritorna indietro con un angolo uguale ed opposto a quello di incidenza, viene detta riflettanza speculare; altrimenti, è detta diffusa.

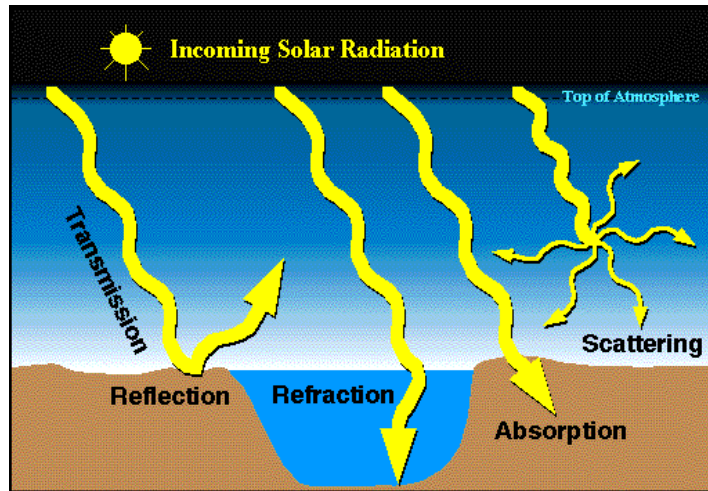


Figura 1.2: Meccanismi di interazione tra energia elettromagnetica e materia.

1.1.2 ENERGIA EMESSA (LEGGE DI PLANCK)

L'equazione che governa la radiazione di un corpo nero è la cosiddetta *legge di Planck*; essa riguarda l'intensità di radiazione emessa per unità di superficie (E) in una certa direzione (angolo solido) da un corpo nero, in funzione della lunghezza d'onda per una determinata temperatura (T).

La legge di Planck può essere espressa attraverso la seguente equazione:

$$E(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda k_B T)} - 1} \quad (1.1)$$

Dove:

- $h = 6.626060957 \cdot 10^{-34}$ [J/s] (o $h = 4.13562852 \cdot 10^{-15}$ [eV/s]) è la costante di Planck;
- $k_B = 1.3806505 \cdot 10^{-23}$ [J/K] è la costante di Stefan-Boltzmann;
- $c = 299792458$ [m/s] è la velocità della luce nel vuoto;

Per un oggetto a temperatura costante, il picco di potenza radiante si riferisce alla lunghezza d'onda alla quale è emessa la massima quantità di energia, espresso come λ_{max} (Fig. 1.3). Il Sole, con una temperatura superficiale di circa

6000 K, ha il suo picco a $0.48 \mu\text{m}$ (in corrispondenza della lunghezza d'onda del giallo). La temperatura superficiale della terra, pari a circa 290 K, chiamata anche temperatura ambiente, il picco di energia emessa è a $9.7 \mu\text{m}$ (Fig.1.4). Questa dipendenza della lunghezza d'onda con la temperatura è descritta dalla legge di Wien:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (1.2)$$

Con $b=2897.77 \text{ [K]}$ costante di Wien.

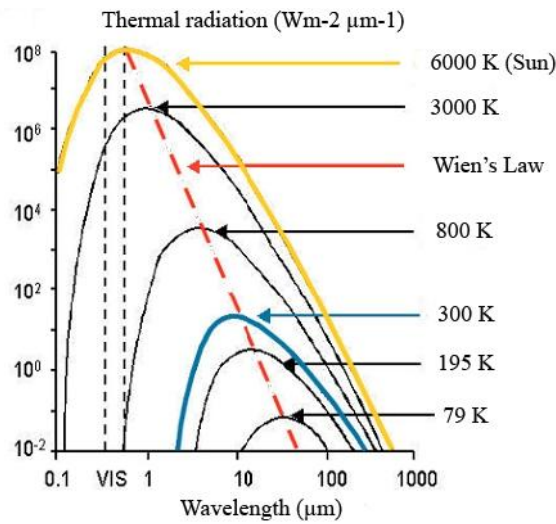


Figura 1.3: Lunghezza d'onda di massima emissione radiativa (legge di Wien).

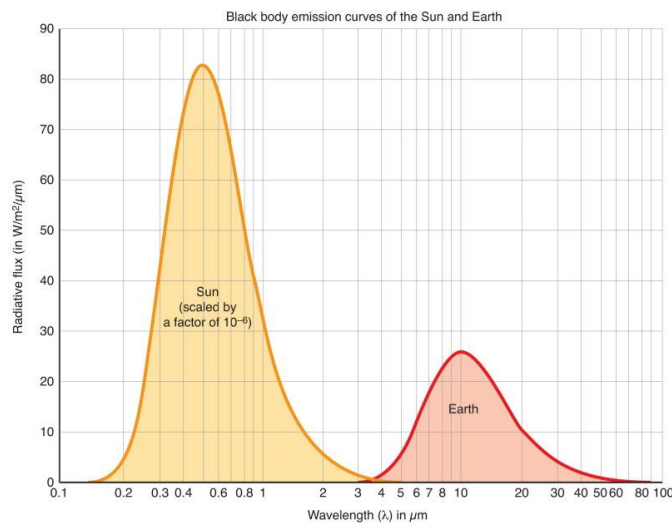


Figura 1.4: Emissione spettrale del Sole e della Terra in funzione della lunghezza d'onda; l'integrale delle curva (area ombreggiata) rappresenta l'emissione totale (M).

1.1.3 SPETTRO ELETTROMAGNETICO

Lo spettro elettromagnetico è il range continuo di energia che va da lunghezze d'onda dell'ordine dei nanometri a lunghezze d'onda dell'ordine di chilometri. Questo continuum è comunemente diviso in fasce, chiamate *bande spettrali*. Delle varie bande, quattro possono essere considerate utili ai fini del telerilevamento:

1) *Ultravioletto*: è caratterizzata da bassa lunghezza d'onda ed è compresa tra i raggi X e la luce visibile. Spesso viene ulteriormente suddiviso in *near-ultraviolet* (UV-A, 0.32-0.40 μm), *far-ultraviolet* (UV-B, 0.32-0.28 μm) e *extreme-ultraviolet* (UV-C, <0.28 μm). E' una radiazione facilmente diffusa dall'atmosfera terrestre, per cui raramente viene usata per il rilevamento a distanza.

2) *Spettro visibile*: costituisce una minima porzione dello spettro. I suoi limiti sono definiti dalla sensibilità dell'occhio umano. Viene abitualmente diviso in tre segmenti, approssimativamente tra 0.4-0.5 μm (B-1, blu), 0.5-0.6 (B-2, verde), 0.6-0.7 μm (B-3, rosso).

3) *Spettro infrarosso*: le lunghezze d'onda maggiori del rosso vengono designate come infrarosso. Si estende da 0.72 μm a 1000 μm . A causa del suo range molto vasto, viene suddiviso in cinque categorie: vicino infrarosso (NIR, 0.75-1.4 μm), onda corta (SWIR, 1.4-3 μm), onda media (MWIR, 3-8 μm), onda lunga (LWIR, 8-15 μm), lontano infrarosso (FIR, 15-1000 μm). Il NIR è utile per rilevare la biomassa presente in una scena acquisita; evidenzia inoltre i contrasti tra terreni e colture e fra terreni e acqua. La banda MIR è sensibile alla quantità di acqua nelle piante, ma viene anche utilizzata per distinguere nubi, neve e ghiaccio. L'infrarosso termico (10.4-12.5 μm) è particolarmente utile per la stima della temperatura superficiale o *Land Surface Temperature* (*LST*). Infine la banda a 2.08-2.35 μm (medio-infrarosso) è utile per distinguere tipi di rocce differenti, ma anche per la quantità di umidità di vegetazione e suolo.

4) *Microonde*: costituiscono le più grandi lunghezze d'onda utilizzate nel telerilevamento, e vanno da $1 \mu\text{m}$ a 20 cm .

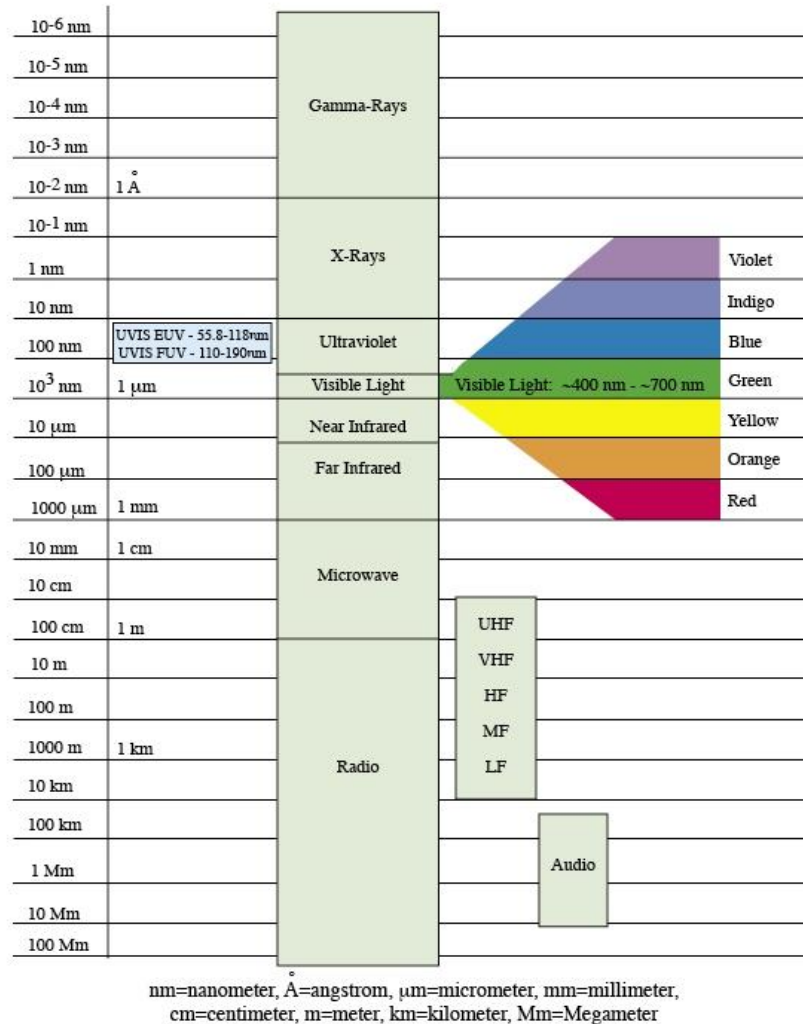


Figura 1.5: Principali bande dello spettro elettromagnetico.

1.1.4 CARATTERISTICHE DI EMISSIONE

Il calore è l'energia cinetica del moto casuale delle particelle della materia; esse, incontrandosi, provocano cambiamenti nello stato energetico e nell'emissione della radiazione elettromagnetica della superficie. L'energia interna, o cinetica, della materia viene così convertita in energia radiante. La temperatura cinetica (T_c) di un corpo, è la misura della concentrazione del calore presente nel corpo stesso.

Il calore può essere trasferito tramite:

- *Conduzione*: trasferimento mediante interazione molecolare tra due corpi in contatto tra di loro;
- *Convezione*: la propagazione del calore avviene con moti macroscopici di materia nel mezzo interessato alla propagazione (moti convettivi);
- *Radiazione*: il calore viene trasferito sotto forma di onde elettromagnetiche; la radiazione, a differenza di conduzione e convezione, può trasferire calore anche attraverso il vuoto.

La temperatura radiativa (T_r) può essere misurata a distanza da rilevatori che valutano la radiazione elettromagnetica nella regione emissiva dello spettro (infrarosso e microonde). La T_r di un materiale è sempre minore o uguale alla T_c a causa dell'*emissività*. Per i corpi neri, ovvero perfetti emettitori, vale $T_r = T_c$; per tutti gli oggetti reali invece bisogna tener conto di un coefficiente di emissività (ε) per cui risulta $T_r < T_c$. Le caratteristiche emissive dei materiali possono essere così sintetizzate:

- *Corpo nero*: $\varepsilon = 1$, per ogni λ ;
- *Corpo grigio*: $0 < \varepsilon < 1$, per ogni λ ;
- *Riflettore perfetto*: $\varepsilon = 0$, per ogni λ ;
- *Corpo reale*: $\varepsilon = \varepsilon(\lambda)$, funzione di λ .

La radianza che giunge al sensore sarà dunque una radianza spettrale: $L_\lambda = \varepsilon_\lambda L_\lambda^*(T_c)$ dove $L_\lambda^*(T_c)$ rappresenta la radianza spettrale del corpo nero alla temperatura T_c . Comunemente il valore di $\varepsilon = \varepsilon(\lambda)$ è difficilmente identificabile; per tale ragione, si associano all'oggetto energie uscenti, per ogni λ , corrispondenti a quelle di un corpo nero la cui temperatura radiativa sia uguale alla T_r del target in esame. Dalla relazione di Planck in Eq. (1.1), è

infatti possibile ottenere la temperatura dell'oggetto; tale temperatura è detta Temperatura di brillantezza (T_b). Si assume quindi che l'oggetto abbia $\varepsilon = 1$, ma che la temperatura sia una funzione della lunghezza d'onda.

Materiale	Emissività (ε)
Granito	0.815
Feldspato	0.870
Silice	0.909
Quarzo, sabbia	0.914
Dolomite	0.929
Basalto	0.934
Asfalto	0.959
Cemento	0.966
Acqua con pellicola di petrolio	0.972
Acqua chiara	0.993

Tabella 1.1: Emissività spettrale media di diverse coperture a lunghezze d'onda nell'intervallo 8-12 μm .

1.2 SISTEMI DI TELERILEVAMENTO

I requisiti che devono essere soddisfatti da un sistema di telerilevamento sono:

- Identificazione dell'oggetto senza ambiguità;
- Ripetibilità delle misure;
- Soddisfacente copertura superficiale;
- Interpretazione delle osservazioni.

Gli strumenti atti a raggiungere questi scopi possono essere divisi in due categorie: *sensori passivi* e *sensori attivi*.

1.2.1 SENSORI PASSIVI

Nei sistemi passivi, viene misurata l'energia prodotta da una sorgente esterna al sistema; in particolare viene misurata la radianza emessa dal sole e riflessa dal pianeta verso lo spazio, oltre a quella emessa direttamente dalla superficie terrestre (Fig. 1.6).

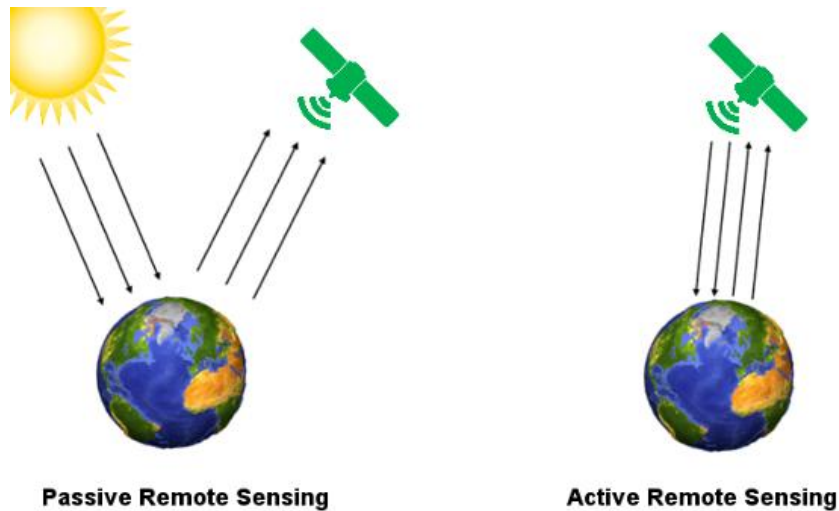


Figura 1.6: Sensori passivi vs sensori attivi.

Tali sensori, secondo la tipologia, operano su varie bande spettrali. I sensori fotografici sono stati i primi ad essere utilizzati per la loro semplicità, possedendo il vantaggio di poter combinare più scene della stessa zona a diverse angolazioni, e quello di combinare tra loro pellicole e sensori fotografici multibanda, per migliorare le informazioni riguardanti l'immagine. I sensori elettro-ottici o *radiometri*, che operano nel visibile e nel lontano infrarosso, sono invece più complessi poiché richiedono un sistema ottico, una componente elettronica per rilevare il segnale e un'unità di uscita. La risoluzione di tali sensori dipende essenzialmente dalla quota del satellite, che rileva l'intensità radiante degli oggetti nel campo di vista, detto IFOV (*Instantaneous Fields Of View*). Una tipica problematica di tali sensori è rappresentata dalla temperatura dei suoi componenti che, al di sopra di una certa soglia, può portare ad un disturbo che ne altera la funzionalità. Necessitano pertanto di tecniche di controllo termico e di raffreddamento, aumentandone la complessità costruttiva.

Tra i sensori passivi, vanno annoverati anche quelli che lavorano con le microonde, che sfruttano configurazioni quali scanner ottici (Fig. 1.7) oppure tecniche di scansione elettronica del lobo dell'antenna, dalle dimensioni della quale dipende la quantità d'informazioni raccolte.

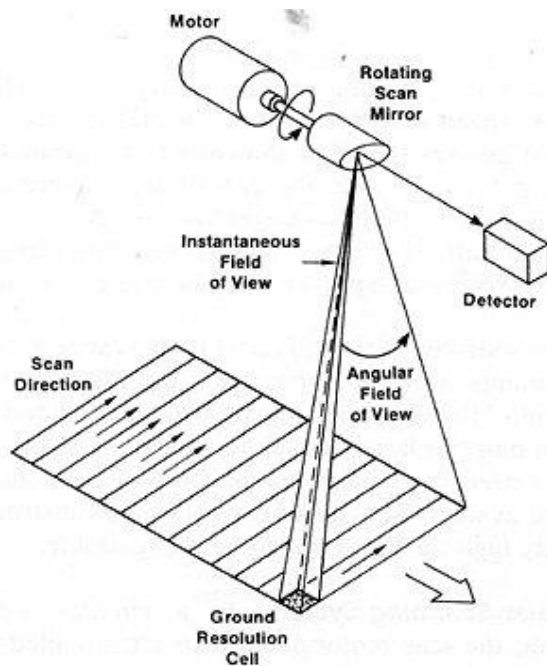


Figura 1.7: Sistema a scansione (*scanner*).

1.2.2 SENSORI ATTIVI

Gli strumenti che misurano le proprietà riflettive della superficie terrestre e degli oggetti, vengono comunemente chiamati radar. Sono costituiti da un'antenna che ha la funzione di trasmettere un segnale, opportunamente modulato, e di ricevere l'eco di ritorno. Essi sono suddivisi in sistemi *coerenti*, quando sono in grado di confrontare la fase del segnale in ricezione con quella trasmessa, e sistemi *non-coerenti* quando misurano solo la potenza.

I radar maggiormente usati sono lo *scatterometro*, l'*altimetro*, lo SLAR (*Side Looking Airbone Radar*) e il SAR (*Syntetic Aperture Radar*).

1.3 ORBITE PER IL TELERILEVAMENTO

Nell'ambito del telerilevamento, sono di particolare interesse quelle orbite che permettono di ottenere peculiari prestazioni quali l'elevata risoluzione spaziale, la possibilità di osservare costantemente, o a intervalli regolari pre-determinati, una stessa regione, il ripetersi delle condizioni d'illuminazione nell'area osservata.

La risoluzione spaziale è funzione diretta della quota cui il satellite orbita, dunque- in tale prospettiva- saranno preferite le cosiddette *orbite basse* o LEO (*Low Earth Orbit*) caratterizzate da quote in cui si abbia il giusto compromesso tra riduzione degli effetti dissipativi dovuti al drag atmosferico e la risoluzione spaziale stessa.

L'osservazione costante o a intervalli regolari di una regione è possibile grazie a orbite in cui il periodo di rivoluzione orbitale risulti in fase con quello di rotazione terrestre, ovvero orbite in cui il numero di rivoluzioni attorno alla Terra completate dal satellite in un intervallo di tempo presenti particolari risonanze con la contemporanea rotazione terrestre; tra queste, di particolare rilevanza sono le orbite *periodiche* e le orbite *geostazionarie* o GEO (*Geostationary Earth Orbit*).

Infine, utilizzando un'orbita in cui la precessione del piano orbitale (della *linea dei nodi*) sia sincrona con il moto di apparente rivoluzione del Sole attorno alla Terra, mantenendo costante l'angolo tra piano orbitale e congiungente Sole-Terra, sarà possibile realizzare le cosiddette orbite *eliosincrone* o SSO (*Sun- Synchronous Orbit*) nella quali le successive osservazioni di una stessa regione avvengono alla stessa ora locale, dunque- approssimativamente- nelle stesse condizioni di luminosità, limitando la necessità di correzioni d'illuminazione (vedi § 1.4.2.3).

Fissate le specifiche della missione, saranno quest'ultime a influenzare la scelta di una tra le tipologie orbitali presentate o, se possibile, la contemporanea combinazione di più d'una di esse. Caratteristiche, vantaggi e svantaggi di ciascuna tipologia sono ora presentati.

1.3.1 ORBITE IN FASE CON LA ROTAZIONE TERRESTRE

Nelle orbite periodiche, il punto sub-satellitare descrive una traccia a terra che si ripete a intervalli regolari, pari alla durata del ciclo di ripetitività (m) espresso in giorni nodali. Durante il periodo di ripetitività, il satellite completa

un numero intero (R) di rivoluzioni (vedi Fig. 1.8). Il grande vantaggio offerto da tale soluzione è di poter osservare una stessa regione a intervalli regolari-programmabili- ogni m giorni nodali. Ciò avviene quando il moto di rivoluzione del satellite è in fase con la rotazione terrestre, matematicamente [Capderou, 2005]:

$$m \cdot D_n = R \cdot T_n \quad (1.3)$$

Con:

- m ed R numeri interi primi tra loro;
- $D_n = \frac{2\pi}{\omega_p - \dot{\Omega}}$ il giorno nodale, in cui ω_p è la velocità angolare di rotazione terrestre e $\dot{\Omega}$ la rotazione della linea dei nodi;
- $T_n = \frac{2\pi}{\dot{M} + \dot{\omega}} = \frac{2\pi}{\dot{\xi}}$ il periodo nodale, in cui \dot{M} è la variazione del moto medio, $\dot{\omega}$ la rotazione della linea delle absidi e $\dot{\xi}$ la variazione dell'argomento di latitudine.

Il parametro in grado di sintetizzare le caratteristiche di periodicità è il numero di rivoluzioni per giorno nodale (q) [King, 1976]:

$$q = \frac{R}{m} = \frac{D_n}{T_n} = N_i + \frac{k}{m} \quad (1.4)$$

Dove:

- N_i è la parte intera di q ;
- k un numero intero minore di m e primo con esso.

Valori caratteristici del parametro q per le orbite basse, in grado di fornire la massima risoluzione spaziale sono dell'ordine di 13-15 [orbite/giorno].

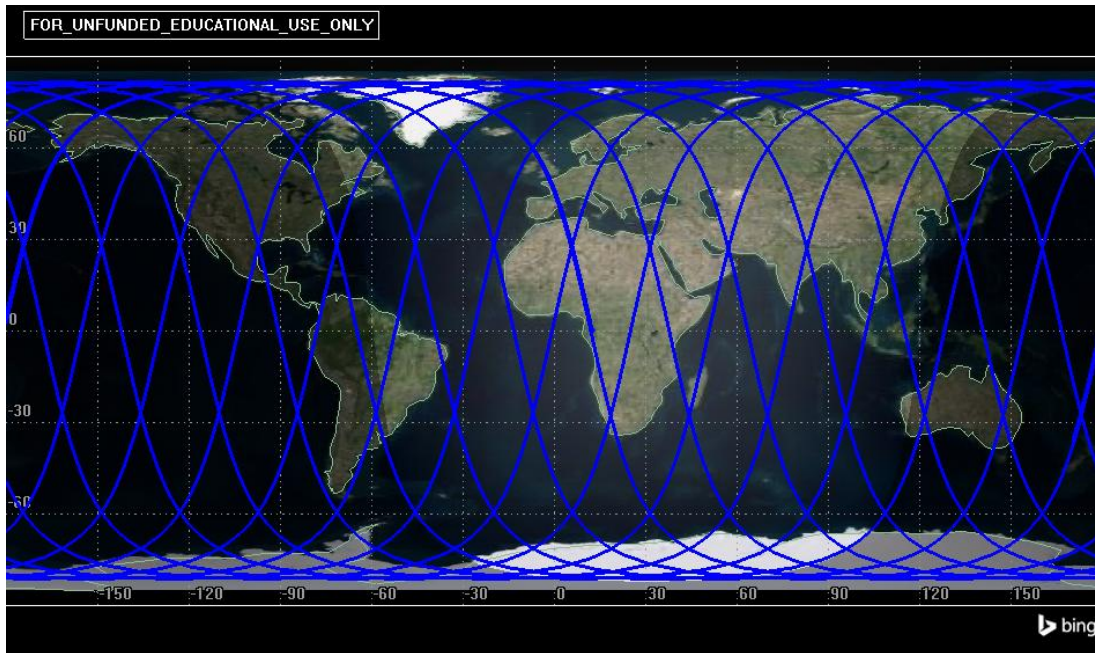


Figura 1.8: Traccia a terra di un'orbita (eliosincrona) periodica con $q=14$ [orbite/giorno] ($R=14$; $m=1$).

Un caso particolare, è quello in cui si ha $q=1$ [orbite/giorno]. Ciò occorre quando $T_n = D_n$, ovvero il periodo nodale del satellite coincide con il giorno nodale. In questo caso, si parla di orbita *geosincrona*, e il moto medio (n) è sincrono con la velocità angolare di rotazione terrestre ($n = \omega_p$); questa condizione è verificata per valori del semiasse maggiore pari a 42164.2 km. In Fig. 1.9 è riportata la traccia al suolo di un'orbita geosincrona con inclinazione non-equatoriale.

Tra le orbite geosincrone, di grande interesse nell'ambito del telerilevamento, in particolare per applicazioni nell'ambito di meteorologia, climatologia, studio dell'atmosfera e caratterizzazione della superficie terrestre, è l'orbita geostazionaria in cui, oltre a porre semiasse pari a quello di geosincronismo, è necessario porre anche eccentricità nulla ($e=0$, orbita circolare) e inclinazione equatoriale ($i=0^\circ$). Nelle orbite GEO, il punto sub-satellitare risulta fisso- stazionario, appunto- sulla linea equatoriale ad una precisa longitudine, e la traccia a terra è puntiforme. In questo modo, è possibile osservare continuamente una porzione della superficie terrestre.



Figura 1.9: Traccia a terra di un'orbita geosincrona non-equatoriale ($i=28^\circ$).

1.3.2 QUOTE PER IL TELERILEVAMENTO

Le orbite geostazionarie presentano, oltre alla possibilità della copertura continua di una precisa regione, il vantaggio di avere un elevato valore del semi-angolo di copertura (θ), definito come:

$$\theta = \arccos\left(\frac{R_p}{R_p + h} \cos \varepsilon\right) - \varepsilon \quad (1.5)$$

Con:

- R_p il raggio planetario terrestre;
- h l'altezza del satellite;
- ε l'angolo di maschera.

Alla quota geosincrona, ponendo angoli di maschera intorno a 10° , si ha infatti una semi-apertura del cerchio di copertura (vedi Fig. 1.12) di circa 70° . Se da un lato ciò consente di coprire con un solo satellite in orbita geostazionaria una

vasta porzione della superficie terrestre, dall'altro si registrano almeno due inconvenienti:

- non è possibile coprire le calotte polari;
- le immagini acquisite avranno una risoluzione spaziale scadente, dell'ordine di 3-5 km.

Per tale ragione, per missioni in cui sia richiesta una più elevata risoluzione spaziale, come nel caso dell'osservazione- strategica o ambientale- della Terra, è indispensabile ricorrere alle quote che caratterizzano le orbite LEO. Inoltre, se si desidera coprire interamente le diverse latitudini, comprese quelle polari, sarà d'obbligo ricorrere a inclinazioni polari o quasi-polari e in particolare, come si vedrà nel paragrafo successivo, a quelle inclinazioni (quasi-polari retrograde) che permettono di ottenere anche la condizione di eliosincronismo.

In tabella 1.2 sono descritte le funzioni operative di alcune delle principali missioni di remote sensing, raggruppate in funzione del tipo di orbita utilizzato [King et al., 2007].

Grande svantaggio dell'orbita bassa è dato dalla ridotta copertura che essa permette di ottenere, con valori della semi-apertura del cerchio di copertura intorno a 20° - 30° , oltre ad una scarsa frequenza di osservazione di una stessa regione, non consentendo la copertura continua dell'area di interesse.

Satellite	Operatore	Altitudine [km]	Inclinazione [°]	Funzione
<i>Medie inclinazioni</i>				
TRMM	NASA JAXA	350-402	35.0	Precipitazioni, radiazioni terrestri
UARS	NASA	585	57.0	Studio della stratosfera
OrbView-1	GeoEye	740	70.0	Fulmini
Geosat Follow-on	Navy	788	108.1	Oceanografia
TOPEX/Poseidon	NASA CNES	1336	66.0	Oceanografia
Jason-1	NASA CNES	1336	66.0	Oceanografia
<i>Orbita eliosincrona</i>				
JERS-1	JAXA	580	98.0	Alluvioni, vegetazione, ghiacci
Landsat 7	USGS	705	98.2	Osservazione terrestre, vulcani, ghiacciai
Terra	NASA	705	98.2	Osservazione terrestre, radiazione terrestre, colore e temperatura superficiale degli oceani, monossido di carbonio, aerosol e caratterizzazione nubi, fire-detection
Aqua	NASA	705	98.2	Temperatura atmosferica, temperatura superficiale degli oceani, fire-detection, colore e temperatura superficiale degli oceani, monossido di carbonio, aerosol e caratterizzazione nubi, proprietà superficiali
ERS-2	ESA	785	98.5	Atmosfera, perdite di petrolio
Envisat	ESA	800	98.6	Oceanologia, analisi atmosferica, venti oceanici, ghiacci, alluvioni
QuikScat	NASA	803	98.6	Venti oceanici
NOAA-14	NOAA	844	98.7	Temperatura superficiale oceani, temperatura atmosferica, nubi
F15	DoD	850	98.8	Ghiacci, temperatura superficiale mari
<i>Orbita geostazionaria</i>				
GOES	NOAA	35800	0	Uragani, vapore acqueo, fire-detection
MSG	EUMETSAT	35800	0	Meteorologia, fire-detection, oceanologia

Tabella 1.2: Quota e inclinazione delle principali missioni di remote sensing.

1.3.3 ORBITA ELIOSINCRONA

Nell'orbita eliosincrona, l'angolo formato dalla congiungente Sole-Terra con il piano orbitale del satellite si mantiene costante, in tal modo, il passaggio del satellite all'equatore, così come a tutte le altre latitudini, avviene alla stessa ora locale, in condizioni d'illuminazione approssimativamente costanti. Ciò avviene quando la rotazione della linea dei nodi avviene ad una velocità

angolare pari a quella di apparente rivoluzione del Sole attorno alla Terra ($\dot{\Omega}_{SUN} \cong 0.98^\circ/\text{giorno}$).

Tenendo conto dei soli effetti perturbativi dell'armonica zonale J_2 , legata allo schiacciamento polare terrestre, la rotazione della linea dei nodi è descritta dalla [Kozai, 1959]:

$$\dot{\Omega} = -\frac{3R_p^2 J_2}{2} \frac{n \cos i}{a^2 (1-e^2)^2} \quad (1.5)$$

In cui:

- J_2 è il valore della corrispondente armonica zonale;
- $n = \sqrt{\mu_p / a^3}$ il moto medio del satellite, con μ_p il parametro gravitazionale planetario e a il semiasse.

In virtù dell'Eq. (1.5), la condizione di eliosincronismo:

$$\dot{\Omega} = \dot{\Omega}_{SUN} \quad (1.6)$$

è verificata per orbita bassa, retrograda, quasi polare (vedi Fig. 1.10), caratteristiche che rendono questa tipologia orbitale tra le più utilizzate nell'ambito del telerilevamento permettendo, oltre alla riproducibilità delle condizioni d'illuminazione solare, anche un'elevata risoluzione e la possibilità di coprire le latitudini più alte.

Infine, di particolare rilevanza sono le orbite periodiche eliosincrone in cui la condizione di eliosincronismo in Eq. (1.6) si somma a quella di periodicità in Eq. (1.4), offrendo contestualmente i vantaggi descritti per ciascuna di queste tipologie orbitali.

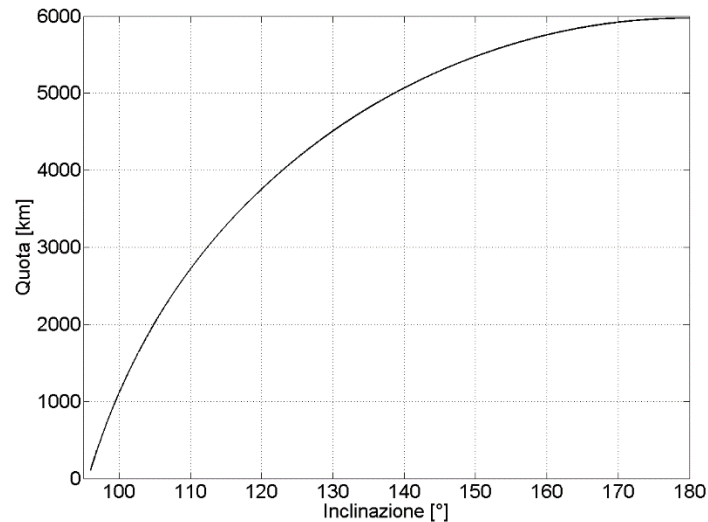


Figura 1.10: Curva di eliosincronismo terrestre.

1.4 IMMAGINI TELERILEVATE

Per alcuni strumenti di remote sensing, la distanza tra il target e la piattaforma gioca un ruolo fondamentale nella determinazione del dettaglio dell'informazione ottenuta e nella grandezza dell'area vista dal sensore. Generalmente, i sensori a bordo di satelliti hanno un grande angolo di vista, ma non riescono a fornire grandi dettagli.

Il dettaglio discernibile dipende dalla risoluzione spaziale del sensore e si riferisce alla dimensione della più piccola caratteristica che può essere rilevata. La risoluzione spaziale dei sensori passivi dipende primariamente dal loro IFOV, che è il cono angolare di visibilità del sensore (A in Fig.1.11) e determina l'area sulla superficie terrestre che può essere vista a una data altitudine in un preciso istante (B). La dimensione dell'area vista è determinata moltiplicando l'IFOV per la distanza dal suolo al sensore (C).

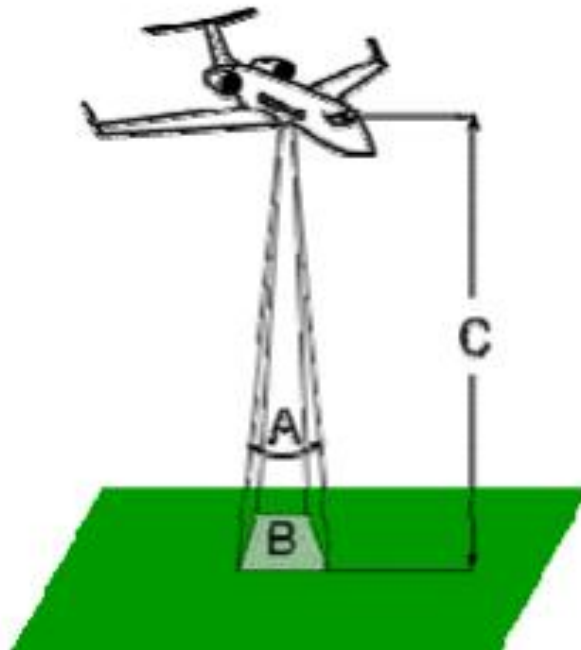


Figura 1.11: Instantaneous Field of View (IFOV).

Quest'area a terra è chiamata *cella di risoluzione* e determina la massima risoluzione spaziale del sensore. Affinché un dettaglio sia rilevato, la sua dimensione deve essere uguale o maggiore della cella di risoluzione. La maggior parte delle immagini telerilevate è composta da una matrice di elementi, o pixel, che sono la più piccola unità di un'immagine. Tali immagini possono essere rappresentate e visualizzate sfruttando la luminosità propria di ogni pixel, indicata da un DN (*Digital Number*). Il DN, a sua volta, è rappresentato mediante un insieme di bit, in genere 8, secondo una scala di toni di grigi che va da 0 a 255 (che corrispondono ad un pixel nero ed uno bianco).

Le immagini acquisite vengono quindi rappresentate da scene in bianco e nero, e la combinazione di immagini multi-spettrali permette di realizzare un'immagine a colori. Tali immagini multi-spettrali misurano la radianza in diverse bande dello spettro, e sono organizzate in tante matrici quante sono le bande di acquisizione del dato.

Banda	Lunghezza d'onda [μm]	Risoluzione	Applicazioni
1	0.52 - 0.72 (visibile)	1 Km	Nuvole, inquinamento, foschia, temporali
2	3.78 - 4.03 (IR)	4 km	Discriminazione della tipologia di nuvole, rilevamento di incendi ed eruzioni vulcaniche, temperature della superficie del mare
3	6.47 - 7.02	4 km	Contenuto di umidità
4	10.2 - 11.2 (IR)	4 km	Venti, forti temporali
5	11.5 - 12.5 (IR)	4 km	Umidità, temperature della superficie del mare, polveri in sospensione, ceneri vulcaniche

Tabella 1.3: Bande e applicazioni di tipo meteorologiche dei satelliti della serie GOES [Berizzi, 2005].

1.4.1 SISTEMI DI ACQUISIZIONE IMMAGINI

Le stazioni di acquisizione sono adibite a ricevere, pre-trattare e registrare i prodotti. Noti gli elementi orbitali del satellite, viene puntata l'antenna di ricezione grazie alla quale possono essere acquisiti dati e informazioni riguardo piattaforma e strumenti. Affinché ci sia scambio di dati tra satellite e stazione, questo deve essere "visibile" dalla stessa, ovvero rientrare nell'area di acquisizione che, in prima approssimazione, è una circonferenza con centro nella stazione e raggio dipendente dalla quota del satellite- come da Eq. (1.5)-, dalla latitudine della stazione e dall'elevazione minima sull'orizzonte per la quale il satellite è acquisibile (Fig. 1.12).

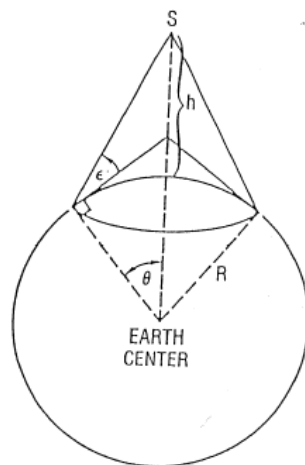


Figura 1.12: Semi-apertura del cerchio di acquisizione di un satellite (θ).

Per acquisire dati relativi ad aree al di fuori dell'acquisizione diretta, è previsto l'utilizzo di registratori che memorizzano i dati relativi alla zona desiderata, oppure vengono impiegati satelliti in orbita geostazionaria come ponte per la trasmissione di dati.

Una volta acquisito il dato grezzo, si passa al sistema di pre-trattamento.

1.4.2 TRATTAMENTO DATI

Ogni sensore è progettato per rilevare la radiazione elettromagnetica emessa in una determinata regione dello spettro. E' quindi necessario filtrare il segnale entrante prima che raggiunga i detectors, i quali hanno il compito di tradurre il segnale analogico in digitale, dando in uscita un numero intero positivo. E' necessario quindi che l'utente finale, oppure la stazione di acquisizione incaricata di generare i prodotti, attui sull'immagine una serie di trasformazioni necessarie alla sua restituzione e interpretazione.

La stazione di acquisizione deve dunque riconoscere e compensare errori, rumori e distorsioni introdotte durante l'acquisizione e la trasmissione dei dati, indicata come fase di pre-processamento. Gli algoritmi che permettono di ottenere un prodotto che rappresenti fedelmente la scena ripresa, si occupano

in particolare di correzioni radiometriche, atmosferiche, geometriche e d'illuminazione.

