



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

Dipartimento di Ingegneria Astronautica Elettrica ed Energetica

Tesi di dottorato

Energia e Ambiente

XXIX ciclo

Utilizzo di immagini satellitari nella gestione post evento  
degli incendi boschivi

Relatore

Prof. Giovanni Laneve

Dottorando

Guido Bernini

Anno Accademico 2015/2016

*Ringrazio  
il Prof. Giovanni Laneve  
per avermi seguito durante l'attività di dottorato*

# Indice

|                                                                                |            |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Introduzione.....</b>                                                       | <b>4</b>   |
| <b>Capitolo 1 Fondamenti del Telerilevamento.....</b>                          | <b>6</b>   |
| 1.1 Fisica del telerilevamento.....                                            | 6          |
| 1.2 Interazione con la materia .....                                           | 10         |
| 1.3 Strumenti di misura.....                                                   | 13         |
| <b>Capitolo 2 Obiettivi della Ricerca: il Progetto PREFER .....</b>            | <b>18</b>  |
| 2.1 Il progetto PREFER.....                                                    | 18         |
| 2.2 I prodotti PREFER.....                                                     | 21         |
| 2.3 Gli utenti .....                                                           | 24         |
| 2.4 Requisiti di osservazione per PREFER.....                                  | 25         |
| 2.5 Le aree di interesse (AOI).....                                            | 27         |
| 2.6 Infrastruttura per il Servizio.....                                        | 34         |
| 2.7 Damage Severity Map.....                                                   | 39         |
| <b>Capitolo 3 Stima del danno attraverso immagini telerilevate.....</b>        | <b>44</b>  |
| 3.1 Indici per la stima del danno da incendio.....                             | 44         |
| 3.2 Indici e il metodo di normalizzazione radiometrica IR-MAD.....             | 54         |
| 3.3 Indici e la rimozione dell'effetto radiometrico con relazione lineare..... | 56         |
| 3.4 Miglioramenti nella definizione di DSI.....                                | 59         |
| 3.5 Effetto dell'atmosfera sulla valutazione degli indici.....                 | 62         |
| 3.6 Effetto degli aerosol sulla valutazione degli indici.....                  | 70         |
| <b>Capitolo 4 Algoritmi .....</b>                                              | <b>84</b>  |
| 4.1 Algoritmi per PREFER.....                                                  | 84         |
| <b>Capitolo 5 Analisi risultati (Validazione).....</b>                         | <b>89</b>  |
| 5.1..Risultati.....                                                            | 89         |
| 5.2 Validazione .....                                                          | 96         |
| 5.3 Dimostrazione .....                                                        | 119        |
| 5.4 Effetto dell'atmosfera sui livelli di danno.....                           | 125        |
| 5.5 Effetto degli aerosol sui livelli di danno.....                            | 132        |
| <b>Conclusioni.....</b>                                                        | <b>139</b> |
| <b>Bibliografia.....</b>                                                       | <b>142</b> |

# Introduzione

L'area Mediterranea è sistematicamente colpita da incendi che danneggiano vaste aree vegetate. Gli incendi boschivi hanno un impatto rilevante sugli ecosistemi e possono causare fenomeni di erosione del terreno, instabilità dei pendii, tendenza alla desertificazione. L'impatto interessa anche l'ambito economico colpito dall'inevitabile diminuzione del turismo.

Ogni anno, in alcune aree del Mediterraneo, come l'Italia, la Francia, il Portogallo, la Spagna e la Grecia, centinaia di migliaia di ettari di foreste sono vittima degli incendi [1]: circa 65000 incendi bruciano approssimativamente 500000 ettari di aree vegetate. Negli ultimi 30 anni, nonostante le nuove tecniche antincendio, le diverse strategie per il contenimento e la tecnologia per l'informazione e la comunicazione, lo scenario non è cambiato. Per apportare miglioramenti nell'informazione e prevenire gli incendi boschivi, è necessario valorizzare l'uso di prodotti derivanti da misure satellitari, i sistemi di rivelazione degli incendi mediante osservazione da terra e dallo spazio ed è necessario migliorare la stima degli effetti dell'incendio sulla vegetazione per stabilire la priorità per gli interventi di ripristino.

Lo scopo del progetto europeo **PREFER** (Space-based Information Support for **P**revention and **R**ecovery of Forest **F**ires **E**mergency in the Medite**R**anean Area) è generare prodotti a supporto delle attività di prevenzione incendi e la fase di recupero e ricostruzione [2], [3].

Il lavoro, svolto grazie al coinvolgimento in questo progetto Europeo, riguarda lo sviluppo di una metodologia per la generazione di mappe di severità del danno da incendio sulla vegetazione (fire damage severity maps) che rientra nell'attività di recupero e ricostruzione. Le mappe vengono ottenute mediante un algoritmo automatico che, utilizzando immagini Landsat 8 ad alta risoluzione spaziale (30 m) e bassa risoluzione temporale (16 giorni), calcola gli indici differential Normalized Burn Ratio (DNBR), Burn Severity Index (BSI) e Damage Severity Index (DSI) [4]. Con le soglie del danno per l'indice DSI si ottengono le soglie per gli altri indici e vengono così generate tre mappe del livello di danno per ogni area bruciata.

I risultati ottenuti sono validati con immagini RapidEye ad altissima risoluzione spaziale (5 m) prima e dopo l'evento e con foto acquisite in situ.

Nel Capitolo 1 vengono richiamati i principi fondamentali del telerilevamento. Vengono descritti i principi fisici e i parametri termo-ottici che caratterizzano questo settore [5]. Particolare attenzione è rivolta ai sensori a bordo dei satelliti e all'individuazione di quelli più adatti per l'analisi del danno dopo un incendio [6]-[8].

Il capitolo 2 descrive lo scenario degli incendi boschivi in Europa evidenziando la necessità di generare prodotti a supporto della fase di prevenzione e alla fase di recupero e ricostruzione. Tali obiettivi sono stati raggiunti con il progetto europeo PREFER [1]-[3]. Viene descritta la metodologia per ottenere le mappe di severità del danno.

Il capitolo 3 esamina lo spettro elettromagnetico nella regione del visibile, del vicino infrarosso e del medio infrarosso nel caso in cui la vegetazione è sana e nel caso in cui è bruciata [9]. Con valori di riflettanza nel RED (regione del rosso), NIR (Near Infrared) e SWIR (Short Wave Infrared) vengono calcolati gli indici DNBR, BSI e DSI che identificano la vegetazione bruciata e stimano l'entità del danno [4]. Mediante simulazioni numeriche MODTRAN e la teoria di Mie, viene effettuato uno studio sull'influenza dell'atmosfera e di particelle di dimensioni diverse sugli indici. È stato creato un algoritmo in linguaggio MATLAB, descritto nel capitolo 4, in grado di generare, in modo automatico, utilizzando immagini Landsat8, mappe degli indici nelle aree test e di rendere disponibili i risultati sul geoserver di PREFER [3].

Nel capitolo 5 vengono messi in relazione gli indici DNBR, BSI e DSI ottenuti, con l'algoritmo, in una particolare area bruciata della Sardegna e vengono individuate, mediante le soglie del livello di danno dell'indice DSI, le soglie degli indici DNBR e BSI. Con questi parametri vengono create mappe del livello di danno per ogni area analizzata dall'algoritmo.

I risultati sono confrontate con l'indice Composite Burn Index (CBI) ottenuto dall'analisi visiva delle aree bruciate mediante foto acquisite in situ [4].

Un secondo metodo per validare le mappe del danno prevede l'uso delle immagini ad altissima risoluzione RapdEye. Le immagini RapdEye prima dell'incendio consentono di individuare le aree con bosco e quelle con prato e di considerare errore l'attribuzione, da parte dell'algoritmo, del danno moderato e alto a zone con prato: il danno alto indica un periodo molto lungo per la rigenerazione della vegetazione (dell'ordine degli anni) e può coinvolgere esclusivamente le foreste. La stima del danno viene validata osservando anche le immagini RapidEye dopo l'incendio in modo simile all'analisi effettuata con le foto acquisite in campo.

Viene studiata inoltre l'influenza dell'atmosfera e degli aerosol sulla stima del livello del danno.

# Capitolo 1    Fondamenti del Telerilevamento

## 1.1 Fisica del telerilevamento

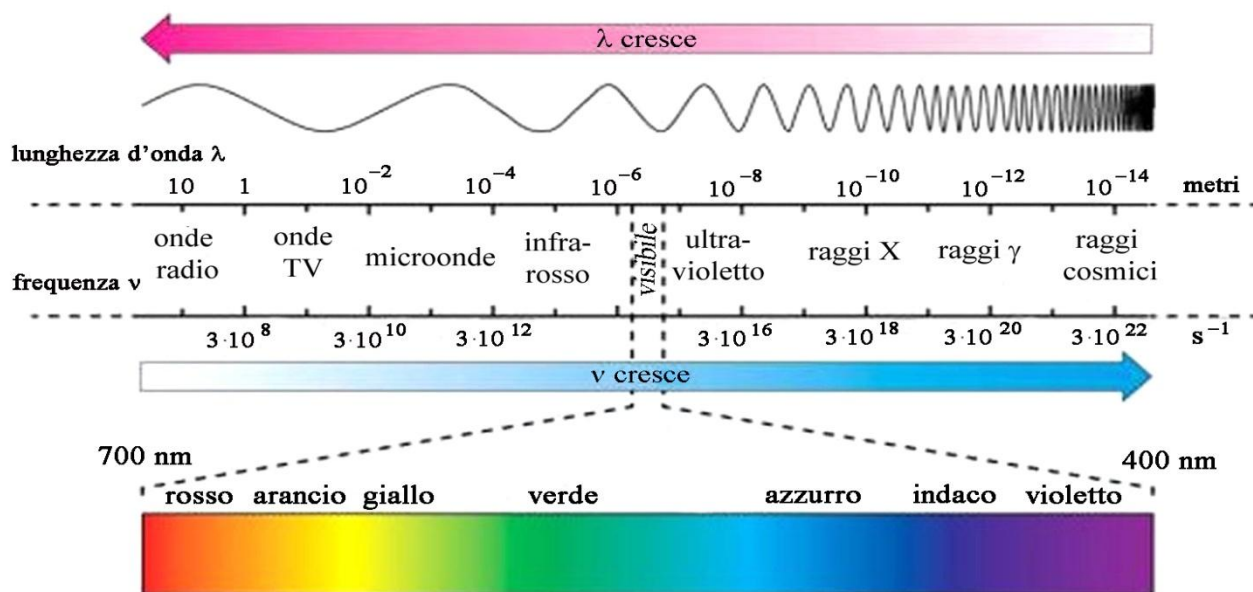
Per telerilevamento o Remote-Sensing si intende “ l’acquisizione di informazioni su un oggetto per mezzo di uno strumento non in contatto con esso”. L’oggetto è l’ambiente terrestre, mentre le informazioni riguardano sia l’identificazione del tipo di oggetto osservato (corpo d’acqua, foresta, vegetazione bruciata, zona urbana, zona agricola, ecc.) sia alcune sue proprietà fisiche e parametri (ad esempio umidità, temperatura, caratteristiche geometriche, quantità di biomassa, livello di danno provocato dall’incendio sulla vegetazione ecc.).

Una sorgente (naturale o artificiale) genera la radiazione elettromagnetica che interagisce con l’oggetto e poi raggiunge il sensore che effettua la misura. L’entità e le caratteristiche di queste interazioni sono legate alle proprietà fisiche dell’oggetto stesso. Quindi è possibile determinare relazioni che leghino le quantità elettromagnetiche misurate ai parametri fisici. Questo può avvenire o con un approccio di tipo teorico, determinando le leggi per mezzo di modelli, o tramite un approccio di tipo empirico-statistico, effettuando cioè dei rilevamenti in situ di alcuni parametri dell’oggetto osservato e determinando le corrispondenti leggi mediante correlazioni statistiche.

I sistemi di telerilevamento possono essere classificati in base alla risoluzione spaziale (dimensioni dell’area elementare al suolo di cui si rileva l’energia elettromagnetica), alla risoluzione spettrale (larghezza delle bande spettrali in cui l’immagine è registrata), alla risoluzione radiometrica (numero di livelli di quantizzazione che si è in grado di discriminare) e alla risoluzione temporale (frequenza d’acquisizione dei frames dell’immagine).

Le misure si effettuano grazie alla radiazione elettromagnetica e i parametri che la caratterizzano soddisfano la nota relazione  $c = \lambda * \nu$ , dove  $c$  è la velocità della luce nel vuoto, pari a 300000 Km/sec,  $\nu$  è la frequenza e  $\lambda$  la lunghezza d’onda.

Lo spettro elettromagnetico è teoricamente infinito ma solo alcune porzioni sono effettivamente utilizzabili: a molti valori delle lunghezze d’onda la radiazione elettromagnetica non ha interazioni rilevanti con l’oggetto in analisi. Inoltre l’atmosfera stessa e le lenti di molti sensori, causano un assorbimento importante delle lunghezze d’onda più corte dell’ ultravioletto.



**Figura 1.1** Spettro elettromagnetico.

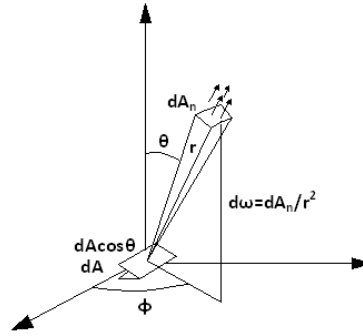
In generale nel Telerilevamento si utilizza una porzione limitata dello spettro elettromagnetico che va dall'ultravioletto alle microonde. L'ultravioletto ( $0.3\text{-}0.38 \mu\text{m}$ ) viene utilizzato fondamentalmente per studiare l'ozono ma in alcuni casi è utilizzato anche per rilevare le particelle di cenere vulcanica e di acido solforico sospese in aria. Da una quota non superiore ai 15 Km, da piattaforma aerea, l'ultravioletto individua l'eventuale presenza di macchie d'olio sul mare.

La radiazione nel campo del visibile ( $0.38\text{-}0.72 \mu\text{m}$ ), percepita dall'occhio umano, consente all'uomo di distinguere gli oggetti e i loro colori. Questa porzione di spettro elettromagnetico, insieme al vicino infrarosso, è utilizzata anche nella fotografia.

L'infrarosso si divide in infrarosso vicino (NIR  $0.72\text{-}1.3 \mu\text{m}$ ), medio (SWIR  $1.3\text{-}3.5 \mu\text{m}$ ) e termico (TIR  $3.5\text{-}300 \mu\text{m}$ ). L'infrarosso termico interagisce molto con l'atmosfera e viene usato quindi per studiarla. Permette inoltre di stimare la temperatura superficiale del pianeta.

Le microonde ( $300 \mu\text{m}\text{-} 1 \text{ m}$ ) invece attraversano l'atmosfera senza variazioni anche in presenza di nubi; tale radiazione viene attenuata solamente in caso di pioggia.

In natura ogni corpo avente una temperatura superiore a 0 K emette radiazione elettromagnetica in modo dipendente dallo stato della superficie. La grandezza fondamentale è la radianza spettrale (o intensità di emissione direzionale spettrale) espressa in  $\left[\frac{\text{Watt}}{\text{sr m}^3}\right]$  che corrisponde al rateo di energia emessa alla lunghezza d'onda  $\lambda$ , da una superficie elementare  $dA$ , nella direzione definita dagli angoli  $\theta$  e  $\phi$ , per unità di superficie ortogonale a tale direzione, per unità di angolo solido, nell'intervallo di lunghezza d'onda  $d\lambda$  intorno a  $\lambda$ .

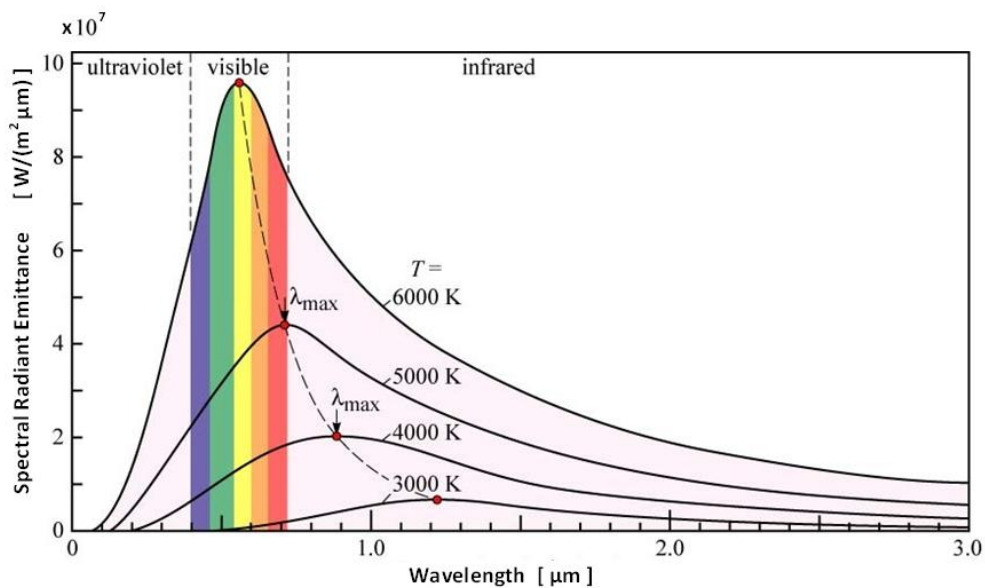


**Figura 1.2** Intensità di emissione direzionale spettrale.

Un corpo si definisce “nero” quando la sua superficie assorbe tutta l’energia incidente, qualunque sia la lunghezza d’onda e l’angolo di incidenza (assorbitore perfetto) ed emette, a parità di temperatura, la massima energia possibile (emettitore perfetto). Il corpo nero emette in maniera diffusa e la sua emittanza spettrale (o Emissione emisferica spettrale), funzione della temperatura e della lunghezza d’onda, è definita dalla legge di Planck che si ottiene integrando nell’emisfero l’intensità di emissione direzionale spettrale (Figura 1.3):

$$M_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad \left[ \frac{\text{Watt}}{\text{m}^3} \right] \quad (1.1)$$

dove le costanti di radiazione valgono  $C_1 = 3.74 \cdot 10^{-16} [\text{Watt} \cdot \text{m}^2]$ ,  $C_2 = 1.44 \cdot 10^{-2} [\text{m} \cdot \text{K}]$ ,  $\lambda$  è la lunghezza d’onda e  $T$  è la temperatura assoluta (espressa in gradi Kelvin) del corpo.



**Figura 1.3** Intensità di emissione in funzione della lunghezza d’onda.

L'emittanza spettrale risulta massima alla lunghezza d'onda (legge di Wien)

$$\lambda_{max} = \frac{2.8978 \cdot 10^{-3}}{T} \quad [\mu m] \quad (1.2)$$

Il sole, a 5880 K, emette nella regione compresa tra l'ultravioletto e il vicino infrarosso, con un massimo di energia a 0.5  $\mu m$ , corrispondente al verde. La Terra, con una temperatura variabile tra 240 K e i 315 K, con un valore medio di 300 K, emette nell'infrarosso termico e nelle microonde e ha un massimo a 9.7  $\mu m$ .

L'area racchiusa dalla generica curva di fig. 1.3 rappresenta l'energia emessa sull'intero spettro elettromagnetico e la sua espressione è data dalla legge di Stefan-Boltzmann:

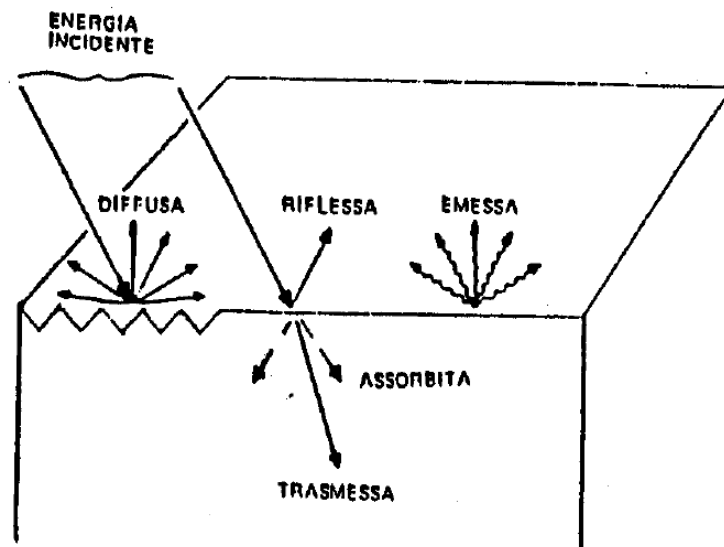
$$M = \int_0^\infty \frac{C_1}{\lambda^5 \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} d\lambda = \sigma T^4 \quad \left[ \frac{Watt}{m^2} \right] \quad \text{con } \sigma = 5.6693 \cdot 10^{-8} \quad \left[ \frac{W}{m^2 K^4} \right] \quad (1.3)$$

L'emissività  $\epsilon$  è un parametro termo-ottico che tiene conto di quanto un corpo, di natura qualsiasi, possa irradiare energia rispetto ad un corpo nero. L'emissività è il rapporto tra l'intensità di emissione della superficie reale rispetto a quella di un corpo nero e può dipendere dalla temperatura del corpo, dalla lunghezza d'onda e dall'angolo sotto cui la radiazione è emessa.  $\epsilon$  è minore di 1 ma se si considera un corpo nero è pari ad 1 che è il valore massimo che può assumere. L'energia radiante che incide su un corpo viene in parte riflessa dalla sua superficie ed in parte penetra al suo interno. Di quella che passa all'interno, una frazione viene assorbita entro lo spessore e trasformata in calore, un'altra frazione invece attraversa il corpo. Quindi definendo la riflettanza ( $r$ ), l'assorbanza ( $\alpha$ ) e la trasmittanza ( $t$ ) rispettivamente come il rapporto tra l'energia riflessa, assorbita e trasmessa, e l'energia incidente, si può scrivere  $r + \alpha + t = 1$ . Se la trasmittanza è 0, il corpo si dice opaco, cioè il corpo ha uno spessore tale da annullare l'energia trasmessa. Inoltre tutta l'energia assorbita da un corpo è emessa in accordo con il principio di Kirchhoff:  $\epsilon(\lambda, T, \varphi, \theta) = \alpha(\lambda, T, \varphi, \theta)$ .

L'atmosfera, ad esempio, è costituita da gas che sono opachi alla radiazione in certe regioni dell'infrarosso termico: l'atmosfera riflette, diffonde, assorbe e riemette radiazione a lunghezze d'onda elevate mentre è trasparente a lunghezza d'onda inferiori come la radiazione solare [5].

## 1.2 Interazione con la materia

I fenomeni di interazione tra la radiazione elettromagnetica e la materia, solida, liquida e gassosa, possono essere divisi in fenomeni di superficie e di volume a seconda che avvengano sulla superficie della sostanza o, dopo averla attraversata, entro la materia. Le variazioni della radiazione elettromagnetica che ne derivano sono cambiamenti di intensità, direzione e lunghezza d'onda. Durante le interazioni la massa e l'energia si conservano. La radiazione può essere trasmessa, cioè passa attraverso la materia variando la velocità di trasmissione, può essere assorbita e provocare un aumento della temperatura in questo caso può essere emessa in funzione della temperatura e delle caratteristiche di superficie. La radiazione può essere diffusa, cioè deflessa in tutte le direzioni. Infine può essere riflessa, in modo speculare o diffuso, cioè l'energia è rinviata dalla superficie colpita. Questi fenomeni dipendono dalla lunghezza d'onda e dalla forma della materia [5].



**Figura 1.4** Interazione tra la radiazione elettromagnetica e la materia.

### *L'assorbimento*

L'assorbimento si realizza quando posta una porzione di materia a contatto con la radiazione elettromagnetica, essa è in grado di assorbire energia dalla radiazione stessa. Se si considera per semplicità un elettrone, si deve pensare che questo può trovarsi in diversi livelli energetici e che per passare da un livello  $E_1$  ad uno ad energia superiore  $E_2$ , ha bisogno di assorbire una quantità di energia esattamente pari ad  $E_{ass}=E_2-E_1$ . Per una radiazione elettromagnetica l'energia è definita dalla relazione  $E=h\nu$ , che discende dalla teoria dei quanti di Max Planck, dove  $\nu$  è la frequenza della radiazione elettromagnetica e  $h$  è la costante di Planck ( $h=6.6256 \times 10^{-34}$  Js).

Se la lunghezza d'onda della radiazione è tale che  $E=E_{ass}$ , allora la radiazione potrà essere assorbita.

A causa della presenza nel materiale di elettroni, già parzialmente eccitati per diverse ragioni, l'assorbimento può verificarsi anche a lunghezze d'onda leggermente diverse da quella per cui  $E=E_{ass}$ .

Una porzione di materiale che assorbe la luce visibile è detta pigmento. Se esso assorbe tutta l'onda luminosa incidente apparirà nero, mentre se assorbe solo determinate lunghezze d'onda, apparirà dello stesso colore della radiazione che riflette.

### *La diffusione ottica (dispersione, o scattering)*

La diffusione ottica (dispersione, o scattering), si riferisce a un'ampia classe di fenomeni in cui onde o particelle vengono deflesse (ovvero cambiano traiettoria) a causa della collisione con altre particelle o onde (dal punto di vista quantistico).

La deflessione avviene in maniera disordinata e in buona misura casuale (scattering si può anche tradurre come "sparpagliamento"), quindi la diffusione si distingue dalla riflessione e dalla rifrazione, in cui le traiettorie cambiano in maniera regolare e determinata. Sono considerati processi di scattering solo le interazioni elastiche o quasi elastiche, quelli cioè che non comportano rilevanti cessioni o guadagni di energia.

In ottica lo scattering è di solito riferito alla dispersione della luce da parte di oggetti più o meno microscopici come le particelle colloidali in liquidi o i solidi polverizzati o il pulviscolo o le molecole dell'atmosfera. Un esempio molto comune di scattering della luce (scattering di Rayleigh) è dato dal colore blu del cielo: la luce del sole incide sull'atmosfera terrestre, le cui molecole diffondono con più facilità le frequenze più alte (ovvero i colori più vicini al blu e al violetto).

Un altro esempio tipico è il colore bianco delle nuvole: le goccioline d'acqua delle nuvole, diffondono uniformemente tutte le frequenze e il mezzo assume un colore bianco. Ma la diffusione che ci è di gran lunga più familiare è la *riflessione diffusa* che viene dalla superficie dei solidi. Quasi tutto ciò che noi vediamo quotidianamente è fortemente condizionato dallo scattering. Tranne gli oggetti riflettenti e quelli trasparenti (o comunque "limpidi", anche se colorati), come vetri, specchi, liquidi limpidi, metalli lucidati, tutte le altre cose "opache" mandano al nostro occhio quasi solo luce diffusa, bianca, grigia o colorata a seconda se sulla loro superficie la luce incidente è stata solo dispersa o anche assorbita più o meno selettivamente.

Lo scattering di Mie, noto anche come scattering di Lorenz-Mie, è una soluzione completa e matematicamente rigorosa del problema dello scattering di un'onda elettromagnetica su di una sfera o su di un cilindro. La teoria che descrive questo tipo di scattering prende il nome dal fisico tedesco Gustav Mie che nel 1908 pubblicò per primo la soluzione completa. Oltre a Mie, anche altri ricercatori pubblicarono quasi contemporaneamente ulteriori sviluppi e diverse, equivalenti formulazioni: principalmente vanno ricordati i contributi di Peter Debye e Ludvig Lorenz. Lo scattering di Mie è valido per elementi diffusori di ogni dimensione e, nel limite in cui questi siano molto più piccoli della lunghezza d'onda incidente, esso coincide con lo Scattering di Rayleigh (che è valido solo per diffusori puntiformi).

## 1.3 Strumenti di misura

Per lo studio del danno nelle aree colpite da incendi boschivi viene utilizzato il Sole come sorgente di radiazione elettromagnetica. La radiazione, nella regione del visibile e del vicino infrarosso, attraversa l'atmosfera interagendo in minima parte con essa e, dopo aver raggiunto la Terra, interagisce con i vari oggetti tra cui la vegetazione. L'energia riflessa e diffusa raggiunge il sensore a bordo del satellite e viene misurata. Dai valori di radianza viene ricostruito lo spettro di riflettanza che consente di avere informazioni sullo stato della vegetazione. La combinazione di valori di riflettanza, pre e post evento, ad alcune lunghezze d'onda, consente infine di creare indici in grado di verificare la presenza di vegetazione bruciata e di stimare il danno.

L'osservazione da satellite si rivela particolarmente adatta per il monitoraggio delle aree colpite dall'incendio in quanto possono essere osservate anche quelle aree che sono difficilmente accessibili da terra. Il satellite in orbita eliosincrona consente di utilizzare immagini a media risoluzione spaziale ma elevata frequenza temporale (MODIS) oppure immagini a risoluzione spaziale alta ma a frequenza temporale dell'ordine delle settimane o suoi multipli (Sentinel-2, Landsat 8). In quest'ultimo caso la frequenza temporale consente di verificare se nelle aree bruciate ci sono stati piccoli cambiamenti della vegetazione in termini di rigenerazione.

Il satellite geostazionario si presta poco per analisi simili in quanto la scarsa risoluzione spaziale, dovuta all'alta quota orbitale (35789 Km), non permette di rilevare aree bruciate di superficie inferiore a 100 ettari.

I sensori multispettrali e iperspettrali, a bordo di satelliti eliosincroni, consentono di studiare gli effetti dell'incendio sulla vegetazione: vengono calcolati indici di severità del danno con valori di riflettanza. Il sensore iperspettrale, grazie all'elevato numero di bande, consente inoltre di ricostruire lo spettro di riflettanza per verificare se la vegetazione è sana, secca o bruciata. Lo spettro di riflettanza quindi può essere confrontato con quelli acquisiti precedentemente o con gli spettri di laboratorio.

Il sensore multispettrale MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) è montato a bordo dei satelliti eliosincroni Terra (EOS AM-1) e Aqua (EOS PM-1) che orbitano a 705 km di quota. Il sensore, a media risoluzione spaziale, riesce ad osservare l'intera superficie del pianeta Terra in uno o due giorni acquisendo immagini in 36 bande tra 0.4  $\mu\text{m}$  e 14  $\mu\text{m}$ :

| Band nr. | Bandwidth (nm) | Spectral domain               | Spatial res. (m) |
|----------|----------------|-------------------------------|------------------|
| 1        | 620 – 670      | Shortwave / VIS               | 250              |
| 2        | 841 – 876      | Shortwave / NIR               | 250              |
| 3        | 459 – 479      | Shortwave / VIS               | 500              |
| 4        | 545 – 565      | Shortwave / VIS               | 500              |
| 5        | 1230 - 1250    | Shortwave / NIR               | 500              |
| 6        | 1628 - 1652    | Shortwave infrared/ SWIR      | 500              |
| 7        | 2105 - 2155    | Shortwave infrared/ SWIR      | 1000             |
| 8        | 405 - 420      | Shortwave / VIS               | 1000             |
| 9        | 438 - 448      | Shortwave / VIS               | 1000             |
| 10       | 483 - 493      | Shortwave / VIS               | 1000             |
| 11       | 526 - 536      | Shortwave / VIS               | 1000             |
| 12       | 546 - 556      | Shortwave / VIS               | 1000             |
| 13       | 662 - 672      | Shortwave / VIS               | 1000             |
| 14       | 673 - 683      | Shortwave / VIS               | 1000             |
| 15       | 743 - 753      | Shortwave / VIS               | 1000             |
| 16       | 862 - 877      | Shortwave / NIR               | 1000             |
| 17       | 890 - 920      | Shortwave / NIR               | 1000             |
| 18       | 931 - 941      | Shortwave / NIR               | 1000             |
| 19       | 915 - 965      | Shortwave / NIR               | 1000             |
| 20       | 3660 – 3840    | Longwave thermalinfrared/ TIR | 1000             |
| 21       | 3929 – 3989    | Longwave thermalinfrared/ TIR | 1000             |
| 22       | 3929 - 3989    | Longwave thermalinfrared/ TIR | 1000             |
| 23       | 4020 – 4080    | Longwave thermalinfrared/ TIR | 1000             |
| 24       | 4433 – 4498    | Longwave thermalinfrared/ TIR | 1000             |
| 25       | 4482 – 4549    | Longwave thermalinfrared/ TIR | 1000             |
| 26       | 1360 – 1390    | Shortwave / NIR               | 1000             |
| 27       | 6535 - 6895    | Longwave thermalinfrared/ TIR | 1000             |
| 28       | 7175 - 7475    | Longwave thermalinfrared/ TIR | 1000             |
| 29       | 8400 - 8700    | Longwave thermalinfrared/ TIR | 1000             |
| 30       | 9580 - 9880    | Longwave thermalinfrared/ TIR | 1000             |
| 31       | 10780 - 11280  | Longwave thermalinfrared/ TIR | 1000             |
| 32       | 11770 - 12270  | Longwave thermalinfrared/ TIR | 1000             |
| 33       | 13185 - 13485  | Longwave thermalinfrared/ TIR | 1000             |
| 34       | 13485 - 13785  | Longwave thermalinfrared/ TIR | 1000             |
| 35       | 13785 - 14085  | Longwave thermalinfrared/ TIR | 1000             |
| 36       | 14085 - 14385  | Longwave thermalinfrared/ TIR | 1000             |

**Tabella 1.1** Bande spettrali del sensore MODIS.

Il satellite Landsat 8, lanciato nel febbraio del 2013, è equipaggiato con due sensori ad alta risoluzione spaziale: Operational Land Imager (OLI) e Thermal Infrared Sensor (TIRS). Landsat 8 ha un periodo di rivisitazione di 16 giorni e si trova in orbita eliosincrona a 702 km di quota.

| Landsat-7 ETM+ Bands ( $\mu\text{m}$ ) |             |               | Landsat-8 OLI and TIRS Bands ( $\mu\text{m}$ ) |               |         |
|----------------------------------------|-------------|---------------|------------------------------------------------|---------------|---------|
|                                        |             |               | 30 m Coastal/Aerosol                           | 0.435 - 0.451 | Band 1  |
| Band 1                                 | 30 m Blue   | 0.441 - 0.514 | 30 m Blue                                      | 0.452 - 0.512 | Band 2  |
| Band 2                                 | 30 m Green  | 0.519 - 0.601 | 30 m Green                                     | 0.533 - 0.590 | Band 3  |
| Band 3                                 | 30 m Red    | 0.631 - 0.692 | 30 m Red                                       | 0.636 - 0.673 | Band 4  |
| Band 4                                 | 30 m NIR    | 0.772 - 0.898 | 30 m NIR                                       | 0.851 - 0.879 | Band 5  |
| Band 5                                 | 30 m SWIR-1 | 1.547 - 1.749 | 30 m SWIR-1                                    | 1.566 - 1.651 | Band 6  |
| Band 6                                 | 60 m TIR    | 10.31 - 12.36 | 100 m TIR-1                                    | 10.60 - 11.19 | Band 10 |
|                                        |             |               | 100 m TIR-2                                    | 11.50 - 12.51 | Band 11 |
| Band 7                                 | 30 m SWIR-2 | 2.064 - 2.345 | 30 m SWIR-2                                    | 2.107 - 2.294 | Band 7  |
| Band 8                                 | 15 m Pan    | 0.515 - 0.896 | 15 m Pan                                       | 0.503 - 0.676 | Band 8  |
|                                        |             |               | 30 m Cirrus                                    | 1.363 - 1.384 | Band 9  |

**Tabella 1.2** Bande spettrali dei sensori ETM+, OLI e TIRS.

Le missioni Sentinel, iniziate nel 2013, sono basate su una costellazione di due satelliti, soddisfano i requisiti di copertura e tempo di rivisitazione e consentono l'utilizzo di tecnologie come il radar e sensori multispettrali per il monitoraggio della terra, dell'oceano e dell'atmosfera. I satelliti forniscono una serie di dati affidabili per i servizi Copernicus. Nel progetto PREFER sono stati utilizzati i dati provenienti dalla missione Sentinel 1, iniziata nel 2014.

I satelliti SPOT, RapidEye e Pleiades sono caratterizzati da un'altissima risoluzione spaziale (6 m SPOT, 5 m RapidEye, 0.5 m Pleiades) e hanno un numero di bande limitato nella regione del visibile e del vicino infrarosso. Risulta quindi impossibile, ai fini della stima del danno da incendio boschivo, il calcolo degli indici che richiedono anche il valore della riflettanza nella regione dello SWIR (1.4  $\mu\text{m}$  - 3  $\mu\text{m}$ ). Le immagini sono adatte invece per validare i risultati in quanto consentono una buona analisi visiva della zona esaminata.

HYPERION è un sensore iperspettrale a bordo del satellite eliosincrono della NASA Earth Observing-1 (EO-1) [6]. Il satellite orbita a circa 700 km di quota e ospita inoltre un sensore multispettrale Advanced Land Imager (ALI) e uno strumento per effettuare la correzione atmosferica che non è più operativo, il Linear Etalon Imaging Spectrometer Array (LEISA) Atmospheric Corrector (LAC).

Hyperion è uno strumento di tipo push broom ed è caratterizzato da due spettrometri e un telescopio.

Il primo spettrometro effettua l'analisi nella regione del visibile e del vicino infrarosso tra 0.4  $\mu\text{m}$  e 1.4  $\mu\text{m}$ , il secondo nella regione dello SWIR tra 1.4  $\mu\text{m}$  e 2.5  $\mu\text{m}$ .

Hyperion è costituito dall'unità Hyperion Sensor Assembly (HSA), Hyperion Electronics Assembly (HEA) e il Crycooler Electronics Assembly (CEA). La prima unità include il telescopio e i due spettrometri, la seconda unità contiene l'interfaccia e il controllo elettronici di tutti gli strumenti e il CEA controlla le operazioni del sistema di raffreddamento criogeno.

Il sensore, caratterizzato da una risoluzione spaziale di 30 m, può avere 242 bande spettrali con una risoluzione spettrale di 11 nm ognuna. Il tempo di rivisitazione del satellite EO-1 è di 16 giorni.

| Parametri                      | Multispettrale        | Iperspettrale         |                       |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                | ALI                   | HYPERION              | LAC                   |
| Intervallo spettrale           | 0,4÷2,4 $\mu\text{m}$ | 0,4÷2,5 $\mu\text{m}$ | 0,9÷1,6 $\mu\text{m}$ |
| Risoluzione spaziale           | 30 m                  | 30 m                  | 250 m                 |
| Ampiezza <i>swath</i>          | 37 km                 | 7,5 km                | 185 km                |
| Risoluzione spettrale          | variabile             | 10 nm                 | 2÷6 nm                |
| Copertura spettrale            | discreta              | continua              | continua              |
| Risoluzione banda pancromatica | 10 m                  | -                     | -                     |
| Numero di bande                | 10                    | 242                   | 256                   |
| Risoluzione temporale          | 16 giorni             | 16 giorni             | 16 giorni             |

**Tabella 1.3** Parametri dei sensori ALI e Hyperion e dello strumento per la correzione atmosferica LAC.

Alcuni sensori iperspettrali sono stati montati su piattaforme aeree.

Tra questi, il sensore MIVIS (Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer) è formato da cinque componenti. La prima è costituita dalla testa di scansione e i quattro spettrometri, le lenti del telescopio collimatore, lo specchio di scansione rotante e i corpi neri per la calibrazione del sensore stesso. Il primo spettrometro consente l'analisi nella regione del visibile e del vicino infrarosso tra 0.433  $\mu\text{m}$  e 0.833  $\mu\text{m}$ , ha 20 canali e una risoluzione spettrale di 0.02  $\mu\text{m}$ . Il secondo spettrometro esamina la regione dell'infrarosso medio tra 1.150  $\mu\text{m}$  e 1.550  $\mu\text{m}$ , ha 8 canali e una risoluzione spettrale di 0.05  $\mu\text{m}$ . Il terzo e il quarto spettrometro analizzano rispettivamente la zona dell'infrarosso medio tra 2  $\mu\text{m}$  e 2.5  $\mu\text{m}$  con 64 canali (risoluzione spettrale 0.008  $\mu\text{m}$ ) e la regione dell'infrarosso termico tra 8.20  $\mu\text{m}$  e 12.70  $\mu\text{m}$  con 10 canali (risoluzione spettrale 0.4  $\mu\text{m}$ ). Il sensore è costituito complessivamente da 102 bande. Nella seconda componente vengono registrati i dati su un supporto magnetico (digitalizzatore) e vengono acquisiti i dati della posizione e dell'assetto del velivolo che consentono la rimozione delle distorsioni della scena ripresa. La terza

componente è un'interfaccia tra l'alimentazione dell'aereo e i sottosistemi del MIVIS. La quarta e la quinta componente sono rispettivamente l'insieme del monitor, dell'oscillatore digitale, dell'invertitore di potenza e il registratore VLDS (Very Large Data Store) che memorizza su un nastro magnetico dati per la successiva analisi, archiviazione e distribuzione.