1.4.2.1 CORREZIONI RADIOMETRICHE

I valori dei pixel rappresentano la radianza della superficie mediante Digital Numbers (DN), che sono calibrati per rientrare in un certo range di valori. La conversione dai DN ai valori di radianza assoluta è un'operazione necessaria per analisi comparate di immagini provenienti da diversi sensori. Poiché ogni sensore ha i propri parametri di calibrazione usati per la registrazione dei valori dei DN, uno stesso DN riferito a due immagini rilevate da sensori differenti, può rappresentare due diversi valori di radianza.

1.4.2.2 CORREZIONI ATMOSFERICHE

La radiazione solare che raggiunge l'atmosfera non è costante, e dipende principalmente da longitudine e latitudine terrestre, e dal periodo dell'anno (data e ora). Oltre a queste variazioni, bisogna considerare che la radiazione elettromagnetica solare riflessa dalla superficie terrestre, prima di giungere al sensore, interagisce con l'atmosfera lungo il suo percorso (Fig. 1.14). Tale passaggio, a causa di gas, particelle di ghiaccio e aerosol, porta ad un cambiamento dell'informazione trasportata dal segnale. Questo cambiamento è causato dai meccanismi di *scattering* e *assorbimento*.

Lo *scattering* si presenta quando particelle o grosse molecole di gas presenti nell'atmosfera, interagiscono con la radiazione elettromagnetica che viene deflessa rispetto al suo andamento originario. Lo scattering peggiora la qualità delle informazioni trasportate a seconda di vari fattori quali la lunghezza d'onda (rispetto alla quale è inversamente proporzionale, quindi immagini riprese nel blu e nel verde sono meno contrastate di quelle nel rosso e nell'infrarosso), la quantità di particelle e la distanza che percorre la radiazione attraverso l'atmosfera

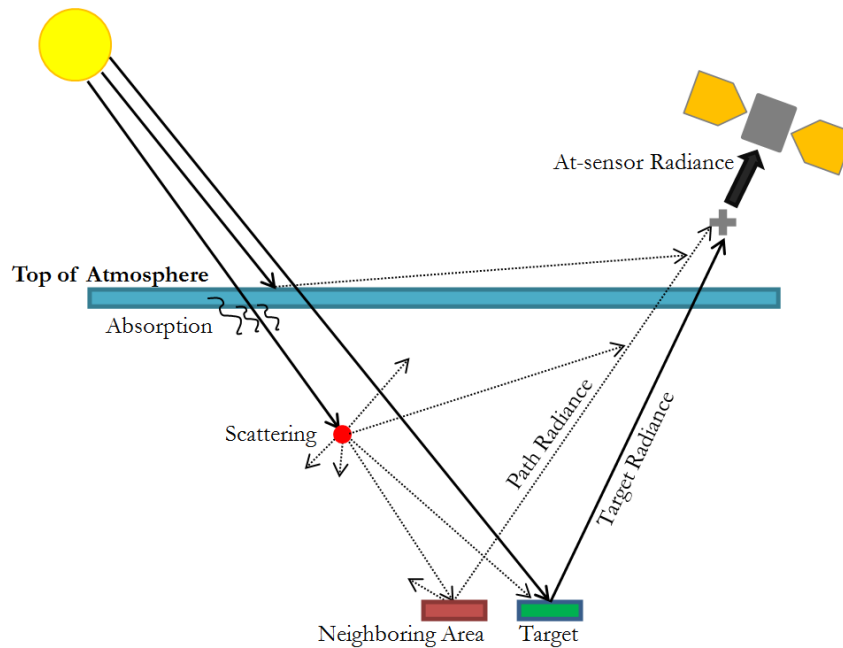


Figura 1.14: Interazione della radiazione con l'atmosfera terrestre.

L'assorbimento invece è un altro meccanismo per il quale le molecole nell'atmosfera assorbono energia a varie lunghezze d'onda. L'ozono, il biossido di carbonio e il vapore acqueo sono le principali fonti di assorbimento della radiazione [Richards, 2009].

1.4.2.3 CORREZIONI GEOMETRICHE

Tali correzioni sono necessarie per eliminare distorsioni dovute al moto e alle caratteristiche superficiali della terra, al movimento della piattaforma e al moto degli specchi degli scanner (nel caso di sensori a scansione). Per effetto della rotazione terrestre, tra la prima e l'ultima riga di scansione dell'immagine si produce uno spostamento di un centinaio di pixel

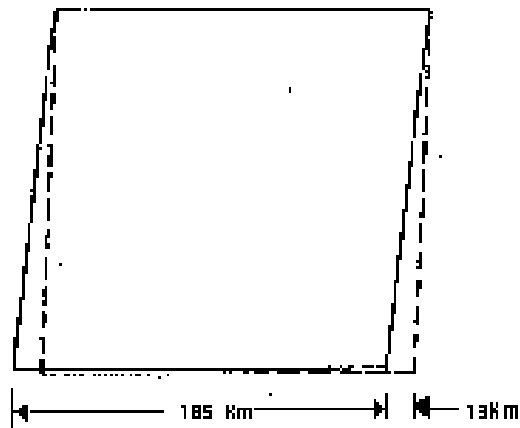


Figura 1.15: Effetto della rotazione terrestre.

Inoltre, la curvatura del pianeta colloca il pixel in una posizione diversa da quella reale, come mostrato dalla Fig 1.16.

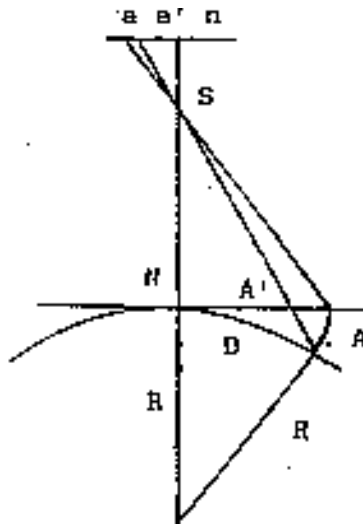


Figura 1.16: Effetto della curvatura terrestre.

I rilievi, infine, distorcono la scena che viene vista sotto diversi angoli (Fig. 1.17): il punto P si trova ad una distanza x e non x' come viene rilevato dal sensore.

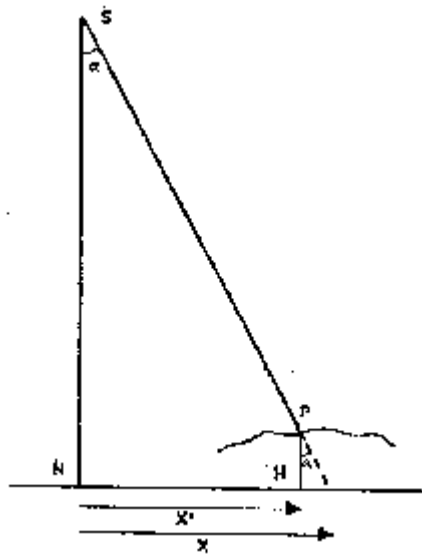


Figura 1.17: Effetto dei rilievi terrestri.

Molti di questi errori sono sistematici o prevedibili, e possono essere ridotti tramite accurati modelli che mettono in relazione il sensore, la piattaforma sulla quale si muove e le caratteristiche geometriche della terra. Ad esempio, per gli errori dovuti ai rilievi, è possibile ricollocare i pixel nella reale posizione mediante un Digital Elevation Model da affiancare all'algoritmo di correzione del rilievo.

1.4.2.4 CORREZIONI D'ILLUMINAZIONE

Questo tipo di correzioni tiene conto delle diverse condizioni d'illuminazione legati all'elevazione del sole. Per correggerlo è necessario moltiplicare il DN di ogni pixel per un fattore dipendente da tale elevazione.

ELEMENTI DI FIRE-DETECTION

Report annuali della Commissione Europea [Schmuck et al., 2012; Schmuck et al., 2011] ben evidenziano l'entità del fenomeno degli incendi boschivi nell'Unione, dove ogni anno vanno in fiamme oltre mezzo milione di ettari di foreste, in circa 50000 incendi. Tale fenomeno, assume particolare rilevanza nei paesi del bacino mediterraneo (vedi Fig. 2.1), in cui fattori climatici producono un elevato livello di stress della vegetazione durante i mesi estivi che induce a un più elevato rischio di infiammabilità della stessa [San Miguel-Ayanz et al., 2009; Barbosa et al., 2009]. In Italia, dove l'ammontare di superficie boschiva combusta ogni anno supera i 50000 ha, il fenomeno assume particolare rilevanza in regioni come la Sardegna in cui, dal 1995 al 2009, è andata in fiamme un'area media di 16601 ha per anno, e il 90% degli incendi risulta dovuto ad origine dolosa (45%) o a negligenze (45%) [Ager et al, 2014]. Per tale ragione, l'adozione di sistemi che permettano di individuare quanto più tempestivamente possibile l'innesco di nuovi incendi può consentire di ridurre considerevolmente i danni ambientali, materiali e sociali, da essi derivanti [Sifakis et al., 2011].

In tale prospettiva, l'utilizzo di sistemi satellitari può essere uno straordinario strumento di supporto, sia per la tempestiva individuazione degli *hotspot* (o *punti-fuoco*), che per la valutazione del livello di stress della vegetazione, e dunque del rischio che si sviluppino nuovi incendi ad esso connesso. Fin dall'inizio degli anni '60 del secolo scorso il servizio forestale statunitense (*U.S. Forest Service*) ha sviluppato presso il *Northern Forest Fire Laboratory* di Missoula (Montana) un sistema di individuazione di incendi boschivi da satellite (*fire-detection*) che prevedeva l'utilizzo di uno spettrometro a scansione lineare operante nell'infrarosso termico, con due

canali: uno nella regione delle SWIR a 3-5 μm e uno nel TIR a 8.5-11 μm [Pilar et al., 1999]. Di quegli anni, risultano di particolare rilievo i lavori proposti da Hirsch [Hirsch, 1963; Hirsch et al., 1971] e Wilson [Wilson e Noste, 1966; Wilson, 1971].

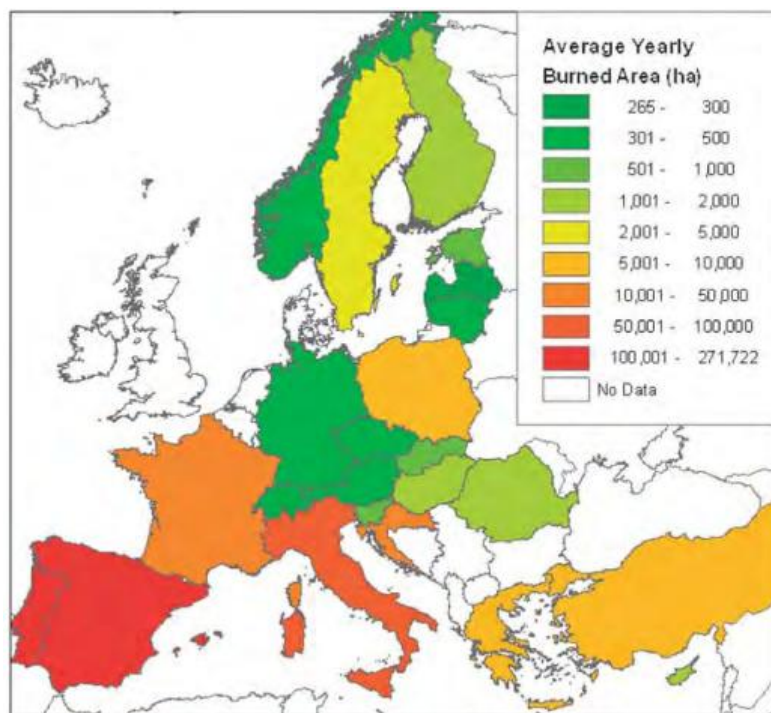


Figura 2.1: Superficie annuale media combusta nei paesi dell'Unione Europea nel periodo 2000-2005 [Barbosa et al., 2009].

Una prima classificazione degli algoritmi di fire-detection con l'ausilio di dati telerilevati, di cui sarà offerta ampia panoramica nei paragrafi successivi, può essere fatta distinguendo tra quelli in cui vengono utilizzate le informazioni fornite da un solo canale (algoritmi mono-canale), e quelli in cui si utilizzato dati provenienti da due o più canali (algoritmi multi-canale). In entrambi i casi, risulta indispensabile disporre delle informazioni nella regione delle SWIR, ed in particolare in canali posti a 3.9 μm . Tale esigenza è dettata da due ragioni; in primo luogo, facendo uso dell'equazione di Wien (Eq. 1.2), si può notare (vedi Fig. 2.2) come, alle temperature che caratterizzano gli incendi boschivi (800-1500 K), il picco di emissione radiativa si ha nell'intervallo 2-4 μm . Inoltre, a 3.9 μm , si ha l'ulteriore vantaggio di lavorare in finestra

atmosferica, ovvero dove si ha il minimo assorbimento atmosferico e la massima trasmissione di energia [Kerle et al., 2004]. Nel caso di sistemi multi-canale, si è soliti scegliere, in aggiunta al canale nello SWIR, un canale nel TIR, a lunghezze d'onda tra 8 μm e 12 μm , dove risulta massima l'emissione dei corpi a temperature prossime a quelle caratterizzanti la superficie terrestre. Ad esempio, per $T=296\text{ K}$, il picco radiativo si ha a $\lambda=9.8\ \mu\text{m}$. Inoltre, anche in questo caso si ha il vantaggio di lavorare in finestra atmosferica.

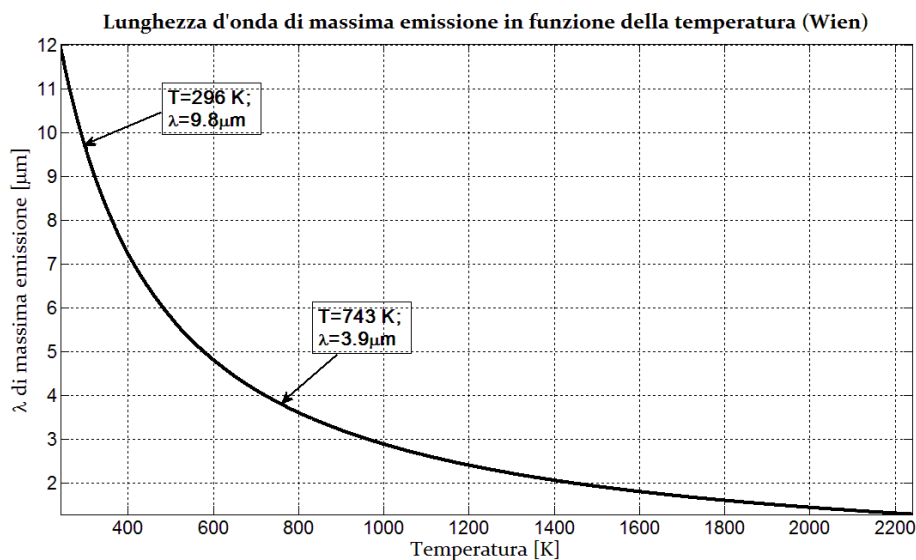


Figura 2.2: Lunghezza d'onda di massima emissione in funzione della temperatura (legge di Wien).

La maggior parte degli algoritmi multi-canale, si avvale della banda a 3.9 μm in combinazione con quella a 10.8 μm , disponibile in tutti i principali scanner adoperati nel campo della fire-detection. In particolare, si utilizzano la temperatura di brillantezza del canale a 3.9 μm ($T_{b3.9}$) e la differenza tra le temperature di brillantezza tra il canale a 3.9 μm e quella a 10.8 μm ($\Delta T = T_{b3.9} - T_{b10.8}$). Tale scelta è dettata dalla diversa risposta che si ha in questi due canali in presenza di incendi all'interno di un singolo pixel. Come evidenziato dalla Fig. 2.3, in accordo con la legge di Planck (Eq. 1.1) essa produce effetti decisamente più significativi nel canale a 3.9 μm , dove il contributo radiativo della frazione di pixel alle temperature caratteristiche degli incendi boschivi risulta largamente maggiore di quello a 10.8 μm .

Conseguentemente, si notano valori crescenti della differenza di temperatura di brillantezza tra i due canali, all'aumentare della frazione di pixel coperta dalle fiamme. Inoltre, questa differenza risulta avere andamento lineare fin quando l'incendio copre il 4% del pixel, valore in corrispondenza del quale si ha $T_{b,3.9} = 350\text{K}$, che solitamente rappresenta quello di saturazione dei più comuni sensori che operino in questa banda [Philip, 2007]. Ai dati telerilevati in questi canali, si accompagnano in genere quelli nei canali alle bande VIS per l'individuazione di pixel caratterizzati da copertura nuvolosa e l'individuazione di falsi allarmi, di cui si dirà nei paragrafi successivi.

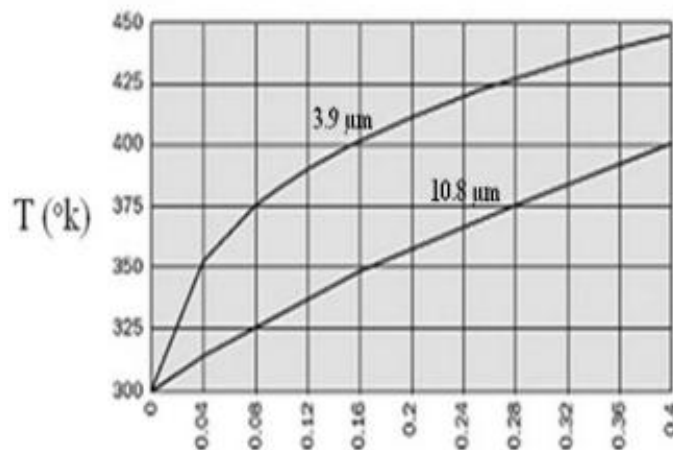


Figura 2.3: Variazione della temperatura di brillantezza nei canali a 3.9 μm e 10.8 μm all'aumentare della frazione di pixel coperta da incendio [EUMETSAT e CGMS, 1999].

Ulteriore distinzione tra sistemi di fire-detection è possibile a partire dalla quota che caratterizza l'orbita cui è posto il satellite dal quale vengono acquisiti i dati telerilevati. Nel caso di orbita bassa, a fronte del vantaggio di poter disporre di immagini a più elevata risoluzione spaziale, si dovrà accettare il limite posto da una scarsa frequenza di osservazione. Altresì, utilizzando satelliti meteorologici posti in orbita geostazionaria, sarà possibile un monitoraggio pressoché continuo (immagini sono solitamente diffuse ogni 15'-30'), ma con una risoluzione spaziale decisamente inferiore (da 3 a 5 km per pixel, in funzione della latitudine). Come è evidente, l'individuazione in tempo reale e la tempestività d'intervento, rendono imprescindibile l'uso di

quest'ultima soluzione, anche a fronte degli svantaggi di varia natura dovuti alla risoluzione spaziale, su tutti le dimensioni minime degli incendi rilevabili.

2.1 PRINCIPALI SENSORI PER FIRE-DETECTION

Algoritmi di fire-detection sono stati sviluppati per i principali sensori di satelliti posti in orbita bassa e geostazionaria. Per quanto concerne i primi, di particolare rilevanza risultano essere i sensori MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) e AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*). Per l'orbita geostazionaria, sono di grande rilevanza, per il continente americano, i sensori a bordo dei satelliti della serie GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) e, per Europa ed Africa, i sensori SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager*) a bordo dei satelliti del sistema meteorologico MSG (*Meteosat Second Generation*).

Lo spettro-radiometro MODIS permette di raccogliere dati in 36 bande spettrali dal VIS al TIR con risoluzione 250 m per i canali 1-2, 500 m per i canali 3-7, e 1 km per le restanti bande. Le lunghezze d'onda dei canali di MODIS sono riportati in tabella 1.1 [modis.gsfc.nasa.gov]. Sensori MODIS sono montati a bordo dei satelliti NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) *Aqua* e *Terra*, nell'ambito dell'EOS (*Earth Observing System*). Essi sono posti in orbita periodica eliosincrona- in cui la traccia al suolo si ripete ogni 16 giorni nodali completando 233 rivoluzioni ($q = 14 + 9/16$ orbita/giorno nodale)-, quasi-circolare ad inclinazione 98.2° e con semiasse di circa 7080 km (quota 705 km) [Salomonson et al., 1988]. I due satelliti, complementari, permettono di acquisire immagini di una stessa regione quattro volte al giorno, registrando due immagini nelle ore diurne e due nelle ore notturne.

Per l'individuazione di incendi mediante l'uso di dati MODIS, risultano significativi i lavori di Kaufman [Kaufman et al., 1998], Justice [Justice et al., 2002] e Giglio [Giglio et al., 2003; Giglio et al., 2008; Giglio et al., 2016].

Banda	Lunghezza d'onda (nm)	Risoluzione (m)	Banda	Lunghezza d'onda (µm)	Risoluzione (m)
1	620-672	250	20	3.660-3.840	1000
2	841-890	250	21	3.929-3.989	1000
3	459-479	500	22	3.929-3.989	1000
4	545-565	500	23	4.020-4.080	1000
5	1230-1250	500	24	4.433-4.498	1000
6	1628-1652	500	25	4.482-4.549	1000
7	2105-2155	500	26	1.360-1.390	1000
8	405-420	1000	27	6.535-6.895	1000
9	438-448	1000	28	7.175-7.475	1000
10	483-493	1000	29	8.400-8.700	1000
11	526-536	1000	30	9.580-9.880	1000
12	546-556	1000	31	10.780-11.280	1000
13	662-672	1000	32	11.770-12.270	1000
14	673-683	1000	33	13.185-13.485	1000
15	743-753	1000	34	13.485-13.785	1000
16	862-877	1000	35	13.785-14.085	1000
17	890-920	1000	36	14.085-14.385	1000
18	931-941	1000			
19	915-965	1000			

Tabella 2.1: Bande dello spettro-radiometro MODIS.

L'AVHRR/3 è la terza ed ultima generazione di uno spettro-radiometro sviluppato dalla NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) in collaborazione con la NASA, e in uso fin dal 1978 con la messa in orbita del satellite TIROS-N. Questa versione, utilizzata per la prima volta nel 1998 sul satellite NOAA-15 (erede della serie TIROS), si avvale di sei canali radiometrici le cui caratteristiche sono riassunte in tabella 2.2 [<http://noaasis.noaa.gov>]. Questo sensore è stato scelto per i satelliti Metop-A e Metop-B nell'ambito missione MetOp (*Meteorological Operational Satellites*) del consorzio europeo EUMETSAT, che prevede la messa in orbita di un terzo satellite (Metop-C) nell'ottobre 2018 [<http://www.eumetsat.int>]. Anche questi satelliti sono posti in orbita bassa eliosincrona periodica- in cui la traccia al suolo si ripete ogni 29

giorni nodali completando 412 rivoluzioni ($q=14+6/29$ orbite/giorno nodale)- con inclinazione polare ($i=98.7^\circ$) ad una quota di circa 820 km [Klaes et al., 2007; Wilson et al., 2010]. Per l'individuazione di incendi mediante AVHRR risultano di primaria rilevanza i lavori di Robinson [Robinson, 1991], Flasse e Ceccato [Flasse e Ceccato, 1996] e Giglio [Giglio et al.,1999; Giglio et al., 2003].

Va ricordato che nonostante il periodo di rivisita (m) di 29 giorni nodali, l'elevato TFOV (Total Field Of View) del sensore consente di acquisire ogni giorno una o 2 immagini della stessa area.

Banda	Lunghezza d'onda (μm)	Risoluzione (km)
1	0.58 - 0.68	1.09
2	0.725 - 1.00	1.09
3A	1.58 - 1.64	1.09
3B	3.55 - 3.93	1.09
4	10.30 - 11.30	1.09
5	11.50 - 12.50	1.09

Tabella 2.2: Bande dello spettro-radiometro AVHRR/3.

I satelliti geostazionari della serie GOES, posti in orbita dalla NOAA, permettono la copertura pressoché completa del continente americano (vedi Fig. 2.4) dal momento che la missione prevede la co-esistenza di due satelliti posti uno a longitudine 75°W (GOES EAST) ed uno a 135°W (GOES WEST). Al momento, le due posizioni sono occupate, rispettivamente, dai satelliti GOES 13 e GOES 15. Le caratteristiche del sensore multi-spettrale dei satelliti GOES (GOES I-M), che fornisce immagini dal VIS al TIR ogni 30', sono riassunte in tabella 2.3 [<http://noaasis.noaa.gov>].

Per la fire-detection con l'ausilio di dati GOES, particolare rilevanza sono i lavori proposti da Prins [Prins et al., 1998], Reid [Reid et al., 2005] e Xu [Xu et al., 2010].

Banda	Lunghezza d'onda (μm)	Risoluzione (km)
1	0.55 - 0.75	1
2	3.80 - 4.00	4
3	6.50 - 7.00	8
4	10.20 - 11.20	4
5	11.50 - 12.50	4

Tabella 2.3: Bande dello spettro-radiometro GOES I-M.

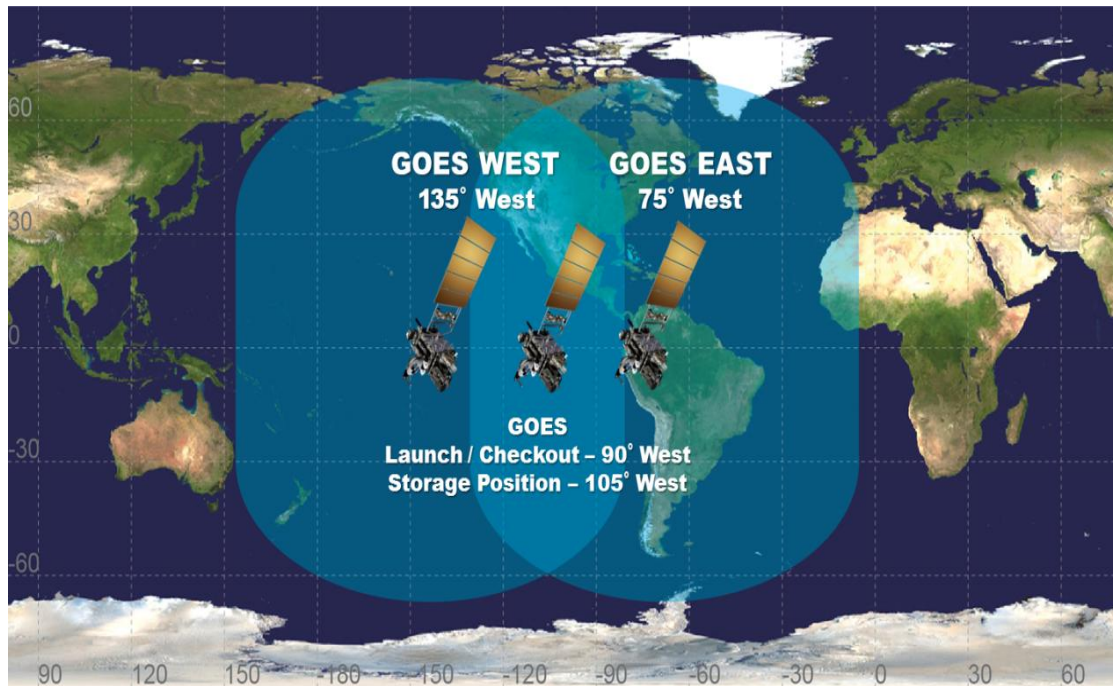


Figura 2.5: Cerchi di acquisizione dei satelliti della missione GOES (NOAA).

Infine, di grande rilevanza per il presente lavoro, sono i satelliti geostazionari del sistema meteorologico MSG e il suo spettro-radiometro SEVIRI, i cui dati sono utilizzati nell'ambito del progetto SIGRI (*Sistema Integrato per la Gestione del Rischio di Incendio*) per realizzare i prodotti che saranno descritti nel *Capitolo 3* e, in particolare, per l'algoritmo SFIDE (*System for Fire-DEtection*) che sarà dettagliatamente presentato nel *Capitolo 4*.

Il satellite geostazionario MSG (in Fig. 2.6), posto in orbita dal consorzio meteorologico EUMETSAT con punto sub-satellitare sul meridiano di Greenwich, ha un diametro di 3,2 m ed altezza di 2,4 m per una massa di 1200 kg ed è in grado di telerilevare immagini ogni 15 minuti (ogni 5' per la modalità

a scansione rapida) grazie allo scanner-radiometro SEVIRI, dell'apertura di 50 cm di diametro, che acquisisce immagini in dodici canali: quattro nel Visibile (VIS) e nel vicino Infra-Rosso (VNIR), e otto nell'Infra-Rosso (IR). Le immagini hanno risoluzione di 3 km al punto sub-satellitare (l'equatore), ad eccezione del canale 12- l'High Resolution Visible (HRV), che fornisce immagini alla risoluzione di 1 km [Aminou, 2002].

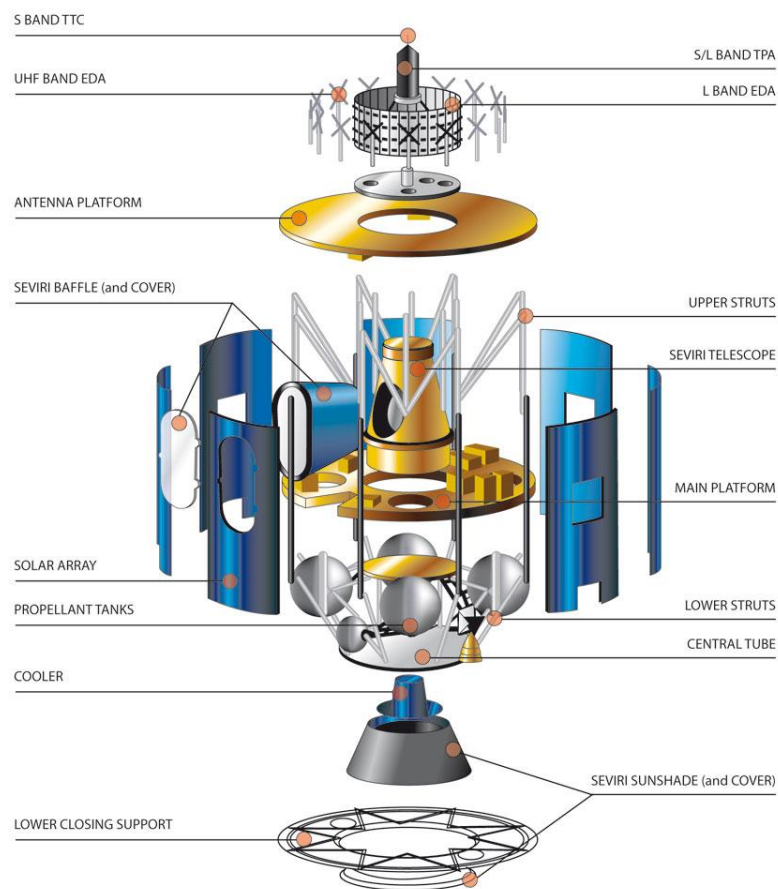


Figura 2.6: Il Satellite MSG (Meteosat Second Generation).

Come si vedrà anche nei paragrafi successivi, le principali applicazioni dei dati dello scanner SEVIRI, le cui caratteristiche dei canali e le relative denominazioni sono state riassunte in Tab. 2.4, sono [Schmid, 2000]:

- Individuazione delle nuvole e realizzazione immagini della superficie terrestre nelle ore diurne, grazie ai due canali VIS 0.6 e VIS 0.8;

- Osservazione di aerosol, umidità del suolo e indici di vegetazione con IR 1.6, VIS 0.6 e VIS 0.8;
- Determinazione del vapore acqueo in atmosfera, delle “nubi sottili” e determinazione del vento con IR 6.2 e IR 7.3;
- I canali IR 3.8, IR 8.7, IR 10.8 e IR 12.0 concorrono all’individuazione delle nuvole e alla stima della loro temperatura. Gli stessi canali sono inoltre utilizzati per la fire-detection (congiuntamente ai due canali VIS) e nella stima della temperatura superficiale (principalmente IR10.8 e IR12.0);
- Il canale IR 9.7 è utilizzato per il monitoraggio dell’alta-atmosfera, e per le stime del contenuto totale di ozono;
- Il canale IR 13.4 è utile alla valutazione della pressione superiore delle nubi, nonché all’individuazione della quota dei venti.

Per quanto concerne l’algoritmo di fire-detection che sarà presentato nel Capitolo 4 del presente lavoro, saranno utilizzati i dati telerilevati in sei dei dodici canali: VIS 0.6 e VIS 0.8 (pixel a copertura nuvolosa), IR 3.9 (soglie di fire-detection), IR 9.7 (soglie di fire-detection e caratterizzazione hot-spot), IR 10.8 e IR 13.4 (caratterizzazione hot-spot), IR 12.0 (pixel a copertura nuvolosa e caratterizzazione hot-spot).

Canale	Denominazione	Lunghezza d'onda (µm)	Lunghezza d'onda nominale (µm)	Risoluzione all'equatore (km)
1	VIS 0.6	0.56 – 0.71	0.635	3
2	VIS 0.8	0.74 – 0.88	0.81	3
3	IR 1.6	1.50 – 1.78	1.64	3
4	IR 3.9	3.48 – 4.36	3.92	3
5	WV 6.2	5.35 – 7.15	6.25	3
6	WV 7.3	6.85 – 7.85	7.35	3
7	IR 8.7	8.30 – 9.10	8.70	3
8	IR 9.7	9.38 – 9.94	9.66	3
9	IR 10.8	9.80 – 11.80	10.80	3
10	IR 12.0	11.00 – 13.00	12.00	3
11	IR 13.4	12.40 – 14.40	13.40	3
12	HRV	0.60 - 0.90	0.75	1

Tabella 2.4: Bande dello spettro-radiometro SEVIRI [www.esa.int].

Circa la fire-detection mediante l'utilizzo di dati MSG-SEVIRI, risultano di grande interesse i lavori proposti da Calle [Calle et al., 2006], Laneve [Laneve et al., 2006], Roberts e Wooster [Roberts e Wooster, 2008] e Amraoui [Amraoui, 2010].

Come ben evidenziato dalle Tab. 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 e come già scritto in precedenza, ciascuno spettro-radiometro presenta bande alle lunghezze d'onda indicate come di maggior utilità nell'ambito della fire-detection. In particolare, per MODIS saranno utilizzati i dati telerilevati nei canali 21 e 22 intorno a 3.9 μm e nei canali 31 e 32 nel TIR, per AVHRR i canali 3B (3.74 μm) e 4 (10.8 μm), per GOES i canali 2 (3.9 μm) e 4 (10.7 μm), per MSG-SEVIRI i canali 4 (3.9 μm) e 9-10 nel TIR (rispettivamente a 10.8 μm e 12 μm). Inoltre, i dati forniti dalle bande nel VIS, sono utilizzati per l'individuazione di pixel contraddistinti da elevata nuvolosità e per l'individuazione di possibili falsi allarmi (vedi § 2.2.1 e § 2.2.3).

Altro aspetto ulteriormente messo in luce da questa carrellata è la frequenza con cui sono disponibili i dati per l'applicazione degli algoritmi su una stessa regione. Come indicato, i sistemi in cui i dati sono acquisiti da orbita LEO, sono in grado di produrre in media due immagini al giorno per satellite, al contrario di quelli in orbita geostazionaria che forniscono dati ogni 15'-30', permettendo un monitoraggio quasi in tempo reale. D'altro canto, la diversa risoluzione spaziale, pari a circa 1 km per MODIS e AVHRR, e intorno a 4 km per GOES e MSG-SEVIRI, consente ai sistemi con sensori in orbita bassa di rilevare incendi di estensione molto minore rispetto a quelli in orbita geostazionaria, dal momento che- a parità di superficie coperta da un incendio- essi occuperanno una percentuale di pixel circa sedici volte maggiore nel primo caso, contribuendo in modo molto più netto all'emissione radiativa totale. Alcuni studi hanno dimostrato, in particolare per SEVIRI, la capacità di rilevare anche incendi di modesta estensione sia in caso di copertura uniforme [Roberts e Wooster, 2008] che per coperture variegata

come quella dell'area mediterranea [Laneve et al., 2006]. La minima estensione rilevabile da algoritmi di fire-detection che utilizzino dati SEVIRI, sarebbe da porre, alle medie latitudini (50°), al di sotto di 0.5 ha [Prins et al., 2001]. Fattori rilevanti circa le dimensioni minime dell'incendio che sia possibile rilevare, sono anche il tipo di copertura e l'omogeneità della stessa su un determinato pixel; in caso di coperture non-omogenee, è questo il caso dell'Europa meridionale o di aree fortemente antropizzate, risulta più difficile valutare l'origine di un aumento di radianza che raggiunge i sensori.

2.2 ALGORITMI DI FIRE-DETECTION

In Fig. 2.7 è stato riprodotto lo schema-tipo della struttura di un algoritmo dedito alla fire-detection da satellite. Partendo dalle immagini telerilevate, rese disponibili a Livello 1B (caso MODIS, riflettanze calibrate) o Livello 1.5 (caso SEVIRI), si rendono necessarie alcune operazioni preliminari prima di procedere all'applicazione delle soglie atte a individuare dapprima i pixel potenzialmente interessati da incendi e, successivamente, quelle in grado di confermare tale ipotesi. In primo luogo, le immagini sono ritagliate al fine di limitare l'indagine solo alla regione d'interesse; in tal modo, oltre a ridurre il costo computazionale d'applicazione dell'algoritmo, sarà possibile definire opportunamente le soglie di individuazione dei punti-fuoco (o *hotspot*), tenendo in debita considerazione le caratteristiche termiche, climatiche e di copertura dell'area-studio. A tal proposito, si pensi ad esempio all'importanza rivestita dal valore locale dell'emissività spettrale (ε) nella stima della temperatura di brillanza.

All'immagine ritagliata si è soliti applicare una maschera che escluda dall'applicazione delle soglie tutti i pixel prevalentemente corrispondenti a corpi d'acqua (*sea mask*).

A questo punto, si rende necessario calcolare le temperature di brillanza di tutti i pixel nei canali più direttamente interessati dalle soglie- ovvero quello intorno a $3.9 \mu\text{m}$ e quelli nel TIR- e stimare le riflettanze nei canali nel VIS. Ciò

è possibile calcolando la radianza (R) di ogni pixel dal *Digital Number* (DN) e tenendo conto del *coefficiente di calibrazione* (c_f) e dell'*Offset* (R_0). Queste informazioni sono contenute nell'immagine nel caso questa sia distribuita in formato *hdf* (caso MODIS) o nell'intestazione del file dell'immagine qualora, come nel caso SEVIRI, questa sia distribuita in formato *pgm*. La relazione tra il DN e la radianza spettrale ha una forma del tipo [Govaerts et al., 2004]:

$$R = c_f \cdot DN + R_0 \quad (2.1)$$

Dove R , c_f e R_0 sono espressi in $[\text{mWm}^{-2}\text{sr}^{-1}(\text{cm}^{-1})^{-1}]$.

Nota la radianza, sarà sufficiente invertire l'equazione di Planck (Eq. 1.1) per calcolare la temperatura di brillantezza (T_b) di ciascun pixel per ciascun canale.

Il calcolo delle riflettanze nei diversi canali VIS (r_{ch}) è possibile, sempre a partire dalla radianza, tramite la:

$$r_{ch} = \frac{\pi R d^2(t)}{I_{ch} \cos(SZA(t, \vec{x}))} \quad (2.2)$$

Dove:

- $d(t)$ è la distanza Sole-Terra espressa in unità astronomiche [AU], funzione del giorno dell'anno;
- I_{ch} è l'irradianza solare di banda (costante nota per ciascuna banda);
- $SZA(t, \vec{x})$ è l'elevazione solare (Solar Zenith Angle), funzione del giorno dell'anno, dell'ora solare locale e della posizione (latitudine e longitudine).

Per i valori caratteristici delle costanti presenti nelle Eqq. (2.1) e (2.2) per SEVIRI si rimanda al successivo Cap. 4 in cui è presentato nel dettaglio l'algoritmo sviluppato nel presente lavoro.