Il sensore AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer) ha 224 bande spettrali con un'ampiezza di 10 nm ognuna [7], [8]. La regione dello spettro elettromagnetico analizzata è compresa tra 0.4  $\mu\text{m}$  a 2.5  $\mu\text{m}$ . Lo specchio del sensore ruotando effettua una scansione del terreno acquisendo dati con una risoluzione spaziale di 20 m.

Il sensore CASI-1500 (Compact Airborne Spectrographic Imager) può avere fino a 288 bande nella regione compresa tra 0.38  $\mu\text{m}$  e 1.050  $\mu\text{m}$ . Il sensore di tipo *push broom* scansiona una linea di pixel alla volta. La risoluzione geometrica dipende dalla quota di volo e può variare tra 25 cm e 1.5 m mentre la risoluzione spettrale è di 3.5 nm.

## Capitolo 2 Obiettivi della Ricerca: il Progetto PREFER

### 2.1 Il progetto PREFER

Il progetto europeo PREFER (Space-based Information Support for **P**revention and **RE**covery of Forest **F**ires Emergency in the Medite**R**anean Area) è iniziato il 1 Dicembre 2012 e ha avuto una durata di 3 anni. Il progetto è associato al programma Europeo Copernicus (<http://www.copernicus.eu/>), precedentemente conosciuto come GMES (Global Monitoring for Environment and Security). Lo scopo di Copernicus è di sviluppare servizi di informazione usando sistemi di monitoraggio basato su misure da satellite e da terra a sostegno alla gestione delle emergenze. Le informazioni sono tempestive e gli utenti abilitati possono accedervi gratuitamente.

Possono essere considerate sei aree tematiche principali:

- Land
- Marine
- Atmosphere
- Climate Change
- Emergency Management
- Security

I servizi rilevanti per il progetto PREFER sono Land e Emergency Management. Il servizio Land Monitoring (GIO-land) fornisce periodicamente prodotti riguardanti la superficie terrestre a varie scale.

Il servizio Emergency Management (GIO-EMS), operativo dal 2012, fornisce un servizio *rush-mode* e un servizio *non rush-mode*. Il servizio *rush-mode* si riferisce ai prodotti, ottenuti da misure satellitari, forniti tempestivamente e su richiesta subito dopo l'emergenza: le mappe sono ottenute da dati satellitari, altri dati geospaziali utili per analizzare situazioni critiche sono fornite da immagini aeree, misure in situ e dati da databases. Le mappe vengono rese disponibili in 24 ore o meno, dopo l'acquisizione dei dati satellitari. Il servizio *non-rush-mode* fornisce, su richiesta, informazioni geospaziali a sostegno delle attività di gestione dell'emergenza ma vengono consegnate con periodi più lunghi rispetto ai prodotti *rush-mode*. Questo servizio è rivolto alle fasi

di prevenzione, preparazione, riduzione del rischio di catastrofi e alla fase di recupero. Esso fornisce mappe prima e dopo l'incendio.

Lo scopo del progetto PREFER, in particolare, è di creare un servizio che genera prodotti cartografici basati su dati acquisiti da satelliti di EO (Earth Observation) per sostenere le fasi di prevenzione, recupero e ricostruzione nel contesto della gestione delle emergenze collegate agli incendi boschivi in Europa. Gli incendi boschivi hanno un impatto rilevante sugli ecosistemi (desertificazione e erosione del suolo), sull'economia locale e, in situazioni estreme, possono esserci anche perdite di vite umane.

Le attività del progetto si sono concentrate sulle regioni mediterranee dell' Europa, nei cinque paesi più colpiti dagli incendi: Grecia, Francia, Italia, Portogallo e Spagna. Questi paesi presentano la più alta percentuale di aree con foreste. L'alta incidenza degli incendi è dovuta alla coincidenza della stagione più secca con la stagione più calda, alla presenza delle condizioni estreme di tempo secco e umido durante l'anno, alla coesistenza di insediamenti urbani, reti di infrastrutture e aree vegetate.

In Europa gli incendi boschivi sono una seria minaccia e quindi avere informazioni affidabili è molto importante per affrontare meglio questo evento.

Il progetto PREFER parte dalla idea che la prevenzione costituisce ancora la strategia più conveniente per tentare di ridurre l'incidenza di tali fenomeni. Il progetto vuole dare un contributo per la protezione delle aree boschive del Sud Europa e in particolare vuole fornire informazioni tempestive, basate sull'utilizzo di tutti i sensori satellitari disponibili, in supporto alle attività di prevenzione degli incendi e di recupero dopo l'evento.

PREFER, basandosi sul confronto con gli Utenti, ha studiato anche possibili applicazioni dall'utilizzo di nuovi sensori satellitari disponibili nei prossimi anni cercando anche di contribuire alla definizione di requisiti per le nuove missioni di Osservazione della Terra (PRISMA, ENMAP e Eumetsat Post-EPS) [10].

Il consorzio PREFER è composto da 8 partners provenienti dai 5 paesi più colpiti dagli incendi, tra questi sono compresi istituti di ricerca e industrie (fig. 2.1).

| Consortium partners                                                                |                                            |                    | Country  |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------|----------|
|   | Università Degli Studi di Roma La Sapienza | DIAEE              | Italy    |
|   | CGS SPA Compagnia Generale per lo Spazio   | GCS                | Italy    |
|   | GMV Aerospace and Defence S.A.U.           | GMV                | Spain    |
|   | University of Strasbourg                   | UNISTRA/<br>SERTIT | France   |
|   | Intelligence for Environment & Security    | IESC               | Italy    |
|   | Center for Security Studies                | KEMEA              | Greece   |
|   | SATWAYS Ltd, Satcom & Telematics           | SATW               | Greece   |
|  | University of Coimbra                      | UCO                | Portugal |

**Figura 2.1** Partners del Consorzio PREFER.

Il progetto fornisce due servizi:

- Information Support to Preparedness/Prevention Phase Service (ISP)
- Information Support to Recovery/Reconstruction Phase Service (ISR)

Ciascuno dei servizi fornisce informazioni, basate sull'elaborazione di misure satellitari, e prodotti cartografici che si concentrano su un particolare aspetto del ciclo dell'incendio (la prevenzione e il recupero/ripristino post-evento) [11].

Nel progetto vengono considerati i seguenti temi:

#### SYSTEMATIC FUEL ESTIMATES:

dopo l'innesco, l'incendio è governato da parametri meteorologici (soprattutto il vento), copertura della vegetazione (quantità, struttura e densità), stato della vegetazione (contenuto di umidità), topografia e biomassa morta (rami, aghi, fogliame ecc). In particolare, le caratteristiche fisiche delle foreste come il carico (peso per unità di area), la dimensione (diametro delle particelle) e la densità di massa (peso per unità di volume) della biomassa viva e morta, contribuiscono alla diffusione,

all'intensità e alla severità dell'incendio. Quindi stime affidabili e tempestive sulla vegetazione che può bruciare sono rilevanti per la fase di preparazione e prevenzione.

#### SYSTEMATIC BURN SCAR MAPPING:

PREFER porta dei miglioramenti nella generazione delle mappe delle aree bruciate sia in termini di soglia dell'area (10 ha per il Fire Damage assessment) sia in termini di risoluzione spaziale (30-50m per il Fire Damage assessment).

#### SYSTEMATIC ANALYSIS OF FIRE EFFECTS ON SLOPE STABILITY:

PREFER evidenzia il legame tra Fire Hazard e Slope Instability Hazard.

L'acqua delle piogge normalmente assorbita dal terreno può correre velocemente sugli strati rocciosi del sottosuolo una volta che i terreni e la vegetazione sono stati bruciati. Può spostare grandi quantità di sabbia, sedimenti, rocce e resti di vegetazione provocando gravi danni in canali sotterranei, nelle aree urbane, alle strade e ai ponti.

L'erosione nelle aree bruciate è legata a molti fattori come la severità dell'incendio, la pendenza del terreno, la dimensione dei bacini di drenaggio danneggiati.

#### SYSTEMATIC VEGETATION RECOVERY ANALYSIS:

Il monitoraggio e la valutazione quantitativa della ricrescita della vegetazione dopo l'incendio sono essenziali per due motivi:

- Il carico di combustibile che deriva dal ripristino dell'ecosistema bruciato e le variazioni del rischio incendio ad esso correlato
- La riduzione del rischio instabilità dei pendii, associata alla ricrescita di una significativa copertura di vegetazione nelle aree soggette all'erosione. L'analisi quantitativa della ricrescita della vegetazione è finalizzata, inoltre, al monitoraggio post-evento del ripristino degli habitat della fauna selvatica

## 2.2 I prodotti PREFER

I prodotti sono basati sull'analisi di dati ottici e SAR caratterizzati da una risoluzione spaziale che varia da 1 m a 250 m, risoluzione temporale da una volta al giorno a due volte al mese [2], [3].

I prodotti PREFER sono elencati nella seguente tabella:

List of products developed in the framework of the PREFER project.

| <b>Service:</b>                               | <b>Information</b> | <b>Support</b> | <b>to</b> | <b>Service:</b>                       | <b>Information</b> | <b>Support</b> | <b>to</b> |
|-----------------------------------------------|--------------------|----------------|-----------|---------------------------------------|--------------------|----------------|-----------|
| <b>Preparedness/Prevention Phase</b>          |                    |                |           | <b>Recovery/Reconstruction Phase</b>  |                    |                |           |
| Seasonal Fuel Map                             |                    |                |           | Post-fire Vegetation Recovery Map     |                    |                |           |
| Seasonal Fire Hazard Map                      |                    |                |           | Burn Scar map HR Optical and SAR      |                    |                |           |
| Seasonal Vulnerability & Economical Value Map |                    |                |           | Burn Scar Map VHR                     |                    |                |           |
| Seasonal Risk Map                             |                    |                |           | Damage Severity Map                   |                    |                |           |
| Daily Fire Hazard Map                         |                    |                |           | 3D Fire Damage Assessment Maps: Soil  |                    |                |           |
| Fuel Reduction Map                            |                    |                |           | Erosion Susceptibility map and Burned |                    |                |           |
|                                               |                    |                |           | Biomass map.                          |                    |                |           |
| Prescribed Fires Map                          |                    |                |           |                                       |                    |                |           |

**Tabella 2.1** Prodotti sviluppati nell'ambito del progetto PREFER.

### ***Information Support to Preparedness/Prevention Phase***

**Yearly fuel map:** è una mappa delle aree vegetate che indica la presenza di materia che può bruciare.

**Daily Fire Hazard Index:** i dati satellitari a media risoluzione spaziale vengono usati per valutare lo stato della vegetazione e stimare il contenuto d'acqua. Queste informazioni sono combinate con i dati meteorologici del giorno in cui si effettua l'analisi e con quelli del giorno seguente per valutare la predisposizione di una zona vegetata a bruciare o a sostenere un incendio.

**Seasonal Fire Hazard Index:** l'indice consente di sviluppare mappe che mostrano il rischio di incendio su una scala a lungo termine (due settimane o un mese) basate sull'osservazione della distribuzione reale degli incendi nei giorni precedenti e la media delle mappe del Daily Fire Hazard Index dei giorni precedenti. Questo indice consente di introdurre il 'fattore umano' nella generazione degli incendi e le condizioni meteorologiche medie della stagione presente rispetto ai 10 anni precedenti.

**Seasonal Vulnerability and Economic Value Maps:** la mappa esprime la "vulnerabilità" in unità misurabili o in indici e consente di stimare il rischio di incendio. Vengono creati tre indici (Esposizione, Sensibilità, Capacità di reazione) che successivamente vengono integrati in una

mappa di vulnerabilità. L'aspetto economico, per eventuali perdite, viene descritto in una seconda mappa.

**Seasonal Risk Map:** la mappa esprime, con cinque livelli differenti, il livello di rischio, durante un incendio, che può causare perdite. La mappa viene ottenuta combinando il Seasonal Fire Hazard Index e la mappa di vulnerabilità.

**Fuel Reduction Map:** vengono usati dati topografici e ambientali relativi ad aree bruciate per studiare la probabilità di propagazione dell'incendio. Queste informazioni indicano dove il pericolo dell'incendio può essere ridotto rimuovendo in modo opportuno la vegetazione ivi presente.

**Prescribed Fire Map:** è una mappa spaziale e temporale delle aree dove sarebbe utile e appropriato applicare la procedura di riduzione del carico combustibile.

### ***Information Support to Recovery/Reconstruction Phase***

**Burn Scar Map HR Optical e SAR:** è una mappa che mostra il perimetro delle aree bruciate con scala 1/25000-1/50000 ed è ottenuta attraverso l'analisi multi-temporale e multi-spettrale di dati ottici e SAR ad alta risoluzione. Vengono considerati i perimetri delle aree più grandi di un ettaro danneggiate dall'incendio durante un intervallo di tempo pari a quello tra le date di acquisizione delle due immagini satellitari coinvolte nell'analisi multitemporale. La mappatura degli incendi viene eseguita esclusivamente su alcune classi di copertura superficiale.

**Burn Scar Map VHR Optical:** è una mappa che mostra il perimetro delle aree bruciate con scala 1/2000-1/4000 ed è ottenuta attraverso l'analisi multispettrale di dati ottici EO ad altissima risoluzione. Le aree considerate sono superiori a 0.4 ettari, non devono essere in ombra più del 25% e devono essere caratterizzate da particolari classi di copertura superficiale prima dell'incendio.

**Post-Fire Vegetation Recovery:** è un prodotto che mostra la presenza di vegetazione su aree precedentemente bruciate. La rigenerazione della vegetazione, nel periodo compreso tra le date di acquisizione delle immagini satellitari iniziale e finale, è rappresentata assegnando "0" o "1" al pixel, indicando se c'è stata o no la ricrescita della vegetazione. L'algoritmo è basato sull'analisi multi-temporale del comportamento spettrale nei canali NIR e SWIR di due immagini ottiche ad alta risoluzione

**Damage Severity Map:** le mappe di severità del danno forniscono informazioni sugli effetti dell'incendio sulla vegetazione. Il prodotto è confrontabile da regione a regione e nel tempo e consente di scegliere le strategie di recupero. I sei livelli del danno permettono un'analisi immediata dello scenario dopo l'evento.

*No Damage*: l'area non mostra differenze dalle condizioni pre-evento

*Very Low Damage e Low Damage*: sono presenti piccoli cambiamenti nella vegetazione in termini di copertura e mortalità.

*Moderate Damage*: effetti sulla vegetazione classificabili come piccoli e grandi cambiamenti.

*High Damage e Very High Damage*: la vegetazione è completamente morta.

L'algoritmo per la stima del danno è basato sul calcolo degli indici DNBR (Differential Normalized Burn Ratio), BSI (Burn Severity Index) e DSI (Damage Severity Index). Tutti gli indici vengono ottenuti usando due immagini acquisite dal sensore OLI di Landsat8, una prima e una dopo l'evento. In particolare DSI è un indice ottimizzato per la valutazione del danno.

**3D Fire Damage Assessment Map**: vengono generate mappe 2D e 3D dell'impatto dell'incendio a partire dai prodotti come Burn Scar Map e Vegetation Recovery e un modello digitale di elevazione (DEM) ottenuto da immagini ottiche e radar. Immagini ottiche ad alta risoluzione e dati ancillari generano mappe pre-evento che evidenziano aree con foreste.

La vulnerabilità per l'erosione del suolo viene descritta da indicatori basati su modelli di erosione del suolo.

Il progetto prevede la partecipazione di utenti finali provenienti da diversi paesi (Portogallo, Spagna, Italia, Francia e Grecia) che sono stati invitati, durante le fasi del progetto, a testare i prodotti PREFER e fornire indicazioni per definire nuovi requisiti. Tra gli utenti sono presenti anche Vigili del Fuoco e Protezione Civile.

I requisiti dei prodotti devono ovviamente prendere in considerazione i quadri giuridici esistenti nei paesi degli utenti.

I prodotti sono complementari a quelli forniti da Copernicus Land, Copernicus Emergency Services e da EC JRC EFFIS System e sono resi disponibili attraverso un'infrastruttura, basata su OGC/INSPIRE, che consente facilmente di accedere alle informazioni. Inoltre la procedura per generare i prodotti può essere applicata in diverse regioni del Mediterraneo.

## 2.3 Gli utenti

La partecipazione di utenti finali è di fondamentale importanza per il raggiungimento degli obiettivi del progetto PREFER: gli utenti hanno contribuito alla definizione delle aree di interesse, alla definizione dei requisiti per adeguare i prodotti e i servizi a quello di cui hanno bisogno.

Hanno fornito dati in situ per la fase di dimostrazione e validazione, hanno partecipato attivamente nelle sessioni di formazione e nei workshop fornendo una valutazione critica dei prodotti e dei servizi.

| Country  | User name                                                                                  |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| France   | Office National des Forêts, Direction Generale Corse (ONF)                                 |
|          | Service Départemental d'Incendie et de Secours de la Haute Corse (SDIS)                    |
| Greece   | General Secretariat for Civil Protection                                                   |
|          | Aristotle University of Thessaloniki                                                       |
|          | Balkan Environment Center                                                                  |
|          | National Centre for Scientific Research Demokritos (NCSRD)                                 |
| Italy    | Corpo Forestale e di Vigilanza Ambientale, Sardinia (CFVA)                                 |
|          | Centro Nazionale di Meteorologia e Climatologia Aeronautica                                |
|          | Fire Brigades                                                                              |
| Portugal | National Authority of Civil Protection (ANPC)                                              |
|          | National Republican Guard, Service of Protection of Nature and the Environment (GNR-SEPNA) |
|          | Institute for Nature Conservation and Forests (ICNF)                                       |
| Spain    | Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía                                              |

**Figura 2.2** Utenti del progetto PRFER.

## 2.4 Requisiti di osservazione per PREFER

La selezione di alcuni parametri, in una missione di telerilevamento, dipende dall'analisi che si sta effettuando. Vengono quindi considerate:

- 1) Risoluzione spaziale - la dimensione del pixel dell'immagine satellitare che copre la superficie della terra.
- 2) Risoluzione temporale - la frequenza di rivisitazione del sensore satellitare per una data regione
- 3) Risoluzione spettrale - numero delle bande spettrali nelle quali il sensore può acquisire misure di radianza riflessa e la posizione delle bande nello spettro elettromagnetico con la loro ampiezza
- 4) Bande spettrali – frequenze specifiche nello spettro elettromagnetico

- 5) Risoluzione radiometrica – sensibilità nel percepire e codificare in segnale le differenze di flusso radiante riflesso o emesso dalle superfici analizzate. La risoluzione radiometrica rappresenta il numero di livelli in cui può essere scomposto il segnale originario.
- 6) Larghezza dello Swath – la striscia di superficie terrestre da cui sono acquisiti dati dal satellite.
- 7) Data di lancio e disponibilità dei dati

Le bande spettrali utilizzate per le fasi *fire-preparedness* e *fire-recovery* sono:

**Blu:** mappe dell'acqua costiera, mappe suolo e piante

**Verde:** mostra la riflettanza nel verde della vegetazione sana. È utile per distinguere i tipi di pianta, determinare lo stato di salute della vegetazione e identificare elementi creati dall'uomo.

**Rosso:** è utile per distinguere i tipi di vegetazione, per individuare i confini del tipo di terreno e i confini geologici.

**Vicino infrarosso (NIR):** è particolarmente sensibile alla quantità di biomassa di origine vegetale presente in una scena, è utile per distinguere le aree vegetate dal suolo e delineare i corpi d'acqua.

**Infrarosso a onda corta (SWIR):** è sensibile alla turgidezza (contenuto di acqua nelle piante), è utile negli studi della siccità e negli studi del vigore della pianta.

**Infrarosso termico:** misura la quantità di flusso radiante nell'infrarosso (calore) emesso da una superficie e quindi è utile per valutare l'evapotraspirazione, analizzare lo stress della vegetazione e misurare l'umidità del suolo.

**Figura 2.3** Bande Spettrali per la generazione dei prodotti.

L'uso dei sensori attivi può rivelarsi utile quando l'area di studio è frequentemente coperta dalle nuvole oppure sia necessaria la descrizione della struttura della vegetazione (SAR e LIDAR).

Nell'ambito del programma Copernicus, l'Agenzie Spaziale Europea ha stabilito un insieme di classi di risoluzione spaziale che sono state usate per classificare i sensori operativi ritenuti utili per il progetto PREFER:

|                             |                            |
|-----------------------------|----------------------------|
| HR1 High Resolution 1       | 4 m < risoluzione <= 10 m  |
| HR2 High Resolution 2       | 10 m < risoluzione <= 30 m |
| VHR1 Very High Resolution 1 | risoluzione <= 1 m         |
| VHR2 Very High Resolution 2 | 1 m < risoluzione <= 4 m   |

**Tabella 2.2** Classi di risoluzione spaziale per la classificazione dei sensori utilizzati nel progetto PREFER.

## 2.5 Le aree di interesse (AOI)

Le regioni analizzate nel progetto PREFER corrispondono ai territori Europei situati nell'area Mediterranea dove l'evento incendio è particolarmente rilevante [1]. Il progetto prevede che i prodotti possano essere ottenuti da dati satellitari di queste regioni. Per la fase di test e dimostrazione sono state definite 5 aree, nel Sud-Europa, considerando anche l'interesse degli utenti, la disponibilità dei dati richiesti per ottenere i prodotti e i servizi, le condizioni fisiche e sociali di queste regioni.

Le aree di interesse sono:

PT – Regione Minho, Portogallo

ES – Los Alcornocales, Andalusia, Spagna

FR – Corsica – Francia

IT – SW Sardegna, Italia

GR – Messinia, Peloponneso, Grecia



**Figura 2.4** Aree di interesse nell'ambito del progetto REFER.

## Regione di Minho, Portogallo



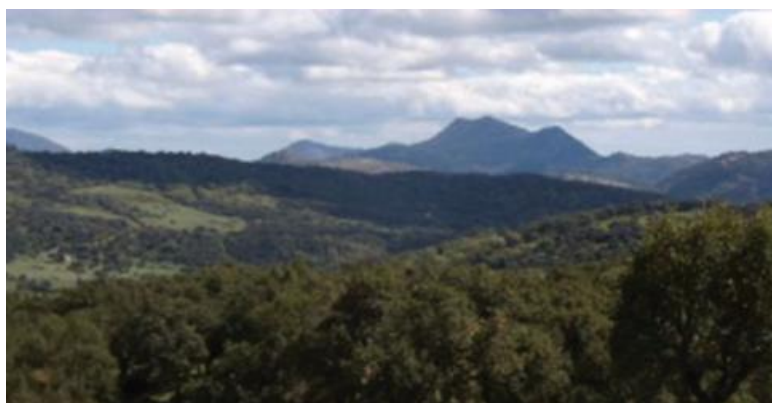
**Figura 2.5** Prodotti PREFER generati nella regione di Minho, Portogallo.

La regione di Minho comprende 24 comuni e ha un'area di 4700 km<sup>2</sup>. La topografia è irregolare e l'altitudine può variare da 0 a 1400m. La regione è caratterizzata da molte precipitazioni, in particolare nelle aree influenzate dall'Oceano Atlantico, che determinano una grande quantità di biomassa.

Sono presenti specie come Alvarinho Oaks (*Quercus robur L.*), Sicomoro (*Acer pseudoplatanus L.*), Pino Marittimo (*Pinus pinaster spp.*) e Eucalipto (*Eucalyptus globulus*). Il lato orientale della regione è occupato dall'area protetta Peneda-Gers, la cui importanza è riconosciuta a livello internazionale.

L'elevata presenza di biomassa, le condizioni topografiche irregolari e l'abbandono dell'area rurale dovuto ai recenti cambiamenti demografici e sociali (invecchiamento della popolazione e la migrazione verso i centri urbani) favoriscono l'insorgere e la propagazione degli incendi boschivi; l'alta incidenza degli incendi, in particolare nei comuni interni è dovuta anche alla presenza di attività umane come la caccia e il pascolo, alle differenti strutture di accessibilità e alla disponibilità di risorse di prevenzione e antincendio.

## Los Alcornocales, Andalusia, Spagna



### Prodotti ottenuti

- Fuel map
- Daily Fire Hazard map
- Seasonal Fire Hazard map
- Vulnerability map
- Fire Risk map
- Fuel Reduction map
- Prescribed Fire map

**Figura 2.6** Prodotti PREFER generati in Andalusia, Spagna.

L'area si estende su 523 km<sup>2</sup> e comprende due comuni (Cádiz e Málaga). Il parco naturale di Alcornocales è un'area protetta e la vegetazione è costituita da foreste mediterranee, con una significativa presenza di quercia da sughero (*Quercus suber*); sono presenti inoltre *Quercus canariensis*, *Pinus pinea*, *Pinus pinaster* e *Eucalyptus*. L'altitudine in questa regione varia tra 0 e 500 m.

Il parco è colpito da incendi e richiede un particolare impegno nella prevenzione visto il suo valore ecologico. Gli incendi nascono tipicamente ai confini con le aree urbane fuori dal parco e in particolare nella stagione estiva. Il parco di Alcornocales, in questa stagione, viene considerato come “very high fire risk area”.

## Corsica, Francia



### Prodotti ottenuti

- Vulnerability map
- 3D Fire Damage Assessment map
- Burn Scar maps (HR, VHR, SAR)
- Damage Severity map
- Post-fire Vegetation Recovery map

**Figura 2.7** Prodotti PREFER generati in Corsica, Francia.

La Corsica, con un'area di 8680 km<sup>2</sup>, è composta da due dipartimenti: Corse-du-Sud e Haute-Corse. L'altitudine varia tra 0 e 2706 m. La vegetazione è prevalentemente costituita da boscaglia in Haute-Corse e foreste (pino, faggio, castagno, quercia, ...) in Corse-du-Sud. Questo territorio è classificato come un parco naturale regionale francese per i suoi paesaggi eccezionali, habitat naturali e patrimonio culturale.

In media, più di 500 incendi ogni anno coinvolgono più di 1000 ha e 360 comuni sono esposti al rischio dell'incendio boschivo, quindi la prevenzione e la lotta contro questo evento critico è una sfida importante sia per proteggere la popolazione sia per preservare la biodiversità.

## Sardegna, Italia



### Prodotti ottenuti

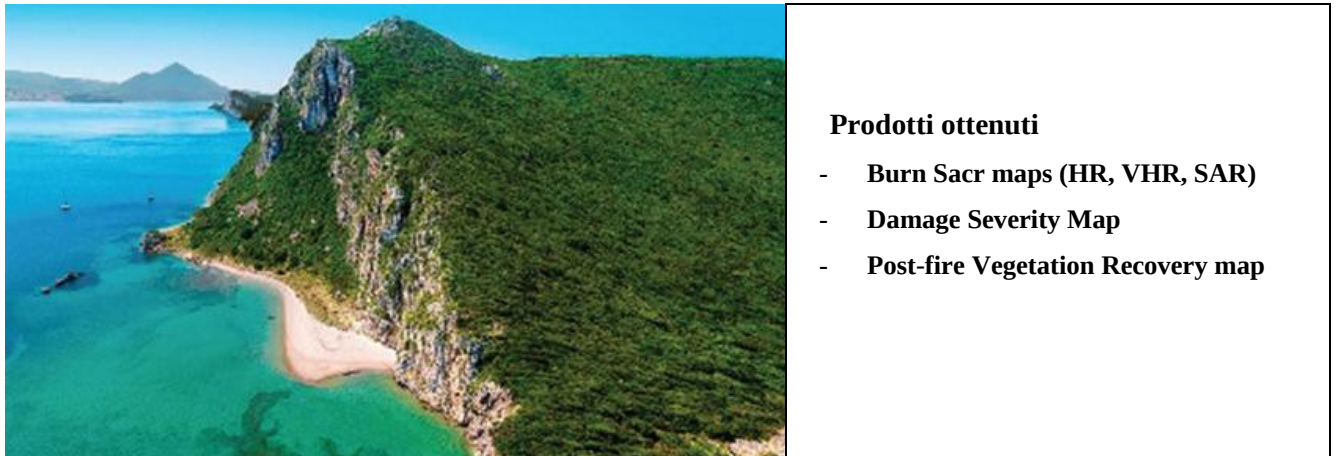
- Fuel map
- Daily Fire Hazard map
- Seasonal Fire Hazard map
- Vulnerability map
- Fire Risk map
- Fuel Reduction map
- Prescribed Fire map
- Burn Scar maps (HR, VHR, SAR)
- Damage Severity Map
- Post-fire Vegetation Recovery map

**Figura 2.8** Prodotti PREFER generati in Sardegna, Italia.

L'area test corrisponde all'area Sud-Ovest della Sardegna e si estende su una superficie di 3000 km<sup>2</sup>. L'area è importante per l'agricoltura e per l'aspetto ecologico: ospita molte aree protette (aree Natura2000, parchi) e la riserva di Monte Arcosu con una delle più grandi foreste di leccio della regione Mediterranea. La vegetazione è caratterizzata da macchia Mediterranea e boschi di querce (*Quercus ilex* e *Quercus suber*). L'altitudine nell'area oscilla tra 0 e 1200 m.

La Sardegna è una delle regioni italiane più colpite dagli incendi: nel 2013 si persero 10588 ha. L'area di interesse comprende Carbonia Iglesias, parti delle province di Cagliari e Medio Campidano, include aree protette (la foresta di Monte Arcosu), aree di interesse e parchi regionali (il Sulcis, monte Arcuentu, monte Linas Marganai).

## Messenia, Peloponneso, Grecia



**Figura 2.9** Prodotti PREFER generati nella regione Messinia, Grecia.

L'area di interesse è situata nella parte Sud-Ovest del Peloponneso e si estende su 5 unità amministrative della regione Messenia, comprendendo 29 comuni e centinaia di piccoli villaggi (1650 km<sup>2</sup>). L'area include la laguna di Gialova circondata dalla baia naturale di Voidokilia. La vegetazione naturale è presente dal livello del mare fino a 1200 m sulla catena montuosa del Taigeto a Est.

La flora è ricca e diversificata e include l'abete greco (*Abies cephalonica*) e il pino nero (*Pinus nigra*) nei boschi della catena del Taigeto, il pino d'Aleppo (*Pinus halepensis*) nelle foreste sulla costa intorno all'estuario del Neda, la macchia Mediterranea, arbusti come il Lentisco (*Pistacia lentiscus*), il corbezzolo (*Arbutus unedo*), arbusti spinosi (*Calicotome villosa*), querce, alberi di ginepro e piante di Posidonia.

Nell'area la piovosità è più alta rispetto alle zone centrali e orientali della Grecia e provoca una forte crescita della biomassa.

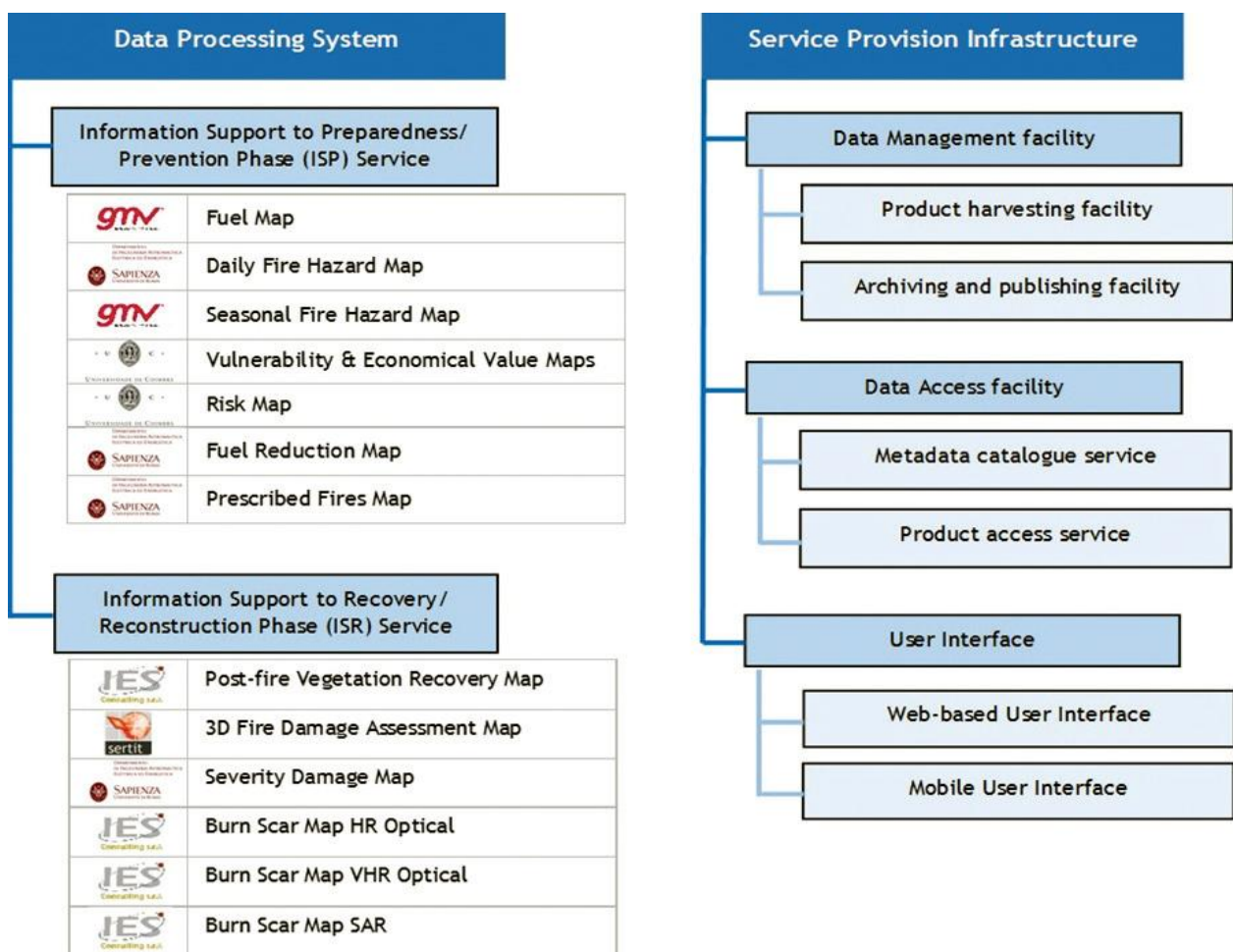
Gli incendi, favoriti da estati molto secche, si verificano di solito a basse e medie altitudini e la maggior parte sono legati ad attività umane, pascolo e cambiamenti dell'uso del terreno. Possono però verificarsi anche ad alte altitudini: durante il grosso incendio del 2007 sono state perse foreste di abeti e pini sulla catena del Taigeto.

## 2.6 Infrastruttura per il Servizio

L'infrastruttura per il servizio PREFER è un sistema informatico costituito da due sottosistemi principali:

- 1) il sistema di elaborazione dati: genera i prodotti PREFER
- 2) l'infrastruttura che fornisce il servizio: consente un accesso Web alle informazioni basate sull'Osservazione della Terra

I principali elementi dei sottosistemi sono rappresentati in fig. 2.10



**Figura 2.10** Infrastruttura per il servizio PREFER.

### Data Processing System:

è composto da un modulo per ogni prodotto PREFER. Ogni prodotto è originariamente elaborato da un partner presso il proprio laboratorio e successivamente trasferito ad un server comune.

## **Service Provision Infrastructure:**

è composta da tre elementi principali

### *Data management facility:*

questo modulo gestisce i nuovi prodotti disponibili nella cartella input. Il Product Harvesting Facility controlla regolarmente la disponibilità di nuovi prodotti PREFER (generati dal sistema di processamento dei dati) nella cartella input, verifica la validità dei file e attiva il modulo di archiviazione e pubblicazione.

### *Data Access Facility:*

questo modulo effettua l'archiviazione dei prodotti PREFER e la pubblicazione dei servizi OGC. Il modulo Product Access Services SW contiene tutti i servizi che forniscono i prodotti PREFER agli utenti, in particolare funzionalità come il download, ottenendo prodotti dall'archivio, e la navigazione attraverso i servizi OGC (WMS,WFS e WCS). Include anche funzionalità che consentono il download del format dei prodotti.

### *User interface:*

questo modulo è responsabile dell'interazione dell'infrastruttura del servizio PREFER con gli utenti: fornisce l'accesso ai prodotti archiviati e pubblicati e al catalogo dei metadati.

Sono state realizzate due tipi di interfaccia utente

- interfaccia utente Web
- interfaccia utente Mobile

La prima è composta principalmente da una applicazione Web e sono state utilizzate tecnologie come HTML/CSS/AJAX. L'applicazione Web è eseguita in ambiente Application Web Server che implementa protocolli standard HTTP/HTTPS ed è visibile su Internet.

L'interfaccia utente Mobile è disponibile come applicazione (App) per le principali piattaforme per dispositivi mobili.

Entrambi i tipi di interfaccia utente richiedono l'autenticazione dell'utente e danno la possibilità di navigare tra i prodotti nel catalogo metadati, attraverso un Catalogue Connector che crea richieste standard CS-W sulla base della selezione degli utenti.

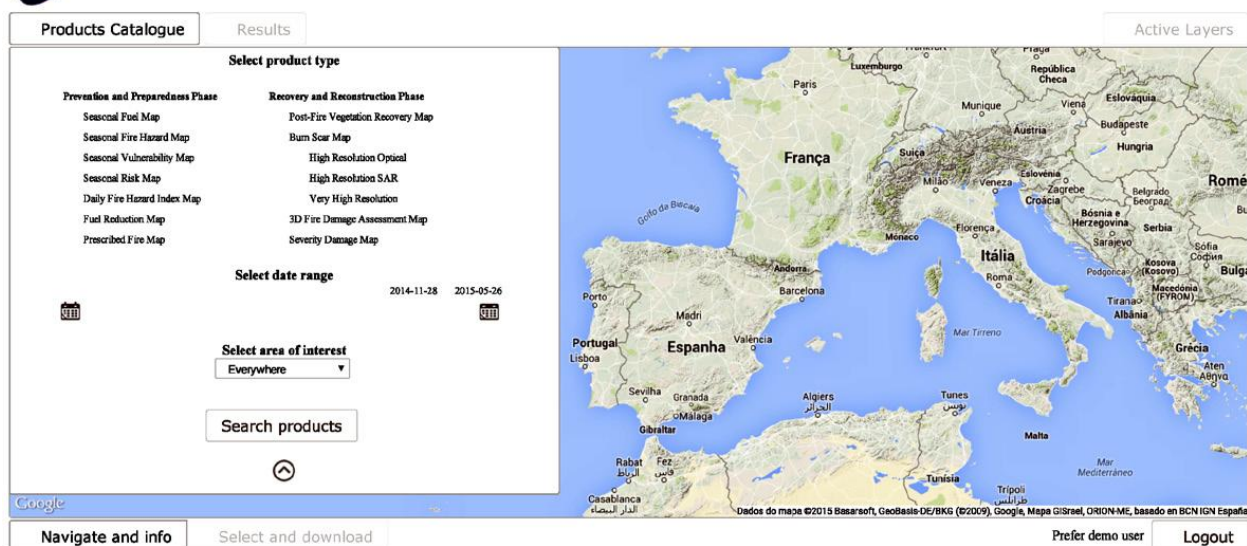


Figura 2.11 Interfaccia utente Web: scelta del prodotto.