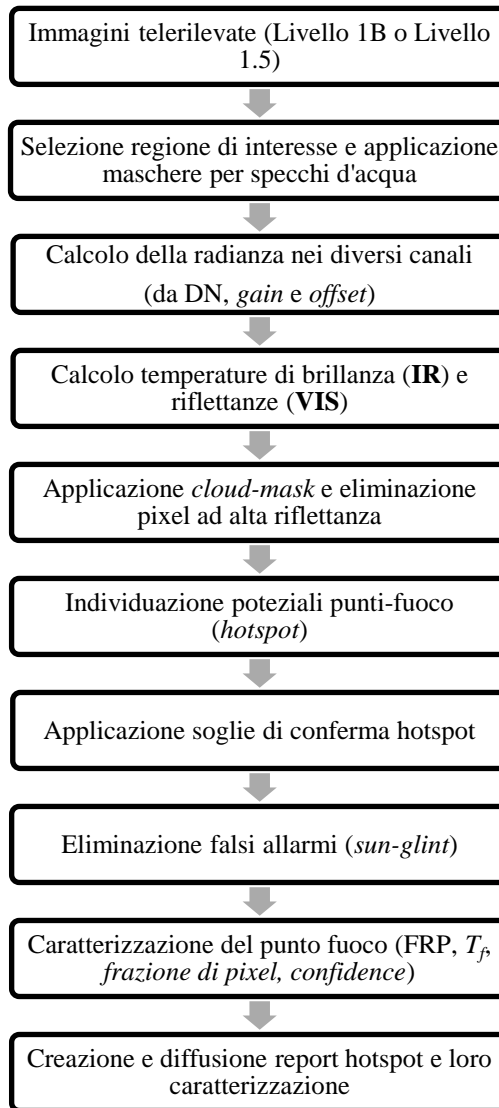


Figura 2.7: Schema-tipo di algoritmi di fire-detection.

Terminate le operazioni preliminari, e note le T_b e le r_{ch} di ciascun pixel nei diversi canali, è possibile utilizzare queste sole informazioni per tutte le successive fasi dell'algoritmo, a patto di porre l'ipotesi semplificativa di corpo nero ($\varepsilon=1$).

2.2.1 CLOUD-MASK

Una delle più comuni cause d'errore (falsi allarmi) nelle ore diurne è rappresentato dalla contaminazione del pixel da parte delle nuvole. Quando sono illuminate dalla luce solare, le nuvole, nel canale a $3.9 \mu\text{m}$, appaiono

come una regione con caratteristiche analoghe a quelle presentate in caso di incendio: anzitutto si ha un aumento della $T_{b3,9}$ dovuto all'accresciuto contributo di riflessione della luce solare; in secondo luogo, si ha una diminuzione della temperatura di brillanza nei canali TIR e, in particolare, della $T_{b10,8}$. Ne consegue un aumento della differenza di temperatura (ΔT) tra i canali a $3.9 \mu\text{m}$ e $10.8 \mu\text{m}$. Come si vedrà nel paragrafo successivo, l'aumento congiunto di $T_{b3,9}$ e ΔT , è uno dei più comuni effetti dovuti alla presenza di incendi che venga preso in esame nella formulazione delle soglie [Amraoui, 2010].

Per tale ragione è indispensabile individuare ed applicare una maschera relativa a tutti i pixel dell'immagine che possano essere ritenuti contaminati da nuvole, in modo da non tenerne conto nelle successive fasi dell'algoritmo. Diverse sono le tecniche adottate per l'individuazione dei pixel nuvolosi. In questo lavoro sarà adottato un algoritmo simile a quello proposto da Saunders e Kriebel per il sensore AVHRR [Saunders e Kriebel, 1988], che prevede l'uso di soglie fisse e distingue il caso diurno da quello notturno. Nelle ore diurne, un pixel è ritenuto contaminato da nuvole se si verificano le seguenti condizioni:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{0.6} + r_{0.8} > r_{MIN} \\ oppure \\ Tb_{12.0} < 265K \\ oppure \\ r_{0.6} + r_{0.8} > r_{min} \text{ e } Tb_{12.0} < 285K \end{array} \right. \quad \text{se } SZA > 0^\circ \text{ (2.3a)}$$

Dove:

- $r_{0.6}$ e $r_{0.8}$ sono, rispettivamente, le riflettanze valutate nei canali a $0.6 \mu\text{m}$ e $0.8 \mu\text{m}$ (canali 1 e 2 sia per SEVIRI che per MODIS);
- $Tb_{12.0}$ è la temperatura di brillanza nel canale a $12.0 \mu\text{m}$ (canale 10 per SEVIRI, 32 per MODIS);

- r_{MIN} e r_{min} sono due valori di soglia indicati da Saunders e Kriebel rispettivamente in 1.2 e 0.8.

Di notte, affinché un pixel venga ritenuto nuvoloso, è sufficiente che sia verificata la condizione:

$$Tb_{12.0} < 265K \quad \text{se } SZA \leq 0^\circ \quad (2.3b)$$

La scelta di r_{MIN} e r_{min} deve essere effettuata tenendo conto che possono verificarsi due distinte situazioni estreme in corrispondenza di valori troppo bassi o troppo elevati di tali soglie. In particolare, se sono scelti valori troppo bassi, si ha un'eccessiva individuazione di pixel nuvolosi (errore di commissione), con conseguente rischio di omissione di punti-fuoco nelle fasi successive. Al contrario, se si pongono valori troppo elevati, si corre il rischio di non individuare pixel contaminati da nubi (errore di omissione) andando incontro a probabili falsi allarmi. In letteratura, i valori minimi considerati sono stati dell'ordine di 0.85 per r_{MIN} , e di 0.5 per r_{min} [Stuttard et al., 1995].

Per ovviare preventivamente a possibili falsi-allarmi, non vengono presi in esame quei pixel considerati ad elevata riflettività superficiale. Condizione per cui nelle ore diurne un pixel venga ritenuto tale è [Giglio et al., 1999]:

$$r_{0.8} > 0.25 \quad (2.4)$$

Valori alternativi della soglia in Eq. (2.4) sono 0.16 [Kennedy et al., 1994] e 0.20 [Flasse e Ceccato, 1996]. Mentre una soglia analoga viene fornita per il canale a 0.6 μm [Arino et al., 1993]:

$$r_{0.6} > 0.25 \quad (2.5)$$

In questo caso, valori troppo bassi della soglia inducono a scartare preventivamente molti più pixel potenzialmente interessati da incendi mentre, valori troppo alti, possono indurre a un cospicuo numero di falsi allarmi.

2.2.2 SOGLIE DI FIRE-DETECTION

Terminata la selezione dei pixel potenzialmente causa di falsi allarmi per via del loro valore di riflettività, è possibile procedere alle fasi successive dell'algoritmo che consentono l'individuazione degli hotspot. Nel diagramma in Fig. 2.7 sono state distinte due diverse operazioni, cui corrisponde una analoga applicazione di soglie opportunamente scelte: una prima fase in cui i pixel oggetto dell'analisi vengono classificati in *non-fuoco* e in *potenziali punti-fuoco*. La seconda, che interessa solo questi ultimi, è atta all'individuazione definitiva degli hotspot. Occorre evidenziare come la distinzione di questi due step dell'algoritmo non sia sempre così netta e, in taluni casi, essi coincidono con l'applicazione di un solo gruppo di soglie, che funge sia da pre-selezione che da conferma dei punti-fuoco.

Per quanto concerne le tipologie di soglie, è possibile distinguere due grandi famiglie: quelle a *soglia fissa* e i cosiddetti *algoritmi contestuali*. In genere, si ricorre alla prima tipologia per l'individuazione delle potenziali anomalie termiche (punti-fuoco), mentre la seconda è utilizzata per la conferma degli stessi.

Sebbene siano stati tentati approcci mono-canale [Muirhead e Cracknell, 1985;], risultati decisamente migliori in termini di individuazione di *hotspot* e elusione dei falsi allarmi, sono ottenuti con approccio multi-canale. Grande limite dell'approccio a singolo canale è che in esso sono ritenuti punti-fuoco quei pixel per cui la temperatura di brillanza nel canale SWIR raggiunga il valore di saturazione (intorno a 335-350 K); in tal modo, è possibile individuare solo incendi che ricoprono una significativa porzione di pixel- circa il 4% (corrispondente a 4 ha nel caso AVHRR) secondo la Fig. 2.2- rendendone utile l'impiego solo per la stima degli effetti di incendi di vaste proporzioni su regioni a copertura forestale omogenea, come nel caso della foresta pluviale [Malingreau e Tucker, 1988; Pereira e Setzer, 1993].

Come detto, i parametri su cui sono poste le soglie sono due: la temperatura di brillantezza nel canale intorno a $3.9 \mu\text{m}$ ($T_{b3.9}$) e la differenza tra le temperature di brillantezza tra i canali a $3.9 \mu\text{m}$ e $10.8 \mu\text{m}$ (ΔT).

2.2.2.1 ALGORITMI A SOGLIE FISSE

Negli algoritmi a soglie fisse, approccio che nella letteratura più recente viene preferito solo per l'individuazione dei potenziali hotspot, superano il test tutti quei pixel in cui siano contemporaneamente rispettate due condizioni del tipo:

$$\begin{cases} T_{b3.9} > T_{b3.9MIN} \\ \Delta T = T_{b3.9} - T_{b10.8} > \Delta T_{min} \end{cases} \quad (2.6)$$

dove $T_{b3.9MIN}$ e ΔT_{min} sono i valori di soglia, rispettivamente, della $T_{b3.9}$ e della ΔT .

Anche in questo caso, la scelta di $T_{b3.9MIN}$ e ΔT_{min} deve essere effettuata tenendo conto del giusto compromesso tra la possibilità di rilevare falsi allarmi e quella di commettere errori in termini di omissione dei punti-fuoco effettivi. Inoltre, si deve tenere conto delle caratteristiche termiche della regione oggetto d'indagine e della copertura della stessa (omogeneità e tipologia). Per tali ragioni si può affermare che non esistono delle soglie fisse che, in assoluto, siano ottimali per tutti i casi-studio, ma esse devono essere adeguatamente valutate per ciascun caso.

Primi tentativi di stima di $T_{b3.9MIN}$ e ΔT_{min} risalgono alla metà degli anni '90 per AVHRR; Arino e Kennedy, in due lavori distinti, indicano le soglie rispettivamente, in 320 K e 15K [Arino et al., 1993; Kennedy et al., 1994], valori ben più conservativi di quelli stimati da Flasse, 311K e 8K [Flasse e Ceccato, 1996]. Successivamente, Dacamara ha individuato in 315 K e 10 K i valori limite per le ore diurne, e in 305 K e 3 K quelli per le ore notturne [Dacamara, 2007].

Report ufficiali diffusi da EUMETSAT indicano invece in 310 K e 5 K (290 K e 0K per la notte) le soglie fisse per un potenziale punto-fuoco e in 310 K e 8K (290 K e 1 K per la notte) quelle di punto-fuoco “certo” [Joro et al., 2008].

Soglie fisse sviluppate in tempi più recenti pongono particolare attenzione alla dipendenza di quest’ultime dal valore dell’elevazione solare, o solar zenith angle (*SZA*), ovvero l’angolo che si forma tra la verticale locale e la congiungente punto sulla superficie-Sole (vedi Fig. 2.8). In particolare, non tenere conto della dipendenza da questo parametro della $T_{b3,9}$, e dunque della relativa soglia, indurrà ad una scelta che produrrà inevitabilmente una delle seguenti casistiche:

- Se la soglia scelta è particolarmente elevata, quindi adeguata ai valori di $T_{b3,9}$ caratteristici delle ore centrali del giorno (*SZA* contenuto), si commetteranno errori di omissione dei punti-fuoco alle ore in cui il *SZA* risulta più elevato e la $T_{b3,9}$ più bassa (prima mattina e tardo-pomeriggio);
- Se, altresì, la soglia scelta risulta particolarmente contenuta, pur limitando le omissioni per valori elevati del *SZA*, si corre il rischio di produrre un numero consistente di falsi allarmi nelle ore a ridosso del mezzogiorno locale.

Per tale ragione, è possibile ricorrere a soglie fisse dipendenti linearmente dal *SZA*, del tipo:

$$\begin{cases} T_{b3,9} > T_{b3,9_0} - c_{3,9} \cdot SZA \\ \Delta T = T_{b3,9} - T_{b10,8} > \Delta T_0 - c_{\Delta T} \cdot SZA \end{cases} \quad (2.7)$$

Dove:

- $T_{b3,9_0}$ e ΔT_0 sono due costanti opportunamente scelte e pari al valore delle soglie nel caso in cui sia $SZA = 0^\circ$ (Sole allo zenith);

- $c_{3,9}$ e $c_{\Delta T}$ sono i due coefficienti lineari- espressi in [K/gradi]- che regolano la decrescita della soglia all'aumentare del SZA , quest'ultimo espresso in gradi.

Per la fire-detection sul continente africano mediante dati SEVIRI, i coefficienti $c_{3,9}$ e $c_{\Delta T}$ sono stati stimati, rispettivamente, in 0.3 e 0.0049 [Roberts e Wooster, 2008].

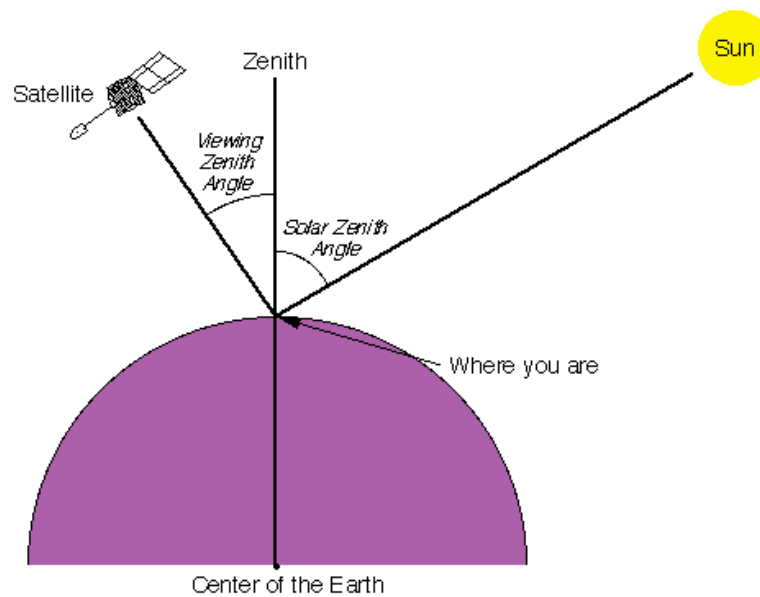


Figura 2.8: Solar Zenith Angle (SZA).

Un'originale strada alternativa alle soglie fisse o linearmente dipendenti dal SZA , e *trait d'union* tra l'approccio a soglie fisse e ad algoritmi contestuali, è quella indicata da Van der Bergh, che ha proposto un metodo multi-temporale in cui le soglie sono ricavate da un'analisi statistica dell'andamento di $T_{b3,9}$, ΔT e delle rispettive deviazioni standard nella giornata che precede quella dell'analisi [Van der Bergh e Frost, 2005].

2.2.2.2 ALGORITMI CONTESTUALI

L'approccio mediante algoritmi contestuali, in taluni casi utilizzato per la conferma dei potenziali punti-fuoco ipotizzati con le soglie fisse [Flasse e

Ceccato, 1996; Amraoui, 2010], in altri- soprattutto per MODIS- come test unico per l'individuazione degli hotspot [Kaufman, 1998; Giglio et al., 1999], si basa sulla valutazione dei valori medi di $T_{b3.9}$, ΔT e delle rispettive deviazioni standard ($\delta_{T_{b3.9}}$ e $\delta_{\Delta T}$) in regioni centrate nel presunto punto-fuoco, di dimensioni $n \times n$, che vanno da $3 \times 3 / 5 \times 5$ pixel nel caso di sistemi basati su dati da satellite GEO fino a 21×21 pixel per quelli da orbita LEO.

In questo caso, l'individuazione (o la conferma) dei punti-fuoco avviene mediante il superamento di soglie del tipo:

$$\begin{cases} T_{b3.9} > \overline{T_{b3.9}} + k_{T_{b3.9}} \cdot \delta_{T_{b3.9}} - k_0 \\ \Delta T > \overline{\Delta T} + \max(k_{\Delta T} \cdot \delta_{\Delta T}, \Delta T_{MIN}) \end{cases} \quad (2.8)$$

Dove:

- $\overline{T_{b3.9}}$ e $\overline{\Delta T}$ sono i valori medi, rispettivamente, di $T_{b3.9}$ e ΔT nel sotto- riquadro $n \times n$ con centro nel punto-fuoco;
- $k_{T_{b3.9}}$ e $k_{\Delta T}$ sono coefficienti adimensionali opportunamente scelti;
- k_0 e ΔT_{MIN} sono due costanti in [K];
- $\max(k_{\Delta T} \cdot \delta_{\Delta T}, \Delta T_{MIN})$ un operatore che restituisce il valore massimo tra $k_{\Delta T} \cdot \delta_{\Delta T}$ e ΔT_{MIN} .

Valori caratteristici di $k_{T_{b3.9}}$ e $k_{\Delta T}$ vanno da 2 a 4, di k_0 da 0 K a 3 K, di ΔT_{MIN} da 2.5 K a 6K. In particolare, per MODIS, Giglio indica: $k_{T_{b3.9}} = 3$, $k_{\Delta T} = 3.5$, $k_0 = 0$ K, $\Delta T_{MIN} = 6$ K [Giglio et al., 2016]. Mentre, per SEVIRI, Roberts e Wooster indicano: $k_{T_{b3.9}} = 2$, $k_{\Delta T} = 2$, $k_0 = 0$ K, $\Delta T_{MIN} = 2.5$ K [Roberts e Wooster, 2008]. I valori più contenuti scelti per l'orbita GEO sono riconducibili alla minor estensione della griglia $n \times n$ e, conseguentemente, alla maggior influenza che il punto-fuoco ha nella stessa, con un marcato aumento delle deviazioni standard.

2.2.3 ELIMINAZIONE FALSI ALLARMI: SUN-GLINT

Superate le fasi di cloud-mask e le soglie di fire-detection, una delle principali fonti residuale di falsi allarmi è addebitabile al fenomeno detto *sun-glint*, ovvero alla riflessione della luce solare su specchi d'acqua in grado di causare un aumento della componente radiativa percepita dai sensori, e dunque di $T_{b3,9}$ e ΔT che induce, in determinati pixel, l'erroneo superamento dei test termici.

Particolarmente a rischio sono i pixel posti sulla linea di costa, quando si verifica una quasi corrispondenza tra il valore dell'angolo (ϑ_g) formato tra la congiungente superficie-satellite e la direzione speculare alla radiazione solare che incide sullo specchio d'acqua (vedi Fig. 2.9). Ulteriore problema che si presenta per questi pixel di frontiera, e particolarmente evidente nei sistemi GEO in virtù della bassa risoluzione, è dato dalla copresenza nello stesso pixel di terra ed acqua; la presenza di quest'ultima, causa alterazioni nella valutazione di $T_{b3,9}$ e ΔT , cui segue una contaminazione nell'applicazione degli algoritmi contestuali (deviazioni standard molto alte).

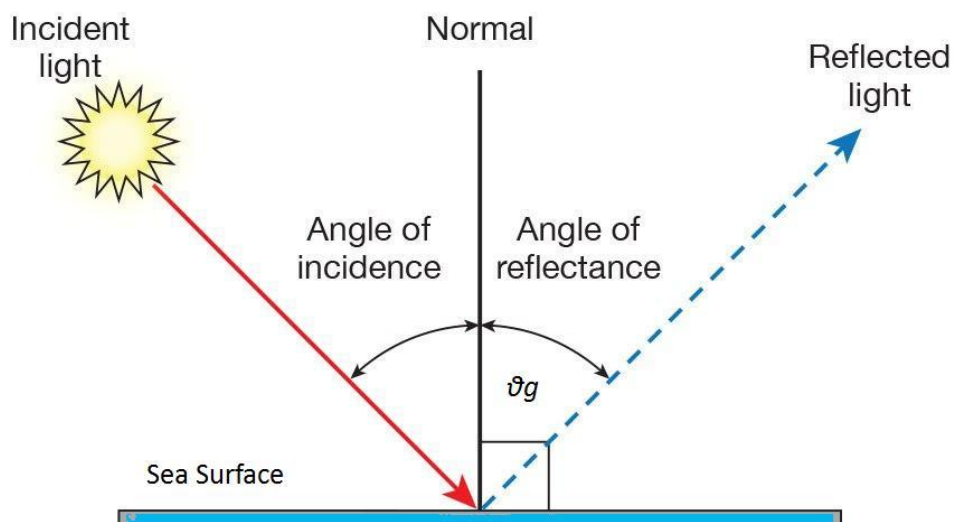


Figura 2.9: Sun-glint, angolo di riflettanza (ϑ_g).

Per tali ragioni, occorre prestare particolare attenzione nella valutazione dei pixel costieri, ricorrendo a soglie più selettive o ad ulteriori test basati sulla valutazione di \mathcal{G}_g , sui valori di riflettanza e sul numero di pixel coperti da acqua nella griglia 3x3 centrata nel punto-fuoco. Per MODIS, condizioni di rigetto dell’hotspot sono, ad esempio [Giglio et al., 2016]:

$$\begin{cases} \mathcal{G}_g < 2^\circ \\ \text{oppure} \\ \mathcal{G}_g < 10^\circ \text{ e } r_{0.6} > 0.1 \text{ e } r_{0.8} > 0.2 \text{ e } r_{2.1} > 0.12 \\ \text{oppure} \\ \mathcal{G}_g < 15^\circ \text{ e } N_w > 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

Dove:

- $r_{2.1}$ è la riflettanza valutata nel canale a 2.1 μm di MODIS (canale 7);
- N_w è il numero dei *pixel-acqua* (coperti dalla sea mask) nella griglia 3x3.

Delle tre condizioni espresse in Eq. (2.9) si può notare come solamente la seconda dipenda, oltre che da fattori geometrici, anche dalle condizioni meteorologiche, nella misura in cui la contaminazione da parte di nubi possa far aumentare i valori della riflettanza.

2.2.4 CARATTERIZZAZIONE DEL PUNTO-FUOCO

Terminata l’identificazione dei falsi allarmi, è possibile procedere alla caratterizzazione degli hotspot, in termini di dimensioni (porzione di pixel occupata dal fuoco), temperatura del fuoco (T_f), Potenza Radiante del Fuoco, FRP (*Fire Radiative Power*) e livello di confidenza del punto-fuoco.

2.2.4.1 PORZIONE DI PIXEL E TEMPERATURA DEL FUOCO

La stima della porzione di pixel occupata dall’incendio- dunque della superficie dello stesso- e della temperatura del fuoco può essere eseguita con

l'approccio bi-canale proposto da Dozier e basato sulla stima delle componenti della radianza che il pixel avrebbe in assenza di incendi, ed identificata con quella data dalla temperatura di background (T_b) e di quella direttamente dovuta alla presenza dell'incendio, quindi legata a T_f , nei due soliti canali a 3.9 μm e 10.8 μm [Dozier, 1981]. Nell'ipotesi di corpo grigio con $\varepsilon=1$, il metodo può essere riassunto mediante due semplici equazioni:

$$\begin{cases} T_{b3.9} = L_{3.9}^{-1} \left[\rho L_{3.9}(T_f) + (1-\rho)L_{3.9}(T_b) \right] \\ T_{b10.8} = L_{10.8}^{-1} \left[\rho L_{10.8}(T_f) + (1-\rho)L_{10.8}(T_b) \right] \end{cases} \quad (2.10)$$

Dove:

- $L_{3.9}^{-1}$ e $L_{10.8}^{-1}$ sono le funzioni inverse della legge di Planck (Eq. 1.1), che permettono di calcolare la temperatura di brillanza a partire dalla radianza;
- ρ è la frazione di pixel occupata dall'incendio;
- T_f è la temperatura del fuoco in [K];
- T_b la temperatura di background, ovvero una temperatura che sia ragionevole ipotizzare essere caratteristica del pixel in assenza di incendi, in [K];
- $L_{3.9}(T_f)$, $L_{3.9}(T_b)$, $L_{10.8}(T_f)$, $L_{10.8}(T_b)$ le radianze che caratterizzerebbero il pixel nei due diversi canali in caso esso fosse omogeneamente alla temperatura T_f o T_b .

È evidente che il sistema in Eqq (2.10) risulti risolubile solo nel caso in cui si consideri nota la T_b ed incogniti i soli valori di ρ e T_f . Affinché ciò si verifichi, si deve assumere un valore adeguatamente stimato per la temperatura di background. Una soluzione è fornita dall'assumere, per ciascun canale, un valore di T_b pari alla media delle temperature di brillanza di una griglia $n \times n$ centrata nel pixel termicamente anomalo, ma dalla quale sia

escluso quest'ultimo. Una seconda strada è fornita da un'indagine statistica mirata a stimare la probabile T_b di un pixel in funzione del periodo dell'anno e dell'ora locale.

In ogni caso, il sistema di Eqq. (2.10) perde di significato nel caso in cui il pixel risulti saturato (circa 335 K per SEVIRI).

2.2.4.2 FIRE RADIATIVE POWER

Una quantità che permette ulteriormente di caratterizzare l'incendio è dato dalla FRP (*Fire Radiative Power*), ovvero la Potenza Radiante del Fuoco che, se integrata nel tempo, permette di calcolare l'*Energia Radiante del Fuoco* (FRE) e quindi offrire una stima di massima della biomassa combusta nel corso dell'incendio.

In questo caso, è possibile procedere attraverso due distinte metodologie, una basata su un approccio bi-canale, che segue la risoluzione del sistema presentato nel § 2.2.4.1, e l'altra basata su un approccio mono-banda, che utilizza come dato la radianza nel canale SWIR.

Risolte le Eqq. (2.10), saranno note T_f e ρ ; da quest'ultima, sarà facilmente valutabile l'area interessata dall'incendio e dunque stimare attraverso la legge di Stefan-Boltzmann [Zhukov et al, 2006]:

$$FRP_{SB} = A_f \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot (T_f^4 - T_b^4) \quad (2.11)$$

Dove:

- FRP_{SB} è la Potenza Radiante di Fuoco stimata mediante Stefan-Boltzmann, in [W];
- $A_f = \rho A_{PIXEL}$ è l'area interessata dal fuoco in [m²] e A_{PIXEL} è l'area del pixel in [m²];
- ε_f è l'emissività che caratterizza A_f (si è soliti assumere $\varepsilon_f = 1$);

- σ la costante di Stefan-Boltzmann);

Un'alternativa all'approccio bi-canale che non richiede la conoscenza preliminare di T_f e ρ è quello offerto dall'equazione approssimata di Wooster [Wooster et al., 2005]:

$$FRP_W = \frac{A_{PIXEL} \cdot \sigma \cdot \varepsilon_f}{a \cdot \varepsilon_{3,9}} L_{3,9} \cong \frac{A_{PIXEL} \cdot \sigma}{a} L_{3,9} \quad (2.12)$$

In cui:

- FRP_W è la Potenza Radiante di Fuoco stimata secondo Wooster, in [W];
- $\varepsilon_{3,9}$ è l'emissività spettrale nel canale intorno a 3.9 μm ;
- a è una costante, caratteristica del sensore, che permette di approssimare, nel range $600 < T_f < 1400$ K, la legge di Planck come: $B(\lambda, T_f) \cong a T_f^4$; in Fig. 2.10a è offerto un confronto in valore assoluto tra la FRP_W (approssimata mediante la costante a) e la FRP correttamente calcolata con l'equazione di Stefan-Boltzmann, nella Fig. 2.10b la differenza viene riportata in termini percentuali. Le figure, ed in particolare la Fig. 2.10b, ben evidenziano l'ottima rispondenza della FRP_W rispetto alla FRP reale nell'intervallo $600 < T_f < 1400$. In Tabella 2.5 sono riportate le costanti individuate da Wooster per i principali sensori utilizzati nell'ambito della fire-detection.

Stimata con uno dei due metodi descritti la FRP , sarà sufficiente integrare tale grandezza (che si ricorda avere le dimensioni di una potenza) rispetto al tempo di durata dell'incendio per calcolare l'energia totale radiata dall'incendio. In realtà, potendo disporre di immagini solo ad intervalli temporali (T_{rate}) pari alla frequenza con cui esse vengono diffuse dallo specifico sistema satellitare, l'integrazione deve essere discretizzata:

$$FRE = \int_{t_{inizio}}^{t_{fine}} FRP dt \cong \sum_1^N FRP_i \cdot T_{rate} \quad (2.12)$$

Con:

- t_{inizio} e t_{fine} i tempi di inizio e fine dell'incendio;
- N il numero di immagini in cui l'incendio viene individuato;
- FRP_i la FRP stimata in ciascuna immagine in cui l'incendio è individuato.

Nel caso in cui l'incendio sia condiviso tra due o più pixel, l'Eq. (2.12) dovrà essere applicata a ciascun punto-fuoco, e la FRE totale dell'incendio sarà data dalla somma delle FRE dei singoli punti-fuoco che lo compongono.

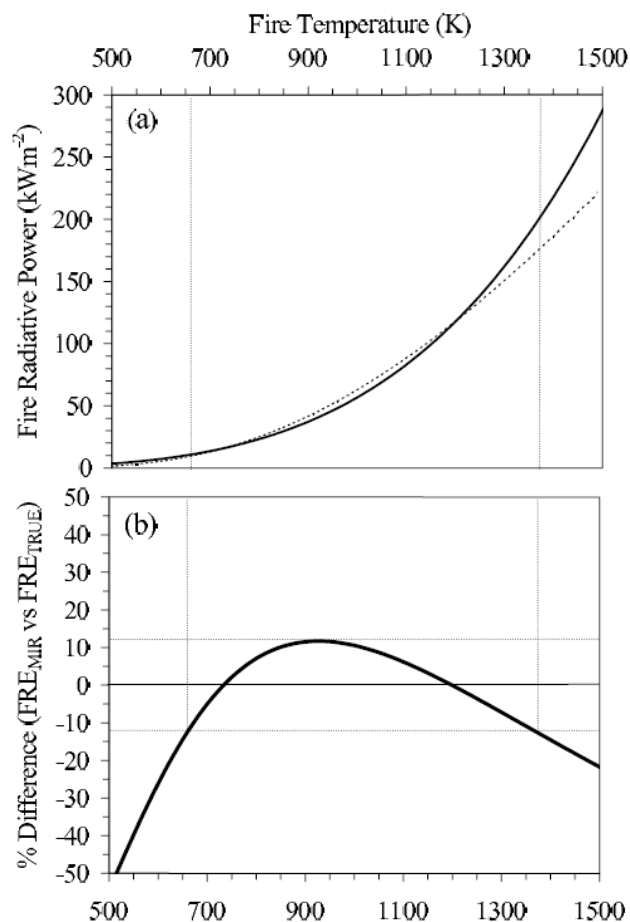


Figura 2.10: a) Differenza tra la FRP calcolata con Stefan-Boltzmann (linea solida) e stimata con Wooster (linea tratteggiata); b) Differenza espressa in percentuale [Wooster et al., 2005].

Nota la FRE , è possibile stimare la biomassa combusta (BB) mediante la [Roberts e Wooster, 2008]:

$$BB \cong C_r \cdot FRE \quad (2.13)$$

In cui $C_r = 0.368$ [kg/MJ] è il rapporto di combustione della biomassa. Ed è infine, nota A_f è possibile stimare la densità di biomassa combusta (ρ_B) [Laneve et al., 2009]:

$$\rho_B \cong \frac{BB}{A_f} \quad (2.14)$$

Spettro-radiometro	$\alpha, \times 10^{-9}$
Terra MODIS	2.96
Aqua MODIS	2.98
BIRD HSRS	3.33
GOES-8 Imager	3.07
GOES-9/10 Imager	3.06
GOES-12 Imager	3.08
<u>Meteosat-8 SEVIRI</u>	<u>3.06</u>
AGEMA 550	3.08

Tabella 2.5: Valori della costante α per i principali spettro-radiometri [Wooster et al., 2005].

2.2.5 CONFIDENCE LEVEL

Sebbene elevati valori della FRP siano un ottimo indice di affidabilità del punto-fuoco, sono disponibili in letteratura algoritmi in grado di stimare in modo euristico il livello di confidenza (C) di ciascun hotspot. Tra questi, risulta di particolare rilevanza quello ideato per MODIS da Giglio e calcolato come la media geometrica di cinque diversi parametri (C_i) [Giglio et al., 2003]. Il valore di ciascun C_i è valutato mediante una diversa funzione-rampa, del tipo:

$$S(\chi; \alpha, \beta) = \begin{cases} 0 & \text{se } \chi \leq \alpha \\ (\chi - \alpha) / (\beta - \alpha) & \text{se } \alpha < \chi < \beta \\ 1 & \text{se } \chi \geq \beta \end{cases} \quad (2.15)$$

L'indice di confidenza del punto-fuoco è dato dalla:

$$C = \sqrt[5]{C_1 C_2 C_3 C_4 C_5}$$

Con:

- $C_1 = S(T_{3.9}; \overline{T_{3.9}}, T_{\text{sat}})$, in cui T_{sat} è la temperatura di saturazione del canale a $3.9 \mu\text{m}$;
- $C_2 = S(z_{3.9}; 3.0, 6)$, in cui $z_{3.9} = (T_{3.9} - \overline{T_{3.9}}) / \delta_{T_{3.9}}$;
- $C_3 = S(z_{\Delta T}; 3.5, 6)$, in cui $z_{\Delta T} = (T_{\Delta T} - \overline{T_{\Delta T}}) / \delta_{\Delta T}$;
- $C_4 = 1 - S(N_c; 0, 4)$ con N_c il numero di pixel coperti dalla cloud-mask nell'intorno 3×3 del punto-fuoco;
- $C_5 = 1 - S(N_w; 0, 4)$.

Nelle ore notturne, i parametri C_4 e C_5 non sono considerati, mentre in C_1 si pone $T_{\text{sat}} = 320 \text{ K}$.

2.2.6 CREAZIONE E DIFFUSIONE DEI REPORT

Nota la posizione degli hotspot e le loro caratteristiche, possono essere creati dei report la cui tempestiva diffusione alle autorità preposte alla prevenzione e al contrasto degli incendi può comportare una rilevante riduzione degli effetti degli stessi, in termini economici, ambientali e sociali. Affinché l'allerta sia efficiente, è indispensabile che gli algoritmi di fire-detection permettano una rapida individuazione degli incendi in corso. Ciò è possibile solo mediante l'uso di sistemi basati su dati da satellite

geostazionario, la cui diffusione ogni 15'-30' (anche 5' se si considera il caso delle immagini del sistema RSS, Rapid Scan System, Meteosat 9), come più volte detto, permette un'analisi pressoché in tempo reale. Essi possono validamente essere coadiuvati dai sistemi in orbita bassa, la cui risoluzione temporale pone un limite invalicabile alla tempestività nell'individuazione degli hotspot.

Molti dei principali algoritmi visti per SEVIRI o GOES risultano plasmati per applicazioni sulle vaste foreste pluviali dell'Africa o delle Americhe, dove l'omogeneità della coperture semplifica notevolmente l'analisi, le soglie adottate risultano molto selettive e finalizzate principalmente a rilevare incendi di grandi dimensioni (>50/100 ha) evitando falsi allarmi, e dunque poco interessate all'aspetto della tempestività dell'individuazione dei nuovi incendi. Per tale ragione, nel presente lavoro sono stati condotti tentativi atti ad apportare sostanziali modifiche alle soglie reperibili nella letteratura corrente, e finalizzate non solo ad una corretta individuazione di incendi di grandi dimensioni, ma anche al celere riconoscimento degli stessi per fornirne tempestiva comunicazione agli enti preposti allo spegnimento degli incendi (Vigili del Fuoco, Protezione Civile e Corpo Forestale dello Stato). In tale opera, una delle difficoltà maggiori è data dalla disomogeneità nella copertura che caratterizza l'area mediterranea, oggetto dell'analisi.

IL PROGETTO SIGRI

È ormai chiara l'utilità delle tecniche di telerilevamento nella prevenzione e nel monitoraggio dei disastri ambientali. In particolare, l'osservazione della Terra da satellite può essere sfruttata per far fronte al problema degli incendi che ogni anno, non solo nella stagione estiva, porta disastrose conseguenze nell'area mediterranea (Italia, Spagna, Grecia e Francia in primis), devastando centinaia di migliaia di ettari di terreno, in particolare a copertura boschiva.

Il progetto SIGRI (*Sistema Integrato per la Gestione del Rischio Incendi*) è stato avviato nel Novembre 2008 dall'Agenzia Spaziale Italiana nell'ambito del settore di Osservazione della Terra applicata alla gestione dei disastri naturali e indotti dall'uomo, e si proponeva di dimostrare le potenzialità dei sistemi di telerilevamento per la valutazione del rischio, il monitoraggio e la gestione degli incendi.

Il principale destinatario dei prodotti del progetto SIGRI è il Dipartimento della Protezione Civile, coinvolto nel consolidamento dei requisiti di prodotto e nella validazione su aree-campione. Tali prodotti sono caratterizzati da un'elevata frequenza di aggiornamento e il loro supporto alla gestione degli incendi è fornito attraverso: 1) *individuazione* in tempo reale dell'evento, 2) *simulazione* della propagazione dell'incendio, 3) *generazione* di mappe di vulnerabilità.

Sebbene negli ultimi anni siano stati sviluppati numerosi progetti con l'obiettivo di sfruttare immagini satellitari per il monitoraggio degli incendi boschivi (AFIS, PREVIEW, FIRE-M3, SENTINEL, etc.), nessuno di questi si propone di agire in tempo reale [Laneve et al, 2012]. Infatti, la maggior parte di tali applicazioni non risulta in grado di offrire un monitoraggio tempestivo,

avendo come principale obiettivo- tranne in rari casi- quello di portare a termine studi statistici di eventi ambientali e il loro impatto in termini di aree bruciate e variazioni delle caratteristiche ottiche dell'atmosfera dopo l'emissione dei prodotti di combustione.

Gli incendi dell'area mediterranea, raramente sono significativi per quanto concerne le sostanze di combustione rilasciate nell'atmosfera, ma hanno un impatto notevole sull'estensione delle aree di vegetazioni- in particolare laddove le regioni non ne siano molto ricche-, sulle infrastrutture e sui servizi umani.

3.1 GENERALITÀ E FUNZIONALITÀ

Come progetto pilota destinato all'utilizzo da parte della Protezione Civile, SIGRI doveva rispondere ad una serie di requisiti istituzionali: normative in campo di incendi boschivi, distribuzione delle responsabilità e competenze delle autorità implicate nelle attività correlate, valutazione dei rischi, previsioni di pericolosità, monitoraggio e gestione dell'incendio, stima dei danni etc.

In accordo con le indicazioni della Protezione Civile, SIGRI avrebbe dovuto poter essere sfruttato facilmente tutto l'anno dai diversi enti preposti alla gestione degli incendi boschivi. Si possono riconoscere tre modalità operative che rispondono alle richieste dei differenti utenti (prevenzione, estinzione, valutazione dei danni) (Fig. 3.1):

- *Modalità strategica*: trova applicazione al di fuori della stagione degli incendi; i prodotti generati supportano le attività per il contrasto di tali eventi, ovvero: mappe di pericolosità (spaziali e temporali), mappe di vegetazione, mappe di aree bruciate.
- *Modalità tattica*: applicata durante la stagione degli incendi; i prodotti generati sono caratterizzati da un frequente aggiornamento e riguardano l'attività di rilevamento, monitoraggio e gestione degli eventi di incendio. Il

supporto alla gestione è fornito attraverso *individuazione* in tempo reale degli eventi, *simulazione* di propagazione dell'incendio, *generazione* di mappe di vulnerabilità.

- *Modalità legislativa*: applicata fuori dalla stagione degli incendi; i prodotti riguardano principalmente la produzione di un archivio delle aree bruciate.

La generazione e l'archiviazione dei prodotti in appositi cataloghi avviene sia tramite operatori addetti in modalità asincrona, sia automaticamente in tempo reale. Tutti i prodotti sono georeferenziati ed in formato SHP (vettoriale) o TIFF (raster). L'utente può usufruirne grazie ai cataloghi dei servizi (CSW, *Catalogue Service for the Web*) tramite autenticazione nell'applicazione gestionale *web-based*, dove è possibile la visualizzazione di anteprime online, o il download per alcuni prodotti (Fig. 3.2).