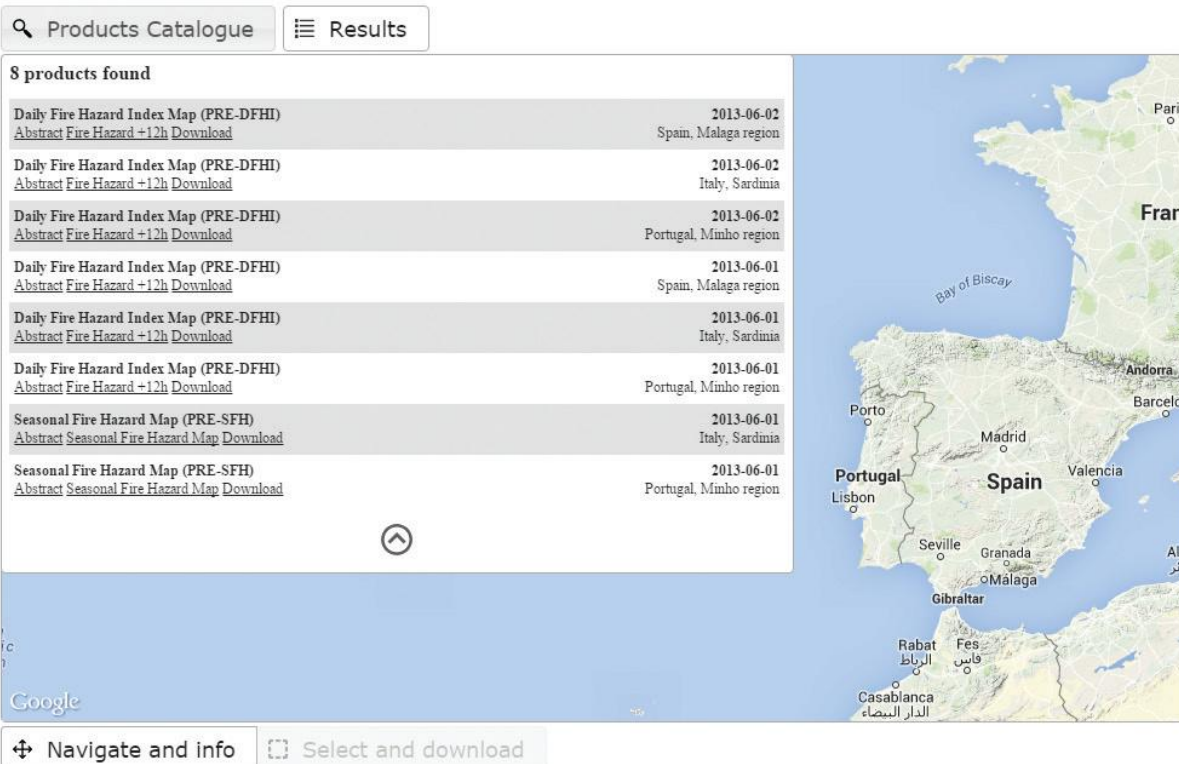
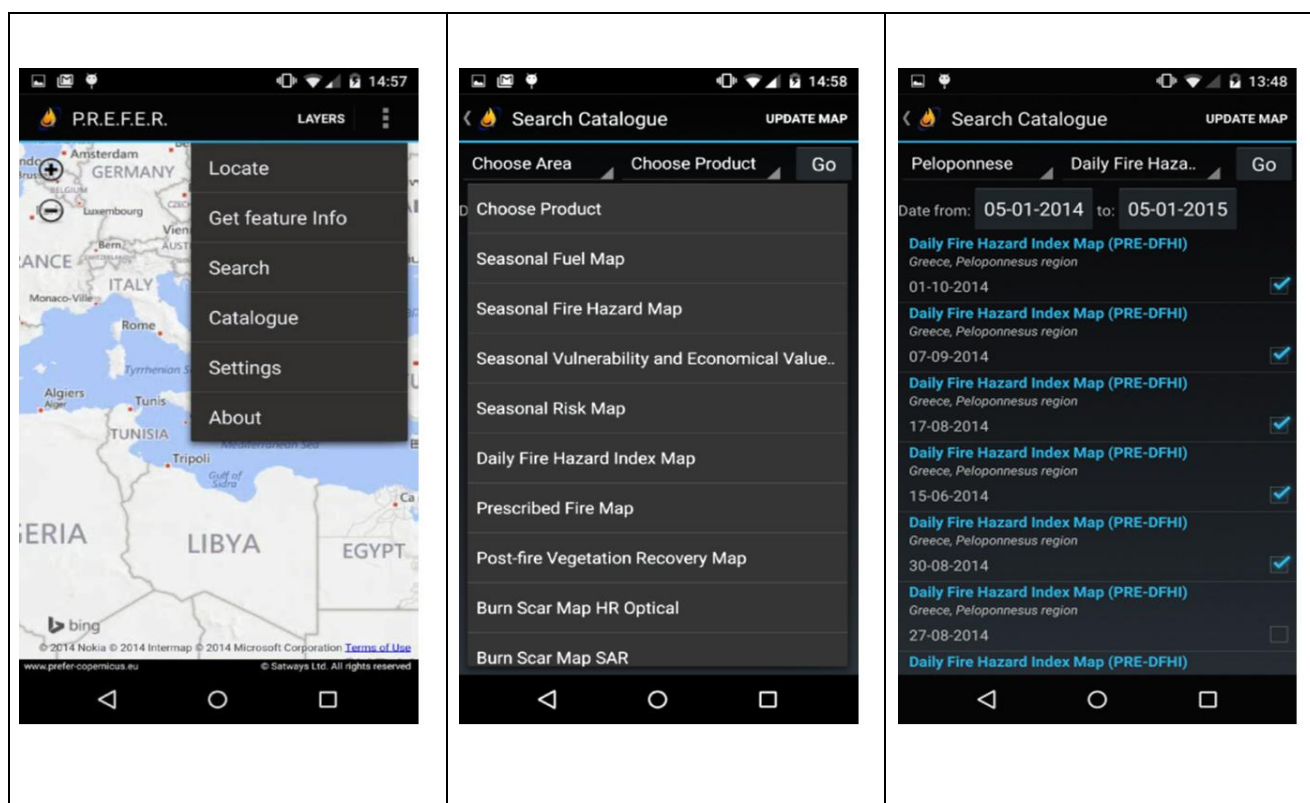
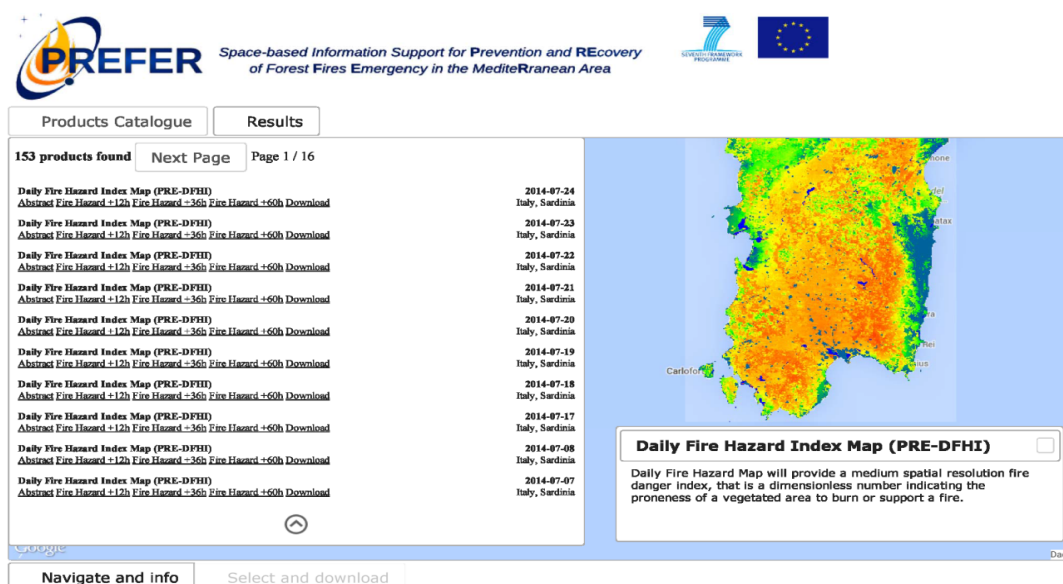


Figura 2.12 Interfaccia utente Web: scelta dell'area di interesse e del periodo.

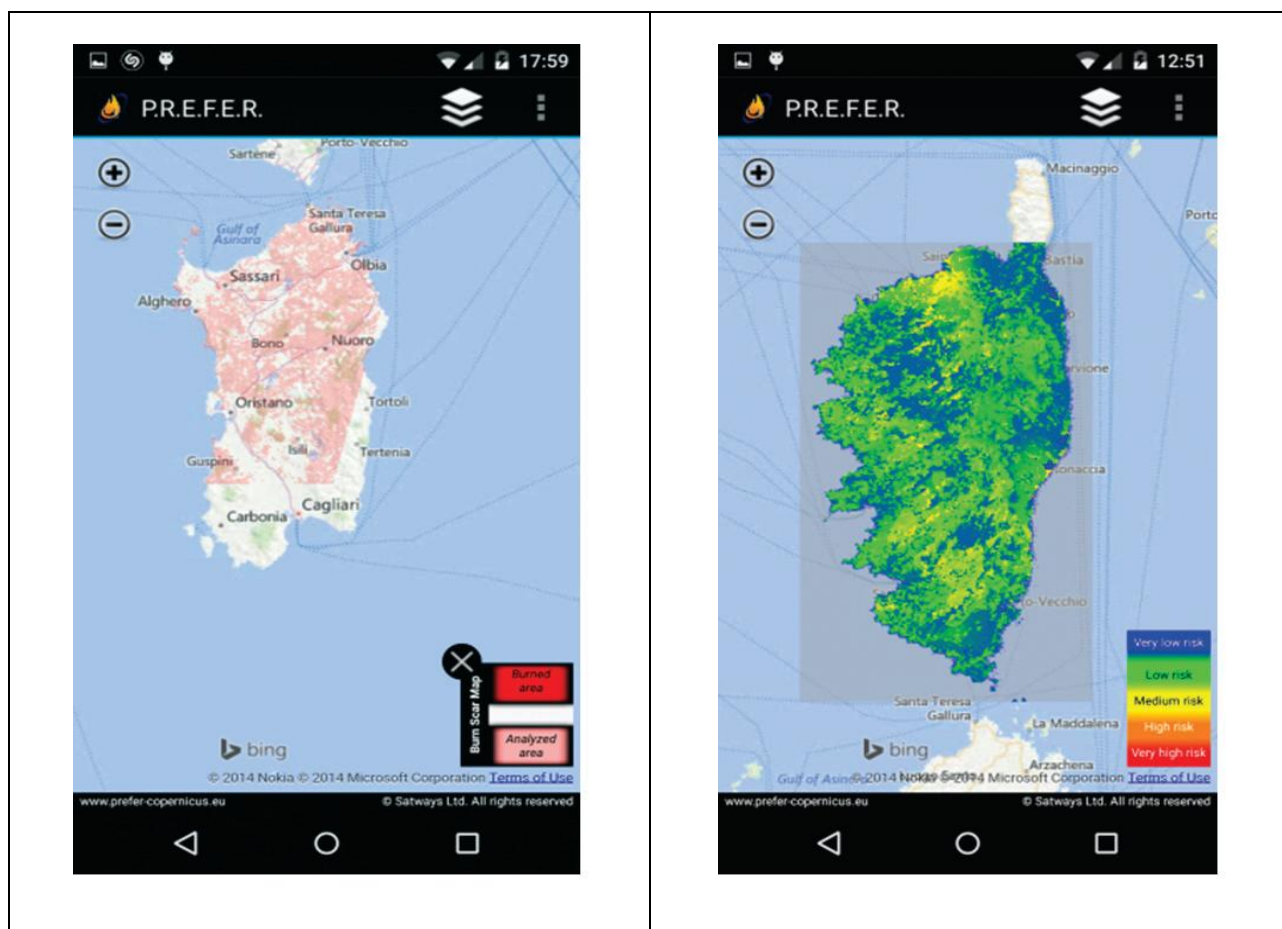


**Figura 2.13** Interfaccia utente Mobile: scelta del prodotto, dell'area di interesse e del periodo.

I prodotti vengono mostrati su una mappa interattiva che consente l'ingrandimento, il trascinamento e la sovrapposizione di layer.



**Figura 2.14** Interfaccia utente Mobile: scelta del periodo e visualizzazione del prodotto Daily Fire Hazard Index Map.



**Figura 2.15** Interfaccia utente Mobile: mappa interattiva e visualizzazione del prodotto e della legenda.

## 2.7 Damage Severity Map

Il Dipartimento di Ingegneria Astronautica Elettrica ed Energetica (DIAEE) dell'Università La Sapienza ha coordinato il progetto PREFER e il suo contributo ha portato alla generazione dei prodotti Daily Fire Hazard Map, Fuel Reduction Map, Prescribed Fire Map e Damage Severity Map.

Il lavoro svolto per la tesi ha riguardato lo sviluppo del *Damage Sverity Map* che rientra nel servizio *Information Support to Recovery/Reconstruction Phase*.

Questo prodotto fornisce stime di severità del danno nelle aree colpite dall'incendio. Le informazioni sullo stato della vegetazione dopo l'evento vengono quindi utilizzate per la fase di recuro e ripristino.

Sono stati effettuati studi sulla possibilità di usare immagini satellitari per studiare l'evento critico e in particolare sono state usate immagini acquisite da sensori multispettrali ad alta risoluzione come Landsat TM/, ETM+ e OLI.

Indici calcolati da dati satellitari prima e dopo l'evento, hanno consentito di valutare l'impatto dell'incendio sulla vegetazione distinguendo, il più accuratamente possibile, diversi livelli di danno. Nell'ambito del progetto PREFER, l'approccio per monitorare l'impatto dell'evento è composto da quattro elementi interconnessi:

a. La definizione di severità

La severità dell'incendio è definita come il grado di cambiamento ambientale causato dall'incendio. L'intensità dell'incendio determina la severità del danno, ma la relazione non è necessariamente costante infatti diversi sistemi ecologici mostrano vari gradi di sensibilità al fuoco. La severità è la misura del gradiente di cambiamento.

b. L'algoritmo per la stima della severità dell'incendio

L'algoritmo è basato sui risultati del progetto FIREMON [12]. La valutazione della severità del danno deriva dall'identificazione della relazione tra DNBR (Delta Normalized Burn Ratio) e stime visive in situ del danno (indice CBI – Composite Burn Index).

Successivamente, dalla relazione sono state definite le soglie di danno per gli altri indici.

c. Misure sul campo per calibrare e/o validare i risultati

d. L'implementazione di una catena che consegna i prodotti agli utenti

Il calcolo degli indici, per la stima della severità del danno, avviene mediante l'analisi multitemporale e multispettrale di due immagini Landsat8 acquisite prima e dopo l'evento.

La generazione dell'indice DSI si basa su un programma automatico chiamato Damage Severity Index Processor (DSIP).

***Specifiche tecniche***

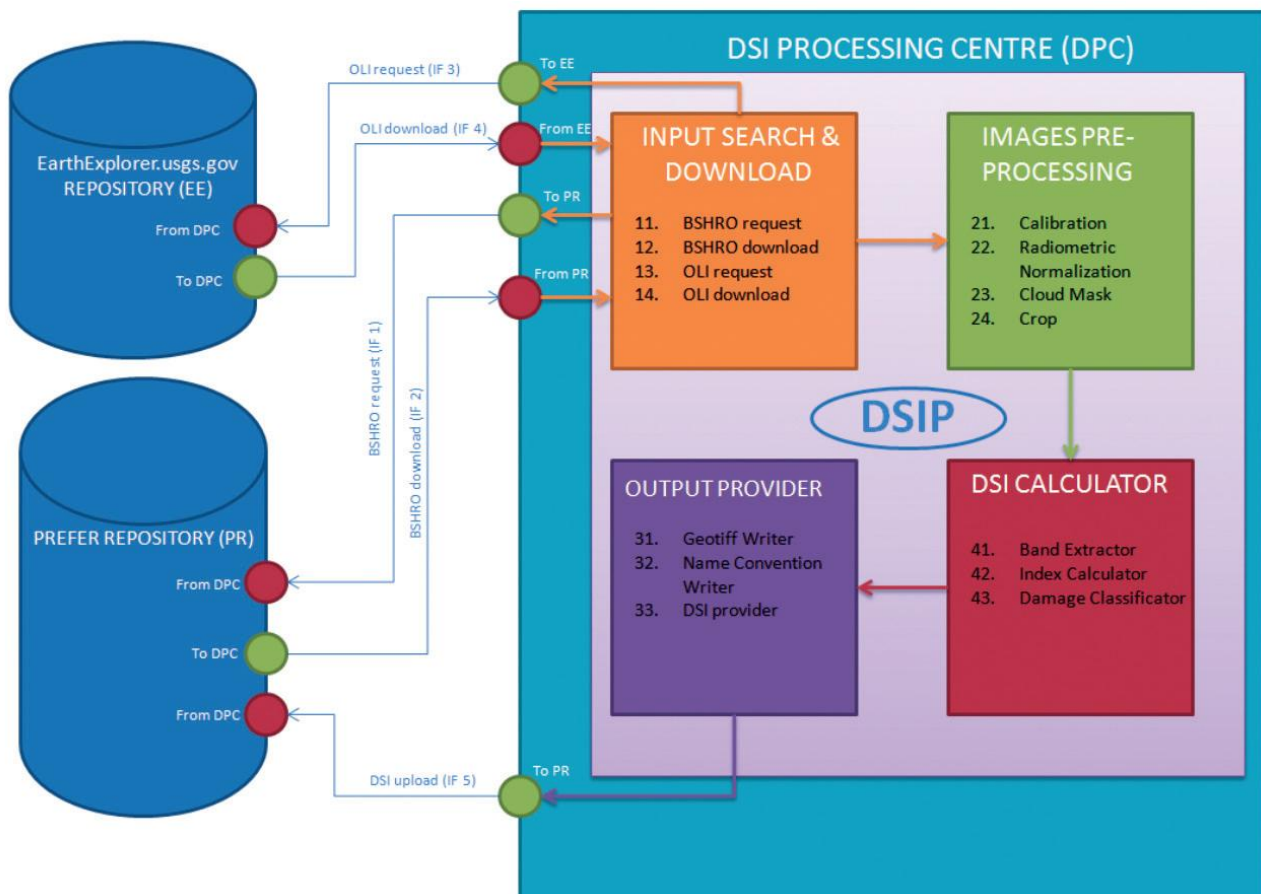
|                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Field of Application                       | Recovery phase, regional scale                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| AOI                                        | FR, IT, GR                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Geographic projection/<br>Reference system | Lat, Long WGS84                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Spatial Resolution /<br>Scale              | 30 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Coverage / Area                            | N/A                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Output data format                         | Raster: Geotiff (*.tif)                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Refresh rate                               | Every 2 weeks                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Naming convention                          | REC-DS-<AOI>-<Date>.<ext><br>Where: <ul style="list-style-type: none"> <li>• REC-DS: is the product id</li> <li>• &lt;AOI&gt; (Area of interest): is a code identifying the area of interest</li> <li>• &lt;Date&gt;: image date, format YYYYMMDD (UTC)</li> <li>• &lt;ext&gt;: extension</li> </ul> |