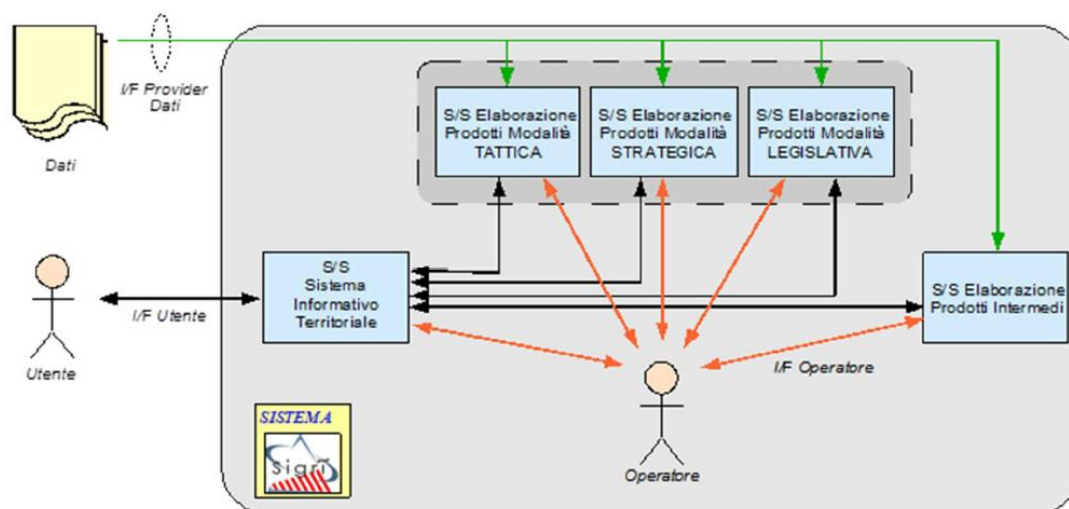


Figura 3.1: Schema funzionale del sistema.

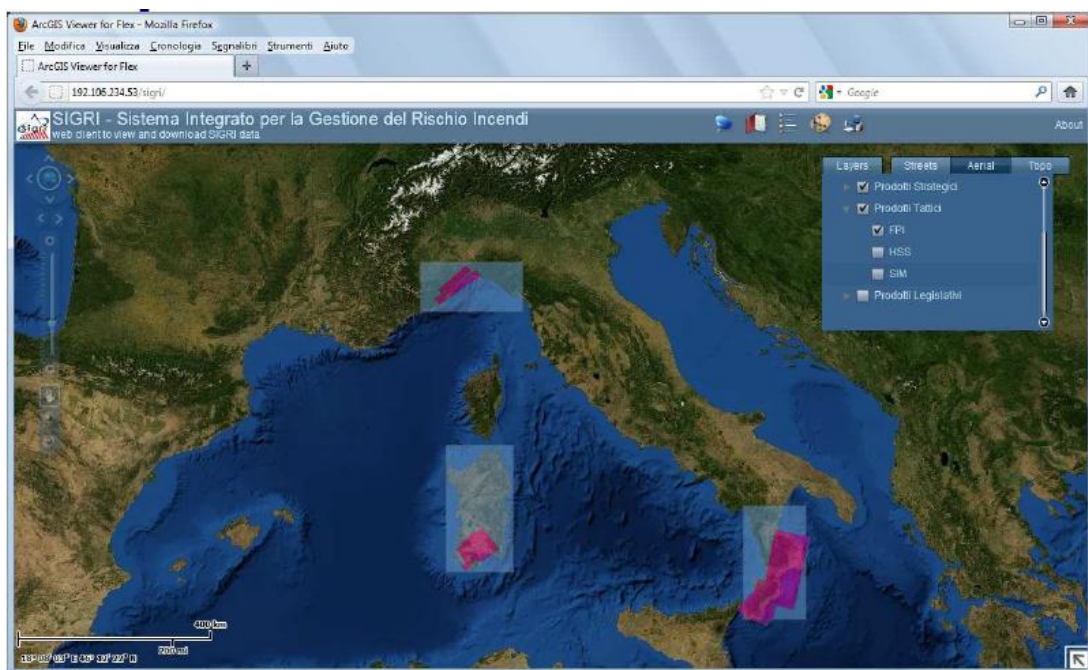


Figura 3.2: Accesso ai prodotti SIGRI (Vista sinottica).

3.2 PRODOTTI SIGRI

SIGRI è attualmente in grado di generare diversi tipi di mappe georeferenziate:

- Hot Spot e caratterizzazione dell'incendio;
- Aree percorse dal fuoco (ad alta risoluzione, da sensori ottici e SAR);
- Mappe di rigenerazione della vegetazione sulle aree precedentemente bruciate;
- Mappe di pericolosità e rischio (annuali, divise per mese e fasce orarie);
- Simulazione della propagazione degli incendi;
- Mappe di *Land Cover* (uso del suolo vegetato, aree agricole e boschive);
- Indici di vegetazione;
- Immagini EO orto-rettificate;

I prodotti menzionati sono ottenuti tramite sensori di satelliti dedicati a missioni di EO (*Earth Observation*) riassunti in Tabella 3.1. Come evidenziato dalla Figura 3.3, non esiste un satellite, né una costellazione, che risulti ottima in senso assoluto, dovendo mediare tra la bassa frequenza di rivisitazione dei satelliti in orbita LEO, e la ridotta risoluzione dei satelliti geostazionari.

Di seguito saranno presentati alcuni tra i principali prodotti SIGRI.

MISSIONE/SENSORE	PRODOTTI
<i>Cosmo-SkyMed</i> <i>IKONOS-2</i> <i>QUICKBIRD</i> <i>GeoEye-1</i> <i>KOMPSAT 2</i> <i>Pleiades</i> (quando disponibile)	Mappe di aree bruciate con risoluzione spaziale molto alta
<i>SPOT-4 / 5</i> <i>IRS-P6-LISS3</i> <i>Landsat 5 / TM</i>	Indici di vegetazione; mappa delle aree bruciate, mappe di rigenerazione della vegetazione, mappe di vulnerabilità dinamica
<i>TERRA e AQUA / MODIS</i>	Mappa degli Hot Spot; indici di vegetazione, mappe di vulnerabilità dinamica
<i>MSG-SEVIRI</i>	Mappe degli Hot Spot
<i>COSMO-SkyMed</i> <i>ERS-SAR</i> <i>ENVISAT/ASAR</i> <i>SAOCOM/SIASGE</i>	Mappa delle aree bruciate; mappe di vulnerabilità dinamica

Tabella 3.1: Principali prodotti del sistema SIGRI.

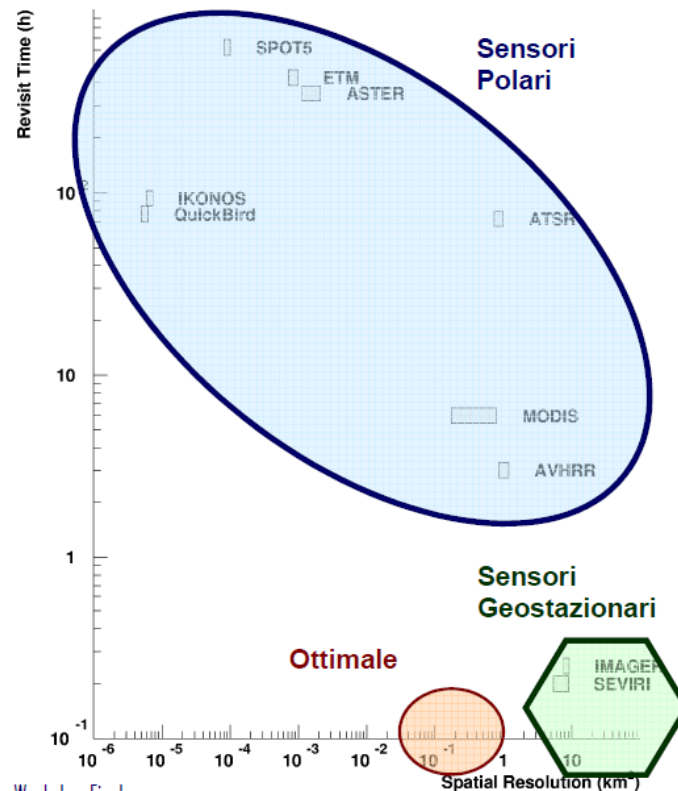


Figura 3.3: Relazione tra tempo di rivisitazione e risoluzione spaziale dei principali satelliti EO.

3.2.1 HOT-SPOT

Tra i prodotti tattici per supportare la gestione degli eventi in corso, gli hot-spot permettono, attraverso la detection delle anomalie termiche, l'individuazione in tempo reale dell'incendio, ricorrendo ai dati del satellite geostazionario MSG (*Meteosat Second Generation*) rilevati dal sensore SEVIRI. Mediante l'utilizzo dell'algoritmo SFIDE (*System for Fire Detection*), è possibile ottenere hot-spot che forniscono le coordinate del pixel con incendio, la temperatura del fuoco e la FRP (*Fire Radiative Power*) nelle regioni italiane selezionate (Sardegna, Liguria e Calabria).

Il prodotto HSS (*Hot Spot SEVIRI*) ha le seguenti caratteristiche:

- *Risoluzione spaziale:* 4 km;
- *Risoluzione temporale:* 15 minuti;

- *Formato input:* pgm (immagini SEVIRI);
- *Formato output:* SHP file;
- *Indici di qualità:* presenza di nuvole.

L'utilizzo di un sistema geostazionario per il rilevamento degli hot-spot permette di seguire l'evoluzione temporale dell'incendio e di stimare la sua intensità attraverso la FRP. In presenza di più incendi simultanei, tale sistema può fornire informazioni utili ad indirizzare le risorse per lo spegnimento dell'incendio in base alle dimensioni, alla pericolosità e al comportamento di ogni singolo rogo.

3.2.2 MAPPE DELLE AREE BRUCIATE

Alcune mappe delle *Aree Percorse dal Fuoco* (APF), ottenute tramite dati ottici ad alta risoluzione spaziale, sono preesistenti al progetto SIGRI ed in scala variabile tra 1:25000 e 1:50000 (dunque ad alta risoluzione). Data la loro utilità come prodotto strategico in supporto alle attività di gestione del territorio, nell'ambito del progetto SIGRI sono state sviluppate altre mappe APF ad altissima risoluzione (1:2000). Queste vengono aggiornate annualmente e riguardano prevalentemente la perimetrazione delle aree bruciate con una scala compatibile a quella del catasto dei terreni agricoli; trovano pertanto applicazione nella legge quadro Anti Incendi Boschivi 323/2000. Tali mappe subiscono processamenti automatici per la calibrazione radiometrica.

La mappatura delle APF è effettuata per determinate classi di copertura del suolo: colture permanenti, aree agroforestali, boschi di latifoglie, boschi di conifere, boschi misti, vegetazione arbustiva o erbacea, aree con vegetazione rada.

Mappe ad alta risoluzione (Tab. 3.2):

Tali mappe partono dalla definizione e localizzazione di punti/aree privi di

vegetazione, perlopiù invarianti nel tempo e nello spazio. Tali punti di riferimento sono chiamati *Riflettori Permanenti* (RP) (step 1). Presi poi in considerazione due distinti dati ottici acquisiti ad inizio e fine del periodo di riferimento, viene effettuata una analisi multi-temporale selezionando le aree caratterizzate da variazione di biomassa e copertura temporale superiore alla variazione dei RP (step 2, fig. 3.4). Tali aree vengono successivamente inserite nella mappa APF.

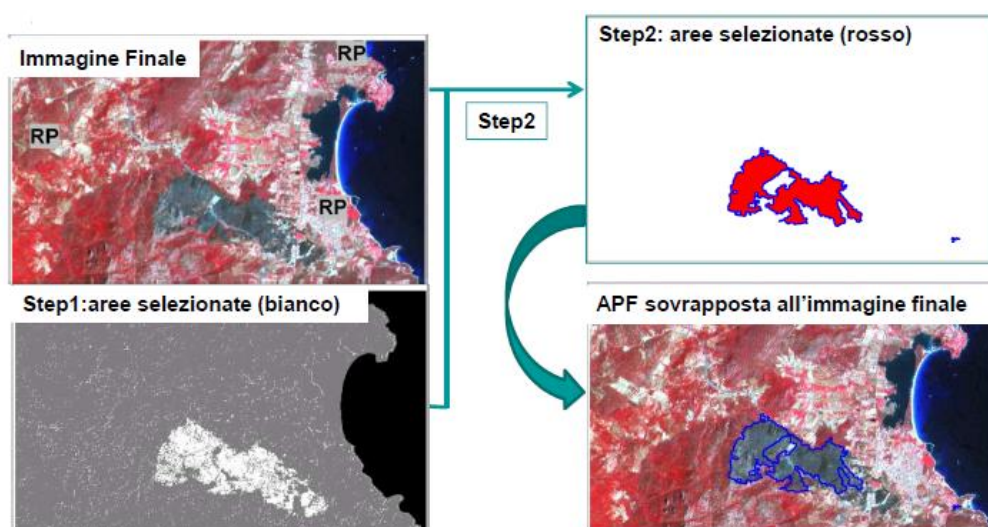


Figura 3.4 : Generazione mappe ad alta risoluzione.

Satellite/Sensore	<i>Landsat 5/TM</i>	<i>IRSP6/LISS3</i>	<i>SPOT4/HRVIR-1&2</i>	<i>SPOT 5/HRG-1&2</i>
Dimensione immagine	180x170 Km	180x170 Km	60x70 Km	60x70 Km
Dimensione del pixel	30x30 m	20x20 m	20x20 m	10/20x10/20 m
Risoluzione in planimetria	42 m	28 m	28 m	28 m
Sovrapponibile alla cartografia	1:50000	1:25000	1:25000	1:25000
Ciclo di rivisitazione (giorni)	16	24	26	26
Canali di osservazione	7	4	4	4

Tabella 3.3 Caratteristiche dei dati ottici ad alta risoluzione.

Mappe ad altissima risoluzione (tab. 3.4):

Dopo l'individuazione dei RP, viene elaborata ed analizzata contestualmente l'immagine. Sono selezionate come APF le aree non affette da ombre dovute alla topografia e con valori di riflettanze non inferiori a quelli dei RP (Fig. 3.5). Le prestazioni risultano ottimali quando l'elevazione del sole è superiore a 35° (Maggio-Ottobre), e quando l'angolo di vista del satellite è compreso tra +/-10° per garantire una corretta accuratezza geometrica del dato.

Satellite/Sensore	<i>Kompsat- 2</i>	<i>WorldView-2</i>
Dimensione del pixel MS;PAN	4x4 m; 1x1 m	2x2 m; 0.5x0.5 m
Risoluzione in planimetria MS;PAN	6 m; 1.5 m	4 m; 0.8 m
Sovrapponibile alla cartografia	1:2.000	1:1.000
Ciclo di rivisitazione (giorni)	28	4
Canali di osservazione	4 MS; 1 PAN	8 MS; 1 PAN

Tabella 3.4 : caratteristiche dei dati ottici ad altissima risoluzione.



Figura 3.5: Esempio di APF ad altissima risoluzione per la regione Sardegna (2011): evidenziati in giallo le impronte al suolo dei dati Kompsat 2, in blu quelle del dato WorldView, in rosso le APF 1:2000.

3.2.3 INDICE DI RISCHIO E MAPPE DI VULNERABILITA'

I metodi per la stima del rischio incendio possono essere distinti in (fig. 3.6):

- *Metodi Statistici (long-term fire risk index)*, che definiscono modelli di previsione basati sull'utilizzo di parametri che variano lentamente nel tempo, come la topografia o altre variabili che possono essere considerate costanti nel corso dell'anno, e informazioni statistiche sulla frequenza del fenomeno;
- *Metodi dinamici (short-term fire risk index)*: basati su dati misurati in modo continuativo (giornalmente) riguardanti caratteristiche territoriali- come lo stato della vegetazione- e modelli di previsione dei parametri meteorologici.

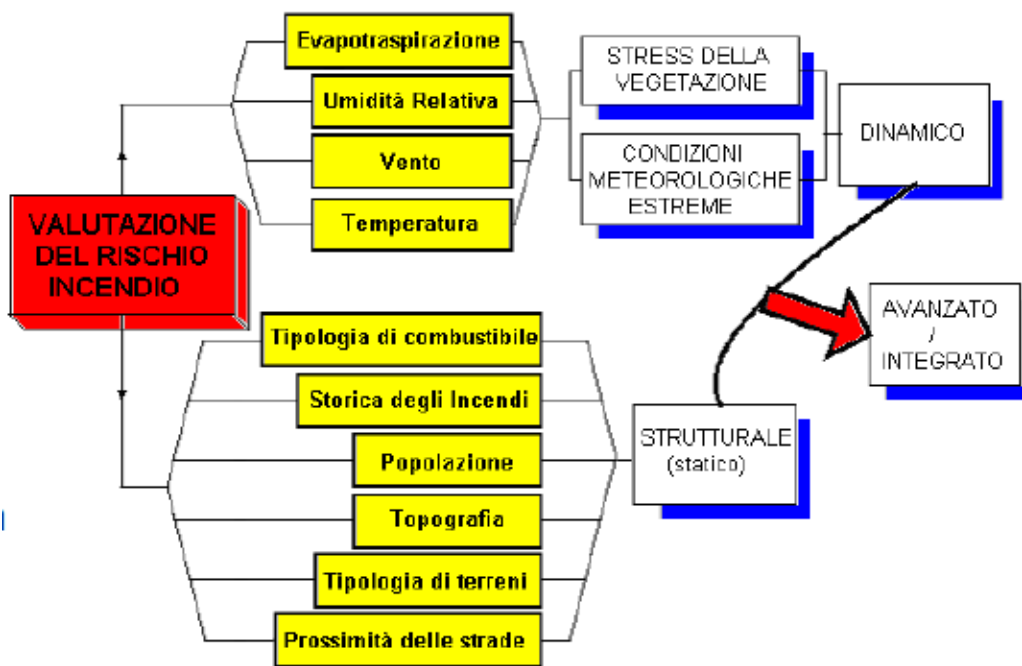


Figura 3.6: Schema di valutazione del rischio incendio.

Alla prima categoria appartengono l'indice di probabilità di incendio (FPI), che definisce le probabilità di incendio, e l'indice di danno potenziale (LDI), che fornisce una stima del possibile danno che un incendio può causare in una determinata area. Alla seconda categoria appartengono invece indici capaci di fornire informazioni sul pericolo di un evento, definendo: aree di possibile

innesco, direzione e velocità di propagazione, energia irradiata etc. In accordo con questi indici, ne può essere definito uno di rischio giornaliero. I differenti indici usati per generare le mappe di rischio incendio sono dunque in genere basate su determinati parametri meteorologici, quali temperatura e umidità dell'aria, velocità del vento, piogge nelle 24 ore precedenti, nuvolosità, radiazione solare, etc.

Combinando i dati che definiscono la probabilità di incendio con informazioni circa infrastrutture, aree protette ed altri, può essere determinato l'indice di vulnerabilità di incendio (FVI) [Laneve et al, 2006].

La commissione europea ha finanziato al JRC (*Joint Research Centre*) lo sviluppo del sistema EFFIS (*European Forest Fires Information System*) che fornisce previsioni di tre giorni elaborate a partire dall'aggiornamento giornaliero dell'indice di rischio. Per diversi anni, le previsioni sono state effettuate sulla base di sette differenti indici, uno dei quali, l'FPI (*Fire Potential Index*) è stato applicato, nell'ambito del progetto SIGRI, con una serie di modifiche, sul territorio italiano nelle tre aree test del progetto. Tale indice consiste nella stima delle condizioni del combustibile mediante la separazione tra vegetazione viva e morta. Questa valutazione è sviluppata utilizzando mappe di indice di vegetazione NDVI (*Normalized Digital Vegetation Index*), ottenute tramite sensori quali MODIS. L'FPI ottenuto ha valori compresi nel range 0-100, inversamente proporzionali alla percentuale di vegetazione verde e all'umidità contenuta nella vegetazione morta.

Le mappe di vulnerabilità nell'ambito del progetto SIGRI hanno l'utilità di mostrare il livello del rischio di incendi nell'area di interesse mediante un indice di vulnerabilità dinamica giornaliero (MDV). La possibilità di realizzarle, deriva dallo stretto legame esistente tra incendio e caratteristiche di (Fig. 2.6):

- Combustibile (tipo di vegetazione, contenuto di umidità,...);

- Topografia (pendenza, altitudine, esposizione solare);
- Condizioni meteorologiche (vento, umidità, temperatura).

Questi parametri, misurabili, hanno un impatto diretto sull'innesco e sulla propagazione dell'incendio.

Il prodotto MVD presenta le seguenti caratteristiche:

- *Risoluzione spaziale*: 250 m;
- *Risoluzione temporale*: 3 ore;
- *Valori*: tra 0 e 100; -2 per aree fuori dalla zona di interesse; -4 per pixel nuvolosi;
- *Output*: immagini GEOTIFF per le regioni testate (Calabria, Sardegna, Liguria).

3.2.4 MAPPE DI PERICOLOSITA'

La pericolosità- intesa come probabilità che si ripeta un evento assegnato con frequenza assegnata- è calcolata per ogni unità della superficie in esame ed è definita in funzione della ripetitività geografica degli eventi incendiari per le diverse classi-suolo, della morfologia del territorio e del fattore antropico. La ripetitività degli eventi è pari alla probabilità di incendio per elemento di superficie.

I prodotti SIGRI comprendono tre mappe per l'analisi preventiva del rischio e della pericolosità degli incendi boschivi:

- mappe di *pericolosità geospaziale*;
- mappe di *pericolosità temporale*;
- mappe di *rischio incendi*.

I criteri per il calcolo della pericolosità geospaziale si rifanno a quelli utilizzati da alcune regioni italiane, comuni e parchi nazionali. In particolare, SIGRI ricalca il criterio utilizzato dalla regione Liguria (Piano regionale di previsione, prevenzione e lotta attiva contro gli incendi boschivi –DGR 1402/2002 – anno 2010) basato sui dati statistici relativi alle aree incendiate, con alcune modifiche che, ad esempio, prevedono l’inserimento del parametro antropico.

Mappe di pericolosità geospaziale:

Sono basate su un’analisi che identifica l’andamento, nel quinquennio precedente, del numero di incendi nell’area percorsa dal fuoco. Il territorio è poi caratterizzato in zone omogenee (CTO) considerando copertura vegetale, quota, esposizione, pendenza, zona climatica, presenza di strade. Il fine di tale caratterizzazione è una discretizzazione del territorio regionale in classi omogenee. Per ogni CTO è valutata l’estensione dell’area percorsa dal fuoco rispetto all’area totale della classe, definendo la Probabilità di Propagazione del Fuoco (PPF), ottenendo infine una mappa discretizzata secondo cinque intervalli in funzione del grado di pericolosità.

Mappa di pericolosità temporale

Viene calcolata per ogni unità della superficie in esame, per ogni mese della stagione degli incendi in determinate fasce orarie.

La mappa rappresenta la Probabilità temporale di incendio nella fascia oraria (o nel mese) rispetto all’intero periodo di osservazione (minimo cinque anni).

Mappa di rischio incendi

Il rischio è calcolato per ogni unità di superficie come convoluzione tra:

- *Pericolosità geospaziale da incendio (P);*
- *Vulnerabilità della vegetazione (V), ovvero la propensione delle classi di vegetazione a subire danni da incendio;*

- *Valore esposto (E)*: valore della vegetazione esposta all'eventualità di essere distrutta da un incendio in funzione della lunghezza del turno di ricrescita e della eventuale presenza di aree protette. Le classi di rischio sono rappresentate nella mappa con valori variabili tra 1 e 5.

3.2.5 SIMULAZIONE DELLA PROPAGAZIONE DEGLI INCENDI

Il primo step per ottenere tali prodotti è quello di definire, per il terreno in esame, le caratteristiche di vegetazione, umidità, vento, morfologia etc., grazie alle quali un modello fisico di combustione fornisce i parametri caratteristici del fuoco in quel punto. Mediante test sperimentali, sono state ricavate le equazioni alla base dei modelli di simulazione, i quali riguardano sia incendi radenti –oggetto di studio sin dai primi anni del '900- sia incendi di chioma, per i quali non esistono ancora simulazioni affidabili. I modelli sperimentali di combustione e propagazione si riferiscono a condizioni omogenee; per le condizioni eterogenee occorrono algoritmi di propagazione basati su (Fig. 3.7):

- *Approccio vettoriale* (ad es. Software FARSITE; Prometheus): il contorno del fronte di fiamma viene trattato come un'unica entità geometrica (di forma ellittica e con una certa eccentricità legata alla velocità del vento) ed espanso ad ogni passo della simulazione;

- *Approccio raster*: (ad es. Software ABBAMPAU) la propagazione dell'incendio avviene mediante "contagio" delle zone adiacenti.

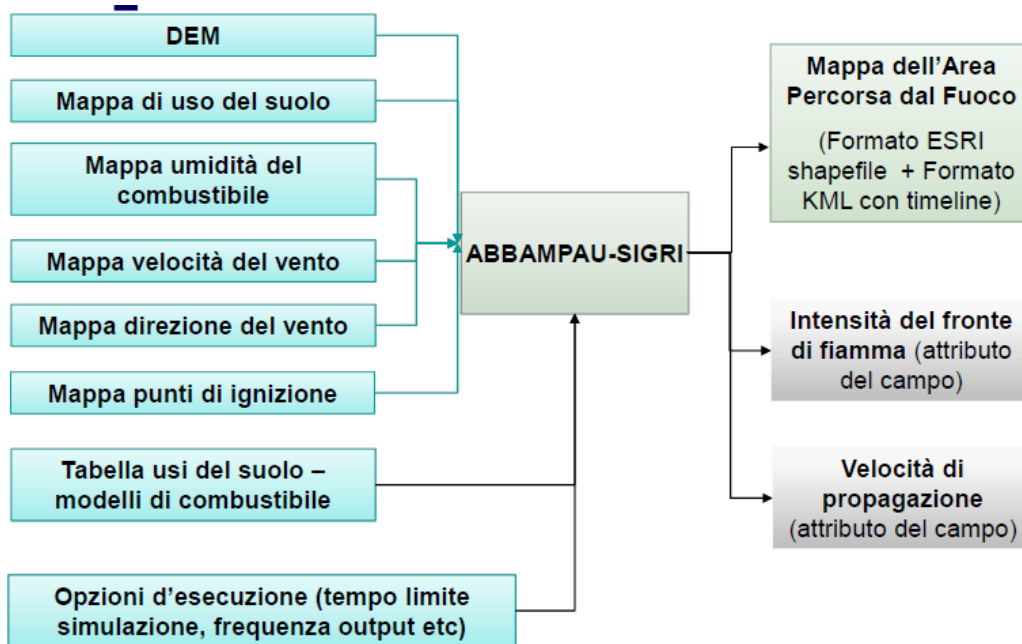


Figura 3.7 Schema di un simulatore SIGRI per la costruzione di mappe APF.

3.3 ALGORITMO SFIDE

Numerosi studi sono stati dedicati allo sviluppo di algoritmi in grado di rilevare incendi di piccole dimensioni sfruttando la misura della temperatura nei canali MIR e TIR. Tuttavia, la bassa frequenza di rivisitazione dei satelliti in orbite LEO, ha fino ad ora impedito l'utilizzo di tali strumenti nelle applicazioni che richiedono un'informazione in tempo reale. Il sensore SEVIRI, invece, nonostante la sua bassa risoluzione spaziale, sta mostrando la possibilità di un utilizzo di questo tipo garantendo una distribuzione delle immagini con intervalli di 15 minuti.

Il bisogno di perfezionare il rilevamento di incendi con tecniche basate sull'osservazione da satellite è giustificato da due forti motivazioni:

- la possibilità di ridurre i tempi di reazione per gli interventi, dovuta all'osservazione continua dell'area di interesse, ottenibile solo con satelliti geostazionari, oppure con una costellazione di almeno 12 satelliti in orbita LEO.

- In caso di più incendi contemporanei, esiste la possibilità di stabilire la gravità di ognuno in modo da ottimizzare le risorse disponibili.

Negli ultimi anni, il numero di incendi in Italia è aumentato notevolmente, spesso per cause umane, e si ritiene sempre più necessario un sistema di fire-detection per le zone dell'area Mediterranea. Come già accennato, sono pochi i progetti destinati al tempestivo rilevamento degli incendi. Il *Centro di Ricerca Progetto San Marco (CRPSM)* si è dedicato per molti anni allo studio delle immagini acquisite da SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*), sensore a bordo dei satelliti geostazionari della serie *Meteosat Second Generation (MSG)*.

Per sviluppare un prodotto utilizzabile dal Dipartimento della Protezione Civile, si è scelto di utilizzare un approccio che, sfruttando le possibilità del sensore MSG/SEVIRI, massimizzi le capacità di rilevamento degli incendi nonostante la limitata risoluzione spaziale [Laneve et al., 2006]. L'algoritmo SFIDE sfrutta l'elevata frequenza di aggiornamento delle osservazioni (15 minuti) per confrontare le variazioni di temperatura che si verificano in ciascun pixel tra due immagini successive con quelle attese.

Rispetto ad una versione preesistente del codice, sono state apportate numerose modifiche, oggetto di questo lavoro di tesi, che sono in seguito riassunte e di cui si tratterà in modo più approfondito nel capitolo 4.

- 1) Considerato il suo approccio multicanale, rispetto a quelli già utilizzati (1, 4, 9, 10, 11) si è scelto di introdurre anche il canale 2 e la relativa riflettenza, utilizzata:
 - nella cloud mask;
 - per la soglia indice dei pixel ad elevata riflettenza;
 - per l'individuazione di pixel a parziale copertura nuvolosa o per pixel interessati da Sun-Glint;

- 2) Introduzione della distinzione tra orari diurni e notturni mediante valori del Solar Zenith Angle in luogo dell'ora locale, che non permetteva di tenere conto della variabilità degli orari di alba e tramonto nel corso dell'anno solare (6:00 GMT e 17:00 GMT venivano stimati come orari di alba e tramonto);
- 3) Revisione totale della cloud-mask, con soglie adattate alla letteratura corrente e specifiche per la regione oggetto di studio (la Sardegna).
- 4) Revisione radicale della fase di individuazione dei potenziali punti fuoco.
- 5) Revisione radicale delle soglie di conferma del pixel. In precedenza, la conferma dell'allarme su un potenziale hotspot avveniva mediante l'applicazione di soglie fisse sui valori di alcune proprietà caratterizzanti il punto fuoco. In luogo di questi valori, per le ore diurne sono state introdotte tre possibili alternative di conferma del punto-fuoco che abbia superato le pre-soglie: soglie di innesco, funzione del *SZA* e valutate statisticamente; una soglia fissa sulla $T_{b3,9}$; algoritmi contestuali nell'intorno del potenziale hotspot basati sui valori di $T_{b3,9}$ e ΔT . Per le ore notturne invece, in luogo di soglie fisse, sono state considerate due diverse alternative: soglie fisse su $T_{b3,9}$ e ΔT , in accordo con la manualistica diffusa da EUMETSAT; soglie contestuali rispetto ai valori medi e rispettive deviazioni standard di $T_{b3,9}$ e ΔT su tutta la Sardegna, che permettono di ridurre notevolmente gli errori di omissione.
- 6) Introduzione del calcolo della *LST* (Land Surface Temperature) per la caratterizzazione dell'hotspot.

L'ALGORITMO "SFIDE"

In questo capitolo viene descritto in dettaglio l'algoritmo del *System for Fire Detection* (SFIDE) ideato nell'ambito del progetto SIGRI e scritto in ambiente MATLAB. In particolare, saranno evidenziate le novità introdotte rispetto alle precedenti versioni, mettendo in luce le ragioni che le hanno rese necessarie e come esse si inseriscano rispetto allo stato dell'arte presentato nel precedente Cap. 2.

A tal proposito, è importante rimarcare come, anche laddove siano state adottate- qualitativamente- soluzioni già largamente riscontrabili nella letteratura, sia stata indispensabile un'attenta valutazione circa l'effettiva applicabilità delle stesse. Tale indagine ha evidenziato, in diversi casi, l'inefficienza dei valori di soglia noti, se utilizzati nelle aree oggetto del caso-studio, in modo particolare per la Sardegna su cui si concentrerà la validazione dell'algoritmo e, nei prossimi capitoli, la presentazione dei risultati ottenuti (Cap.5). Le ragioni che inducono questa inefficienza sono già state accennate in diversi punti delle pagine precedenti (cfr. § 2.2.2), ma converrà riassumere alcune cause principali. In primo luogo, gran parte dei lavori che costituiscono la base teorica della *fire-detection*, sia essa da satellite in orbita bassa o da orbita geostazionaria, sono stati prodotti nell'ambito di applicazioni concernenti l'individuazione di incendi su aree ad omogenea copertura boschiva, come le foreste tropicali e del Nord America, profondamente diverse dalla copertura disomogenea e fortemente antropizzata dell'area mediterranea, in cui sovente la superficie boschiva in cui occorre rilevare la presenza di incendi copre soltanto una frazione del pixel, rendendone molto meno agevole l'individuazione. In secondo luogo, si è dovuto tenere conto delle diversità climatiche caratterizzanti ciascun caso-studio, sia per quanto

riguarda le temperature caratteristiche che per quanto concerne la nuvolosità che, come si vedrà, costituisce uno degli elementi di più difficile gestione nell'ambito del problema. Infine, come già accennato nel Cap. 3, una delle prerogative che fa profondamente differire l'algoritmo SFIDE dalle applicazioni rinvenibili in letteratura, risiede nella tempestività con cui esso è in grado di individuare i nuovi incendi. Operando in tempo reale, ed essendo finalizzato anzitutto ad una tempestiva segnalazione alle autorità competenti, sarà indispensabile che ciò avvenga negli istanti subito successivi all'innesco di un nuovo focolaio. In tal modo si pone il problema in una prospettiva sensibilmente diversa dalla semplice stima degli effetti prodotti, ad esempio in termini di biomassa combusta, dalla completa evoluzione di incendi in zone scarsamente antropizzate e popolate.

È in tale prospettiva che deve essere inquadrata una delle novità introdotte dall'algoritmo SFIDE: l'individuazione di nuovi incendi, nelle loro fasi embrionali e fin quando la copertura degli stessi su un singolo pixel risulterà avere trend crescente, mediante soglie di *change-detection* accuratamente valutate per $T_{b3,9}$ e ΔT ad intervalli di 15 e 30 minuti. In particolare, variazioni (tendenzialmente aumenti) di queste due grandezze oltre valori prestabiliti in funzione del Solar Zenith Angle (*SZA*), saranno interpretati come anomalie termiche riconducibili- con buona probabilità- alla presenza di nuovi eventi incendiari. Ulteriore elemento di novità è costituito dalla formulazione delle soglie che consentono di individuare i pixel potenzialmente interessati da incendi ("pre-soglie"): per esse sono state elaborate, mediante un'analisi statistica degli andamenti di $T_{b3,9}$ e ΔT in alcuni giorni significativi, funzioni di terzo grado del *SZA* che permettono non solo di superare i limiti evidenziati per le soglie fisse (vedi § 2.2.2.1), ma anche quelli relativi a soglie linearmente dipendenti dal *SZA* per le quali è previsto un andamento simmetrico delle stesse tra ore antimeridiane e pomeridiane, che si vedrà essere errato nel § 4.4.

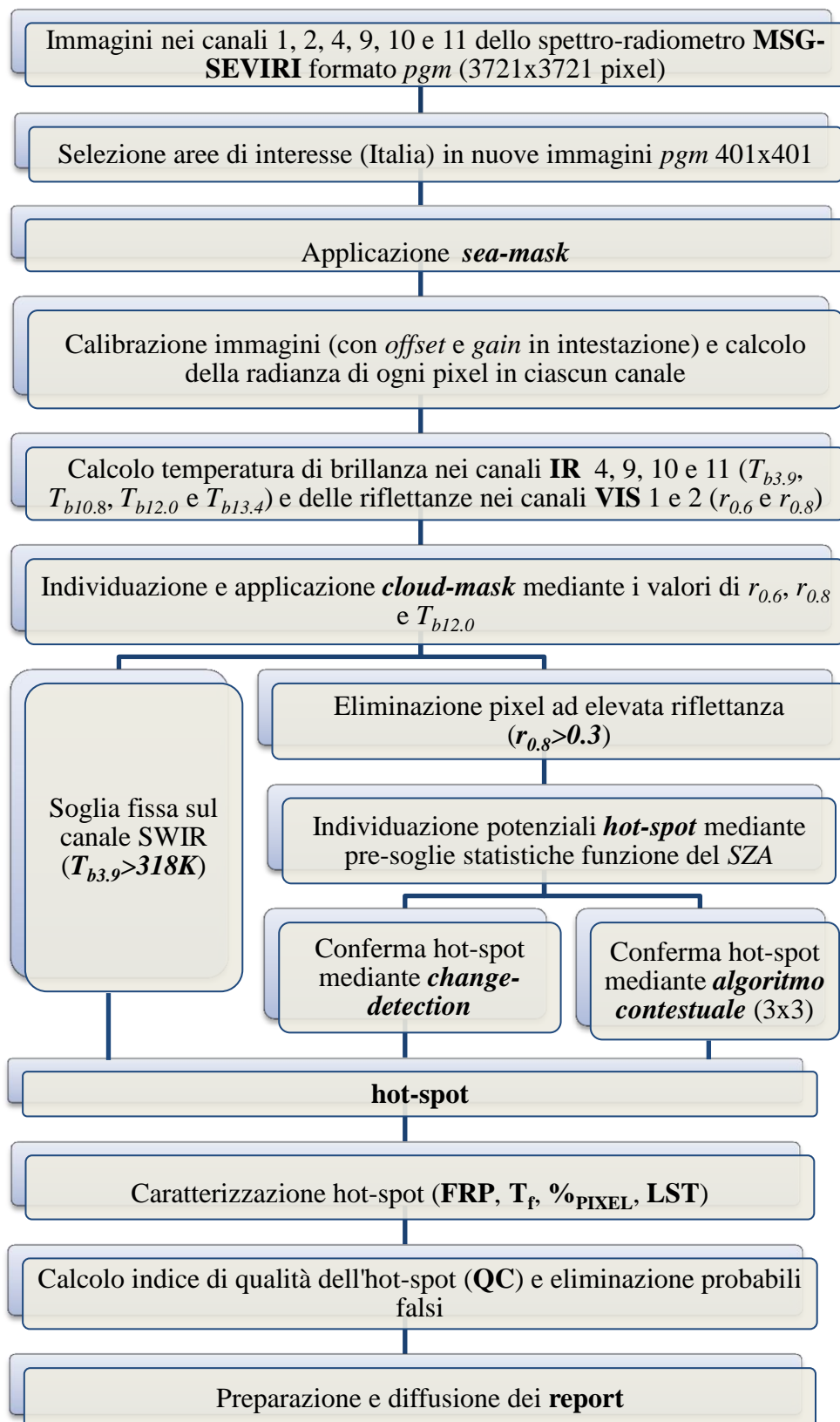


Figura 4.1: SFIDE, algoritmo per le ore diurne ($SZA < 85^\circ$).

La Fig. 4.1 mostra un diagramma di flusso dell'algoritmo SFIDE per quanto riguarda l'analisi delle immagini SEVIRI nelle ore diurne ($SZA < 85^\circ$), mentre quello per le ore notturne verrà esposto nella parte finale di questo capitolo. L'algoritmo può essere scomposto in alcune fasi significative: anzitutto, sono necessarie alcune operazioni preliminari finalizzate all'ottenimento delle grandezze utili all'applicazione delle diverse soglie, ovvero le temperature di brillanza nei canali MIR/TIR e le riflettanze nei canali VNIR. Per arrivare a tali risultati è necessario, una volta ritagliate le immagini nell'area d'interesse ed applicata la *sea-mask*, estrarre dall'intestazione dei file-immagine, in formato *pgm*, i valori del coefficiente di calibrazione e dell'offset. Tali valori consentono di calcolare le radianze di ogni pixel per ciascuno canale, a partire dal DN.