**Figura 2.16** Specifiche tecniche per il Damage Severity Map.

L'elaborazione dei dati può essere riassunto in

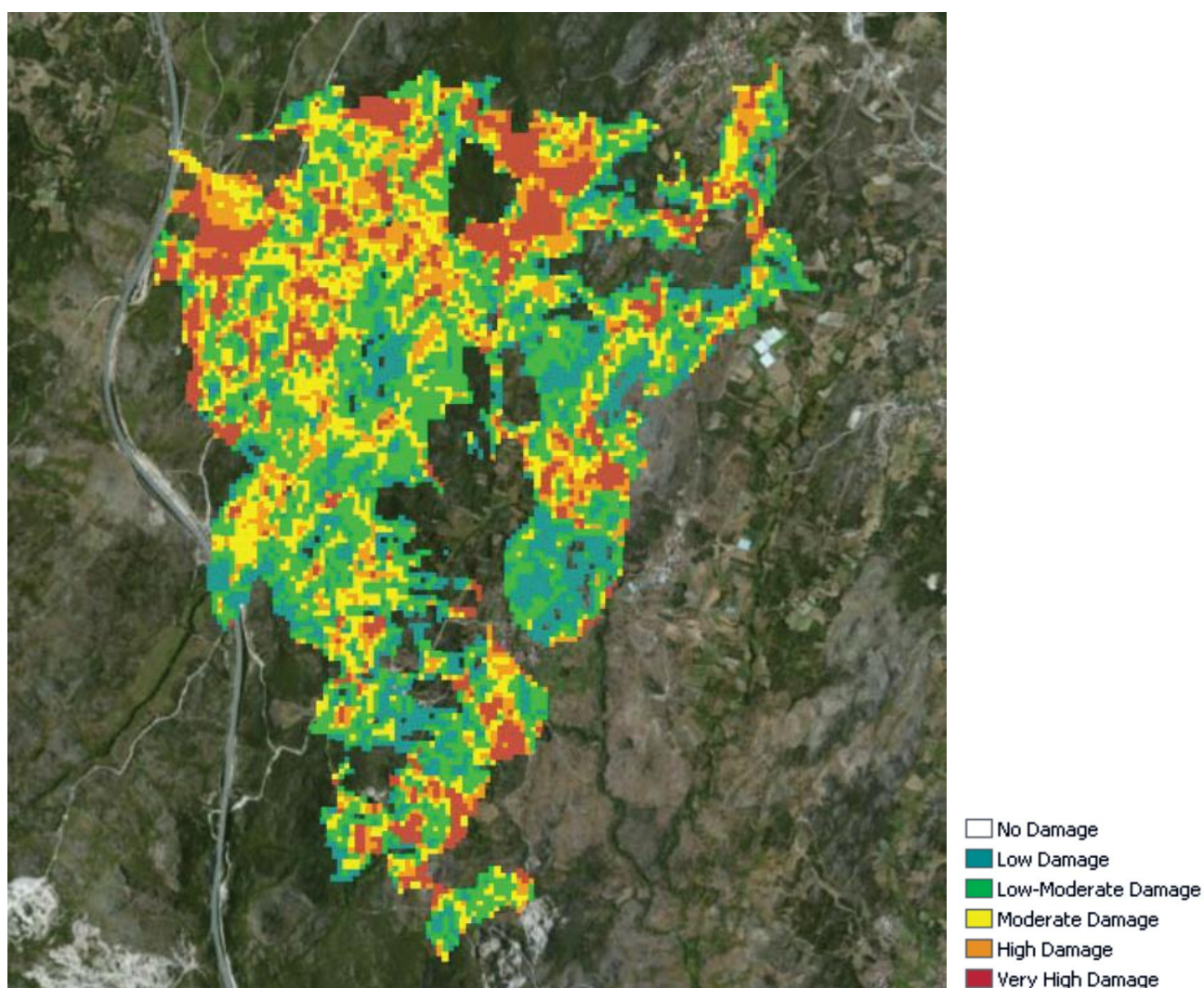
- *pre-processing delle immagini*
  - 1) Calibration: viene convertito il Digital Number (DN) in Riflettanza
  - 2) Radiometric Normalization: viene eseguita la normalizzazione radiometrica di due immagini acquisite dal sensore OLI
  - 3) Cloud Mask: viene applicata la maschera delle nuvole alle immagini
  - 4) Crop: taglia le immagini nelle aree bruciate
- *Calcolo degli indici DNBR, BSI e DSI*
  - 1) Estrazione delle bande: estrae le bande richieste per il calcolo degli indici *DNBR*, *BSI* e *DSI*
  - 2) Calcolo degli indici:
    - viene calcolato NBR (Normalized Burn Ratio), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDII (Normalized Difference Infrared Index ) e MNBR, (Modified Normalized Burn Ratio) per ogni immagine Landsat
    - DSI viene ottenuto dalla differenza tra MNBR prima l'evento e MNBR dopo l'evento; vengono calcolati DNDVI, DNBR, DNDII come differenza tra l'indice prima e dopo l'evento; la media di DNDVI, DNBR, DNDII determina BSI
  - 3) Classificazione del danno: i valori degli indici vengono convertiti in livelli di danno
    - Le soglie DSI vengono definite una volta per tutte dall'analisi della correlazione tra DSI e CBI effettuata su una serie di eventi verificatisi in precedenza sui quali è stata condotta un'ispezione visuale dei danni (per la stima del CBI):
  - No Damage ( $DSI \leq 0$ ): lo scenario dell'area bruciata è indistinguibile dallo scenario prima dell'incendio
  - Very Low ( $DSI < 0.5$ ) e Low Damage ( $0.5 < DSI < 1$ ): piccoli cambiamenti nella vegetazione in termini di copertura e mortalità
  - Moderate Damage ( $1 < DSI < 1.5$ ): effetti sulla vegetazione classificabili come piccoli e grandi cambiamenti
  - High Damage ( $1.5 < DSI < 2$ ) e Very High Damage ( $DSI > 2$ ): la vegetazione è completamente morta

Le relazioni tra i vari indici consentono di ottenere le soglie per DNBR e BSI.



**Figura 2.17** Elaborazione dei dati per la generazione del Damage Severity Map.

In figura 2.18 viene mostrato un esempio di mappa di severità del danno per l'indice DSI. L'incendio si è verificato in Grecia durante l'estate 2014 e ha distrutto diversi tipi di vegetazione (prati, terreni agricoli, arbusti e alberi). L'indice DSI considera la vegetazione presente prima dell'incendio per stimare la severità del danno: i valori più alti del danno corrispondono ad aree con foreste completamente bruciate, dove è richiesto un lungo periodo di tempo per la rigenerazione, mentre i valori più bassi del danno corrispondono ad aree con foreste lievemente danneggiate o ad aree con solo prato.



**Figura 2.18** Damage Severity Map - incendio avvenuto nell'estate 2014 in Grecia.

## Capitolo 3

### Stima del danno attraverso immagini telerilevate

#### 3.1 Indici per la stima del danno da incendio

Il monitoraggio della vegetazione mediante misure satellitari viene eseguito calcolando la riflettanza spettrale nota la radianza spettrale riflessa dalla vegetazione, acquisita poi dal sensore, e l'irradianza spettrale secondo l'espressione

$$R(\lambda) = \frac{L(\lambda)}{I(\lambda)} \quad (3.1)$$

$L(\lambda)$ , la radianza spettrale, è l'energia, entro una banda spettrale, irradiata nell'unità di tempo, per unità di angolo solido e per unità di area.

Viene analizzata la regione riflettiva dello spettro elettromagnetico tra 0.3  $\mu\text{m}$  e 3  $\mu\text{m}$ : l'energia emessa dal sole, dopo aver raggiunto la superficie terrestre, viene in parte assorbita e in parte riflessa dalla vegetazione. Viene considerata l'energia riflessa a cui si aggiunge una piccola frazione che deriva dalla diffusione atmosferica ed eventualmente dalla riflessione delle aree adiacenti. La radianza spettrale riflessa viene misurata dal sensore montato sul satellite e viene espressa in  $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{micron}}$  dopo essere stata corretta con dei coefficienti.

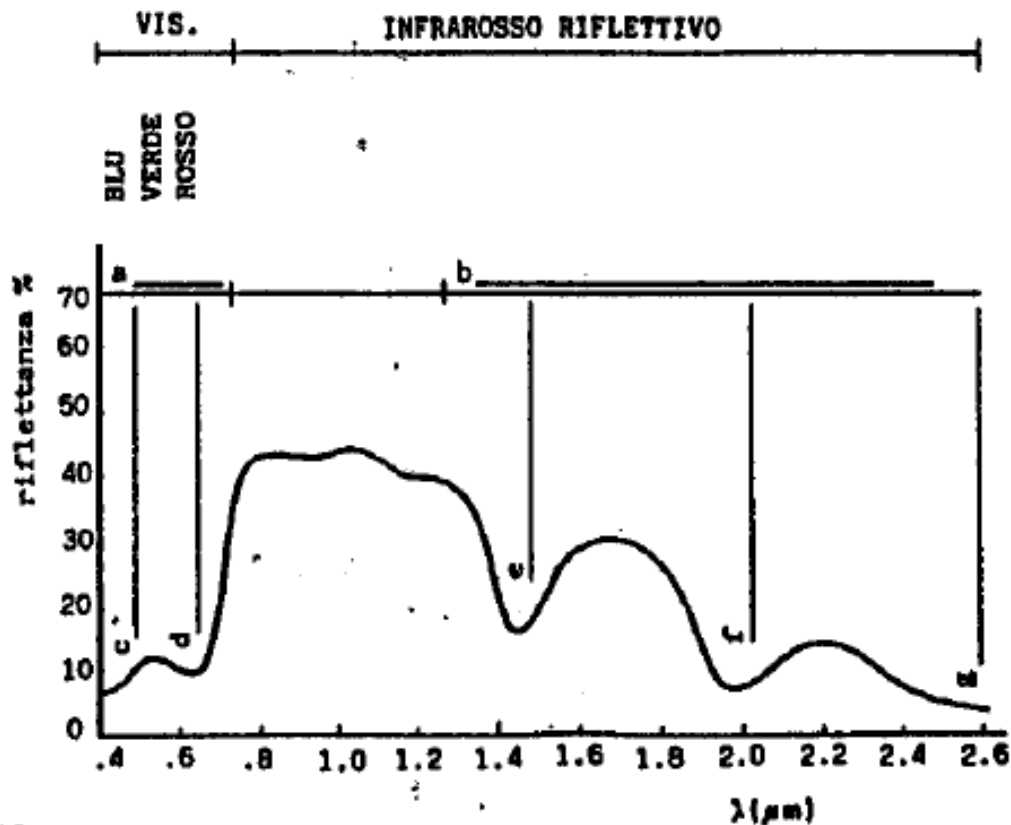
L'irradianza spettrale è l'energia, ad una lunghezza d'onda, irradiata verso l'unità di area, nell'unità di tempo e viene misurata in  $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ . L'energia solare per unità di angolo solido, da utilizzare per l'estrazione della riflettanza spettrale, è ottenuta dividendo la misura per un fattore  $\pi$ .

Un altro parametro importante è l'angolo di zenith del sole  $\theta$  che descrive le condizioni di illuminazione: l'irradianza viene moltiplicata per il coseno dell'angolo di zenith del sole. L'espressione della riflettanza spettrale diventa quindi

$$R(\lambda) = \frac{L(\lambda)}{\frac{I(\lambda) \cdot \cos(\theta)}{\pi}} \quad (3.2)$$

È necessario applicare una correzione per rimuovere il contributo dell'atmosfera alla radiazione elettromagnetica che giunge al sensore.

La riflettanza spettrale della vegetazione in salute, dopo la correzione atmosferica, varia con la lunghezza d'onda secondo l'andamento mostrato in figura 3.1.



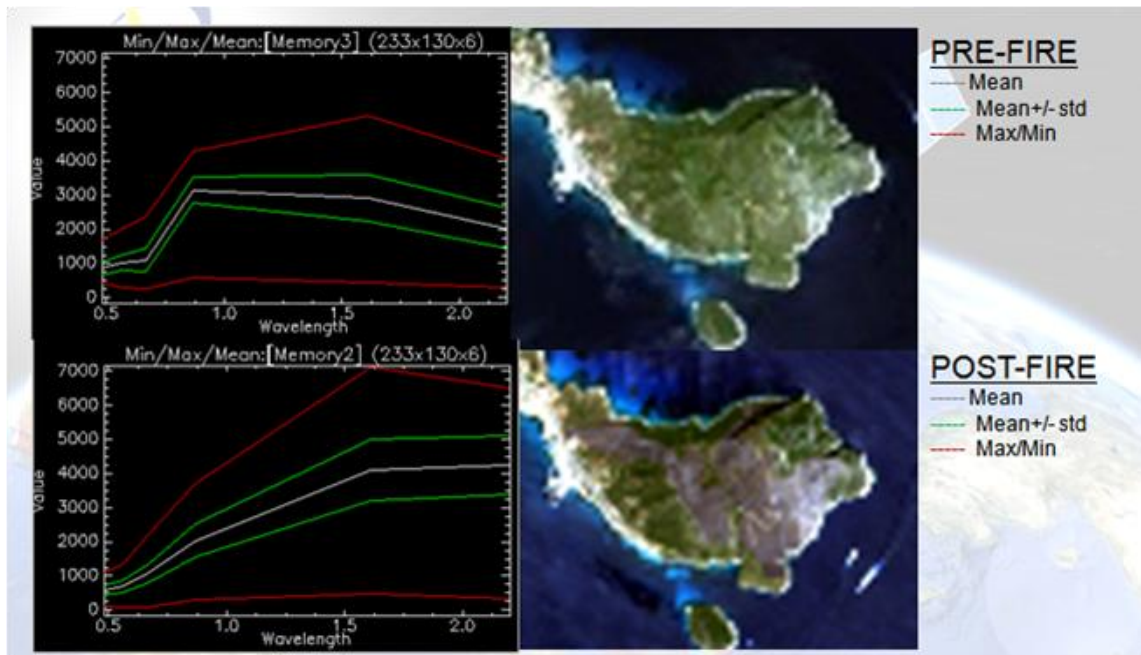
**Figure 3.1** Riflettanza spettrale della vegetazione in salute.

Si distinguono tre zone:

- visibile (a) ove domina l'assorbimento dovuto al pigmento presente nella vegetazione; la clorofilla ad esempio agisce nel blu (c) e nel rosso (d);
- medio infrarosso (b) ove il fattore che controlla la riflessione è il contenuto di acqua presente nelle foglie, che determina forti assorbimenti a 1,4 1,9 e 2,6 micron (e,f,g);
- zona intermedia (infrarosso vicino) ove l'assorbimento è ridotto e l'energia incidente è riflessa in alta percentuale. Il fattore di controllo della riflessione è la struttura interna della foglia.

Considerando un'area bruciata in Sardegna in un'immagine Landsat8 prima dell'incendio e la stessa area in un'immagine dopo l'incendio, è possibile studiare l'effetto dell'evento sullo spettro di riflettanza dell'area interessata. In un primo caso di studio viene considerata la penisola di Golfo Aranci (fig. 3.2): lo spettro di riflettanza della vegetazione, prima dell'incendio, è caratterizzato da

alti valori del vicino infrarosso e valori inferiori nella regione del medio infrarosso. I valori di riflettanza più bassi sono nella regione del visibile. Dopo l'incendio, invece, la riflettanza nel medio infrarosso è superiore alla riflettanza nel vicino infrarosso [9].



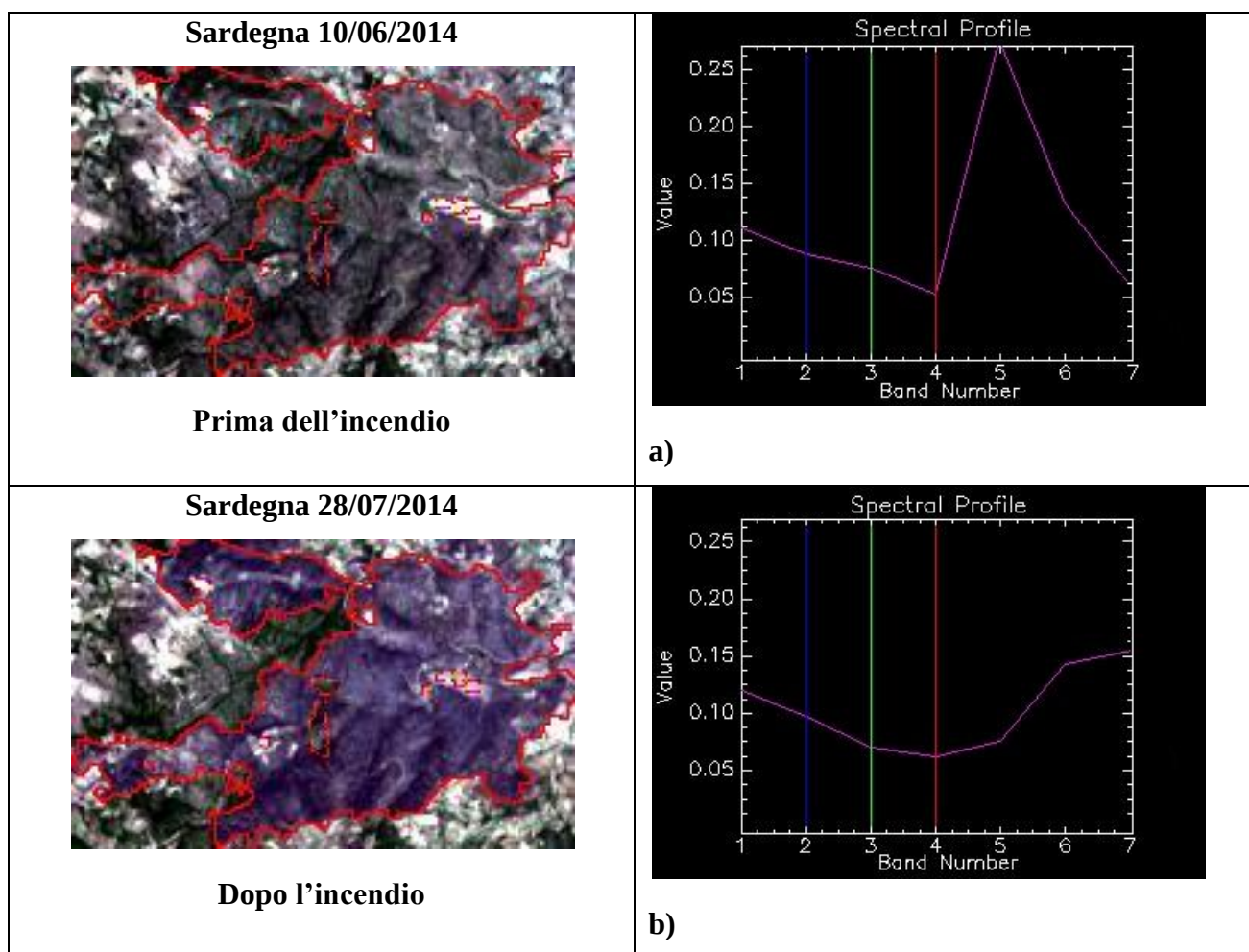
**Figure 3.2** Riflettanza spettrale moltiplicata per 10000 della vegetazione in salute e della vegetazione bruciata, Golfo Aranci, Sardegna.

Nel secondo caso studio si esamina l'incendio avvenuto tra il 10 giugno 2014 e il 28 luglio 2014 nel Sud della Sardegna. Nella figura 3.3 vengono riportati i valori di riflettanza per le prime sette bande del sensore OLI montato sul satellite Landsat 8.

| <b>Landsat 8<br/>Operational<br/>Land Imager<br/>(OLI)<br/>and<br/>Thermal<br/>Infrared<br/>Sensor<br/>(TIRS)</b><br><br><b>Launched<br/>February 11, 2013</b> | Bands                               | Wavelength<br>(micrometers) | Resolution<br>(meters) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------|
|                                                                                                                                                                | Band 1 - Coastal aerosol            | 0.43 - 0.45                 | 30                     |
|                                                                                                                                                                | Band 2 - Blue                       | 0.45 - 0.51                 | 30                     |
|                                                                                                                                                                | Band 3 - Green                      | 0.53 - 0.59                 | 30                     |
|                                                                                                                                                                | Band 4 - Red                        | 0.64 - 0.67                 | 30                     |
|                                                                                                                                                                | Band 5 - Near Infrared (NIR)        | 0.85 - 0.88                 | 30                     |
|                                                                                                                                                                | Band 6 - SWIR 1                     | 1.57 - 1.65                 | 30                     |
|                                                                                                                                                                | Band 7 - SWIR 2                     | 2.11 - 2.29                 | 30                     |
|                                                                                                                                                                | Band 8 - Panchromatic               | 0.50 - 0.68                 | 15                     |
|                                                                                                                                                                | Band 9 - Cirrus                     | 1.36 - 1.38                 | 30                     |
|                                                                                                                                                                | Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1 | 10.60 - 11.19               | 100 * (30)             |
|                                                                                                                                                                | Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2 | 11.50 - 12.51               | 100 * (30)             |

**Tabella 3.1** Bande spettrali dei sensori OLI e TIRS.

Allo spettro di riflettanza, ottenuto in un pixel nell'area bruciata evidenziata in rosso (fig. 3.3), non è stata applicata la correzione atmosferica e questo determina, prima e dopo l'incendio, valori della riflettanza nel blu (banda 1 e 2) più alti di quelli nel verde (banda 3). Tuttavia l'andamento della riflettanza, prima e dopo l'evento, presenta caratteristiche simili al caso precedente: nel vicino infrarosso (banda 5) la percentuale di energia riflessa è circa 0.25, prima dell'incendio, e diminuisce notevolmente con la vegetazione bruciata, circa 0.1; un comportamento inverso esiste per la percentuale di energia riflessa nel medio infrarosso (bande 6 e 7).