Noti i valori delle temperature di brillanza e delle riflettanze, sarà possibile individuare, e scartare da tutte le successive fasi dell'algoritmo, i pixel caratterizzati da copertura nuvolosa (*cloud-mask*) o quelli a parziale copertura nuvolosa che presentino quindi valori elevati della riflettanza. Per entrambe le casistiche è risultato di grande importanza aver introdotto, nella presente versione di SFIDE, i dati (DN) rilevati nel canale 2 ($0.8 \mu\text{m}$) di SEVIRI e, conseguentemente, il valore della riflettanza nello stesso canale ($r_{0.8}$) mediante relazioni simili all'Eq. (2.2).

A questo punto, è possibile applicare le soglie su $T_{b3.9}$ e ΔT atte all'individuazione dei potenziali hot-spot, che sono rappresentate da funzione di terzo grado del SZA . I pixel che superano queste pre-soglie sono sottoposti a ulteriori valutazioni (§ 4.5) finalizzate a confermare o meno l'ipotesi di incendio. Le soglie di conferma sono riconducibili a due tipologie: le prime si basano sulla *change-detection*, le altre ricorrono ad un'analisi contestuale nell'intorno 3×3 del potenziale hot-spot. Soglie più rigide sono previste per quei pixel considerati ad elevato rischio di falso-allarme, principalmente perché interessati da Sun-Glint; si tratta, per lo più, di pixel posti sul confine

con la sea-mask (pixel costieri). Parallelamente a queste, è previsto anche l'utilizzo di una soglia fissa molto alta su $T_{b3,9}$, di cui si illustrerà la ragione.

Successivamente si procede alla caratterizzazione dell'hot-spot in termini di FRP, temperatura del fuoco (T_f), frazione di pixel coperta dall'incendio (e dunque estensione dello stesso), temperatura superficiale LST (*Land Surface Temperature*).

Prima della realizzazione dei report contenenti tutte le informazioni riguardanti gli hot-spot e della loro tempestiva diffusione alle autorità interessate, viene effettuata un'ultima verifica sulla base di un indice di qualità (QC) che permette di escludere allarmi sulla cui veridicità non si abbia sufficiente certezza.

4.1 OPERAZIONI PRELIMINARI

Come mostrato da Fig. 4.1 tra il secondo e il quarto step del diagramma di flusso, al fine di poter utilizzare nell'ambito della fire-detection i dati acquisiti dallo spettro-radiometro di MSG-SEVIRI, sono indispensabili una serie di operazioni preliminari per convertire i dati DN del file in formato *pgm*, in temperature di brillantezza nei canali MIR/TIR (4, 9, 10 e 11) e in riflettanze nei canali VNIR (1 e 2).

4.1.1 SELEZIONE DEI PIXEL UTILI

Prima di procedere al calcolo della radianza, e dunque delle temperature di brillantezza e riflettanze seguendo la procedura descritta nel § 2.2, si è provveduto a ridurre le dimensioni delle immagini in formato *pgm* dalle dimensioni originali 3721x3721 pixel- pari a circa 14 MPX- ad un formato 401x401- pari approssimativamente a 0.16 MPX-, ritagliando in ciascun canale i soli pixel riguardanti l'Italia. Tale operazione ha ridotto drasticamente il numero dei pixel su cui applicare l'algoritmo e, conseguentemente, il costo

computazionale dello stesso. Ciò, oltre a offrire un vantaggio sui requisiti minimi dell'elaboratore che valuterà l'algoritmo, permette anche di ridurre sensibilmente i tempi di elaborazione, che devono necessariamente risultare al di sotto dei 15 minuti pari all'intervallo di aggiornamento dei dati telerilevati, consentendo una più celere diffusione dei report nel caso in cui vengano individuati incendi.

Per ritagliare le immagini, è stato scritto un apposito codice MATLAB grazie al quale è stato possibile creare file *pgm* ex-novo nel formato 401x401 pixel, formalmente identici agli originali, preservando la presenza dell'intestazione dell'immagine contenente il coefficiente di calibrazione e l'offset.

La prima parte del codice SFIDE è dedicata alla creazione delle stringhe di carattere, corrispondenti alle directory ed ai nomi dei file, che permettono di aprire, leggere e immagazzinare ciascuna delle immagini necessarie, archiviate in cartelle divise per giorno, in apposite matrici. Le immagini utilizzate sono in tutto diciotto, tre per ciascuno dei sei canali utilizzati, corrispondenti agli ultimi tre orari disponibili, intervallati tra loro di 15 minuti. Oltre alle ultime immagini disponibili, sono utilizzate quelle negli orari che le precedono di 15 e 30 minuti rispettivamente (che saranno in seguito denotate anche come *immagine -15'* e *immagine -30'*), per permettere le valutazioni di change-detection. Qualora non siano disponibili una o più immagini tra quelle necessarie, l'elaborazione del codice non viene ultimata ed è restituito un messaggio d'errore.

Per escludere i punti prevalentemente caratterizzati da corpi d'acqua, è applicata una *sea-mask* pre-caricata, che riduce il numero dei pixel oggetto dell'algoritmo fino al valore di 97470. In Fig. 4.2 è valutabile il risultato dell'applicazione della *sea-mask*: in bianco i pixel su cui l'algoritmo è applicato, in nero quelli occultati dalla maschera.



Figura 4.2: *sea-mask*, in nero i pixel occultati.

4.1.2 CALIBRAZIONE, TEMPERATURE DI BRILLANZA E RIFLETTANZE

Come illustrato nel § 2.2, è possibile ottenere la radianza spettrale dal DN mediante l'Eq. (2.1), a patto di conoscere i valori del coefficiente di calibrazione (c_f) e dell'offset (R_0) relativi all'immagine che, come si è detto, sono contenuti nell'intestazione della stessa. Si rende dunque necessario acquisire questi coefficienti e realizzare dei cicli iterativi che consentano di calcolare la radianza spettrale per ciascun pixel di ciascuna immagine in ogni canale. In Tab. 4.1 sono riportati i valori del coefficiente di calibrazione e dell'offset nei diversi canali per le immagini del giorno 5 agosto 2014 alle ore 13.30 (orario di MSG, ossia GMT). I valori dei coefficienti possono offrire una valutazione qualitativa della proporzione delle radianze spettrali misurate nei diversi canali.

Canale	R_0 [mWm ⁻² sr ⁻¹ (cm ⁻¹) ⁻¹]	c_f [mWm ⁻² sr ⁻¹ (cm ⁻¹) ⁻¹]
1	-1.065268	0.020888
2	-1.421905	0.027880
4	-0.186592	0.003659
9	-10.456819	0.205036
10	-11.337868	0.222311
11	-8.037952	0.157607

Tabella 4.1: Offset e coefficienti di calibrazione del 05/08/2014 alle 13.30.

Note le radianze spettrali, per calcolare le temperature di brillantezza nei diversi canali sarà sufficiente invertire la legge di Planck in Eq. (1.1) introducendo l'opportuno valore della lunghezza d'onda. Tale operazione viene effettuata solo nei canali MIR/TIR (4, 9, 10, 11), gli unici le cui temperature di brillantezza siano utilizzate nell'algoritmo SFIDE. Inoltre, note le temperature di brillantezza nei canali 4 e 9 ($T_{b3.9}$ e $T_{b10.8}$), sarà calcolata anche la differenza di temperatura tra questi due canali (ΔT) in ogni pixel.

Il calcolo delle riflettanze nei canali VNIR (1 e 2) è possibile, sempre a partire dalle rispettive radianze spettrali, utilizzando l'Eq. (2.2), che richiede un preventivo calcolo della distanza Sole-Terra ($d(t)$) e dell'elevazione solare ($SZA(t, \vec{x})$). Mentre la prima grandezza dipende solo dal giorno dell'anno, ed è dunque costante per tutti i pixel di una stessa immagine, la seconda dipende anche dall'ora locale e dalla posizione (latitudine e longitudine); per tale ragione, il SZA dovrà essere calcolato per ciascun pixel, tenendo conto della sua georeferenziazione. A tal proposito, è opportuno precisare che, il valore del SZA considerato per la definizione del codice da utilizzare tra diurno e notturno, viene calcolato a partire da valori medi di latitudine e longitudine dell'area studio (nel nostro caso, la Sardegna), in modo da utilizzare uniformemente lo stesso algoritmo. L'Eq. (2.2) richiede anche la conoscenza dell'irradianza solare di banda (I_{ch}), una costante caratteristica di ciascuna banda; per i canali 1 e 2 del sensore MSG-SEVIRI, tali costanti sono rispettivamente pari a $I_{0.6} = 65.2296 \text{ mWm}^{-2}(\text{cm}^{-1})^{-1}$ e $I_{0.8} = 73.0127 \text{ mWm}^{-2}(\text{cm}^{-1})^{-1}$ [Govaerts et al., 2004].

Come si vedrà nel prossimo paragrafo, l'introduzione del canale 2 nella presente versione dell'algoritmo SFIDE, riveste particolare rilevanza nella definizione della *cloud-mask* e, più in generale, nell'individuazione dei pixel ad elevata riflettanza che, come tali, sono spesso origine di falsi allarmi.

4.2 CLOUD-MASK E PIXEL AD ELEVATA RIFLETTANZA

L'introduzione dell'uso delle immagini nel canale 2, e dunque della relativa riflettanza $r_{0.8}$, ha consentito di adeguare l'individuazione della *cloud-mask* alla letteratura corrente, rispetto a cui le soglie sono state opportunamente modificate per essere applicate sulla Sardegna. Similmente all'Eq. (2.2a), nelle ore diurne un pixel è ritenuto a copertura nuvolosa se sono verificate le seguenti condizioni:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{0.6} + r_{0.8} > 1 \\ \textit{oppure} \\ Tb_{12.0} < 265K \\ \textit{oppure} \\ r_{0.6} + r_{0.8} > 0.7 \textit{ e } Tb_{12.0} < 285K \end{array} \right. \quad (4.1)$$

Queste soglie, ed in particolare quelle relative alla somma $(r_{0.6} + r_{0.8})$, sono state ritenute un buon compromesso tra il rischio di occultare con la maschera un numero eccessivo di pixel e la necessità di evitare possibili falsi-allarmi correlati ai punti parzialmente o completamente coperti da nuvole. Ma non è questo il solo aspetto di cui tenere conto, dal momento che, come si vedrà a breve, molti pixel che non rientrano nella *cloud-mask* saranno comunque esclusi dall'algoritmo poiché considerati ad elevata riflettanza.

L'importanza di individuare correttamente i punti affetti da nuvolosità non risiede soltanto nell'esclusione di tali pixel dall'applicazione dell'algoritmo; infatti, nella parte del codice in cui si propone la conferma dei potenziali hot-spot, la presenza di pixel nuvolosi nell'intorno 3x3 del presunto punto-fuoco,

sarà considerata una delle discriminanti che suggerirà di utilizzare soglie più rigorose al fine di limitare i falsi-allarmi.

Nelle Figg. 4.3, sono proposte le mappe delle riflettanze nei canali 1 e 2 (prima riga), la temperatura di brillanza nel canale 10 (seconda riga, seconda colonna) e la *cloud-mask* sull'Italia (pixel amaranto) valutata secondo le soglie in Eq. (4.1) alle ore 15.00 del 7 luglio 2014, orario in cui si può facilmente constatare la marcata nuvolosità su quasi tutta la parte centro-settentrionale della penisola e sulla Sardegna. Le mappe ben evidenziano la grande differenza di riflettanza che intercorre tra pixel nuvolosi, in cui questo valore diviene prossimo a quello unitario, e non-nuvolosi, in cui è possibile registrare riflettanze anche al di sotto di 0.1. Ugualmente netta è la differenza nella temperatura di brillanza nel canale a $12.0 \mu m$, con valori addirittura prossimi a 200 K in caso di copertura nuvolosa.

La riflettanza nel canale 2 è utilizzata anche per scartare quei pixel, a parziale copertura nuvolosa, dunque ad elevata riflettanza, che rischiano di essere fonte di possibili falsi allarmi, poiché caratterizzati da una marcata differenza tra $T_{b3.9}$ e $T_{b10.8}$ (ovvero ΔT). Per tale ragione, sono scartati tutti i pixel per i quali risulti:

$$r_{0.8} > 0.35 \quad (4.2)$$

Il valore di soglia in Eq. (4.2) è meno severo di quello reperibile in letteratura e riportato in Eq. (2.4); tale scelta è stata compiuta nell'ottica di ridurre gli errori di omissione derivanti dall'esclusione dei pixel ad elevata riflettanza.

In ultimo, è doveroso precisare che la condizione in Eq. (4.2) non è attuata per quei pixel il cui valore di $T_{b3.9}$ superi una determinata soglia; questa scelta è stata dettata da motivazioni che saranno esplicitate nel prossimo paragrafo.

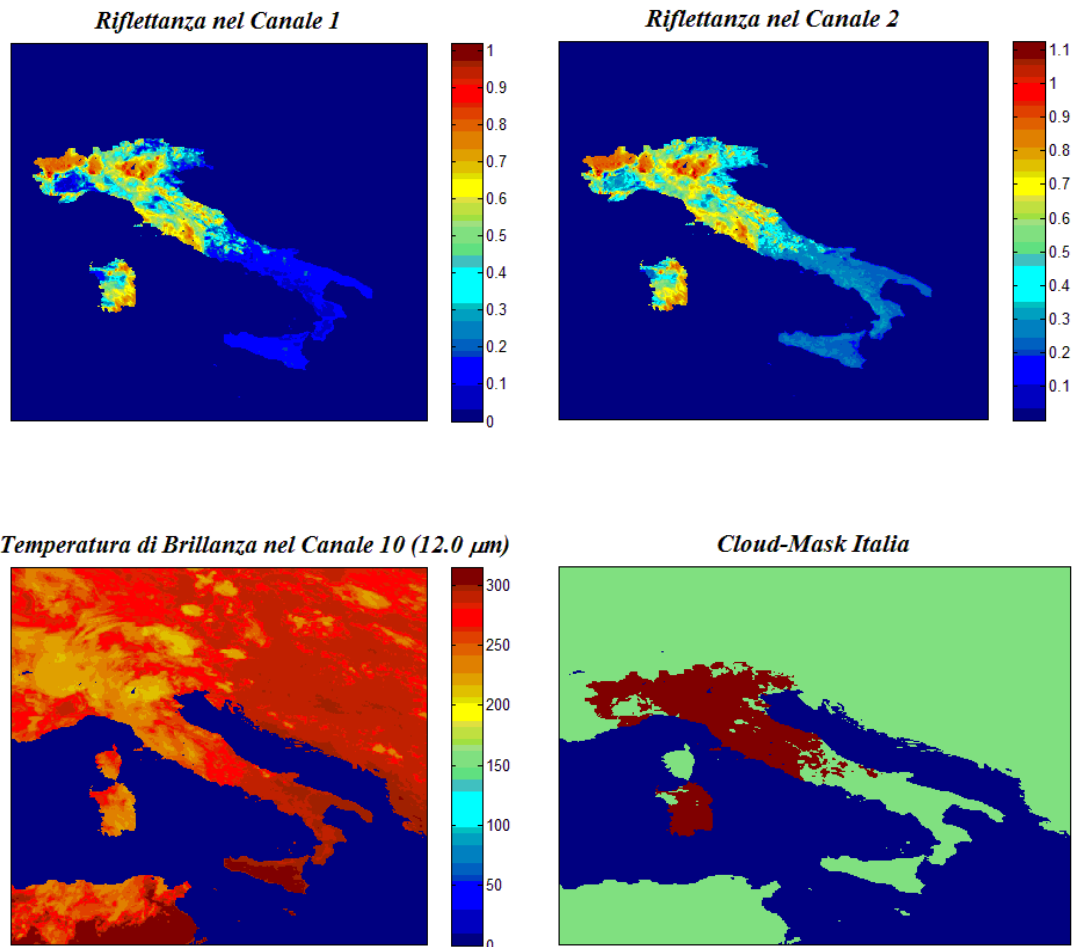


Figura 4.3: *a,b*) Riflettanza nei canali 1 e 2; *c*) Temperatura di Brillanza nel canale 10; *d*) Cloud-mask sull'Italia alle ore 15.00 del 07/07/2014.

4.3 SOGLIA FISSA SULLA TEMPERATURA NEL CANALE 4

L'attuazione congiunta di *cloud-mask* (Eq.(4.1)) ed elevata riflettanza (Eq.(4.2)) può essere fonte di errori di omissione. Al fine di ridurre l'incidenza, è stata considerata una soglia fissa su $T_{b3,9}$:

$$T_{b3,9} > 318K \quad (4.3)$$

I pixel per cui sia verificata la condizione in Eq. (4.3) sono immediatamente catalogati come hot-spot, anche se ad elevata riflettanza, purché non esclusi dall'attuazione della *cloud-mask*. L'unica verifica che viene effettuata su questi punti, prima di diffonderne comunicazione alle autorità competenti, è quella

relativa all'indice di controllo qualità (QC), di cui si dirà nel § 4.7, che per questa tipologia di allarmi risulta in genere molto elevato.

Il limite di 318 K è il prodotto delle analisi che sono state condotte sull'andamento di $T_{b3.9}$ nell'area-studio, nelle diverse casistiche limite riscontrate: è stato possibile osservare come, in corrispondenza dei punti in cui $T_{b3.9}$ risultasse maggiore di 318 K, anche nelle ore più calde del giorno fossero inequivocabilmente presenti incendi, solitamente di notevole estensione. In tal modo, è stato possibile individuare- o, per meglio dire, non perdere- incendi di notevoli dimensioni anche su pixel contraddistinti da parziale nuvolosità, tale da far scattare la condizione di elevata riflettanza.

4.4 INDIVIDUAZIONE POTENZIALI HOT-SPOT

Altro elemento di novità introdotto nel presente lavoro riguarda le soglie che permettono l'individuazione dei potenziali hot-spot. Come illustrato nel § 2.2.2, in quest'ambito sono generalmente utilizzate due diverse tipologie di soglie:

- a) Soglie fisse. Solitamente distinte per ore diurne e notturne e/o per mattina e pomeriggio;
- b) Soglie variabili con il SZA , secondo una dipendenza lineare da esso, oppure per scaglioni di SZA .

Se le soglie fisse, ed in particolare per l'area mediterranea, risultano sempre troppo elevate o troppo contenute, causando quindi errori di omissione nel primo caso e di commissione nel secondo; quelle variabili linearmente con il SZA hanno il limite di risultare simmetriche rispetto allo zenith. In altre parole, quando il SZA ha un determinato valore nelle ore anti-meridiane, si considerano limiti identici a quando il SZA assume lo stesso valore nelle ore pomeridiane; la pratica evidenza come questa simmetria non corrisponda ai reali andamenti medi di $T_{b3.9}$ e ΔT , grandezze su cui sono generalmente poste

le soglie di pre-allerta. Per tale ragione, sebbene le soglie linearmente dipendenti dal SZA risultino di facile realizzazione e complessivamente migliori delle soglie fisse, esse presentano, seppur in tono decisamente attenuato, le stesse criticità di quest'ultime, implicando il rischio di errori di omissione e commissione, in funzione dei coefficienti angolari $c_{3,9}$ e $c_{\Delta T}$ posti nelle Eqq. (2.7). Perciò, si è deciso di condurre un'analisi statistica dell'andamento medio di $T_{b3,9}$ e ΔT su tutta la Sardegna in funzione del SZA , per alcuni giorni rappresentativi nel periodo di massima densità degli incendi (mesi di luglio e agosto), e approssimarne l'andamento con un'interpolazione di terzo grado che può essere utilizzata come soglia-base per l'individuazione dei potenziali hot-spot.

Nelle Figg. 4.4 e 4.5 sono riportati (quadrati pieni) gli andamenti medi, rispettivamente, di $T_{b3,9}$ e ΔT in funzione del SZA per la Sardegna in alcuni giorni presi a campione nei mesi di luglio e agosto 2014. In questi giorni, sono state calcolate le temperature di brillantezza nei canali 4 e 9 in tutti gli orari diurni in cui fossero disponibili immagini, e per essi sono stati calcolati i valori medi di $T_{b3,9}$ e ΔT e le deviazioni standard ad essi associate, trascurando quei pixel che presentassero evidenti anomalie termiche (es. nuvole, elevata riflettanza o temperature di brillantezza troppo basse). Per ragioni di chiarezza grafica, è stato posto SZA negativo nelle ore anti-meridiane. I grafici evidenziano come $T_{b3,9}$ e ΔT siano mediamente più elevate nelle ore pomeridiane; in tal senso, va però tenuto conto che la presenza di una parziale copertura nuvolosa possa indurre a valori medi di ΔT maggiori anche in ore anti-meridiane. I valori medi di $T_{b3,9}$ e ΔT raccolti, e le loro deviazioni standard, sono dunque stati interpolati in funzioni di terzo grado realizzate con la funzione *polyfit* di MATLAB, graficate (linea continua) nelle Figg. 4.4 e 4.5.

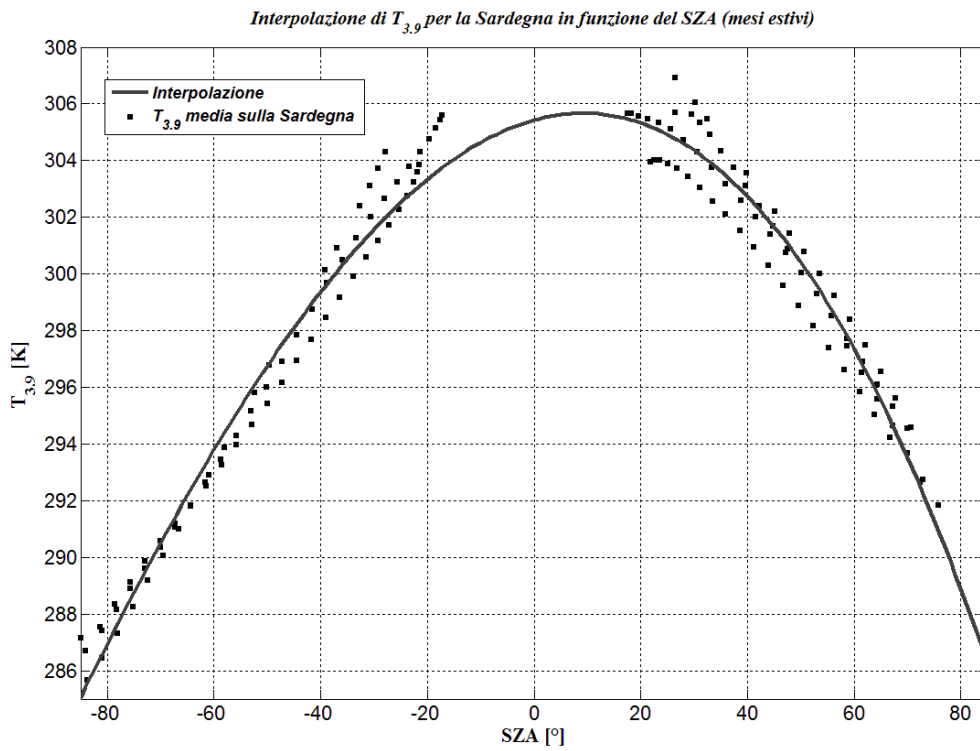


Figura 4.4: Interpolazione di $T_{3.9}$ in funzione del Solar Zenith Angle per la Sardegna.

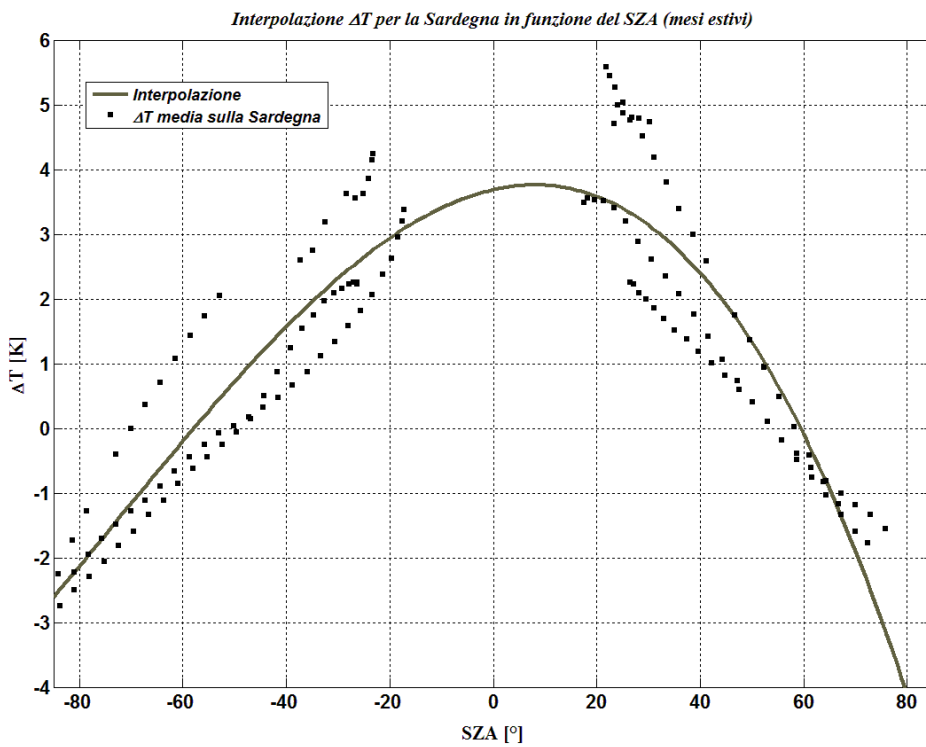


Figura 4.5: Interpolazione di ΔT in funzione del Solar Zenith Angle per la Sardegna.

Le funzioni ricavate mediante l'interpolazione di $T_{b3.9}$ e ΔT sono, rispettivamente:

$$\langle T_{b3.9} \rangle = \mp 6.24E-6 \cdot SZA^3 - 0.0027 \cdot SZA^2 \pm 0.052 \cdot SZA + 305.43 \quad (4.4)$$

$$\langle \Delta T \rangle = \mp 4.75E-6 \cdot SZA^3 - 0.0011 \cdot SZA^2 \pm 0.018 \cdot SZA + 3.69 \quad (4.5)$$

In cui, nei termini a esponente dispari, il segno superiore deve essere utilizzato nelle ore pomeridiane, mentre quello inferiore nelle anti-meridiane. O, in alternativa, è possibile utilizzare il solo segno superiore ponendo, com'è stato fatto per la realizzazione dei grafici presentati, SZA negativo per il mattino.

I valori medi descritti dalle Eqq. (4.4) e (4.5) sono stati assunti come soglia di individuazione dei potenziali hot-spot, utilizzando per ciascun pixel il SZA calcolato tenendo conto del giorno dell'anno, dell'ora locale e della georeferenziazione (latitudine e longitudine) del pixel stesso. Un punto è ritenuto un potenziale hot-spot, se sono contemporaneamente soddisfatte le condizioni:

$$\begin{cases} T_{b3.9} > \langle T_{b3.9} \rangle \\ \Delta T = T_{b3.9} - T_{b10.8} > \langle \Delta T \rangle \end{cases} \quad (4.6)$$

L'addizione, nei valori di soglia delle Eqq. (4.6), di termini costanti o multipli delle deviazioni standard riportate nelle successive Eqq. (4.7) e (4.8), può indurre a errori di omissione. Al contrario, la sottrazione di analoghi termini può portare a errori di commissione (falsi-allarmi). Poiché le pre-soglie nelle Eqq. (4.6) hanno dimostrato la loro efficienza nei mesi estivi; quest'ultima soluzione risulta auspicabile nei mesi invernali, in cui è consigliabile una minor severità delle soglie.

Come detto, una possibile strada per rendere più (o meno) severi questi limiti, è quello di considerare le rispettive deviazioni standard:

$$\langle \sigma_{T_{b3.9}} \rangle = \mp 1.5E-6 \cdot SZA^3 - 0.00035 \cdot SZA^2 \pm 0.0085 \cdot SZA + 3.66 \quad (4.7)$$

$$\langle \sigma_{\Delta T} \rangle = \mp 2.64E-6 \cdot SZA^3 - 0.00032 \cdot SZA^2 \pm 0.0082 \cdot SZA + 2.46 \quad (4.8)$$

sommando o sottraendo multipli, anche non interi, di tali deviazioni standard nei termini di destra delle Eqq. (4.6). Un'ultima strada possibile è quella di calcolare in tempo reale i valori medi di $T_{b3.9}$ e ΔT ponendo questi ultimi come soglia-limite; soluzione che, nel presente lavoro, è stata introdotta per le ore notturne.

4.5 CONFERMA DEGLI HOT-SPOT

Individuati i potenziali hot-spot, su questi sono effettuate successive verifiche atte a confermarne la veridicità. Ciò avviene mediante due diverse tipologie d'indagine: una basata su criteri di *change-detection*, in cui sono rilevate eventuali anomalie nelle variazioni di $T_{b3.9}$ e ΔT tra i valori al tempo corrente e gli istanti che lo anticipano di 15 e 30 minuti, e l'altra di natura contestuale in cui i valori di $T_{b3.9}$ e ΔT del potenziale hot-spot sono confrontati con quelli di un suo intorno di 3x3 pixel.

Nel primo caso, sarà possibile dare conferma degli hot-spot per i soli incendi che siano in fase crescente, i cui effetti inducano ad un aumento congiunto di $T_{b3.9}$ e ΔT oltre valori di soglia stimati statisticamente con un'analisi condotta in modo analogo a quanto visto nel § 4.4. Quest'approccio, del tutto innovativo rispetto alla letteratura corrente, è di particolare efficacia soprattutto per l'individuazione di nuovi incendi in tempi più stretti rispetto alle analisi di tipo contestuale, ben adattandosi ai requisiti dell'algoritmo SFIDE tra cui, come più volte ribadito, vi è la tempestività nell'individuazione dei focolai; per questo motivo, le soglie di *change-detection* sono state dette di *innesco*. Il secondo metodo di verifica, di tipo contestuale, adiuva il primo nelle fasi iniziali del nuovo evento incendiario e ne consente l'individuazione

anche quando, successivamente, $T_{b3,9}$ e ΔT non sono più crescenti nel tempo, sintomo che l'incendio non sta più accrescendo le sue dimensioni (all'interno di un singolo pixel).

Per entrambe le metodologie, sono state previste soglie più rigorose per i pixel ritenuti ad alto rischio di falso-allarme a causa della parziale copertura nuvolosa (elevata riflettanza), della repentina variazione di riflettanza nel tempo (nuvolosità variabile), o della Sun-glint (pixel sulla costa).

4.5.1 CHANGE-DETECTION

Procedendo in analogia ai modi descritti nel § 4.4 per la stima dell'andamento medio di $T_{b3,9}$ e ΔT in funzione del SZA , è stata condotta un'analisi statistica atta all'individuazione delle variazioni medie delle stesse grandezze, in intervalli di 15 e 30 minuti, sempre in funzione del SZA . Per ciascun'immagine disponibile nelle ore diurne del giorno, sono stati calcolati i valori di $T_{b3,9}$ e ΔT medi sulla Sardegna per l'immagine corrente e sulle immagini diffuse 15 e 30 minuti prima. In questo modo, è stato possibile calcolare le variazioni medie- e le relative deviazioni standard medie- di $T_{b3,9}$ e ΔT tra l'immagine corrente e quelle che l'anticipano di 15 e 30 minuti, per la Sardegna, in funzione del SZA . I dati, raccolti nelle stesse giornate campionate per le *pre-soglie*, sono stati interpolati in funzioni di terzo grado dipendenti dal SZA . Infine, utilizzando queste funzioni, sono state elaborate delle soglie, dette di innesco, che costituiscono i valori limite nelle variazioni temporali di $T_{b3,9}$ e ΔT oltre le quali un pixel viene definitivamente considerato hot-spot. Nelle pagine che seguono, sarà utilizzata la seguente simbologia:

- $T_{b3,9_15'}$ e $\Delta T_{15'}$ sono, rispettivamente, i valori di $T_{b3,9}$ e ΔT nell'immagine che precede di 15' quella corrente;

- $T_{b3.9_30'}$ e $\Delta T_{30'}$, i valori di $T_{b3.9}$ e ΔT nell'immagine che precede di 30' quella corrente;
- $\Delta T_{b3.9_15'} = (T_{b3.9} - T_{b3.9_15'})$ e $\Delta(\Delta T)_{15'} = (\Delta T - \Delta T_{15'})$, rispettivamente, le variazioni di $T_{b3.9}$ e ΔT tra l'immagine corrente e quella che l'anticipa di 15';
- $\Delta T_{b3.9_30'} = (T_{b3.9} - T_{b3.9_30'})$ e $\Delta(\Delta T)_{30'} = (\Delta T - \Delta T_{30'})$, le variazioni di $T_{b3.9}$ e ΔT tra l'immagine corrente e quella che l'anticipa di 30'.

4.5.1.1 VARIAZIONI TERMICHE NEI QUINDICI MINUTI

Nelle Figg. 4.6 e 4.7, in cui come nelle precedenti è stato assunto SZA negativo nelle ore antimeridiane per ragioni di chiarezza grafica, sono mostrati gli andamenti di $\Delta T_{b3.9_15'}$ e $\Delta(\Delta T)_{15'}$ medi per la Sardegna nei giorni campionati (pallini neri) e le relative interpolazioni di terzo grado (linea continua). I grafici mostrano come un'anomalia nelle variazioni di $T_{b3.9}$ e ΔT nei 15', non debba necessariamente essere inteso come un aumento di queste grandezze. In particolare, nelle ore pomeridiane, per cui l'andamento di $T_{b3.9}$ e ΔT è decrescente (vedi Figg. 4.4 e 4.5), si registrano valori negativi di $\Delta T_{b3.9_15'}$ e $\Delta(\Delta T)_{15'}$; ne consegue che si può ritenere anomalo anche un decremento di $T_{b3.9}$ e ΔT inferiore al previsto. Le interpolazioni hanno permesso di individuare i seguenti andamenti di $\Delta T_{b3.9_15'}$ e $\Delta(\Delta T)_{15'}$ medie e delle rispettive deviazioni standard:

$$\langle \Delta T_{b3.9_15'} \rangle = \mp 2.91E-7 \cdot SZA^3 - 1.75E-5 \cdot SZA^2 \pm 4.39E-4 \cdot SZA + 0.49 \quad (4.9)$$

$$\langle \sigma_{\Delta T_{b3.9_15'}} \rangle = \pm 1.00E-6 \cdot SZA^3 - 5.09E-5 \cdot SZA^2 \mp 1.77E-2 \cdot SZA + 0.21 \quad (4.10)$$

$$\langle \Delta(\Delta T)_{15'} \rangle = \pm 5.03E-7 \cdot SZA^3 - 1.21E-6 \cdot SZA^2 \mp 6.84E-3 \cdot SZA + 0.005 \quad (4.11)$$

$$\langle \sigma_{\Delta(\Delta T)_{15'}} \rangle = \mp 7.17E-7 \cdot SZA^3 - 8.81E-5 \cdot SZA^2 \pm 1.75E-3 \cdot SZA + 0.85 \quad (4.12)$$

Dove $\langle \Delta T_{b3.9_{-15'}} \rangle$ e $\langle \Delta(\Delta T)_{15'} \rangle$ sono, rispettivamente, le funzioni che approssimano l'andamento medio di $\Delta T_{b3.9_{-15'}}$ e $\Delta(\Delta T)_{15'}$ in funzione del SZA , mentre $\langle \sigma_{\Delta T_{b3.9_{-15'}}} \rangle$ e $\langle \sigma_{\Delta(\Delta T)_{15'}} \rangle$ quelle che approssimano le rispettive deviazioni standard medie. Per la scelta dei segni da utilizzare, vale quanto già espresso in merito alle Eqq. (4.4) e (4.5).

Le Eqq. (4.9)-(4.12) saranno utilizzate nel § 4.5.1.3 per la definizione delle soglie di innesco che permettono di individuare incendi nelle loro fasi iniziali.

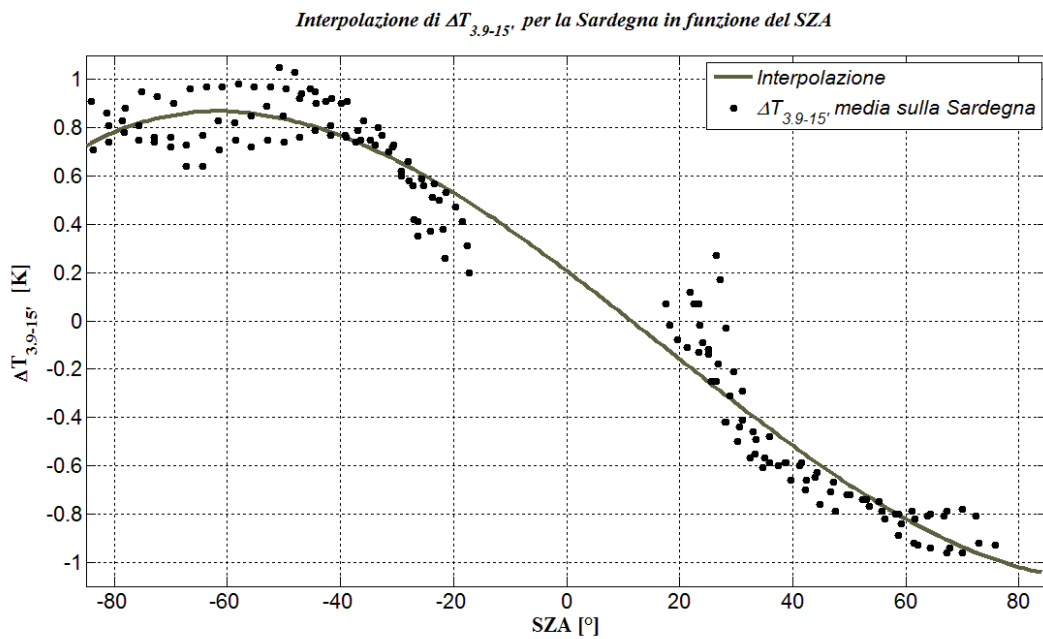


Figura 4.6: Interpolazione di $\Delta T_{b3.9_{-15'}}$ in funzione del Solar Zenith Angle per la Sardegna.

Interpolazione di $\Delta(\Delta T)_{15'}$ per la Sardegna in funzione del SZA

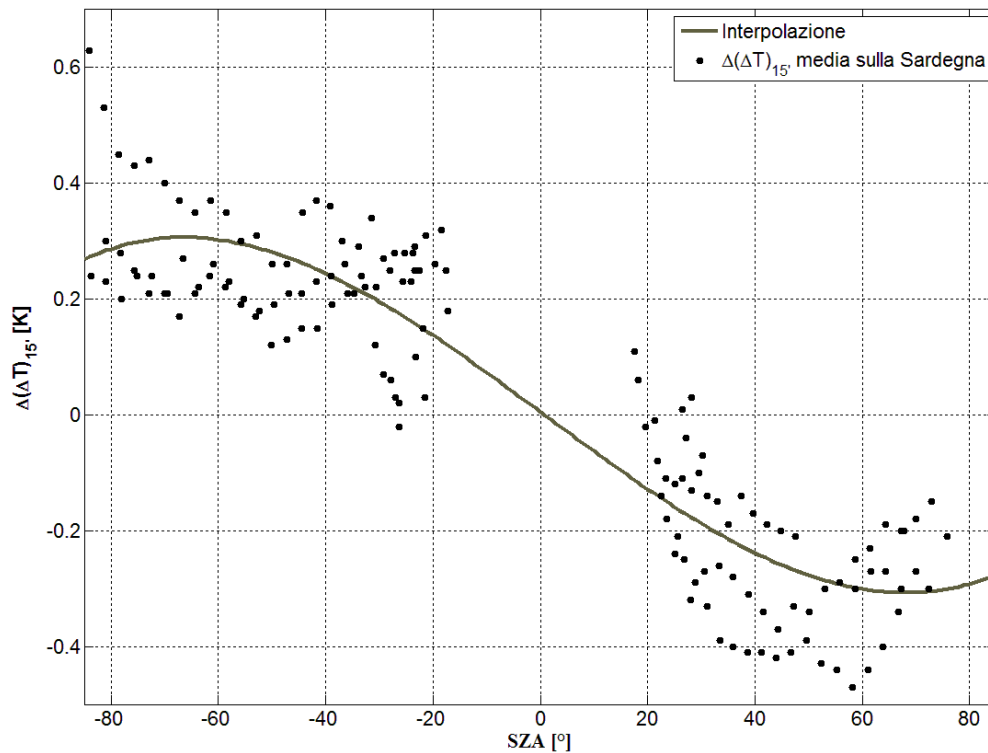


Figura 4.7: Interpolazione di $\Delta(\Delta T)_{15'}$ in funzione del Solar Zenith Angle per la Sardegna.