**Figure 3.3** Riflettanza spettrale prima (a) e dopo (b) l'incendio in un'area bruciata della Sardegna.

Sfruttando la variazione dello spettro di riflettanza, in particolare la variazione di riflettanza nel rosso, nel vicino e nel medio infrarosso indotta dall'incendio, è possibile calcolare degli indici e monitorare l'evento individuando le zone con diversi livelli di danno. Gli indici vengono calcolati utilizzando l'immagine prima e l'immagine dopo l'incendio.

L'indice Delta Normalized Burn Ratio (DNBR) indica se, in una data area e in un intervallo di tempo, la vegetazione è stata coinvolta da un incendio e si è ridotta o se è in atto un processo di ricrescita dopo un evento critico. In DNBR viene calcolato utilizzando un'immagine satellitare multi spettrale o iperspettrale acquisita prima dell'incendio e una acquisita dopo (dopo un numero di giorni non eccessivamente alto, soprattutto se l'area interessata dall'incendio è costituita prevalentemente da pascolo o macchia bassa). Nel nostro caso sono state utilizzate immagini multispettrali Landsat 8. Il DNBR è definito come

$$\text{DNBR} = \text{NBR}_{\text{pre-fire}} - \text{NBR}_{\text{post-fire}} \quad (3.3)$$

dove NBR è  $\frac{\text{NIR} - \text{SWIR2}}{\text{NIR} + \text{SWIR2}}$ .

NIR e SWIR2 sono rispettivamente il valore di riflettanza nel vicino infrarosso (0.865  $\mu\text{m}$ , banda 5 di Landsat8) e il valore di riflettanza nella regione dell'infrarosso ad onda corta (2.2  $\mu\text{m}$ , banda 7 di Landsat8) [4], [13], [14]. Come già detto nel capitolo 1, la riflettanza può assumere valori compresi tra 0 e 1 quindi il DNBR può variare tra -1 e 1: nel primo caso ( $-1 < \text{DNBR} \leq 0$ ), dopo l'incendio, la differenza NIR – SWIR2 è positiva e superiore rispetto al valore che assume prima dell'evento critico cioè la riflettanza nel NIR supera quella dello SWIR e questo accade quando la vegetazione sta ricrescendo

$$\left(\frac{\text{NIR} - \text{SWIR2}}{\text{NIR} + \text{SWIR2}}\right)_{\text{post-fire}} > \left(\frac{\text{NIR} - \text{SWIR2}}{\text{NIR} + \text{SWIR2}}\right)_{\text{pre-fire}} \quad (3.4)$$

Si passa quindi da uno scenario come quello della figura 3.3.b ad uno come quello della figura 3.3.a. Nel caso in cui il valore di DNBR sia positivo e al massimo pari all'unità, la situazione è inversa: la vegetazione inizialmente è sana, con una differenza NIR – SWIR2 positiva, e in seguito all'incendio si manifestano una diminuzione della riflettanza nel NIR e un incremento nello SWIR. La differenza NIR – SWIR2, dopo l'evento, diventa negativa quindi DNBR, quando si è verificato un incendio, è positivo.

Se la vegetazione non è stata coinvolta dall'incendio nell'intervallo di tempo compreso tra le date di acquisizione delle due immagini della stessa area, l'indice DNBR è prossimo allo zero.

Il DNBR costituisce la metodologia fondamentale per esaminare gli effetti di un incendio sulla vegetazione ed è stato utilizzato con l'indice CBI (Composite Burn Index) per ricavare una relazione tra la stima del danno da satellite e il danno 'reale' rilevato da misure sul campo [15],

[16]. L'indice CBI è ottenuto mediante una valutazione visiva dello stato della vegetazione (prati, arbusti e alberi) dopo l'incendio. La procedura per il rilevamento del danno subito dalla vegetazione è stata codificata. Dopo aver raggiunto una zona su un campo, vengono acquisite foto dello scenario seguendo una procedura particolare: viene considerato un punto sul campo e si annota la sua posizione mediante i dati GPS; vengono scattate 4 foto dello scenario ponendosi ad una distanza di 15 metri dal punto e osservandolo nella direzione Nord, Est, Sud e Ovest. Vengono scattate inoltre 4 foto ponendosi al centro dove sono stati acquisiti i dati GPS.

La stima del danno viene effettuata secondo la tabella 3.2.

La vegetazione viene, in generale, considerata come costituita da tre strati diversi: lo strato A è costituito da erba e piccoli arbusti, lo strato B da arbusti e alberi da 2 a 4 m, lo strato C da grandi alberi.

Ogni strato viene identificato con un numero da 0 a 3 per indicare lo stato della vegetazione (0 per la vegetazione non coinvolta nell'incendio, 3 per la vegetazione completamente bruciata) e viene quindi classificato con i livelli "nessuno effetto", "cambiamenti piccoli", "cambiamenti moderati", "grandi cambiamenti".

La stima del danno si ottiene dalla media dei valori assegnati ai tre strati, viene cioè calcolato il MCBI (Modified Composite Burn Index) [4], [17], [18].



**Figure 3.4** Danno sulla vegetazione causato dall'incendio.

| STRATA                                                  | Burn Severity Scale        |                             |     |                                                        |     |                                                 |     |
|---------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----|--------------------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------|-----|
|                                                         | No effect or strata absent | Low change                  |     | Moderate change                                        |     | High changes or strata absent                   |     |
|                                                         | 0.0                        | 0.5                         | 1.0 | 1.5                                                    | 2.0 | 2.5                                             | 3.0 |
| A STRATA: HERBS, LOW SHRUBS AND TREES LESS THAN 2 METER | No effect                  | Damage only in herbs strata |     | Herbs strata very damaged and damage at shrubs strata. |     | Herbs and shrubs very damaged and trees damaged |     |
| B STRATA: TALL SHRUBS AND TREES 2 TO 4 METER            | No effect                  | Damage only in tall shrubs  |     | Tall shrubs very damages and trees semi damaged.       |     | Tall shrubs and trees very damaged.             |     |
| C STRATA: BIG TREES                                     | No effect                  | Trees low damaged           |     | Trees moderately damaged                               |     | Trees very damaged                              |     |
| MCBI:<br>Avarage value of all strata                    |                            |                             |     |                                                        |     |                                                 |     |

**Tabella 3.2** Scala di severità dell'incendio per la stima dell'indice CBI.

L'indice DNBR porta a buoni risultati tuttavia la severità del danno da incendio dipende da molti fattori e il modo migliore per valutarla è prendere in considerazione alcuni parametri della vegetazione che si possono stimare con il telerilevamento satellitare. In questa prospettiva vengono considerati quindi indici in grado di valutare diverse caratteristiche della vegetazione e l'effetto dell'incendio [14]. La loro combinazione consente di creare una mappa di severità del danno.

$$NBR = \frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2} \quad NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad NDII = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1} \quad (3.5)$$

I parametri che compaiono nei tre indici sopra riportati sono i valori di riflettanza a determinate lunghezze d'onda e vengono riassunti nella tabella 3.3.

| Riflettanza | Lunghezza d'onda | Banda del sensore OLI (Landsat 8) |
|-------------|------------------|-----------------------------------|
| RED         | 0.65 µm          | 4                                 |
| NIR         | 0.865 µm         | 5                                 |
| SWIR1       | 1.6 µm           | 6                                 |
| SWIR2       | 2.2 µm           | 7                                 |

**Tabella 3.3** Bande del sensore OLI utilizzate per il calcolo degli indici DNBR, BSI e DSI.

Il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) utilizza la riflettanza nella regione del rosso e del vicino infrarosso mentre il Normalized Difference Infrared Index (NDII) utilizza valori di riflettanza nel vicino infrarosso e nell'infrarosso ad onda corta.

Calcolando gli indici con i dati prima dell'incendio e dopo l'incendio si ottengono le differenze

Delta Normalized Burn Ratio (DNBR)

$$DNBR = NBR_{pre-fire} - NBR_{post-fire} \quad (3.6)$$

Delta Normalized Difference Vegetation Index (DNDVI)

$$DNDVI = NDVI_{pre-fire} - NDVI_{post-fire} \quad (3.7)$$

Delta Normalized Difference Infrared Index (DNDII)

$$DNDII = NDII_{pre-fire} - NDII_{post-fire} \quad (3.8)$$

La combinazione di questi tre indici (DNBR, DNDVI, DNDII) consente di determinare l'indice Burn Severity Index (BSI) [4] secondo l'espressione

$$BSI = \frac{(DNBR + DNDVI + DNDII)}{3} \quad (3.9)$$

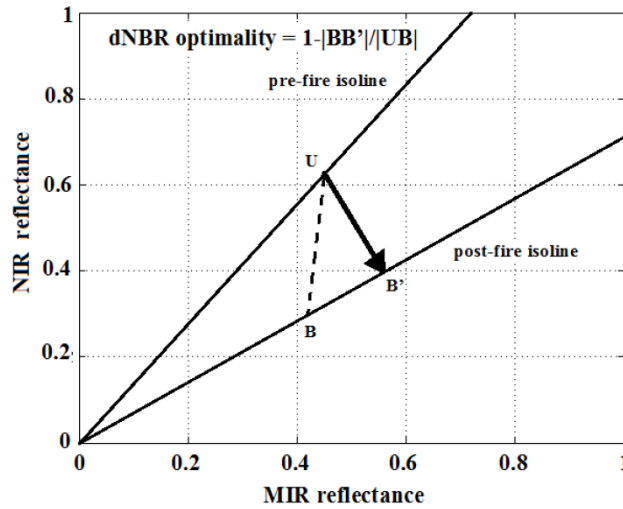
Il BSI è costituito da una serie di indici ottimizzati, ognuno dei quali rappresentativo di una caratteristica biofisica della vegetazione. Come detto in precedenza un indice come il BSI risulta più efficace quando viene calcolato con dati iperspettrali. In tal caso infatti, in linea di principio, è possibile individuare coppie di riflettanze spettrali in grado di evidenziare cambiamenti nella vegetazione quali: contenuto di clorofilla, contenuto di carotenoidi, contenuto di pigmento marrone, Equivalent Water Thickness (EWT), Leaf Mass Area (LMA) e Leaf Area Index (LAI).

Un tale indice, avrebbe la particolarità di fornire informazioni sul danno causato anche da altri eventi critici oltre all'incendio (alluvioni, eruzioni vulcaniche, frane, macchie di petrolio, eventi meteorologici, ecc).

Diversi studi hanno dimostrato che DNBR presenta problemi di saturazione e che NBR non è un indice ottimizzato per la misura dei cambiamenti provocati dall'incendio. E' stata quindi sviluppata una versione ottimizzata dell'indice NBR, il Modified Normalized Burn Ratio (MNBR):

$$MNBR = \frac{NIR - \frac{1}{1.68} SWIR2}{(0.7 - NIR)^2 + SWIR2^2} \quad (3.10)$$

Lo NBR risulterebbe essere un indice ottimo, per la stima della severità dell'incendio, se la traiettoria, nello spazio delle variabili spettrali, causata da diversi livelli di severità, risulta perpendicolare alle isolinee NBR [19], [20].



**Figura 3.5** Condizione di perpendicolarità per ottenere DNBR ottimo.

Per migliorare l'ottimalità dell'indice, sono state studiate, nello spazio spettrale, le traiettorie della variazione di riflettanza dei pixel dovuta agli effetti dell'incendio. Imponendo alcune condizioni, tra cui la perpendicolarità, all'indice NBR calcolato su incendi della Sardegna antecedenti al 2014, è stata ottenuta una versione modificata dell'NBR chiamata MNBR (Modified NBR).

La stima del danno deriva dalla differenza tra MNBR calcolato prima dell'incendio e MNBR calcolato dopo l'incendio [4]:

$$DSI = MNBR_{pre-fire} - MNBR_{post-fire} \quad (3.11)$$

A questa differenza è stato dato il nome di DSI (Damage Severity Index). Il Damage Severity Index è stato creato, considerando che gli effetti che comportano una diminuzione dell'ottimalità (presenza dell'atmosfera, variazioni di riflettanza bidirezionale, ecc.) possono essere ridotti. Gli effetti legati all'atmosfera e alle condizioni di osservazione/illuminazione possono essere

minimizzati introducendo una procedura di normalizzazione radiometrica. È stato applicato, come metodo di normalizzazione radiometrica, la Iteratively Re-weighted Multivariate Alteration Detection (IR-MAD) che è una nuova versione del metodo MAD per la normalizzazione radiometrica automatica di immagini multispettrali e iperspettrali [21], [22]. Confrontando i risultati derivanti dall'applicazioni del metodo IR-MAD con quelli derivanti dall'applicazione della correzione atmosferica standard (Quick Atmospheric Correction – QUAC) [23], è stato dimostrato che il metodo IR-MAD è migliore del metodo MAD ma la normalizzazione non è sufficiente ad ottimizzare la traiettoria di DNBR nello spazio spettrale. Quindi è stata analizzata la traiettoria seguita dalle variazioni spettrali nei pixel delle immagini Landsat8 per diverse aree bruciate della Sardegna. Statisticamente è stata individuata la traiettoria con coefficiente angolare  $-1.68$ , quindi per avere le isolinee dell'indice perpendicolari alla traiettoria deve valere l'espressione

$$AI = NIR - \frac{1}{1.68} MIR \quad (3.12)$$

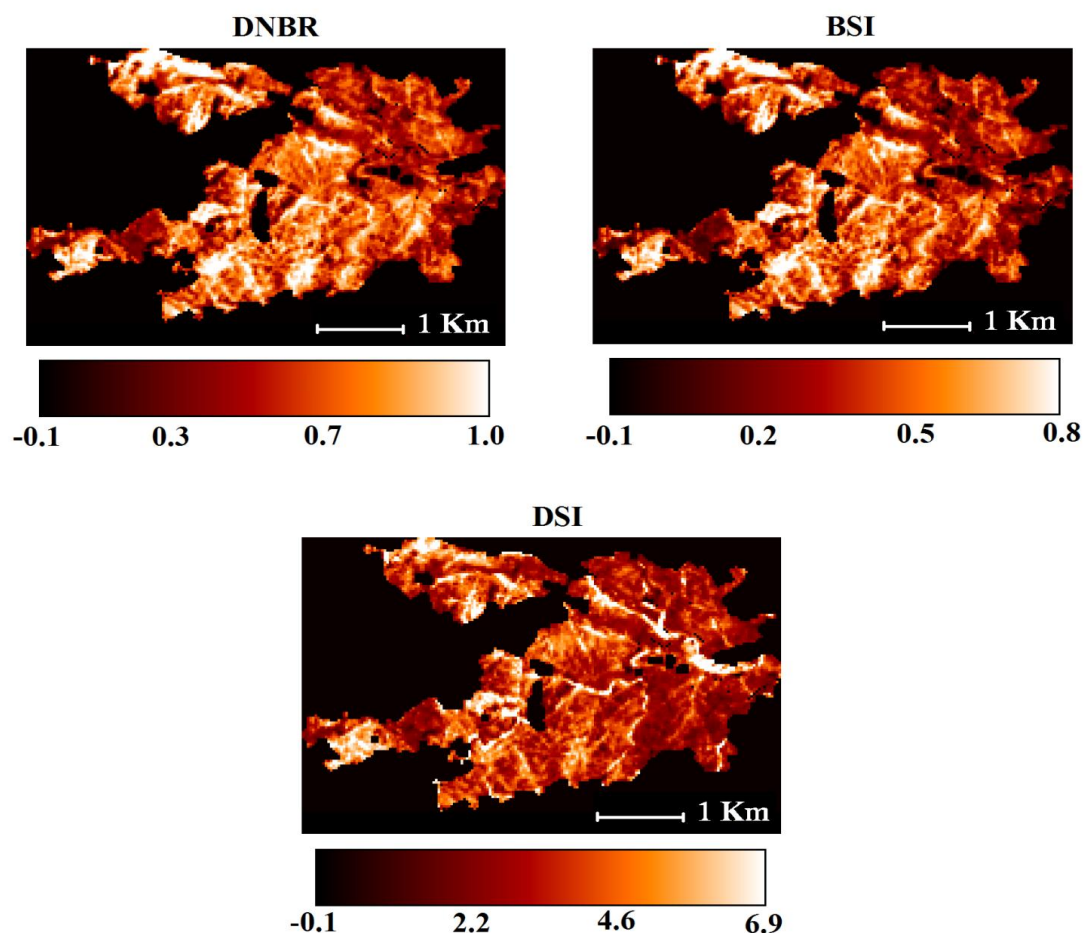
Angular Index (AI) non è molto sensibile alla diminuzione della riflettanza nel NIR e all'incremento della riflettanza nella regione del medio infrarosso (Middle InfraRed – MIR) quando vengono analizzati pixel con vegetazione bruciata. Considerando che la vegetazione sana è caratterizzata da un valore massimo di riflettanza nel NIR pari a 0.7 e un valore nel MIR molto vicino allo 0, è stato creato un indice in modo che una sua diminuzione iniziasse dalla condizione iniziale (NIR=0.7, MIR=0):

$$DI = \frac{1}{(0.7 - NIR)^2 + MIR^2} \quad (3.13)$$

Il MNBR, da cui si ottiene l'indice DSI, è ottenuto dal prodotto di AI e DI ed è la versione di NBR migliore in termini di risposta ai cambiamenti nella vegetazione causati dall'incendio. Usando le immagini del sensore OLI a bordo del satellite di Landsat8, le bande NIR e MIR sono rispettivamente la bande riflettive a 0.86  $\mu m$  (banda 5) e 2.2  $\mu m$  (banda 7).

### 3.2 Indici e il metodo di normalizzazione radiometrica IR-MAD

Il monitoraggio degli incendi, come detto nel paragrafo 3.1, viene effettuato calcolando gli indici DNBR, BSI e DSI utilizzando l'immagine prima e dopo l'evento. In questo caso studio le immagini Landsat8 del 10/06/2014 e del 28/07/2014 sono state utilizzate per ottenere le mappe di DNBR, BSI e DSI per l'area della Sardegna precedentemente analizzata in fig. 3.3. Gli indici sono stati calcolati dopo aver applicato il metodo di normalizzazione radiometrica IR-MAD [21] che usa l'analisi della correlazione canonica (CCA) per generare una coppia di nuove immagini multispettrali da combinazioni lineari tra due gruppi di variabili (bande spettrali e immagini di riferimento). Ogni coppia di variabili canoniche, cioè le componenti delle nuove immagini, sono massimamente correlate alle altre coppie. Nelle nuove immagini, applicando delle soglie, vengono individuati i pixel invarianti cioè strade, edifici, dove non c'è variazione dello stato dell'oggetto e le variazioni spettrali sono dovute unicamente all'atmosfera e a lievi cambiamenti della geometria di osservazione. I pixel invarianti vengono utilizzati per ottenere relazioni lineari e normalizzare le immagini.