4.5.1.2 VARIAZIONI TERMICHE NEI TRENTA MINUTI

Analogamente a quanto fatto per le immagini diffuse 15' prima rispetto a quelle attuali, è stata condotta un'analisi delle variazioni di $T_{b3.9}$ e ΔT in intervalli di 30'. I risultati dell'indagine statistica sono riassunti nelle Figg. 4.8 e 4.9, dove sono rappresentati gli andamenti, rispettivamente, di $\Delta T_{b3.9_30'}$ e $\Delta(\Delta T)_{30'}$ medi per la Sardegna nei giorni campionati (pallini neri) e le relative interpolazioni di terzo grado (linea continua). Quest'ultime, hanno dato luogo alle seguenti funzioni:

$$\langle \Delta T_{b3.9_30'} \rangle = \pm 1.95E-6 \cdot SZA^3 - 1.25E-4 \cdot SZA^2 \mp 3.46E-2 \cdot SZA + 0.48 \quad (4.13)$$

$$\langle \sigma_{\Delta T_{b3.9_30'}} \rangle = \mp 4.39E-7 \cdot SZA^3 - 6.07E-6 \cdot SZA^2 \pm 1.21E-3 \cdot SZA + 0.75 \quad (4.14)$$

$$\langle \Delta(\Delta T)_{30'} \rangle = \pm 9.13E-7 \cdot SZA^3 - 6.40E-6 \cdot SZA^2 \mp 1.34E-2 \cdot SZA + 0.026 \quad (4.15)$$

$$\langle \sigma_{\Delta(\Delta T)_{30'}} \rangle = \mp 1.18E-6 \cdot SZA^3 - 1.09E-4 \cdot SZA^2 \pm 3.56E-3 \cdot SZA + 1.16 \quad (4.16)$$

Dove $\langle \Delta T_{b3.9-30'} \rangle$ e $\langle \Delta(\Delta T)_{30'} \rangle$ sono, rispettivamente, le funzioni che approssimano l'andamento medio di $\Delta T_{b3.9-30'}$ e $\Delta(\Delta T)_{30'}$ in funzione del SZA , mentre $\langle \sigma_{\Delta T_{b3.9-30'}} \rangle$ e $\langle \sigma_{\Delta(\Delta T)_{30'}} \rangle$ quelle che approssimano le rispettive deviazioni standard medie. Ancora una volta, i simboli superiori devono essere utilizzati nelle ore pomeridiane e quelli inferiori nelle ore antimeridiane o, in alternativa, è possibile porre SZA negativo nelle ore del mattino.

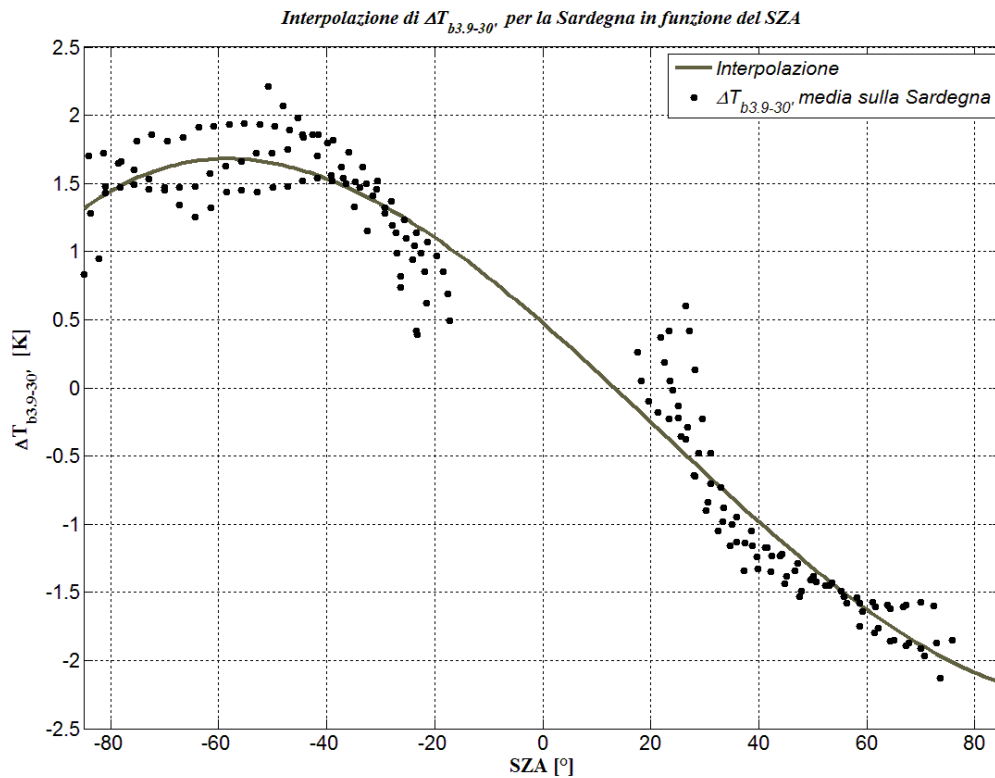


Figura 4.8: Interpolazione di $\Delta T_{b3.9-15'}$ in funzione del Solar Zenith Angle per la Sardegna.

Interpolazione di $\Delta(\Delta T)_{30'}$ per la Sardegna in funzione del SZA

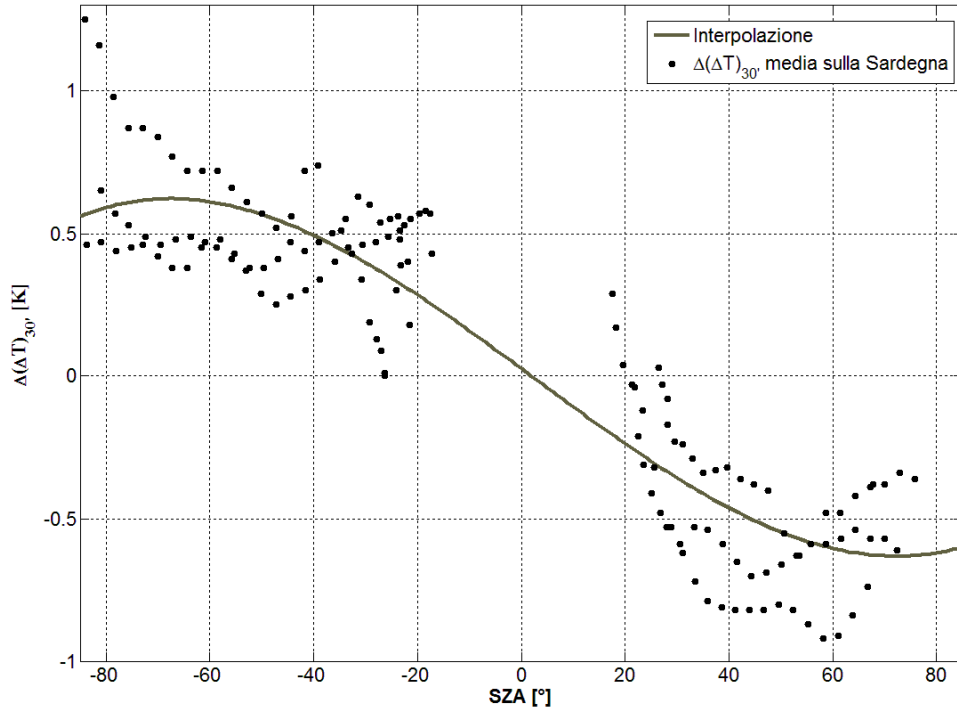


Figura 4.9: Interpolazione di $\Delta(\Delta T)_{30'}$ in funzione del Solar Zenith Angle per la Sardegna.

4.5.1.3 SOGLIE DI INNESCO

Le funzioni descritte dalle Eq. (4.9)-(4.16) sono state utilizzate per porre, sui soli potenziali hot-spot che abbiano superato le condizioni poste in Eq. (4.6), delle soglie, dette di innesco, in grado di confermare la presenza dell'incendio sul pixel.

In particolare, tenendo conto delle sole variazioni termiche negli ultimi 15', un potenziale hot-spot è confermato se sono rispettate contemporaneamente tutte le seguenti condizioni:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T_{b3.9_15'} = (T_{b3.9} - T_{b3.9_15'}) > \langle \Delta T_{b3.9_15'} \rangle + \langle \sigma_{\Delta T_{b3.9_15'}} \rangle \\ \Delta(\Delta T)_{15'} = (\Delta T - \Delta T_{15'}) > \langle \Delta(\Delta T)_{15'} \rangle + \langle \sigma_{\Delta(\Delta T)_{15'}} \rangle + f_{15'}(\Delta r_{0.6}) \\ T_{b3.9} > \overline{T_{b3.9}} + 1.5 \\ \Delta T > \overline{\Delta T} + 0.5 \\ N_w + N_c = 0 \end{array} \right. \quad (4.17)$$

Dove:

- $\overline{T_{b3.9}}$ e $\overline{\Delta T}$ sono, rispettivamente, i valori medi di $T_{b3.9}$ e ΔT nell'intorno 3×3 del potenziale hot-spot;
- N_w e N_c sono il numero di pixel-acqua e pixel nuvolosi nell'intorno 3×3 del potenziale hot-spot;
- $f_{15'}(\Delta r_{0.6}) = 100(r_{0.6} - r_{0.6_{15'}})$ se $r_{0.6} > r_{0.6_{15'}}$, con $r_{0.6_{15'}}$ la riflettanza nel canale 1 valutata 15' prima dell'ora corrente.

La funzione $f_{15'}$, applicata solo in presenza di un aumento di $r_{0.6}$ negli ultimi 15', serve a correggere l'incremento di ΔT che esso produce, stimato in 1K per ogni centesimo di $r_{0.6}$. L'introduzione di tale funzione risulta determinante per evitare che un aumento di ΔT dovuto alla variazione di $r_{0.6}$ (ad esempio per un aumento della copertura nuvolosa del pixel) non porti ad un erroneo superamento delle soglie di *change-detection*.

Considerando le variazioni termiche negli ultimi 30', un hot-spot è confermato se sono rispettate contemporaneamente tutte le seguenti condizioni:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T_{b3.9_{30'}} = (T_{b3.9} - T_{b3.9_{30'}}) > \langle \Delta T_{b3.9_{30'}} \rangle + \langle \sigma_{\Delta T_{b3.9_{30'}}} \rangle \\ \Delta(\Delta T)_{30'} = (\Delta T - \Delta T_{30'}) > \langle \Delta(\Delta T)_{30'} \rangle + \langle \sigma_{\Delta(\Delta T)_{30'}} \rangle + f_{30'}(\Delta r_{0.6}) \\ T_{b3.9} > \overline{T_{b3.9}} + 1.5 \\ \Delta T > \overline{\Delta T} + 0.5 \\ N_w + N_c = 0 \end{array} \right. \quad (4.18)$$

Dove $f_{30'}(\Delta r_{0.6}) = 100(r_{0.6} - r_{0.6_{30'}})$ se $r_{0.6} > r_{0.6_{30'}}$, con $r_{0.6_{30'}}$ la riflettanza nel canale 1 valutata 30' prima dell'ora corrente, è la funzione atta a correggere eventuali innalzamenti di $r_{0.6}$ negli ultimi 30'.

Soglie analoghe, ma più rigorose, sono previste per quei potenziali hot-spot ritenuti a elevato tasso di falso-allarme, poiché contaminati da fattori di rischio quali la Sun-glint, l'elevata nuvolosità nell'intorno del potenziale pixel-fuoco o una marcata variazione di $r_{0.6}$. Soglie più rigide sono dunque poste qualora si verifichi almeno una delle seguenti condizioni:

$$|r_{0.6} - r_{0.6_{-15}}| \geq 0.03 \quad (4.19)$$

$$|r_{0.6} - r_{0.6_{-30}}| \geq 0.03 \quad (4.20)$$

$$(N_w + N_c) > 0 \quad (4.21)$$

$$(r_{0.8} - r_{0.6}) \geq 0.1 \quad (4.22)$$

Le condizioni poste dalle Eqq. (4.19) e (4.20) servono ad individuare quei pixel per cui si abbia una repentina variazione di $r_{0.6}$, che può essere evidenza di una nuvolosità variabile. In presenza di tale circostanza, è stata notata una marcata variabilità di ΔT tale da indurre sovente ad aumenti considerevoli di questa grandezza, anche in caso di diminuzione di $r_{0.6}$. La condizione in Eq. (4.21) permette di individuare e prevenire gli inconvenienti legati sia ai punti posti sulla costa ($N_w > 0$) che a quelli confinanti con pixel nuvolosi ($N_c > 0$); i primi presentano valori anomali (più alti) di $T_{b3.9}$ - e conseguentemente anche di ΔT - , per i secondi, le anomalie si registrano principalmente sul ΔT a causa di una diminuzione delle temperature di brillantezza nei canali TIR.

Per i pixel a elevato rischio, i limiti in Eq. (4.17) sono rivisti nelle:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T_{b3.9_{-15'}} = (T_{b3.9} - T_{b3.9_{-15'}}) > \langle \Delta T_{b3.9_{-15'}} \rangle + 2 \cdot \langle \sigma_{\Delta T_{b3.9_{-15'}}} \rangle \\ \Delta(\Delta T)_{15'} = (\Delta T - \Delta T_{15'}) > \langle \Delta(\Delta T)_{15'} \rangle + 2 \cdot \langle \sigma_{\Delta(\Delta T)_{15'}} \rangle + f_{15'}(\Delta r_{0.6}) \\ T_{b3.9} > \overline{T_{b3.9}} + 1.5 \\ \Delta T > \overline{\Delta T} + 0.5 \\ N_w + N_c = 0 \end{array} \right. \quad (4.23)$$

Mentre le condizioni in Eq. (4.18) sono modificate nelle:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T_{b3.9_{-30'}} = (T_{b3.9} - T_{b3.9_{-30'}}) > \langle \Delta T_{b3.9_{-30'}} \rangle + 2 \cdot \langle \sigma_{\Delta T_{b3.9_{-30'}}} \rangle \\ \Delta(\Delta T)_{30'} = (\Delta T - \Delta T_{30'}) > \langle \Delta(\Delta T)_{30'} \rangle + 2 \cdot \langle \sigma_{\Delta(\Delta T)_{30'}} \rangle + f_{30'}(\Delta r_{0.6}) \\ T_{b3.9} > \overline{T_{b3.9}} + 1.5 \\ \Delta T > \overline{\Delta T} + 0.5 \\ N_w + N_c = 0 \end{array} \right. \quad (4.24)$$

4.5.2 ANALISI CONTESTUALE

In alternativa al metodo basato sulla valutazione della variazione delle grandezze termiche, la conferma dei potenziali hot-spot può avvenire anche mediante un'analisi contestuale delle stesse nell'intorno 3x3 del presunto pixel-fuoco, in affinità alle modalità presentate nel § 2.2.2.2. Anche in questo caso sono state previste due diverse rigidità delle soglie, in funzione del grado di rischio di falso-allarme. Per i punti a basso rischio, le condizioni di conferma dell'hot-spot sono:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{b3.9} > \overline{T_{b3.9}} + \max(1, \sigma_{T_{b3.9}} - 3) \\ \Delta T > \overline{\Delta T} + \max(1.25, \sigma_{\Delta T}) \text{ oppure } \Delta T > \overline{\Delta T} + \min(2, \sigma_{\Delta T}) \text{ oppure } \Delta T > 4.5 \end{array} \right. \quad (4.25)$$

Dove $\sigma_{T_{b3.9}}$ e $\sigma_{\Delta T}$ sono le deviazioni standard di $T_{b3.9}$ e ΔT nell'intorno 3x3 del potenziale hot-spot.

Qualora sia rispettata almeno una tra le condizioni in Eqq. (4.19), (4.20) e (4.22), oppure una tra quelle sotto elencate, il punto è ritenuto a più elevato rischio di falso allarme:

$$r_{0.6} > 0.15 \quad (4.26)$$

$$r_{0.6} > \overline{r_{0.6}} + \sigma_{r_{0.6}} \quad (4.27)$$

$$\overline{r_{0.6}} < 0.1 \quad (4.28)$$

$$\min(r_{0.6})_{3 \times 3} < 0.08 \quad (4.29)$$

In cui $\overline{r_{0.6}}$, $\sigma_{r_{0.6}}$ e $\min(r_{0.6})_{3 \times 3} < 0.08$ sono, nell'ordine, il valore medio, la deviazione standard e il valore minimo di $r_{0.6}$ nell'intorno 3×3 del potenziale hot-spot. Mentre le prime due condizioni in Eqq. (4.26) e (4.27) mirano ad individuare i pixel a parziale copertura nuvolosa, le ultime due in Eqq. (4.28) e (4.29) consentono di porre particolare attenzione ai punti di confine con la sea-mask.

Per i pixel a più alto rischio di falso-allarme, le condizioni che danno conferma dell'hot-spot sono:

$$\begin{cases} T_{b3.9} > \overline{T_{b3.9}} + \max(2.5, \sigma_{T_{b3.9}} - 3) \\ \Delta T > \overline{\Delta T} + \min(4, 2 \cdot \sigma_{\Delta T}) \end{cases} \quad (4.30)$$

4.6 CARATTERIZZAZIONE HOT-SPOT

Terminata la fase d'individuazione degli incendi, segue quella in cui essi sono caratterizzati in termini di stima della potenza radiante di fuoco (FRP), temperatura di fuoco (T_f), stima della frazione di pixel coperta dalle fiamme (ρ) e, dunque, dell'estensione superficiale dell'incendio (A_f). Inoltre, in questa versione di SFIDE, è stata introdotta la valutazione della temperatura superficiale (LST), grandezza che, nei futuri sviluppi dell'algoritmo, si conta di

integrare sia per il calcolo della FRP (per una più corretta stima della temperatura di background) che nelle soglie di *fire-detection*, in luogo delle temperature nei canali TIR.

La caratterizzazione degli hot-spot, ha rilevanza non solo per quanto concerne le valutazioni a posteriori sugli incendi, ma anche per considerazioni in tempo reale, in particolare sulle dimensioni e sulla violenza degli incendi in atto, che consentono di dimensionare le risorse da impiegare su ciascun focolaio.

4.6.1 FRP, TEMPERATURA DI FUOCO ED ESTENSIONE DEGLI INCENDI

La potenza radiante di fuoco, FRP , è anzitutto calcolata utilizzando l'approssimazione di Wooster in Eq. (2.12) in cui è stato posto $A_{PIXEL}=16 \times 10^6 m^2$ (essendo la risoluzione del pixel pari a 4 km) e $a=3.06 \times 10^{-9}$, conformemente alla Tab. 2.5. Dalla FRP_w così calcolata è possibile individuare la temperatura di fuoco (T_f) e la frazione di pixel interessata dall'incendio (ρ) mediante l'uso di matrici pre-caricate che permettono di correlare a valori discreti di FRP a corrispondenti stime di T_f e ρ , e dunque dell'area interessata dall'incendio (A_f). Lavorando MATLAB nel discreto, si prenderanno in considerazione i valori di T_f e ρ corrispondenti alla FRP più prossima alla FRP_w precedentemente calcolata. Le tabelle sono state ottenute simulando la FRP per diversi valori di temperatura e dimensione dell'incendio.

Noti T_f e A_f , come successiva verifica è calcolata anche la FRP_{SB} secondo l'Eq. (2.11), nell'ipotesi di corpo nero, e assumendo come temperatura di background (T_b) il valore medio delle $T_{b10.8}$ dei quattro pixel confinanti con quello interessato dall'incendio, ovvero quelli posti nelle posizioni (1,2), (2,1), (2,3) e (3,2) nel riquadro 3x3 del pixel-fuoco. Se FRP_w e FRP_{SB} differiscono notevolmente tra loro (di almeno il 30%) si effettuano delle correzioni che permettono di ricavare una FRP ottima, che viene poi convertita in $MWatt$ e

salvata per la successiva preparazione dei report, assieme all'estensione dell'incendio (in m^2) e alla temperatura di fuoco.

4.6.2 LAND SURFACE TEMPERATURE

Nella presente versione del codice SFIDE è stato implementato il calcolo della temperatura superficiale o *Land Surface Temperature (LST)*. Questa grandezza, oltre ad essere un utile parametro nella caratterizzazione dei pixel-fuoco, potrà essere utilizzata, in futuri aggiornamenti dell'algoritmo, sia per l'individuazione degli incendi che per il calcolo della FRP, ed in particolare per la stima della temperatura di background (T_b), evitando la scomoda approssimazione di quest'ultima con il valore medio di $T_{b10.8}$ nell'intorno del pixel-fuoco.

L'ampia letteratura reperibile sugli algoritmi di stima della temperatura superficiale mediante i dati del sensore MSG-SEVIRI, mostra come i risultati migliori si ottengano adoperando la cosiddetta tecnica della *doppia finestra* atmosferica e, in particolare, utilizzando come dati di input le temperature nei canali 9 e 10 ($T_{b10.8}$ e T_{b12}) che operano, per l'appunto, in finestra atmosferica e per i quali si registrano valori minimi della deviazione standard [Sobrino e Romaguera, 2004].

Nel presente lavoro, è stato considerato un algoritmo di calcolo della temperatura superficiale in cui è considerata la dipendenza dall'emissività spettrale, dal vapore acqueo atmosferico totale e, soprattutto, dall'angolo di vista (*Viewing Zenith Angle, VZA*), principale discriminante nel calcolo dei coefficienti presenti nella [Atitar et al., 2008]:

$$LST = T_{b10.8} + a_1(T_{b10.8} - T_{b12}) + a_2(T_{b10.8} - T_{b12})^2 + a_3(1 - \bar{\varepsilon}) + a_4(1 - \bar{\varepsilon})W + a_5 \cdot \Delta\varepsilon + a_6 \cdot W \cdot \Delta\varepsilon + a_0 \quad (4.31)$$

Dove:

- $a_1 = 1.34 - \frac{0.11}{\cos^2 \theta}$;
- $a_2 = 0.29 + \frac{0.08}{\cos^2 \theta}$ [K⁻¹];
- $a_3 = 60.67 - \frac{10.01}{\cos^2 \theta}$ [K];
- $a_4 = -6.71 + \frac{2.47}{\cos^2 \theta}$ [K·cm²·g⁻¹];
- $a_5 = -125.91 + \frac{15.09}{\cos^2 \theta}$ [K];
- $a_6 = 19.44 - \frac{4.27}{\cos^2 \theta}$ [K·cm²·g⁻¹];
- $a_0 = -0.44 + \frac{0.57}{\cos^2 \theta}$ [K];
- $\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{10.8} + \varepsilon_{12}}{2}$ è il valor medio dell'emissività spettrale valutata nei canali 9 ($\varepsilon_{10.8}$) e 10 (ε_{12});
- $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{10.8} - \varepsilon_{12}$ è la differenza di emissività spettrale tra i due canali;
- W è il vapore acqueo atmosferico totale in [g·cm²];
- θ è il Viewing Zenith Angle, ovvero l'angolo che si forma tra lo Zenith locale e la congiungente tra l'osservatore e il satellite [Soler e Eisemann, 1994]. La Fig. 4.10 permette di confrontare angolo di vista ed elevazione solare.

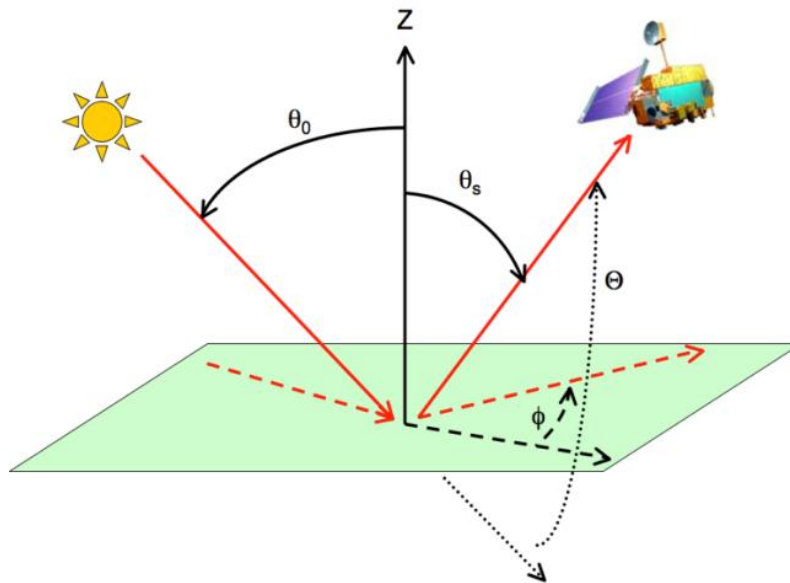


Figura 4.10: Angolo di Vista (ϑ_s) e Elevazione Solare (ϑ_0).

Per valori dell'angolo di vista in linea con quelli della Sardegna, gli autori indicano deviazioni standard intorno a 0.69 K, a patto di utilizzare in Eq. (4.31) i corretti valori di W , $\Delta\varepsilon$ e $\bar{\varepsilon}$. La valutazione di queste grandezze costituisce una delle problematiche più rilevanti nella corretta stima della LST . I modelli atmosferici stagionali- come quelli reperibili utilizzando il simulatore MODTRAN- consentono di individuare con buona approssimazione il vapore acqueo totale. Quest'ultimo è presente in due soli termini che hanno un'incidenza piuttosto contenuta nella stima della temperatura superficiale, in genere non superiore a 1 K.

Diverso è il discorso delle emissività spettrali, per le quali è difficoltoso mappare il valore sulla superficie d'interesse alle diverse lunghezze d'onda e valutarne le variazioni temporali. In Fig. 4.11 è riportato un profilo-tipo di andamento di emissività spettrale in funzione della lunghezza d'onda. La difficoltà di reperire mappe dell'emissività spettrale per i diversi canali di MSG-SEVIRI, e gli errori derivanti sulla stima della LST prodotti dall'utilizzo di valori approssimati, sono i principali limiti che ostano all'utilizzo della temperatura superficiale nella fire-detection vera e propria e ne confina, almeno per il momento, l'utilizzo alla sola caratterizzazione degli hot-spot. La

mappatura esatta delle emissività spettrali sull'area studio, è da considerarsi come uno tra gli inevitabili sviluppi futuri dell'algoritmo SFIDE. Nel presente lavoro, i valori di $\varepsilon_{10.8}$ e ε_{12} , assunti costanti per tutti i pixel in ciascuno dei due canali, sono stati valutati attraverso mappe di emissività spettrale relative ai canali 13 e 14 del radiometro ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), operanti alle lunghezze d'onda più prossime a quelle canali 9 e 10 di MSG-SEVIRI, e pari- rispettivamente- a $10.25-10.95 \mu m$ e $10.95-11.65 \mu m$. L'operazione di media condotta sulla Sardegna ha permesso di stimare le due emissività spettrali in $\varepsilon_{10.8} = 0.9801$ e $\varepsilon_{12} = 0.9792$, valori in linea con la letteratura [Salisbury e D'Aria, 1992].

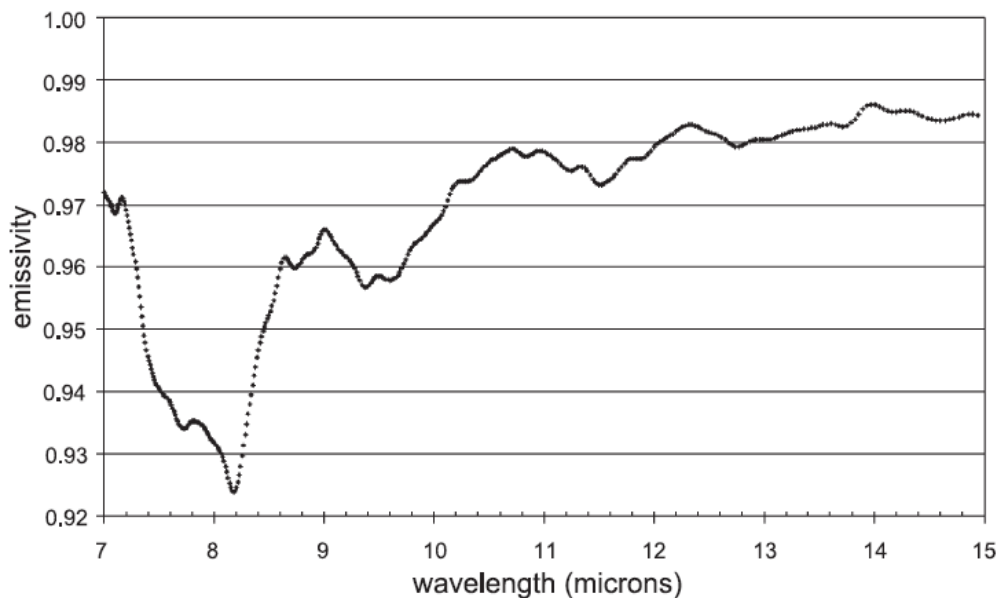


Figura 4.11: Curva dell'emissività spettrale in funzione della lunghezza d'onda per una copertura di tipo misto.

Per ciascuna delle grandezze in Eq. (4.31) sono stati assunti valori costanti per tutti i pixel, riportati in Tab. (4.2). In particolare, i coefficienti a_i sono stati valutati utilizzando un angolo di vista (θ) calcolato tenendo conto dei valori medi di latitudine e longitudine della Sardegna. Il vapore acqueo totale è valutato mediante un modello atmosferico simulato in MODTRAN per la stagione estiva alle latitudini della Sardegna.

θ [°]	a_0 [K]	a_1	a_2 [K ⁻¹]	a_3 [K]	a_4 [cm ² ·K·g ⁻¹]	a_5 [K]	a_6 [cm ² ·K·g ⁻¹]	W [g·cm ⁻²]	$\varepsilon_{10.8}$	ε_{12}
47	0.78	1.10	0.46	39.16	-1.40	-93.49	10.27	3	0.9801	0.9792

Tabella 4.2: Coefficienti utili al calcolo della LST.

4.7 CONTROLLO QUALITÀ

Ultima verifica che viene effettuata sugli hot-spot è il controllo qualità degli stessi. Questo test si basa sulla comparazione tra il valore effettivo di ΔT e quello atteso (ΔT_{Att}), stimato dalla valutazione della variazione di $T_{b3.9}$ negli ultimi 15' per via delle variazioni dei contributi radiativi termici (legati all'emissione terrestre) e della riflessione solare.

Calcolando la variazione di $T_{b10.8}$ negli ultimi 15' ($\Delta T_{b10.8_{15'}} = T_{b10.8} - T_{b10.8_{15'}}$, in analogia a quanto visto nel paragrafo sulla change-detection), e riportando gli effetti di quest'ultima nel canale 4, è possibile calcolare di quanto la $T_{b3.9}$ dovrebbe conseguentemente variare. La mutazione del contributo radiativo dovuto alla riflessione solare, è valutata mediante la variazione del SZA negli ultimi 15', i cui effetti sono stimati, ancora una volta, nel canale 4.

Sommando i due termini, è possibile approssimare la variazione di radianza attesa nel canale 4 negli ultimi 15' e, dunque, quella della temperatura di brillantezza nello stesso canale ($\Delta T_{b3.9_{15'}_{Att}}$). Sommando quest'ultima alla temperatura di brillantezza nel canale 4 valutata 15' prima del tempo corrente, è possibile stimare il valore atteso di $T_{b3.9}$: $T_{b3.9_{Att}} = T_{b3.9_{15'}} + \Delta T_{b3.9_{15'}_{Att}}$). Noto quest'ultimo, si potrà stimare il ΔT atteso come segue:

$$\Delta T_{Att} = T_{b3.9_{Att}} - T_{b10.8} \quad (4.32)$$

Il ΔT_{Att} ottenuto con l'Eq. (4.32) è utilizzato per calcolare l'indice di qualità (QC) dell'hotspot, mediante la relazione:

$$QC = 100 \left(\frac{|\Delta T|}{|\Delta T_{Att}|} - 1 \right) \quad (4.33)$$

Per questo indice, che è una misura del rapporto che intercorre tra ΔT reale e ΔT_{Att} , è stato assunto un valore massimo pari a 100 (se $QC > 100$, si pone $QC = 100$).

Per l'algoritmo SFIDE, è stato scelto di ritenere superato il controllo qualità quando:

$$QC > 30 \quad (4.34)$$

Le simulazioni hanno evidenziato come questo valore di soglia permetta di ridurre notevolmente i falsi allarmi. È stato notato come, la quasi totalità degli hot-spot caratterizzati da QC negativo ($\Delta T < \Delta T_{Att}$), fosse riconducibili a falsi allarmi. Contrariamente, per $0 \leq QC \leq 30$, sono stati talvolta scartati pixel appartenenti a incendi effettivamente in corso, sebbene essi costituissero una netta minoranza rispetto ai falsi allarmi eliminati.

4.8 PREPARAZIONE E DIFFUSIONE DEI REPORT

Ultima operazione dell'algoritmo è quella che permette, in presenza di incendi attivi, di darne tempestiva comunicazione alle autorità competenti mediante l'invio di un file di report che contiene tutte le informazioni utili all'identificazione geografica dell'incendio e delle sue proporzioni. I report sono prodotti in formato *shapefile*, un comune formato vettoriale che può essere aperto usando sistemi informativi geografici commerciali quali *ArcGIS* o *QGIS*.

In Tab. 4.3 è riportato un esempio delle informazioni riassunte nei report. Anzitutto, sono riportate le referenziazioni temporali e geografiche (latitudine e longitudine) degli hot-spot. Seguono poi tutti i dati caratterizzanti l'incendio: potenza radiante di fuoco, temperatura di brillanza nel canale 4,

temperatura di fuoco, temperatura superficiale, estensione dell'incendio e indice di qualità.

Ora [hh:mm]	Latitudine [°]	Longitudine [°]	FRP [MWatt]	$T_{b3.9}$ [K]	T_f [K]	LST [K]	Area [m ²]	QC
23:30	39.85324	8.625212	53	286.75	983	291.87	817	100
23:30	39.81233	8.619372	63	289.28	761	289.36	2463	100
23:30	39.77146	8.613549	46	288.46	744	290.91	2201	100
23:30	39.52778	8.61598	45	285.08	801	289.15	1487	100
23:30	39.48791	8.64724	44	285.85	744	296.46	2103	100
23:30	39.2076	8.754748	56	300.89	757	296.10	1920	100
23:30	39.20835	8.791594	72	302.46	930	296.16	1754	100
23:30	39.16726	8.749027	239	317.64	936	296.94	3163	100
23:30	39.16801	8.785848	284	321.04	910	297.49	2960	100
23:30	39.12697	8.743323	92	305.21	846	296.94	2421	100
23:30	39.12771	8.780119	112	307.24	776	297.25	2530	100

Tabella 4.3: Esempio di un file di report dell'algorithm SFIDE.

Particolarmente importante è porre l'accento sui valori della FRP, soprattutto alla presenza di più incendi in contemporanea, come avviene nell'esempio riportato, relativo alla notte tra 3 e 4 luglio 2014. Infatti, se sono molteplici i focolai attivi, la gestione delle risorse per il contrasto degli stessi, potrà essere compiuta in relazione ai valori di FRP di ciascun incendio, essendo questo parametro un indice della biomassa combusta e, in definitiva, delle proporzioni dell'incendio. Questo parametro, è inoltre molto importante anche nelle valutazioni a posteriori di un evento incendiario, permettendo di calcolare la biomassa combusta e, dunque, di stimare i danni ambientali in termini di vegetazione persa e di emissione di gas inquinanti, prodotti della combustione, in atmosfera.

4.9 ALGORITMO ORE NOTTURNE

Quando non è più rispettata la condizione $SZA < 85^\circ$, l'individuazione degli incendi è condotta mediante un algoritmo alternativo, costruito ad hoc per le

ore notturne. Com'è evidente, la differenza principale tra le ore diurne e quelle notturne è l'assenza, nella radianza totale, della componente solare riflessa. Ciò rende superfluo il calcolo delle riflettanze nei canali VNIR, poiché perde di senso ogni possibile valutazione su queste grandezze. Di conseguenza, nelle ore notturne, l'indagine risulta più semplice e a minor rischio di falsi-allarmi, venendo meno le problematiche di elevata riflettanza e Sun-glint.

Rispetto a quello diurno, l'algoritmo notturno- riassunto in Fig. 4.12- differisce principalmente nei seguenti punti:

1) L'individuazione della *cloud-mask* è condotta utilizzando unicamente una soglia sulla temperatura nel canale 10: coerentemente alla letteratura (vedi § 2.2.1), come condizione affinché di notte un pixel sia ritenuto a copertura nuvolosa, è:

$$T_{b12.0} < 265K \quad (4.35)$$

2) L'individuazione degli hot-spot mediante sole soglie fisse avviene con valori limite di $T_{b3.9}$ e ΔT adeguati alle ore notturne. Un primo modo considerato per individuarli è quello basato sull'adozione di due valori di soglia costanti su $T_{b3.9}$ e ΔT ; in ottemperanza alle indicazioni fornite dalla manualistica diffusa dal consorzio EUMETSAT, questi valori sono stati fissati in [Joro et al., 2008]:

$$\begin{cases} T_{b3.9} > 290K \\ \Delta T > 1K \end{cases} \quad (4.36)$$

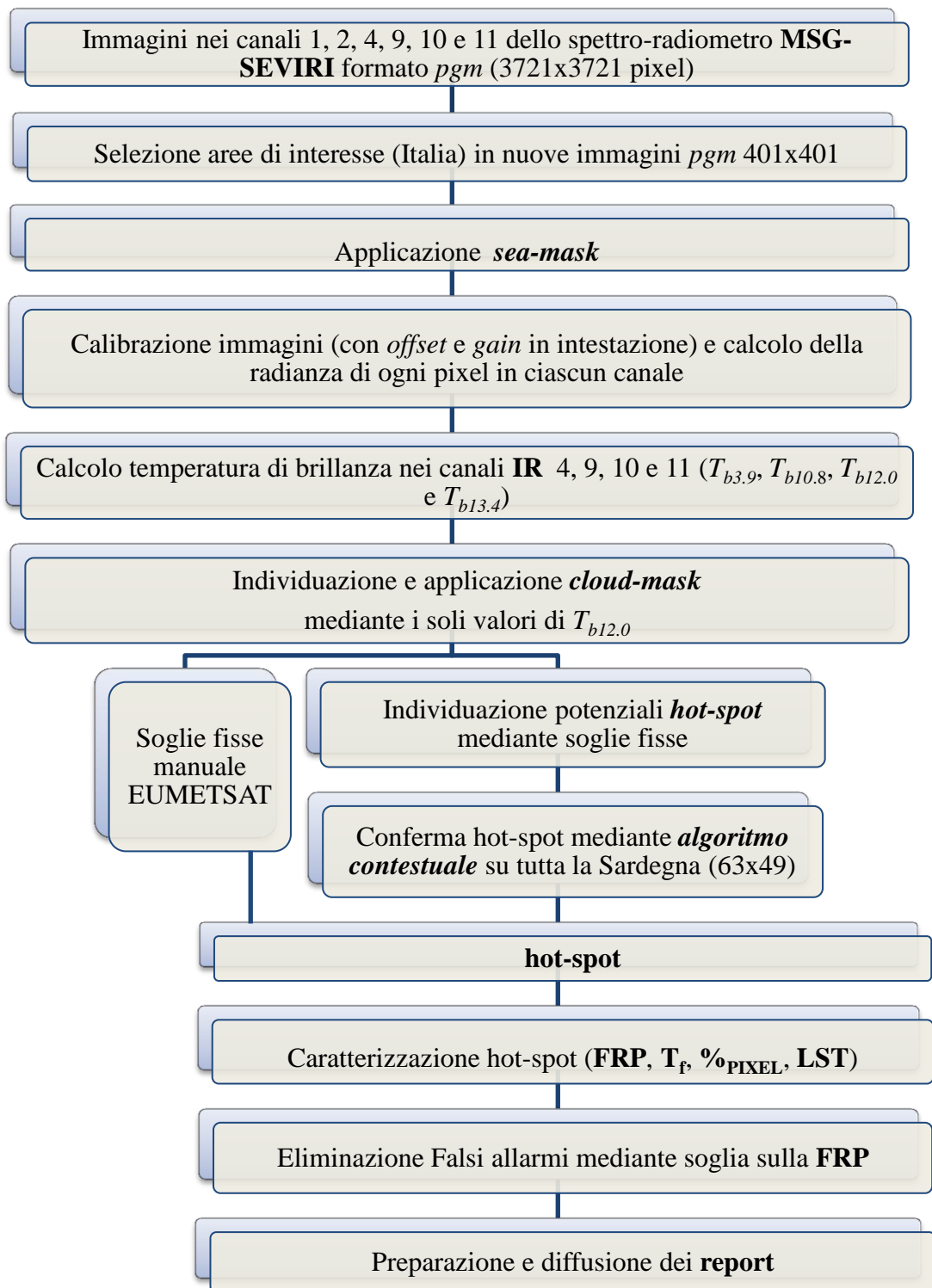


Figura 4.12: SFIDE, algoritmo per le ore notturne.

Osservando le Figg. 4.13, in cui sono riportati gli andamenti di $T_{b3.9}$ e ΔT alle ore 23:30 del giorno 08/07/2014, si può notare come i valori di $T_{b3.9}$ e ΔT , ed in

particolare di quest'ultimo, siano ben al di sotto dei limiti indicati in Eq. (4.36). Per tale ragione, le soglie fisse risultano eccessivamente rigorose e causa dei notevoli errori di omissione.

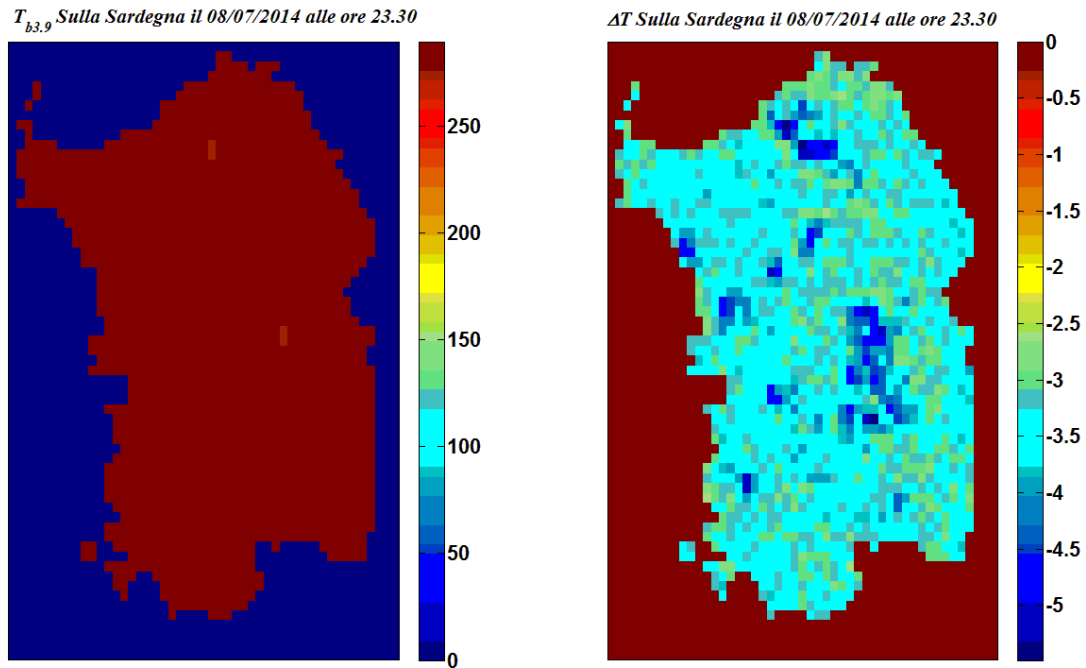


Figura 4.13: $T_{b3.9}$ e ΔT Sulla Sardegna nella notte del 08/07/2014 alle ore 23.30.

3) Come soglia d'individuazione dei potenziali hot-spot sono stati considerati limiti fissi di $T_{b3.9}$ e ΔT , e non più funzioni dipendenti dal SZA . L'individuazione dei potenziali hot-spot avviene mediante due soglie, ancora una volta poste su $T_{b3.9}$ e ΔT , meno rigorose delle analoghe indicate da EUMETSAT (rispettivamente 290 K e 0 K) e maggiormente adatte alla Sardegna:

$$\begin{cases} T_{b3.9} > 285 K \\ \Delta T > -2 K \end{cases} \quad (4.37)$$

4) La conferma degli hot-spot avviene questa volta solo mediante analisi contestuale. Non sono state previste soglie di *change-detection*, quindi di innesco, poiché la quasi totalità degli incendi rilevati nelle ore notturne è costituita da eventi incendiari protrattisi dalle ore diurne. Il confronto non è stato eseguito in questa circostanza con un intorno 3×3 del potenziale hot-spot, ma con i valori medi e le rispettive deviazioni standard di $T_{b3.9}$ e ΔT calcolati su tutta la Sardegna che, nelle immagini MSG-SEVIRI, ha dimensioni 63×49 pixel. Le condizioni di definitiva conferma degli hot-spot sono:

$$\begin{cases} T_{b3.9} > T_{b3.9_SAR} + 1.5 \cdot \sigma_{T_{b3.9_SAR}} \\ \Delta T > \Delta T_{_SAR} + 1.5 \cdot \sigma_{\Delta T_{_SAR}} \end{cases} \quad (4.38)$$

Dove:

- $T_{b3.9_SAR}$ e $\sigma_{T_{b3.9_SAR}}$ sono, rispettivamente, il valor medio e la deviazione standard di $T_{b3.9}$ per la Sardegna;

- $\Delta T_{_SAR}$ e $\sigma_{\Delta T_{_SAR}}$ il valor medio e deviazione standard di ΔT per la Sardegna.

Nel calcolo di queste grandezze, sono stati esclusi i pixel che presentassero anomalie termiche che avrebbero potuto corrompere l'operazione di media.

5) Non vi è distinzione tra pixel a maggiore o minore rischio di falso allarme poiché, come detto, vengono meno le possibili cause d'errore (elevata riflettanza, Sun-glint);

6) La verifica finale non è più effettuata mediante un controllo sul *QC*, ma mediante una soglia posta sulla *FRP*. Nelle ore notturne, infatti, l'indice di qualità presentato nel § 4.7 perde di significato, poiché non ha più senso calcolare la variazione di radianza dovuta alla componente solare riflessa dalla

Terra. Per tale ragione, in luogo del limite finale posto sul QC , ne è posto uno analogo sulla potenza radiante di fuoco, quest'ultima calcolata con modalità analoghe alle ore diurne. Un hot-spot viene definitivamente confermato soltanto se:

$$FRP > 40 [MW] \quad (4.39)$$

Il resto dell'algoritmo notturno si mantiene invariato rispetto a quello diurno, sia per quanto concerne la caratterizzazione degli hot-spot che la creazione e diffusione dei report.

VALIDAZIONE DELL'ALGORITMO

Questo capitolo è dedicato ad illustrare i risultati della validazione della nuova versione dell'algoritmo SFIDE descritta nel capitolo precedente. La validazione riguarda la regione Sardegna. In particolare, sarà proposto un confronto tra gli hot-spot individuati dall'algoritmo sulle immagini MSG/SEVIRI acquisite nei giorni 2-8 luglio e 31 luglio - 6 agosto 2014, con i risultati delle perimetrazioni effettuate in situ dal *Corpo forestale e vigilanza ambientale* (CFVA) della Regione Sardegna riguardanti tutti gli incendi verificatisi sulla regione negli stessi intervalli temporali. Tale confronto interesserà i soli incendi che, per dimensioni e caratteristiche di copertura, possano essere individuati da sistemi di *fire-detection* basati su dati da satelliti in orbita geostazionaria.

I risultati ottenuti, saranno poi confrontati con gli incendi rilevati nello stesso periodo da sistemi di fire-detection che utilizzino dati da satelliti in orbita bassa, ed in particolare con gli hot-spot rilevati mediante l'uso di dati MODIS.

In alcuni giorni, l'analisi è stata fortemente limitata da una marcata nuvolosità sulla regione, che ha impedito di rilevare gli incendi presenti. Come si vedrà, nelle giornate caratterizzate da nuvolosità diffusa, il numero di incendi rilevabili ne risulta generalmente compromesso.

Oltre a questa criticità, saranno mostrate altre problematiche rilevate durante l'analisi comparativa, come la presenza di hot-spot posti su pixel immediatamente limitrofi a quelli individuati sugli incendi di dimensione maggiore, e caratterizzati da dati termici ascrivibili a quelli di incendi veri e propri. Infine saranno analizzate le principali cause che inducono ad errori di commissione (falsi-allarmi) ed omissione.

5.1 CONFRONTO CON LE PERIMETRAZIONI IN SITU

Il confronto tra risultati ottenuti con l'algoritmo SFIDE e le perimetrazioni in situ del CFVA nei giorni oggetto dell'analisi, è stato limitato a incendi le cui dimensioni e la cui copertura fossero in grado di produrre variazioni termiche nelle grandezze su cui sono state poste le soglie di *fire-detection* tali da essere rilevate da un satellite posto in orbita geostazionaria con risoluzione di circa 4 km. Per tale ragione, si è tenuto conto dei soli incendi caratterizzati da una copertura boschiva totale di almeno 5 ha e/o una superficie totale di almeno 10 ha, sebbene qualche eccezione, rispetto a questi limiti, sia stata rilevata (cfr. Tab. 5.1). Occorre evidenziare come le dimensioni complessive dell'incendio non coincidano con la superficie istantaneamente occupata dallo stesso su un singolo pixel e, quindi, le minime dimensioni complessive non coincidano con la dimensione minima di un incendio rilevabile dall'algoritmo. Non essendo reperibili dati a terra che permettano di stimare le dimensioni istantanee di un incendio durante il suo sviluppo, per quanto concerne la superficie minima che ne permetta l'individuazione si dovrà fare riferimento alle stime proposte dall'algoritmo nella fase di caratterizzazione dell'hot-spot, che saranno poi presentate.

In Tabella 5.1 è riportato il confronto tra gli incendi individuati con l'algoritmo SFIDE ed i dati rilevati in situ dal CFVA nei giorni 2-8 luglio e 31 luglio-5 agosto 2014. La comparazione mostra come sia stato possibile individuare 20 dei 31 incendi di medie e grandi dimensioni, aventi le caratteristiche prima enunciate, pari a circa il 64,5%. Tale percentuale va però rivista alla luce della nuvolosità e dei valori di riflettanza (nel canale 2 a $0.8 \mu m$) misurati nei giorni e nelle zone in cui gli 11 incendi "persi" si sono sviluppati.

Ad esempio, come evidenziato dalle Figg.5.1 e 5.2, in cui è mostrata la *cloud-mask* relativa alla Sardegna nei giorni 3 e 4 luglio alle ore 12.00 GMT (pixel amaranto), è la presenza di nuvolosità, locale o diffusa, a indurre agli errori di omissioni commessi in queste due giornate. In particolare, nella Fig. 5.1

relativa al 3 luglio, si può notare come le nubi si addensino proprio nella Sardegna sud-occidentale, dove non è stato possibile rilevare due degli incendi riportati in Tab. 1 (comune di Carbonia), di cui uno a principale copertura boschiva. Il giorno 4 luglio, in Fig. 5.2, è invece la diffusa nuvolosità su tutta la regione (nel grafico riportata alle ore 12.00 GMT) a rendere impossibile l'individuazione di tutti gli incendi rilevati dal CFVA.

Data	Comune	Copertura Principale	Copertura Boschiva [m ²]	Area Totale [ha]	Rilevato	Nuvoloso/Alta Riflettanza
02/07/14	DECIMOPUTZU	Altro	0	58.49	Sì	No
03/07/14	VILLACIDRO	Altro	0	5.16	Sì	No
03/07/14	GUSPINI	Altro	0	8.1	Sì	No
03/07/14	CARBONIA	Bosco/Altro	35784.46	10.04	No	Sì
03/07/14	VILLAPERUCCIO	Altro	0	15.1	Sì	No
03/07/14	CARBONIA	Altro	0	17.24	No	Sì
03/07/14	BARUMINI	Altro	0	39.95	Sì	No
03/07/14	SANTA GIUSTA	Altro	0	91.66	Sì	No
03/07/14	NUXIS	Bosco/Altro	1332406.9	136.21	Sì	No
03/07/14	NUXIS	Bosco/Altro	3517093.08	486.11	Sì	No
03/07/14	MARRUBIU	Bosco/Pascolo/Altro	920821.7	818.61	Sì	No
03/07/14	GONNOSFANADIGA	Bosco/Pascolo/Altro	6839320.4	1746.46	Sì	No
04/07/14	IGLESIAS	Bosco	87709.0	8.77	No	Sì
04/07/14	ORISTANO	Bosco/Altro	24044.7	11.01	No	Sì
04/07/14	CABRAS	Altro	0	16.13	No	Sì
04/07/14	UTA	Altro	0	25.95	No	Sì
05/07/14	SILIQUA	Altro	0	10.58	No	No
05/07/14	SETTIMO SAN PIETRO	Altro	0	11.08	No	No
05/07/14	SUELLI	Altro	0	14.53	Sì	No
06/07/14	VILLACIDRO	Bosco/Altro	10179.3	12.28	Sì	No
07/07/14	SAN VERO MILIS	Bosco/Altro	1580.5	8.63	No	Sì
08/07/14	CAPOTERRA	Altro	0	4.33	Sì	No
08/07/14	QUARTUCCIU	Altro	0	5.94	Sì	No
08/07/14	SARRENTI	Altro	0	6.54	Sì	No
08/07/14	SETTIMO SAN PIETRO	Altro	0	28.1	Sì	No
01/08/14	ITTIRI	Pascolo	0	7.83	No	Sì
01/08/14	SANT'ANNA ARRESI	Bosco/Altro	73143.3	19.41	Sì	No
04/08/14	BONARCADO	Pascolo	0	5.21	No	Sì
05/08/14	NURRI	Pascolo	0	15.54	Sì	No
05/08/14	MARACALAGONIS	Pascolo	0	23.22	Sì	No
06/08/14	BARUMINI	Altro	0	9.84	Sì	No

Tabella 5.1: Confronto tra gli incendi individuati con l'algoritmo SFIDE e le perimetrazioni in situ della Protezione Civile sulla Sardegna nei giorni 2-8 luglio e 30 luglio-5 agosto 2014.

Diversamente, il 7 luglio è l'elevata riflettanza nel canale 2 ($0.8 \mu m$), e la conseguente esclusione dei pixel così caratterizzati, a causare un errore di omissione. In Fig. 5.3 è riportata una mappa (pixel amaranto) di tutti i pixel per cui sia verificata la condizione di elevata riflettanza in Eq. (4.2), alle ore 12.00 GMT del 7 luglio; come si può vedere, essi coprono la quasi totalità della Sardegna.

Problematiche analoghe sono state riscontrate anche nei due giorni di agosto in cui non sono stati rilevati incendi, 1 e 4 agosto.

Cloud-mask Sardegna alle ore 12:00 del 3 Luglio 2014

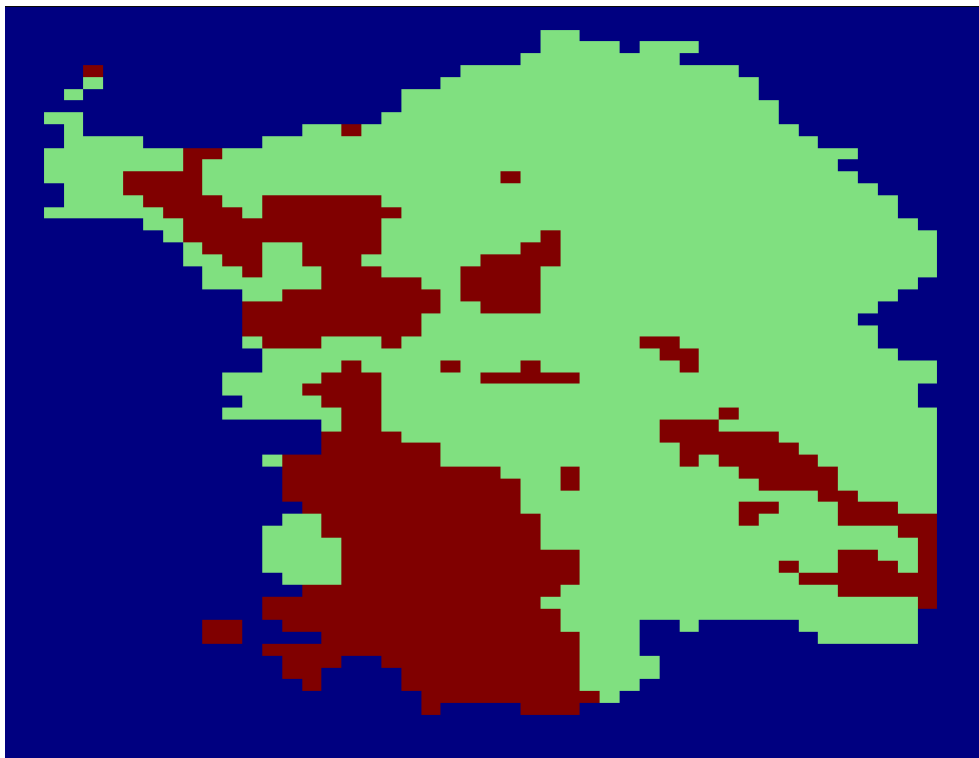


Figura 5.1: Cloud-mask (in amaranto) sulla Sardegna per il giorno 3 luglio 2014 alle ore 12.00.

Cloud-mask Sardegna alle ore 12:00 del 4 Luglio 2014

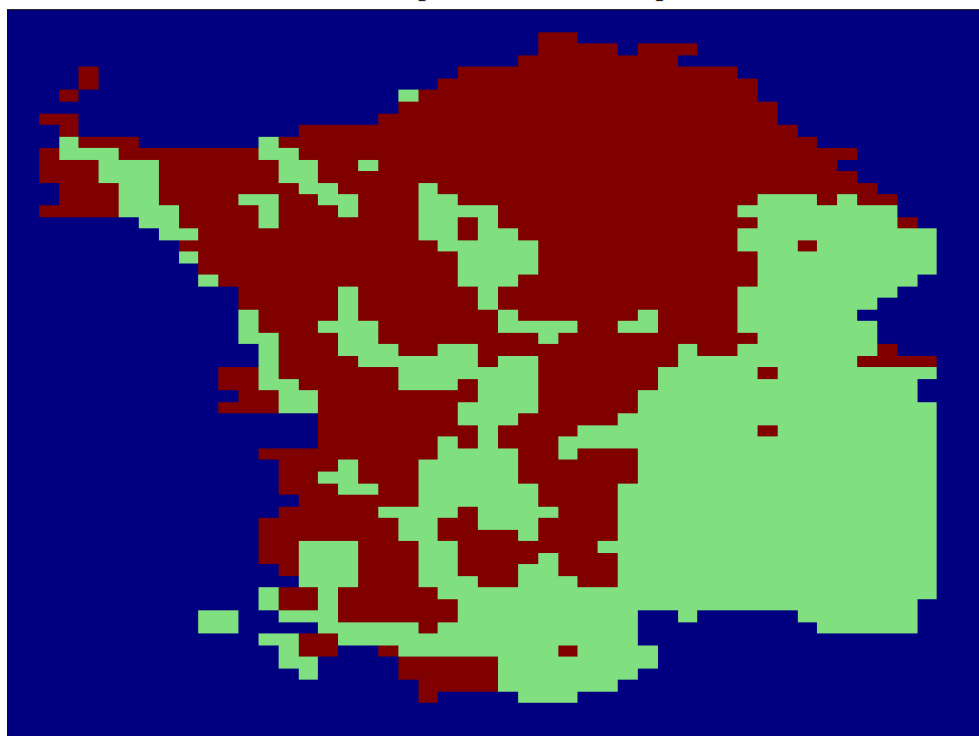


Figura 5.2: Cloud-mask (in amaranto) sulla Sardegna per il giorno 4 luglio 2014 alle ore 12.00.

Pixel ad elevata riflettanza ($R2 > 0.3$) sulla Sardegna alle ore 12:00 del 3 Luglio 2014

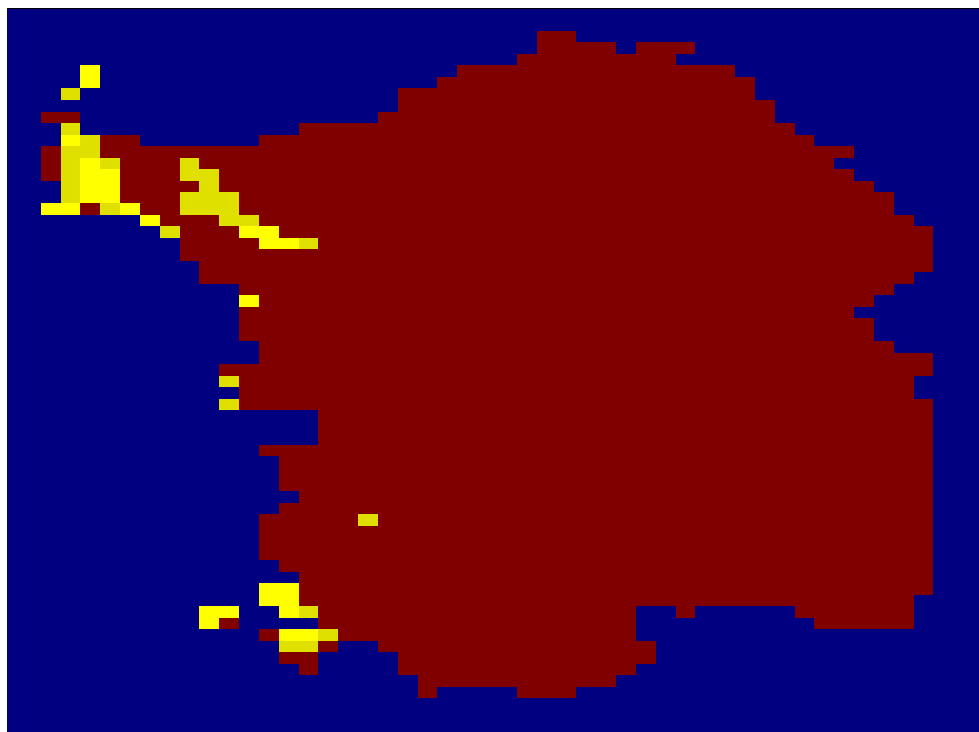


Figura 5.3: Mappa dei punti ad elevata riflettanza ($r_{0,s} > 0.3$) sulla Sardegna per il giorno 3 luglio 2014 alle ore 12.00 (in amaranto).

Tenendo conto di tutte queste casistiche, sebbene le perimetrazioni al suolo non offrano informazioni temporali sufficientemente circoscritte, tali da poter analizzare al tempo esatto in cui l'incendio si è sviluppato le ragioni per cui esso non venga rilevato (le valutazioni sulla nuvolosità e riflettanza sono state arbitrariamente effettuate alle ore 12:00 GMT per tutti i giorni esaminati), si può ritenere che per 9 degli 11 incendi non rilevati, la mancata individuazione sia ascrivibile all'esclusione dei pixel interessati a causa della cloud-mask o dell'elevata riflettanza.

Dunque, sarebbe possibile alzare la percentuale degli incendi rilevati, rispetto a quelli effettivamente rilevabili dall'algoritmo, fino al 90.9% (20 su 22), con i soli incendi di Settimo San Pietro (circa 11 ha) e Siliqua (circa 10 ha), entrambi del 5 luglio ed entrambi a copertura non precisata, a non essere individuati, ponendo quindi gli errori di omissione ad un valore sotto al 10%.

Un altro dato significativo riguarda la possibilità di rilevare non solo incendi caratterizzati principalmente da copertura boschiva, obiettivo principale dell'algoritmo SFIDE, ma anche quelli a copertura contraddistinta da pascolo o non meglio specificata dalle perimetrazioni diffuse dal CfvaCFVA. Infatti, come mostrato dalla Tabella 5.1, è stato possibile individuare hot-spot riguardanti incendi, anche a copertura non-boschiva, le cui dimensioni totali fossero ben inferiori a 10 ha (come l'incendio di appena 4.33 ha individuato a Capoterra il giorno 8 luglio). Urge nuovamente ricordare come, il minimo valore dell'area totale coperta da un incendio, non coincida con la minima superficie in fiamme istantaneamente rilevabile dall'algoritmo. La mancanza di dati a terra utili a ricostruire lo sviluppo di un singolo incendio, in termini di estensione, preclude la possibilità di riportare la minima superficie rilevabile, stimata mediante la caratterizzazione del pixel-fuoco (vedi § 4.6.1), a dati reali.

5.2 ANALISI DEI RISULTATI

In tabella 5.2 sono sintetizzati i risultati ottenuti con le simulazioni dell'algoritmo SFIDE nei due intervalli temporali considerati (2-8 luglio 2014 e 31 luglio-6 agosto 2014).

Il dato più rilevante è che dei 285 hot-spot individuati nei giorni considerati, appena 14 corrispondano a falsi-allarmi, pari a meno del 5% del totale. Un'analisi più dettagliata di questi falsi-allarmi sarà mostrata in seguito, cercando di analizzare le principali cause che li hanno prodotti (§ 5.3).

Giorno/ Hot-Spot Totali	Hot- Spot Diurni %	Hot- Spot Notte %	Non- Falsi %	Falsi %	Innesco %	Contest. Diurno %	Soglia Fissa Diurna %	Contest. Notte %	Soglia Fissa Notte %	Incendi %
2 luglio 8	100.00	0	62.50	37.50	87.50	25.00	0	0	0	1 100.00
3 luglio 210	21.90	78.10	96.67	3.33	16.67	12.38	5.71	78.10	71.90	9 100.00
4 luglio 36	0	100.00	100.00	0	0	0	0	100.00	63.89	- -
5 luglio 2	100.00	0	100.00	0	100.00	50.00	0	0	0	1 33.33
6 luglio 2	100.00	0	100.00	0	100.00	100.00	0	0	0	1 100.00
7 luglio 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	- -
8 luglio 6	100.00	0	100.00	0	83.33	50.00	0	0	0	4 100.00
31 luglio 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	- -
1 agosto 2	100.00	0	100.00	0	100.00	100.00	0	0	0	1 100.00
2 agosto 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	- -
3 agosto 1	100.00	0	0	100	0	100.00	0	0	0	- -
4 agosto 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	- -
5 agosto 17	100.00	0	82.35	17.65	100.00	23.53	0	0	0	2 100.00
6 agosto 1	100.00	0	100.00	0	100.00	100.00	0	0	0	1 100.00
TOTALE 285	85 29.82	200 70.18	271 95.09	14 4.91	71 24.91	42 14.74	12 4.21	200 70.18	174 61.05	20 90.90

Tabella 5.2: Riepilogo degli hot-spot individuati con l'algoritmo SFIDE negli intervalli 2-8 luglio 2014 e 31 luglio-6 agosto 2014 (*hot-spot tutti riferibili a incendi perimetrati al 3 luglio 2014).

Il restante 95% degli hot-spot è stato etichettato come “non-falsi”. A questa categoria appartengono due tipologie di hot-spot: quelli direttamente riferibili a pixel che coprano l’area interessata da un incendio (ovvero l’area perimetrata dal CFVA), dunque più propriamente hot-spot corretti, e quelli riferibili a pixel che- pur non coprendo direttamente le superfici perimetrata- sono comunque riconducibili a incendi (solitamente di grandi dimensioni) che si sviluppano nei pixel limitrofi. La presenza di questi pixel affetti da “rumore”, è dovuta, in particolare, a due fenomeni. In primo luogo, esiste la possibilità che, per il cosiddetto *effetto di adiacenza*, le alte temperature dell’incendio portino ad una notevole deflessione della radiazione verso pixel limitrofi, rilevata dallo scanner come un ulteriore pixel-fuoco; la radiazione emessa in presenza di elevate temperature può, inoltre, portare ad una saturazione del sensore che, per un certo intervallo di tempo resta “abbagliato”, non riuscendo a decodificare il segnale della frequenza desiderata, misurando un valore di radianza analogo a quello del pixel che ha prodotto la saturazione del sensore. Un terzo fenomeno si presenta nel caso in cui ci sia un incendio che occupi anche la zona di sovrapposizione tra due o più pixel adiacenti: questo *overlapping* può portare al rilevamento dell’incendio in tutti i pixel confinanti. In Fig. 5.4 sono proposti due esempi di questo fenomeno: nella Fig. 5.4a) viene mostrato il caso in cui si presenti tale fenomeno in un pixel che contamina quelli strettamente adiacenti (a “croce”); nella Fig. 5.4b) è illustrata il caso in cui il fenomeno sia diffuso tra più pixel adiacenti, producendo una contaminazione a “quadrato” [Calle et al., 2009].

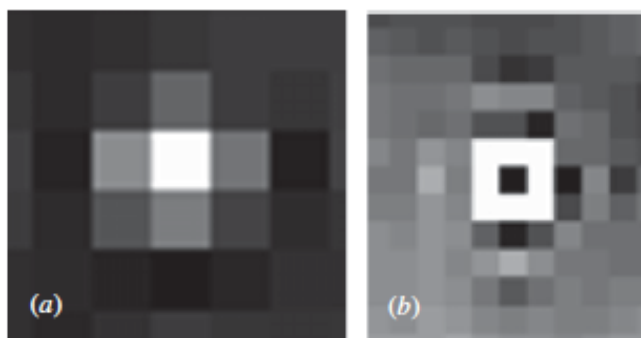


Figura 5.4 : Esempi di *overlapping* tra pixel affetti da incendio [Calle et al., 2009].

Particolarmente evidente è anche il dato percentuale circa la suddivisione degli hot-spot rilevati tra ore diurne (appena il 30%) e notturne (addirittura il 70%). Tale risultato è però fortemente viziato da quanto accade nella notte tra il 3 ed il 4 luglio 2014 in cui, il protrarsi di incendi di dimensioni particolarmente rilevanti (quelli di dimensione maggiore riportati in Tabella 5.1) nelle ore notturne, fa sì che siano individuati tutti i 200 hot-spot notturni rilevati nel periodo esaminato. Di questi, nessuno è risultato essere un falso-allarme. L'assenza di hot-spot nelle ore notturne in tutti i restanti giorni, ed il fatto che tutti i falsi-allarmi siano stati rilevati in ore diurne, da un lato ripristina le normali proporzioni tra gli hot-spot individuati nelle due fasce orarie e, dall'altro, chiarifica come l'algoritmo diurno si offra a un più ampio raggio di problematiche che possono causare falsi-allarmi (in particolare *sun-glint* e variazioni significative della riflettanza), rispetto alle ore notturne in cui queste fonti di errore vengono meno.

Riguardo alle ore notturne, è interessante notare come tutti gli hot-spot individuati con la soglia fissa siano rilevati anche dal confronto contestuale, che- rispetto alla soglia fissa- permette di aggiungere ulteriori 26 pixel-fuoco, nessuno dei quali è risultato essere un falso-allarme. Ciò evidenzia quanto già discusso circa la "severità" della soglia fissa proposta dalla manualistica EUMETSAT che, se non sufficientemente adiuvata da soglie di altra natura (come quella contestuale qui proposta), rischia di non far individuare incendi persino in condizioni termiche estreme, quali quelle evidenziate dagli incendi della notte tra 3 e 4 luglio 2014. Inoltre, i risultati ottenuti mettono in luce come l'applicazione della soglia fissa notturna, risulti ridondante rispetto alla parte contestuale dell'algoritmo poiché, come già detto, tutti gli hot-spot individuati con la soglia fissa sarebbero comunque stati individuati con l'analisi contestuale.

Nelle ore diurne, emerge la preponderanza delle soglie di innesco che rilevano 71 degli 85 hot-spot (83.53%); al riguardo, però, il dato più rilevante è che, in

ciascuno dei 20 incendi rilevati, il primo hot-spot è sempre individuato mediante le soglie di innesco (talvolta in concomitanza con le altre tipologie). Ciò permette di evidenziare l'importanza di aver introdotto queste specifiche soglie, non solo perché consentono di individuare incendi altrimenti non rilevati, ma anche- e soprattutto- per la celerità con cui esse permettono di lanciare l'allarme in caso di nuovi incendi, rispetto all'analisi contestuale e alla soglia fissa, che richiedono il consolidarsi delle anomalie termiche, prima che l'incendio sia rilevato.

L'analisi contestuale, rileva circa la metà degli hot-spot diurni, mentre con la soglia fissa sono individuati appena il 14.11% degli allarmi nelle ore diurne, tutti riconducibili a incendi effettivi, a conferma di quanto era stato affermato circa l'efficienza della soglia fissa posta a 318K.

Infine, come già anticipato, nel complesso sono rilevati 20 dei 22 incendi che si sviluppano in giorni e zone non caratterizzati da nuvolosità o, comunque, elevata riflettanza. Ciò porrebbe ottimisticamente intorno al 10% gli errori di omissione mentre, considerando anche le giornate meno favorevoli all'elaborazione dell'algoritmo (in termini di nuvolosità e riflettanza), questa stima andrebbe rivista al rialzo, dopo un'analisi di più lungo periodo.

Nelle Figg. 5.5 è presentato un confronto, elaborato graficamente con il software commerciale *ArcMap*, tra gli hot-spot rilevati mediante l'algoritmo SFIDE (quadrati rossi) e le perimetrazioni in situ del CFVA (superfici evidenziate in blu), rispettivamente, nei giorni 2,3, 8 luglio e 5 agosto 2014. Occorre anzitutto ricordare come, il numero degli hot-spot visibili nelle figure sia in genere inferiore a quelli dichiarati in Tab. 5.2 poiché, su uno stesso pixel, possono essere rilevati più hot-spot in tempi diversi. Gli hot-spot nelle cui vicinanze non sono presenti aree evidenziate corrispondono ai falsi-allarmi (presenti il 2 e 3 luglio e 5 agosto). La figura riguardante il 3 luglio (in alto a destra) ben evidenzia il grande numero di hot-spot rilevati in quella giornata e la notevole estensione degli incendi ad essi associati, in relazione a quelli che si sviluppano negli altri giorni considerati. Nella stessa data, è possibile vedere

delle superfici evidenziate nei dintorni di Carbonia, corrispondenti agli incendi non rilevati a causa della nuvolosità locale, e, a margine degli incendi di maggiori dimensioni, è possibile individuare gli hot-spot causati dai fenomeni di contaminazione, dovuti alla saturazione del sensore, descritti in precedenza.

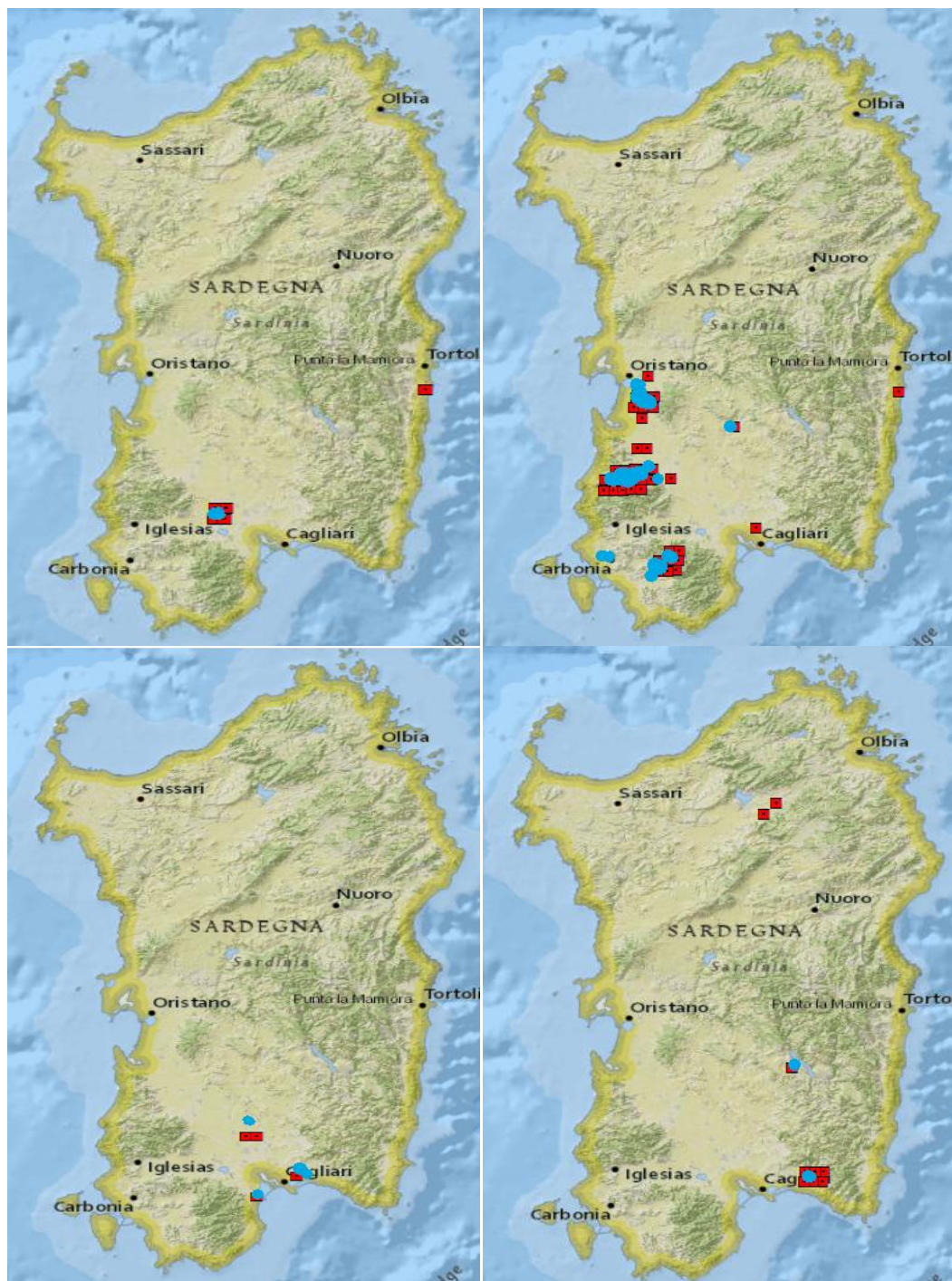


Figura 5.5: Confronto tra gli hot-spot rilevati dall'algorithm SFIDE e le perimetrazioni al suolo del CFVA nei giorni 2 luglio (in alto a sx), 3 luglio (in alto a dx), 8 luglio (in basso a sx) e 5 agosto (in basso a dx) del 2014.

5.3 ANALISI DEI FALSI-ALLARMI

In Tabella 5.3 sono state riassunte le caratterizzazioni dei 14 hot-spot rivelatisi falsi-allarmi individuati nel periodo analizzato, tutti in orari diurni. Il dato più evidente è la predominanza di falsi attribuibili alle soglie di innesco, ben 13. Se, da un lato, l'introduzione di questa tipologia di soglie ha permesso di individuare più incendi con maggiore tempestività, dall'altro ha prodotto, come danno collaterale, l'individuazione di diversi falsi-allarmi evitati dalle altre soglie.

Una delle principali cause di falsi-allarmi dovuti all'innesco, è la repentina variazione della riflettanza in intervalli temporali ristretti: in questo caso, ad essa si accompagna un'altrettanto rapida variazione di $T_{b3.9}$ (e dunque di ΔT), tale da far superare anche le soglie più rigide contemplate per prevenire tale specifica evenienza.

Non a caso, in alcuni giorni, si registrano, in orari particolari, più falsi-allarmi contemporaneamente: è il caso, ad esempio, delle 11:30 del 2 luglio (tre falsi) e delle 15:30 del 3 luglio (quattro falsi). A tal proposito, la Fig. 5.6 mostra l'elevata variazione di riflettanza misurata nel canale 2 ($0.8 \mu m$) tra le 11:00 e le 11:30 del 2 luglio 2014, con incrementi medi di $r_{0.8}$ dell'ordine di 0.2 in appena 30'. È proprio l'aumento di questa variabile a causare i tre falsi-allarmi, tutti caratterizzati da $QC = 100$.

Variazione di $r_{0,8}$ tra le 11:00 e le 11:30 del 2 luglio 2014

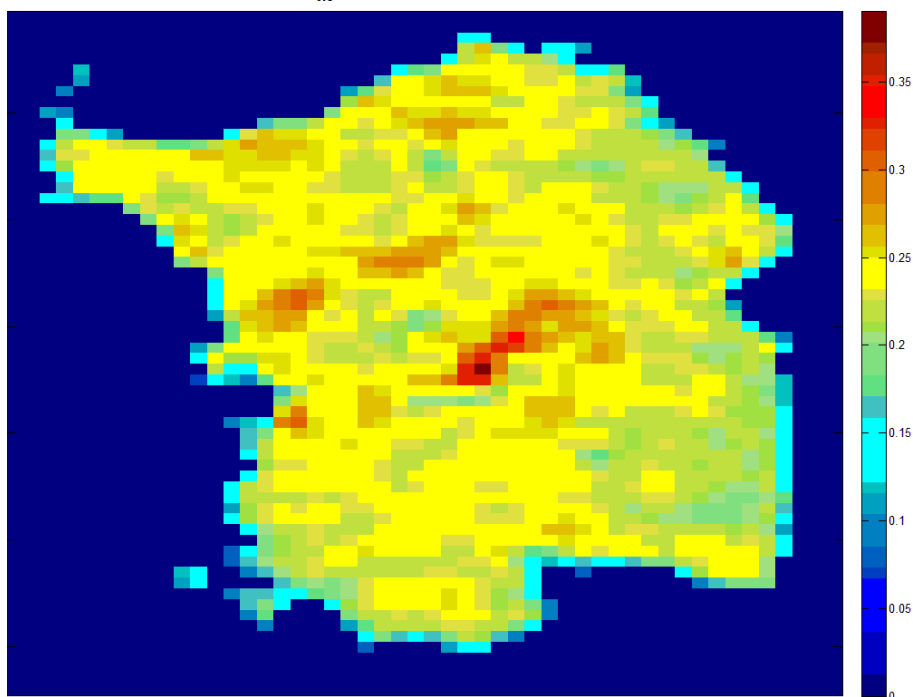


Figura 5.6: Variazione di $r_{0,8}$ tra le ore 11:00 e le 11:30 del 2 luglio 2014.

Ulteriore elemento che emerge è il contenuto valore della FRP che si registra per alcuni falsi, mai al di sopra dei 100 MWatt. In taluni casi, essa è persino al di sotto della soglia considerata come ultima verifica per gli hot spot nelle ore notturne ($FRP > 40$ MWatt). Il report-tipo proposto in Tabella 4.3, peraltro riferibile a hot-spot notturni, e i valori riportati nel successivo *Capitolo 6*, permettono di confrontare la FRP caratteristica di incendi che hanno trovato riscontro nelle perimetrazioni a terra, dunque effettivi, con quella dei falsi-allarmi. Discorso analogo può essere ripetuto per l'indice di qualità (QC), parametro valutabile nelle sole ore diurne, che per taluni falsi registra un valore di poco superiore a quello di soglia ($QC > 30$). Si può concludere che, l'inclusione nei report di hot-spot caratterizzati, nelle ore diurne, da QC compresi tra 0 e 30 oppure, nelle ore notturne, da FRP compresi tra 30 MWatt e 40 MWatt, permetta, in genere, di incrementare il numero di incendi individuati, a fronte però di un cospicuo numero di falsi-allarmi, facilmente individuabili come tali dall'analisi dei dati da parte di un operatore. Infine,

sono stati ritenuti falsi-allarmi anche alcuni hot-spot, rilevati a causa dei fenomeni di saturazione del sensore, su pixel non strettamente adiacenti a quelli effettivamente interessati da un incendio.

Giorno	Ora	Riga	Colonna	Innesco	Contestuale	FRP [MW]	T _{b3.9}	T _f	LST	AREA [mq]	QC
02-lug	11.30	238	94	Sì		45	311	858	319	1130	100
02-lug	11.30	249	103	Sì		47	312	865	321	1114	100
02-lug	11.30	284	96	Sì		46	310	866	313	1097	100
03-lug	8.00	241	78	Sì		38	300	837	300	1118	94
03-lug	8.45	277	107	Sì		99	303	872	301	1737	100
03-lug	11.30	264	120	Sì		87	307	884	307	1503	41
03-lug	15.30	269	93	Sì		48	306	746	304	1601	100
03-lug	15.30	269	94	Sì		48	306	792	304	1390	86
03-lug	15.30	272	97	Sì		42	305	799	303	1169	88
03-lug	15.30	273	97	Sì		37	303	814	301	1193	41
03-ago	10.15	260	118		Sì	71	302	902	303	1225	39
05-ago	8.45	242	103	Sì		46	301	802	308	1517	58
05-ago	9.15	243	102	Sì		48	304	854	312	1197	100
05-ago	10.00	264	104	Sì		38	310	771	318	1585	34

Tabella 5.3: Riepilogo dei falsi-allarmi individuati negli intervalli 2-8 luglio 2014 e 31 luglio-6 agosto 2014.

5.4 CONFRONTO CON ALGORITMI MODIS

In Tabella 5.5 è riportato un confronto tra gli incendi rilevati dall’algoritmo SFIDE mediante dati MSG-SEVIRI, e quelli- diffusi dalla NASA- rilevati da appositi algoritmi sviluppati per la fire-detection da orbita bassa, nel caso specifico basati su dati MODIS [<https://earthdata.nasa.gov>], con le perimetrazioni al suolo della Protezione Civile.

Il numero di incendi rilevati dagli algoritmi sviluppati per l’utilizzo delle immagini MODIS nel periodo considerato è appena di 3 incendi, a fronte dei 20 rilevati con SFIDE e dei 31 totali. Unico incendio rilevato da MODIS e non da SFIDE, è quello di Iglesias del 4 luglio (boschivo di 8.77 ha), che non è stato rilevato dall’algoritmo qui presentato a causa della marcata nuvolosità.

Data	Comune	SFIDE	MODIS (NASA)
02/07/14	DECIMOPUTZU	Sì	No
03/07/14	VILLACIDRO	Sì	No
03/07/14	GUSPINI	Sì	No
03/07/14	CARBONIA	No	No
03/07/14	VILLAPERUCCIO	Sì	No
03/07/14	CARBONIA	No	No
03/07/14	BARUMINI	Sì	No
03/07/14	SANTA GIUSTA	Sì	No
03/07/14	NUXIS	Sì	No
03/07/14	NUXIS	Sì	No
03/07/14	MARRUBIU	Sì	No
03/07/14	GONNOSFANADIGA	Sì	Sì
04/07/14	IGLESIAS	No	Sì
04/07/14	ORISTANO	No	No
04/07/14	CABRAS	No	No
04/07/14	UTA	No	No
05/07/14	SILQUA	No	No
05/07/14	SETTIMO SAN PIETRO	No	No
05/07/14	SUELLI	Sì	No
06/07/14	VILLACIDRO	Sì	No
07/07/14	SAN VERO MILIS	No	No
08/07/14	CAPOTERRA	Sì	No
08/07/14	QUARTUCCIU	Sì	No
08/07/14	SARRENTI	Sì	No
08/07/14	SETTIMO SAN PIETRO	Sì	No
01/08/14	ITTIRI	No	No
01/08/14	SANT'ANNA ARRESI	Sì	No
04/08/14	BONARCADO	No	No
05/08/14	NURRI	Sì	Sì
05/08/14	MARACALAGONIS	Sì	No
06/08/14	BARUMINI	Sì	No

Tabella 5.4: Confronto delle perimetrazioni al suolo con gli hot-spot rilevati dall’algoritmo SFIDE e da algoritmi su dati MODIS.

Particolarmente rilevante è il confronto tra i due algoritmi per il giorno 3 luglio, in cui quello su dati MODIS non rileva, al contrario di SFIDE, alcuni incendi di dimensioni notevoli, tra cui tre di estensione superiore a 100 ha (i due di Nuxis e quello di Marrubiu).

In conclusione, dunque, questa comparazione evidenzia come l’algoritmo SFIDE su dati da satellite geostazionario, non permetta solo di avere copertura in tempo reale sulla Sardegna, individuando con maggior tempestività i nuovi

focolai, ma anche di ottenere prestazioni notevolmente migliori dal punto di vista del numero di incendi rilevati. Questo soprattutto grazie alla elevata frequenza di aggiornamento delle immagini dell'area di interesse: 96 immagini al giorno per SEVIRI contro le 2 - 4 di MODIS.

STIMA DELLA BIOMASSA COMBUSTA

In questo sesto e ultimo capitolo viene effettuata la stima della biomassa combusta (BB) relativa ad uno degli incendi analizzati nel cap. 5 che, il giorno 3 luglio 2014 ha interessato il comune di Gonnosfanadiga (cfr. Tab. 5.1). Tale evento è stato selezionato in virtù della sua estensione totale e, in particolare, della copertura boschiva, stimata dal CFVA in 684 ha .

La stima della biomassa è stata effettuata attraverso la seguente procedura, già anticipata nel § 2.2.4.2:

- 1) Sono registrate le FRP di tutti gli hot-spot relativi all'incendio scelto, dall'orario di prima a quello di ultima individuazione (nella notte tra il 3 e 4 luglio). Tra questi due orari, ritenuti come il tempo d'inizio (t_{inizio}) e di fine (t_{fine}) dell'incendio su uno specifico pixel, sarà considerata anche la FRP negli orari in cui, per ragioni diverse (es. occultamento da parte della cloud-mask), il pixel non figura tra gli hot-spot, quindi l'incendio non è rilevato, dunque ipotizzando la continuità dello stesso dall'inizio alla fine.
- 2) Utilizzando la relazione in Eq. (2.12), la FRP è integrata discretamente tra t_{inizio} e t_{fine} su ciascun pixel dell'incendio per ricavare la FRE totale dell'incendio.
- 3) Facendo ricorso all'Eq (2.13) è infine stimata la biomassa combusta dall'incendio (BB)



Fig. 6.1: Incendio del 3 Luglio 2014 nel comune di Gonnosfanadiga

6.1 FRP E FRE

Mediante elaborazione dati dell'algorithm SFIDE, sono stati individuati hot-spot relativi all'incendio selezionato su 8 distinti pixel, tra le ore 15:15 del 3 Luglio 2014 e le ore 02:00 del giorno successivo (Tab. 6.1).

Latitudine [deg]	Longitudine [deg]	T _{inizio} [HH:MM]	T _{fine} [HH:MM]	FRP (medio) [MWatt]	FRE (media) [MJ]
39.526288	8.541969	23:45	2:00	35.78	32202
39.527030	8.578971	20:00	0:00	59.11	53199
39.527775	8.615980	15:30	23:30	99.00	89100
39.528524	8.652995	15:15	1:00	84.71	76239
39.484942	8.499321	21:30	21:30	40.73	36657
39.485679	8.536291	15:45	0:45	35.45	31905
39.486419	8.573268	19:30	0:45	202.82	182538
39.487163	8.610251	15:15	1:00	216.57	194913

Tab. 6.1: caratteristiche degli hot-spot relativi all'incendio del 3 Luglio 2014 nel comune di Gonnosfanadiga

I pixel che, rispetto alla perimetrazione del CFVA, risultano essere maggiormente coperti da incendio, presentano una FRP media superiore ai 200 MWatt, e la FRP media dell'intero incendio è di 506 MWatt. Al riguardo, è importante evidenziare come, soprattutto per i pixel su cui la copertura percentuale dell'incendio è alta, la stima della FRP qui fornita debba considerarsi come un valore minimo. Infatti, come mostrato in Fig. 2.3, la saturazione del pixel nel canale a $3.9 \mu m$, si ha - per SEVIRI- quando l'incendio occupa una porzione di pixel prossima al 4% ($T_{b3.9} \cong 335K$); dunque, quando ciò si verifica, la stima della $T_{b3.9}$ fornisce il valore di soglia del sensore, inferiore al valore reale, e la conseguente stima della FRP risulta anch'essa inferiore al valore corretto. A valori di $T_{b3.9}$ pari a quello di soglia, sono state valutate FRP, variabili in funzione della temperatura di background, generalmente superiori a 450 MWatt. Nel caso esaminato, ciò si verifica per almeno 5 diversi pixel, negli orari in cui, in Fig. 6.2, si registrano i picchi della FRP.

Un'ulteriore fattore che contribuisce a stimare un valore della FRP inferiore a quello effettivo è la presenza di nuvolosità, anche parziale, sui pixel interessati dall'incendio. Registrando un valore di $T_{b3.9}$ più basso, ne consegue che anche la FRP sarà stimata al ribasso [Roberts et al., 2005].

L'andamento di FRP totale al variare del tempo, consente sia di valutare l'entità dell'incendio mediante i suoi picchi, sia di conoscere il valore di FRE il quale, come introdotto nella Eq. 2.12, risulta essere l'integrale della funzione FRP, ovvero l'area sottesa alla curva che ne descrive l'andamento in Fig. 6.2. Il valore totale della FRE ammonta a circa $20 \cdot 10^6$ MJ.

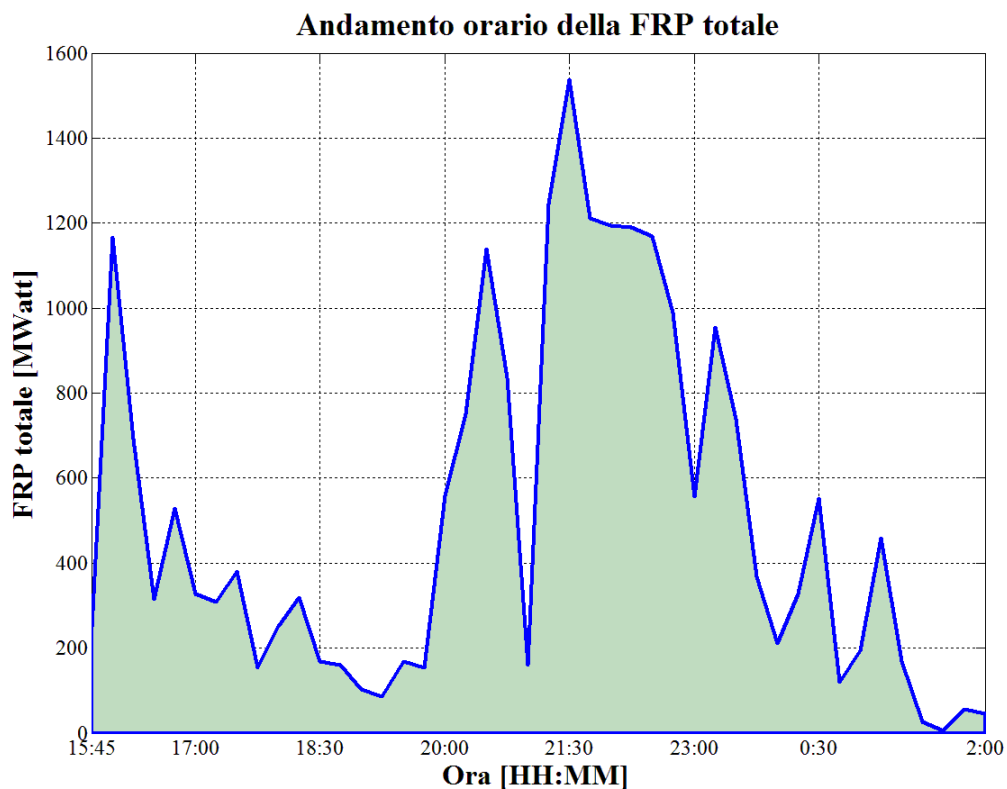


Figura 6.2: Andamento orario della FRP totale

6.2 BIOMASSA COMBUSTA

Integrando la FRP in intervalli temporali discreti di 15', è stato possibile calcolare la FRE come da Eq. 2.12, dalla quale è infine possibile valutare i kg di biomassa bruciata (Eq. 2.13).

In Fig. 6.3 è mostrato, relativamente all'incendio del 3 Luglio 2014 presso il comune di Gonnosfanadiga, per ogni intervallo di 15' di attività dell'incendio, la stima della biomassa combusta in tonnellate.

In Fig. 6.4 è mostrato l'andamento della biomassa combusta totale dall'incendio, al decorrere del tempo, in tonnellate. Il valore ultimo di tale grafico, corrispondente alla biomassa totale bruciata, risulta essere pari a 7397 tonnellate, da cui è possibile stimare un rateo di combustione pari a 0.191 tons/s.

Considerando quanto espresso in merito alla stima della FRP nel § 6.2, ne consegue che il rateo di combustione qui stimato assuma inevitabilmente un valore inferiore a quello reale. Inoltre, occorre tener conto degli effetti di assorbimento atmosferico, che ancora una volta limitano la stima della FRP, e dei pixel, limitrofi a quelli valutati, per cui le dimensioni della porzione di incendio non ne consentono l'individuazione, restando esclusi dalla stima della FRP e, conseguentemente, della biomassa combusta.

In virtù di ciò, alcuni autori hanno evidenziato l'importanza di stimare accuratamente la rilevanza di tali criticità per il singolo incendio, in modo da correggere opportunamente il valore della biomassa combusta.

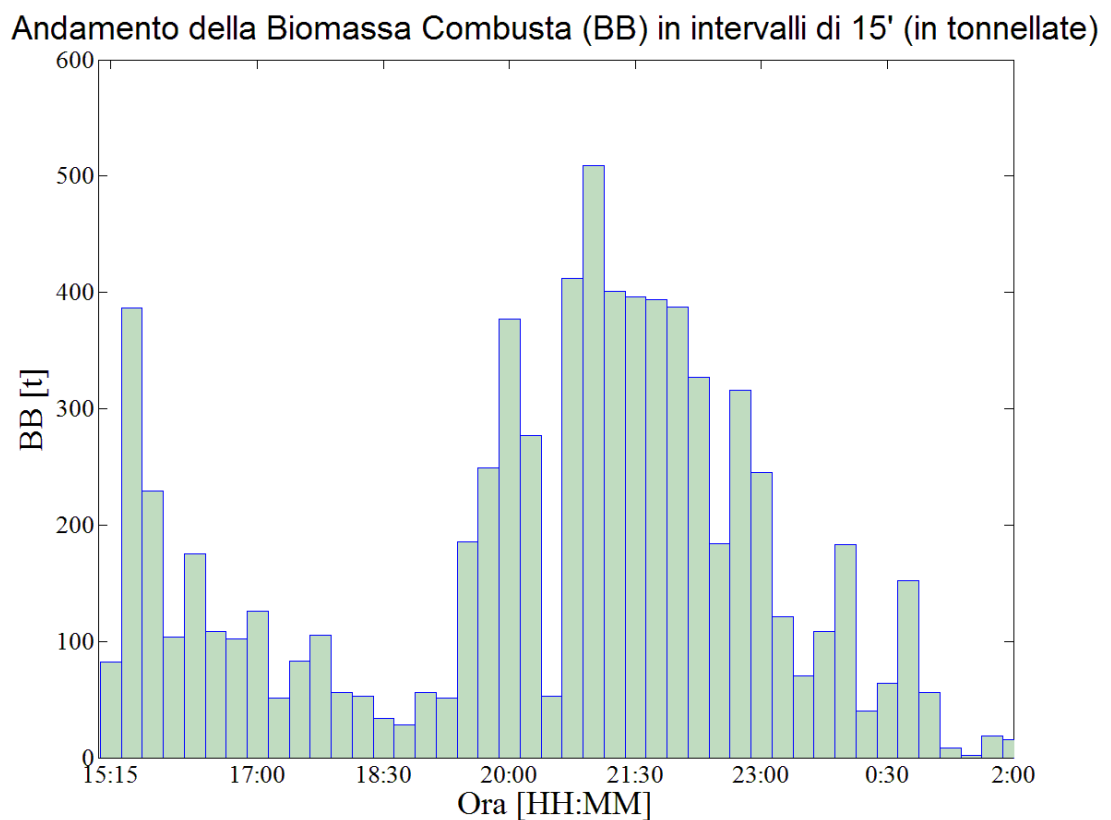


Fig. 6.3: Andamento della biomassa combusta in intervalli di 15'

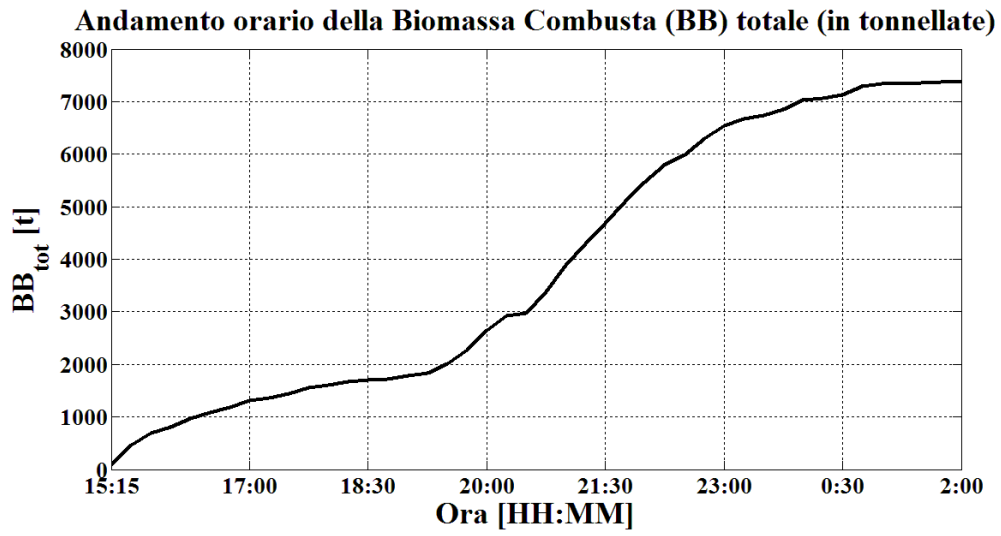


Fig. 6.4: Andamento della biomassa combusta al variare del tempo

CONCLUSIONI

La tesi è stata finalizzata al miglioramento dell'algoritmo di *fire-detection* SFIDE sviluppato nell'ambito del progetto SIGRI. E' stata effettuata una completa revisione dell'algoritmo, basato sui dati del sensore SEVIRI del satellite geostazionario MSG, utile all'individuazione di incendi in tempo reale sull'area mediterranea e, in particolare, sulla Sardegna.

Rispetto allo stato dell'arte, è stata introdotta una metodologia innovativa basata sulla *change-detection* dei principali parametri termici utilizzati in ambito di *fire-detection*, elaborata mediante un'analisi statistica dell'andamento delle stesse variabili termiche, sulla Sardegna, in funzione dell'elevazione solare. I test, hanno evidenziato come, tale elemento di novità, abbia permesso di individuare un maggior numero di incendi e con maggior tempestività.

Tra le altre modifiche che hanno consentito di migliorare le prestazioni dell'algoritmo, valutabili ancora una volta in termini di numero di incendi rilevabili e celerità nell'individuazione degli stessi, oltre che nella riduzione dei falsi allarmi, di particolare rilievo è stata la rivalutazione delle soglie utilizzate nel confronto contestuale dei valori termici del presunto hot-spot con quelli dei pixel confinanti (intorno 3x3). Tale revisione ha permesso, mediante l'introduzione di opportune condizioni, di limitare i falsi allarmi dovuti a particolari problematiche quali la repentina variazione di riflettanza e, soprattutto, la presenza di *Sun-glint*.

Inoltre, l'adozione di soglie per l'individuazione della *cloud-mask* in linea con la letteratura, e adeguate al caso della Sardegna, con l'introduzione delle immagini nel canale 2 di SEVIRI, ha permesso di estendere la valutazione dell'algoritmo ad un numero di pixel in genere maggiore rispetto alle precedenti versioni di SFIDE, riducendo gli errori di omissione, sebbene, al

riguardo, i test validativi abbiano evidenziato come la copertura nuvolosa sia ancora una delle principali cause del mancato rilevamento di incendi.

Altri significativi sviluppi sono stati proposti nella definizione delle soglie di individuazione dei potenziali pixel-fuoco, definite mediante funzioni di terzo grado dell'angolo di elevazione solare, e l'adozione di un algoritmo contestuale anche per le ore notturne. Novità queste che, ancora una volta, hanno permesso di aumentare il numero di incendi rilevati rispetto alle precedenti versioni dell'algoritmo.

I test validativi, condotti mediante un confronto tra gli incendi individuati dalla versione di SFIDE qui presentata e i dati al suolo rilevati dal CFVA della Sardegna, hanno evidenziato un netto miglioramento delle prestazioni dell'algoritmo. In particolare, nei giorni presi in considerazione, sono stati rilevati ben 20 dei 22 incendi rilevabili con la detection di incendi da immagini satellitari, limitando al di sotto del 10% gli errori di omissione. Le modifiche apportate all'algoritmo hanno permesso di rendere più performante l'algoritmo anche nelle dimensioni degli incendi rilevabili e nella tipologia di copertura: il più piccolo evento registrato presenta le dimensioni di 4.33 ha, e numerosi altri sono di dimensioni paragonabili. Tra questi, alcuni risultano caratterizzati, nei report del CFVA, da copertura diversa da quella boschiva.

Dei 285 hot-spot rilevati, appena 14 sono risultati falsi allarmi (4.91%). Di questi, la quasi totalità (13 su 14) è dovuta alle condizioni d'innescio. D'altro canto, però, un'attenta analisi ha evidenziato come molti fossero caratterizzati da valori di FRP e/o QC poco al di sopra dei limiti inferiori considerati. Un'ultima importante comparazione è stata effettuata tra i risultati ottenuti con l'algoritmo SFIDE, che utilizza dati da satellite in orbita geostazionaria, con quelli ricavati da algoritmi basati sull'uso di dati del sensore MODIS, posto in orbita bassa. Nello stesso periodo considerato, quest'ultimi hanno individuato solamente 3 incendi, tutti rilevati da SFIDE a meno di un evento occorso in presenza di alta nuvolosità.

In conclusione, i risultati illustrati dimostrano come il rilevamento di incendi da orbita geostazionaria sia fondamentale per il tempestivo intervento degli enti preposti al contrasto degli eventi incendiari, al fine di limitare i danni di natura sociale, ambientale e- non ultimo- economici prodotti dai roghi. I vantaggi derivati dall'utilizzo di dati da orbita geostazionaria non risiedono soltanto nelle tempistiche, aspetto comunque principale, ma anche nella percentuale di incendi rilevabili grazie alla copertura continua delle zone di interesse, rendendola l'unica strada percorribile per una *fire-detection* rapida ed efficiente, atta al contrasto attivo degli incendi e non solo alla stima dei danni da essi causati. Non va inoltre dimenticata la visione sinottica che un satellite consente sulla distribuzione degli incendi a livello nazionale e sovranazionale che può costituire un utile supporto alla prioritizzazione degli interventi e allo scambio di risorse tra paesi contigui.

In futuro, si può pensare all'uso di altre variabili termiche, quali la temperatura superficiale (LST), già implementata in questa versione dell'algoritmo SFIDE nell'ambito della caratterizzazione degli hot-spot, per ridurre ulteriormente gli errori di omissione, in modo da rendere definitivamente efficiente il supporto da satellite alla gestione degli incendi.

BIBLIOGRAFIA

- Ager, A. A., Preisler, H. K., Arca, B., Spano, D., Salis, M.: Wildfire risk estimation in the Mediterranean area. *Environmetrics*, **25**(6), 384-396 (2009).
- Amraoui, M., DaCamara, C. C., Pereira, J. M. C.: Detection and monitoring of African vegetation fires using MSG-SEVIRI imagery. *Remote sensing of Environment*. **114**(5), 1038-1052 (2010).
- Arino, O., Melinotte, J. M., Calabresi, G.: Fire, cloud, land, water: The Ionia AVHRR CD-browser of ESRIN. *Earth Observation Quarterly*. **41**, 6-7 (1993).
- Atitar, M., Sobrino, J. A., Soria, G., Wigneron, J. P., Jimenez-Munoz, J. C., Julien, Y., Belen, A.: Land surface temperature retrieved from SEVIRI/MSG2 data: algorithm and validation. EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Darmstadt, Germany 8-12 Sept. (2008).
- Barbosa Ferreira, P., Camia, A., Kucera, J., Libertà, G., Palumbo, I., San-Miguel-Ayanz, J., Schmuck, G.: Assessment of Forest Fires Impact and Emissions in the European Union Based on the European Forest Fire Information System. In *Wildland Fires and Air Pollution*. Elsevier, 197-208, (2009).
- Calle, A., Casanova, J. L., Romo, A.: Fire detection and monitoring using MSG Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI) data. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. **111**(G4), (2006).
- Calle, A., Casanova, J. L., Gonzalez-Alonso, F.: Impact of point spread function of MSG-SEVIRI on active fire detection. *International Journal of Remote Sensing*. **30**(17), 4567-4579 (2009).
- Capderou, M.: *Satellites - Orbits and Missions*. Springer-Verlag (2005).
- DaCamara, C. C., Calado, T. J., Amraoui, M., Pereira, J. M.: The SAF for land surface analysis wildfire applications. In 2007 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference and the 15th Satellite Meteorology

& Oceanography Conference of the American Meteorological Society, Amsterdam, Netherlands, 24–28 September, EUMETSAT. **50**, 92-9110 (2007).

- Dozier, J.: A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution. *Remote Sensing of environment*. **11**, 221-229 (1981).
- EUMETSAT, CGMS. *Directory of Meteorological Satellite Applications*, (1999).
- Flasse, S. P., Ceccato, P.: A contextual algorithm for AVHRR fire detection. *International Journal of Remote Sensing*. **17**(2), 419-424 (1996).
- Giglio, L., Kendall, J. D., Justice, C. O.: Evaluation of global fire detection algorithms using simulated AVHRR infrared data. *International Journal of Remote Sensing*. **20**(10), 1947-1985 (1999).
- Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C. O., Kaufman, Y. J.: An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment*. **87**(3), 273-282 (2003).
- Giglio, L., Csiszar, I., Restas, A., Morisette, J. T., Schroeder, W., Morton, D., Justice, C.O.: Active fire detection and characterization with the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER). *Remote Sensing of Environment*. **112**(6), 3055-3063 (2008).
- Giglio, L., Schroeder, W., Justice, C. O.: The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sensing of Environment*. **178**, 31-41 (2016).
- Govaerts, Y., Clerici, M.: MSG-1/SEVIRI solar channels calibration commissioning activity report. EUMETSAT, European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites. **04**(0024), (2004).
- Hirsch, S. N.: Applications of remote sensing to forest fire detection and suppression. In *Proceedings of the Second Symposium on Remote Sensing of Environment*, 15-17 (1963).

- Hirsch, S. N., Kruckeberg, R. F., Madden, F. H.: The bispectral forest fire detection system. Proceedings of the 7th international symposium on remote sensing of environment, 17. (1971).
- <http://www.eumetsat.int/>
- <https://modis.gsfc.nasa.gov>
- <http://noaasis.noaa.gov/>
- Joro, S., Samain, O., Yildirim, A., Van De Berg, L., Lutz, H. J.: Towards an improved active fire monitoring product for MSG satellites. EUMETSAT. (2008).
- Justice, C. O., Giglio, L., Korontzi, S., Owens, J., Morisette, J. T., Roy, D., Descloitres, J., Alleaume, S., Petitcolin, F., Kaufman, Y.: The MODIS fire products. Remote Sensing of Environment. **83**(2), 244-262 (2002).
- Kaufman, Y. J., Justice, C. O., Flynn, L. P., Kendall, J. D., Prins, E. M., Giglio, L., Ward, D. E., Menzel, W. P., Setzer, A. W.: Potential global fire monitoring from EOS-MODIS. Journal of Geophysical Research-Atmospheres. **103**(D24), 32215-32238 (1998).
- Kennedy, P. J., Belward, A. S., Gregoire, J. M.: An improved approach to fire monitoring in West Africa using AVHRR data. International Journal of Remote Sensing. **15**(11), 2235-2255, (1994).
- Kerle, N., Janssen, L. L., Huurneman, G. C.: Principles of remote sensing. ITC, Educational textbook series, 2 (2004).
- King, J.C.: Quantization and Symmetry in Periodic Coverage Patterns with Applications to Earth Observation. Journal of Astronautical Sciences. **24**(4), 347-363, October-December (1976).
- King, M. D., Parkinson, C. L., Partington K. C., Williams, R.G.: Our Changing Planet The View from Space. Cambridge University Press. (2007).
- Klaes, K. D., Cohen, M., Buhler, Y., Schlüssel, P., Munro, R., Engeln, A., Clérigh, E., Luntama, J. P.: An introduction to the EUMETSAT polar

system. *Bulletin of the American Meteorological Society*. **88**(7), 1085-1096 (2007).

- Kozai, Y.: The motion of a close Earth satellite. *Astron. J.* **64**(1274), 367-377 (1959).
- Laneve, G., Castronuovo, M. M., Cadau, E. G.: Continuous monitoring of forest fires in the Mediterranean area using MSG. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. **44**(10), 2761-2768 (2006).
- Laneve, G., Cadau, E. G.: Quality assessment of the fire hazard forecast based on a fire potential index for the Mediterranean area by using a MSG/SEVIRI based fire detection system. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IEEE International*. 2447-2450, (2007).
- Laneve, G., Cadau, E. G., Santilli, G.: Estimation of the burned biomass based on the quasi-continuous MSG/SEVIRI earth observation system. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS*. **3**, III-597, (2009).
- Laneve, G., Jahjah, M., Ferrucci, F., Battazza, F.: SIGRI project: the development of the fire vulnerability index. In *34th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Sydney, 10-15 April* (2011).
- Laneve, G., Cadau, E., Ferrucci, F., Rongo, R., Guarino, A., Fortunato, G., Loizzo, R.: SIGRI-an Integrated System for Detecting, Monitoring, Characterizing Forest Fires and Assessing damage by LEO-GEO Data. *Italian Journal of Remote Sensing*. **44**(1), 19-25 (2012).
- Laneve, G., Jahjah, M., Ferrucci, F., Hirn, B., Battazza, F., Fusilli, L., De Bonis, R.: SIGRI project: Results of the products validation process. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International*. 970-973, (2012).
- Laneve, G., Jahjah, M., Ferrucci, F., Hirn, B., Battazza, F., Fusilli, L., De Bonis, R.: SIGRI project: Products validation results. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. **7**(3), 895-905 (2014).

- Malingreau, J. P., Tucker, C. J.: Large-scale deforestation in the southeastern Amazon basin of Brazil. *Ambio*. 49-55 (1988).
- Martín, M. P., Ceccato, P., Flasse, S., Downey, I.: Fire detection and fire growth monitoring using satellite data. In *Remote sensing of large wildfires*. Springer Berlin Heidelberg. 101-122 (1999).
- Muirhead, K., Cracknell, A. P.: Straw burning over Great Britain detected by AVHRR. *International Journal of Remote Sensing*. 6(5), 827-833 (1985).
- Pereira, M. C., Setzer, A. W.: Spectral characteristics of deforestation fires in NOAA/AVHRR images. *International Journal of Remote Sensing*. 14(3), 583-597 (1993).
- Philip, S.: Active fire detection using remote sensing based polar-orbiting and geostationary observations: an approach towards near real-time fire monitoring. University of Twente, Faculty of Geo-information Science and Earth Observation, Enschede (2007).
- Prins, E. M., Feltz, J. M., Menzel, W. P., Ward, D. E.: An overview of GOES-8 diurnal fire and smoke results for SCAR-B and 1995 fire season in South America. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 103(D24), 31821-31835 (1998).
- Prins, E. M., Schmetz, J., Flynn, L. P., Hillger, D. W., Feltz, J. M.: An overview of diurnal active fire monitoring using a suite of international geostationary satellites. *Global and Regional Vegetation Monitoring from Space: Planning a Coordinated International Effort*. 145-170 (2001).
- Reid, J. S., Koppmann, R., Eck, T. F., Eleuterio, D. P.: A review of biomass burning emissions part II: Intensive physical properties of biomass burning particles. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 5, 799-825 (2005).
- Richards, J. A.: *Remote sensing with imaging radar*. Berlin, Heidelberg: Springer. (2009).
- Roberts, G., Wooster, M. J., Perry, G. L., Drake, N., Rebelo, L. M., Dipotso, F.: Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire

radiative power observations: Application to southern Africa using geostationary SEVIRI imagery. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. **110**(D21), (2005).

- Roberts, G. J., Wooster, M. J.: Fire detection and fire characterization over Africa using Meteosat SEVIRI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. **46**(4), 1200-1218 (2008).
- Robinson, J. M.: Fire from space: Global fire evaluation using infrared remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*. **12**(1), 3-24 (1991).
- Salisbury, J. W., D'Aria, D. M.: Emissivity of terrestrial materials in the 8–14 μm atmospheric window. *Remote sensing of Environment*. **42**(2), 83-106 (1992).
- Salomonson, V. V., Barnes, W. L., Maymon, P. W., Montgomery, H. E., Ostrow, H.: MODIS: advanced facility instrument for studies of the earth as a system. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. **27**, 145 – 153 (1989).
- San-Miguel-Ayanz, J., Pereira, J., Boca, R., Strobl, P., Kucera, J., Pekkarinen, A.: Forest Fires in the European Mediterranean Region: Mapping and Analysis of Burned Areas. In *Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems*. Springer Berlin Heidelberg, 189-204 (2009).
- Saunders, R. W., Kriebel, K. T.: An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*. **9**(1), 123-150 (1988).
- Schmuck, G., San-Miguel-Ayanz, J., Camia, A., Durrant, T., Santos De Oliveira, S., Boca, R., Whitmore, C., Giovando, C., Libertà, G., Corti, P., Schulte, E.: Forest Fires in Europe 2010, EUR 24910 EN. Publications Office of the European Union, (2010).
- Schmuck, G., San-Miguel-Ayanz, J., Camia, A., Durrant, T., Boca, R., Whitmore, C., Libertà, G., Corti, P., Schulte, E.: Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2011, EUR 25483 EN. Publications Office of the European Union, (2012).

- Sifakis, N. I., Iossifidis, C., Kontoes, C., Keramitsoglou, I.: Wildfire Detection and Tracking over Greece Using MSG-SEVIRI Satellite Data. *Remote sensing*, **3**(3), 524-538 (2011).
- Sobrino, J. A., Romaguera, M.: Land surface temperature retrieval from MSG₁-SEVIRI data. *Remote Sensing of Environment*. **92**(2), 247-254 (2004).
- Soler, T., Eisemann, D. W.: Determination of look angles to geostationary communication satellites. *Journal of surveying engineering*. **120**(3), 115-127 (1994).
- Stuttard, M., Proud, R., Bamford, C.: *Terra 2: understanding the terrestrial environment: remote sensing data systems and networks*. 83 (1995).
- Van den Bergh, F., Frost, P. E.: A multi-temporal approach to fire detection using MSG data. In *Proceedings of the 2nd IEEE International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images*, Biloxi, MS, USA. **1618**, 156-160 (2005).
- Wilson, J. J., Anderson, C., Baker, M. A., Bonekamp, H., Saldana, J. F., Dyer, R. G., Schied, E.: Radiometric calibration of the advanced wind scatterometer radar ASCAT carried onboard the METOP-A satellite. *IEEE Transactions on Geoscience and remote Sensing*, **48**(8), 3236-3255 (2010).
- Wilson, R. A., Noste, N. V.: *Project fire scan; fire detection interim report*, (1966).
- Wilson, R. A.: *Airborne infrared forest fire detection system: final report*, (1971).
- Wooster, M. J., Roberts, G., Perry, G. L. W., Kaufman, Y. J.: Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. **110**(D24), (2005).

- Xu, W., Wooster, M. J., Roberts, G., Freeborn, P.: New GOES imager algorithms for cloud and active fire detection and fire radiative power assessment across North, South and Central America. *Remote Sensing of Environment*. **114**(9), 1876-1895 (2010).