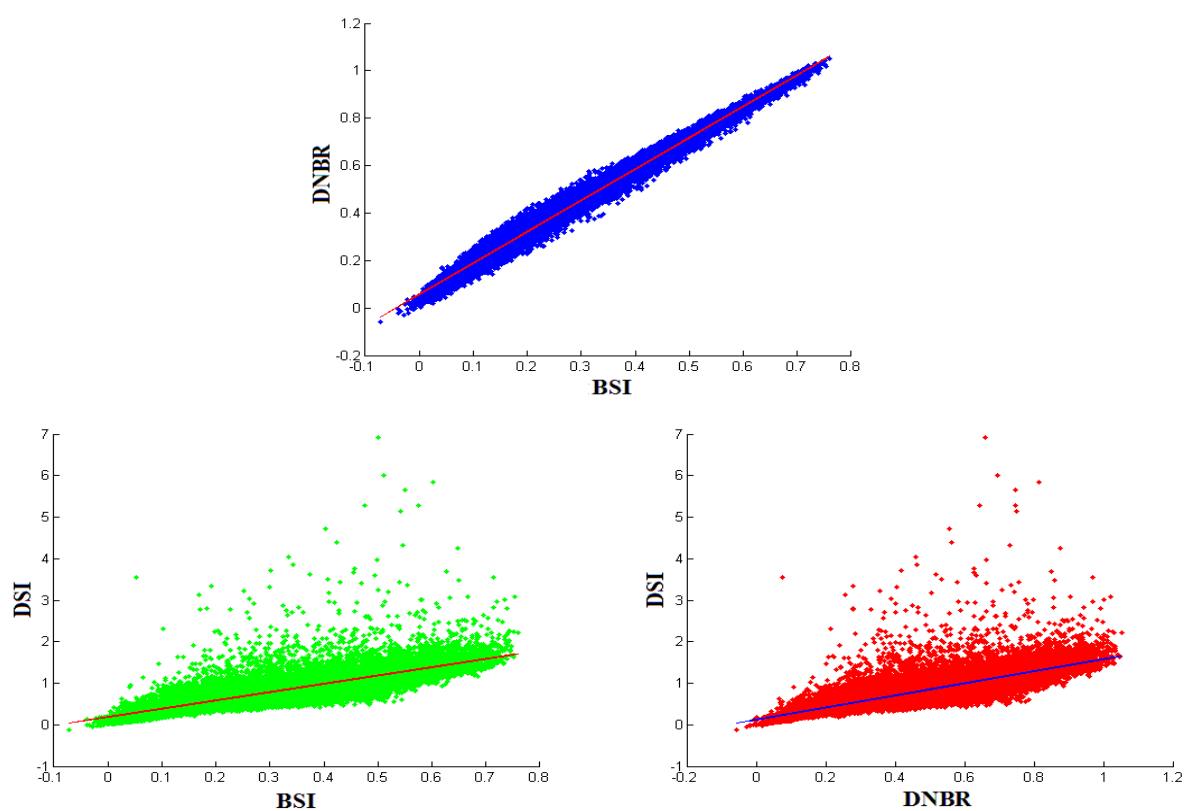
**Figura 3.6** Mappe DNBR, BSI e DSI per un'area bruciata della Sardegna. Le mappe sono ottenute usando il metodo di normalizzazione IR-MAD.

Le mappe mostrano come all'interno della stessa area esistano zone con diversi livelli di danno: un alto valore dell'indice indica danno elevato. Questo significa che aree boschive sono state coinvolte dall'incendio in quanto queste hanno bisogno di un lungo periodo per la rigenerazione.

Valori dell'indice bassi possono indicare danni lievi alle aree boschive o anche danni più o meno gravi ad arbusti o prati. La definizione del danno quindi tiene conto del periodo che la vegetazione impiega, dopo l'incendio, per tornare allo stato iniziale: i prati impiegano un anno, le foreste decine di anni.

Per studiare le relazioni tra gli indici, sono stati calcolati DNBR, BSI e DSI per tutte le aree bruciate, superiori a 10 ettari, dagli incendi verificatisi in Sardegna tra il 10/06/2014 e il 28/07/2014. Ogni pixel viene rappresentato nei grafici di fig. 3.6: sugli assi x e y sono riportati i valori degli indici. In questo modo per ogni coppia di indici (DNBR e BSI, DSI e BSI, DSI e DNBR) è possibile individuare una relazione lineare. I valori dei coefficienti delle rette sono riportati in tab. 3.4.

La correlazione tra gli indici DNBR e BSI è molto alta. Va ricordato che l'indice BSI è ottenuto dalla combinazione di tre indici tra cui il DNBR.



**Figura 3.6** Stima della correlazione tra i tre indici.  $DNBR = f(BSI) r=0.99$ ,  $DSI = f(BSI) r=0.75$ ,  
 $DSI = f(DNBR) r=0.72$ .

| Metodo Iteratively Re-weighted Multivariate Alteration Detection (IR-MAD) |                   |                   | Correlazione<br>(r) |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
|                                                                           | a                 | b                 |                     |
| DBR=a*BSI+b                                                               | 1.320282646285933 | 0.057634484394636 | 0.99                |
| DSI=a*BSI+b                                                               | 2.001746371752464 | 0.186877416866888 | 0.75                |
| DSI=a*DBR+b                                                               | 1.455806129527884 | 0.129148331273447 | 0.72                |

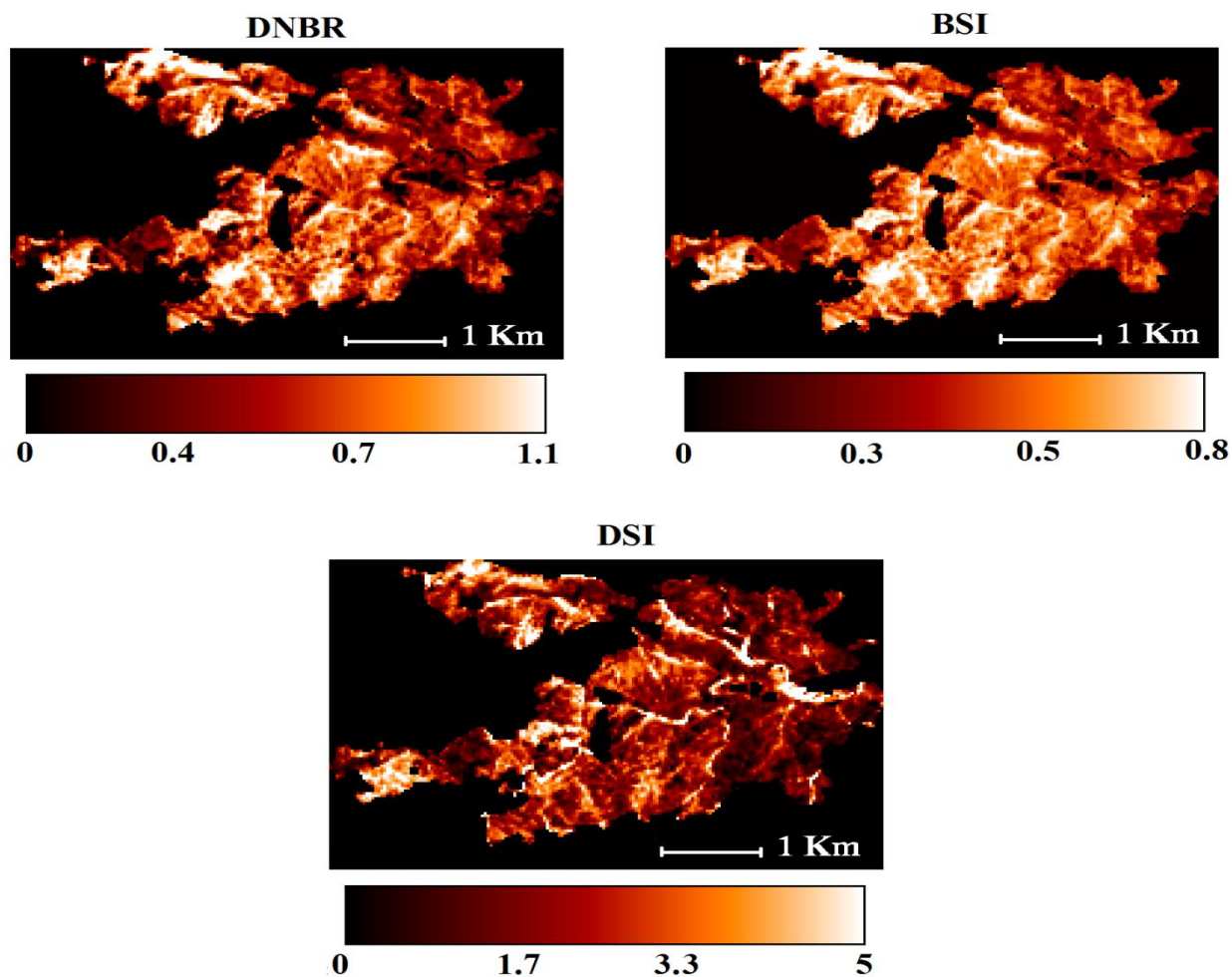
**Tabella 3.4** Relazioni lineari e correlazione tra indici ottenute con il metodo di normalizzazione IR-MAD.

### 3.3 Indici e la rimozione dell'effetto radiometrico con relazione lineare

Il metodo di normalizzazione IR-MAD, descritto nel paragrafo 3.2, non si è dimostrato sempre efficace: sono state riscontrate anomalie nell'individuazione dei pixel invarianti. È stato necessario quindi ricorrere ad una tecnica più semplice studiando il singolo caso: i *pixel invarianti* vengono scelti, esternamente alle aree bruciate, nelle immagini Landsat8 prima e dopo l'incendio ( $D_{pre-fire}$  e  $D_{post-fire}$ ), non in modo automatico e in questi pixel viene studiata la riflettanza per ogni banda e viene ricavata una relazione lineare per ottenere un'immagine  $\bar{D}_{pre-fire}$  dall'immagine  $D_{pre-fire}$ .

$\bar{D}_{pre-fire}$  rappresenta l'immagine prima dell'incendio dopo aver rimosso l'effetto radiometrico e viene quindi utilizzata con l'immagine  $D_{post-fire}$  per il calcolo degli indici.

Per confrontare i due metodi di normalizzazione vengono riportate le mappe di DNBR, BSI e DSI ottenuti dopo aver rimosso dalle immagini Landsat8 del 10/06/2014 e del 28/07/2014 l'effetto radiometrico con il nuovo metodo (fig. 3.7). L'area analizzata è quella del paragrafo 3.2.



**Figura 3.7** Mappe DNBR, BSI e DSI per un'area bruciata della Sardegna. Le mappe sono ottenute usando il nuovo metodo di normalizzazione basato sullo studio dei pixel invarianti.

I coefficienti delle rette che legano gli indici sono riportate in tab. 3.5.

| Metodo della rimozione dell'effetto radiometrico con la relazione lineare |                   |                   | Correlazione (r) |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|
|                                                                           | a                 | b                 |                  |
| $DBR=a*BSI+b$                                                             | 1.313277234262787 | 0.036354221243013 | 0.99             |
| $DSI=a*BSI+b$                                                             | 1.698714316308653 | 0.195815173196078 | 0.75             |
| $DSI=a*DBR+b$                                                             | 1.238101907552069 | 0.178957195867307 | 0.73             |

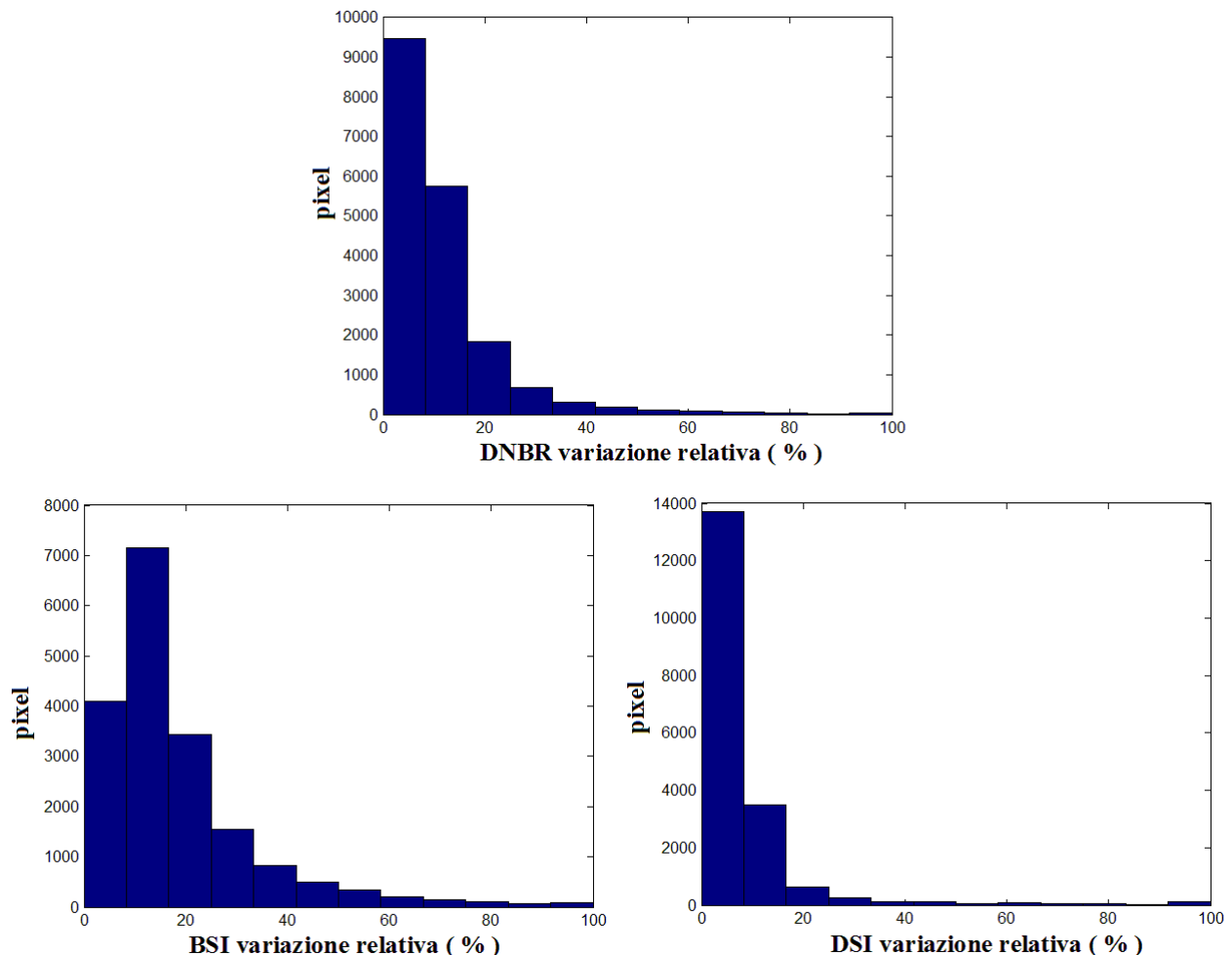
**Tabella 3.5** Relazioni lineari e correlazione tra indici ottenute con il nuovo metodo di normalizzazione basato sullo studio dei pixel invarianti.

Si può notare che i valori minimi degli intervalli DNBR, BSI, DSI (fig. 3.7), sono superiori rispetto a quelli degli intervalli ottenuti con il metodo IR-MAD (fig. 3.6) mentre, solo per DSI, il valore massimo scende 5.

I grafici seguenti (fig 3.8) sono stati ottenuti analizzando i due metodi di normalizzazione e mostrano i pixel con le variazioni relative di DNBR, BSI, DSI considerando tutte le aree bruciate, superiori a 10 ettari, della Sardegna.

La variazione relativa viene ottenuta, per il singolo pixel, utilizzando l'espressione

$$\text{var\_rel} = \frac{\text{indice}_{\text{IR-MAD}} - \text{indice}_{\text{legge lineare}}}{\text{indice medio}} \quad (3.14)$$



**Figura 3.8** Variazione relativa degli indici dovuta all'applicazione del nuovo metodo di normalizzazione.

La maggior parte dei pixel è interessata da una variazione relativa modesta (inferiore al 10%).

### 3.4 Miglioramenti nella definizione di DSI

Come detto nel paragrafo 3.1, l'indice MNBR viene ottenuto dal prodotto degli indici AI e DI considerando, come condizione iniziale per una sua variazione, NIR = 0.7 e MIR = 0. Questa condizione però è restrittiva in quanto, come si vede dalla figura 3.1, la riflettanza nel MIR a 2.2  $\mu\text{m}$  (banda 7 del sensore OLI di Landsat8) è prossima a 0.1: l'aumento della riflettanza nel medio infrarosso, nel caso di vegetazione danneggiata dall'incendio, inizia da 0.1. Risulta quindi più corretto modificare la relazione 3.13 nel modo seguente

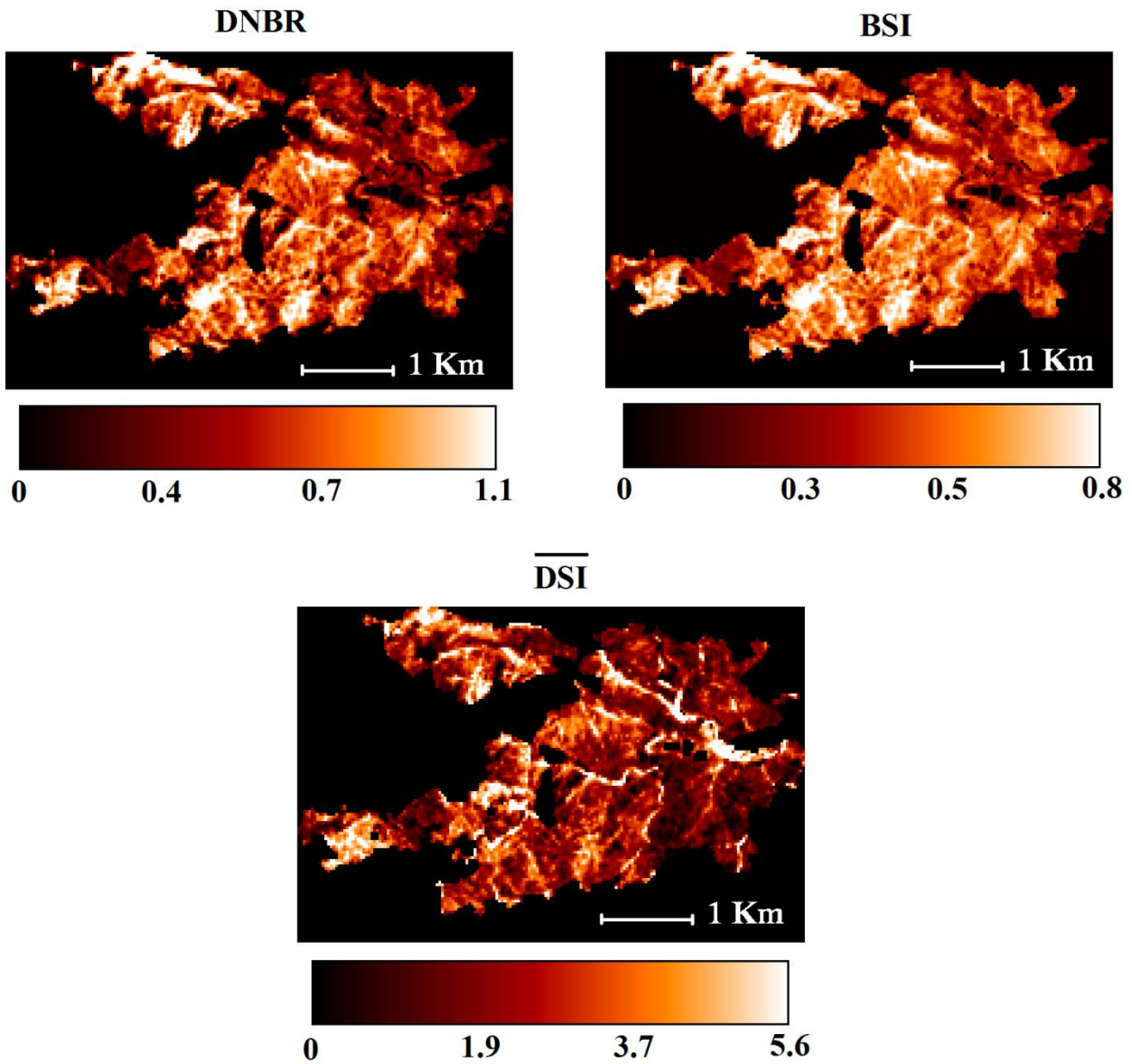
$$DI = \frac{1}{(0.7 - NIR)^2 + (0.1 + MIR)^2} \quad (3.15)$$

e introdurre una nuova versione di MNBR e DSI:

$$\overline{MNBR} = \frac{NIR - \frac{1}{1.68} SWIR2}{(0.7 - NIR)^2 + (SWIR2 - 0.1)^2} \quad (3.16)$$

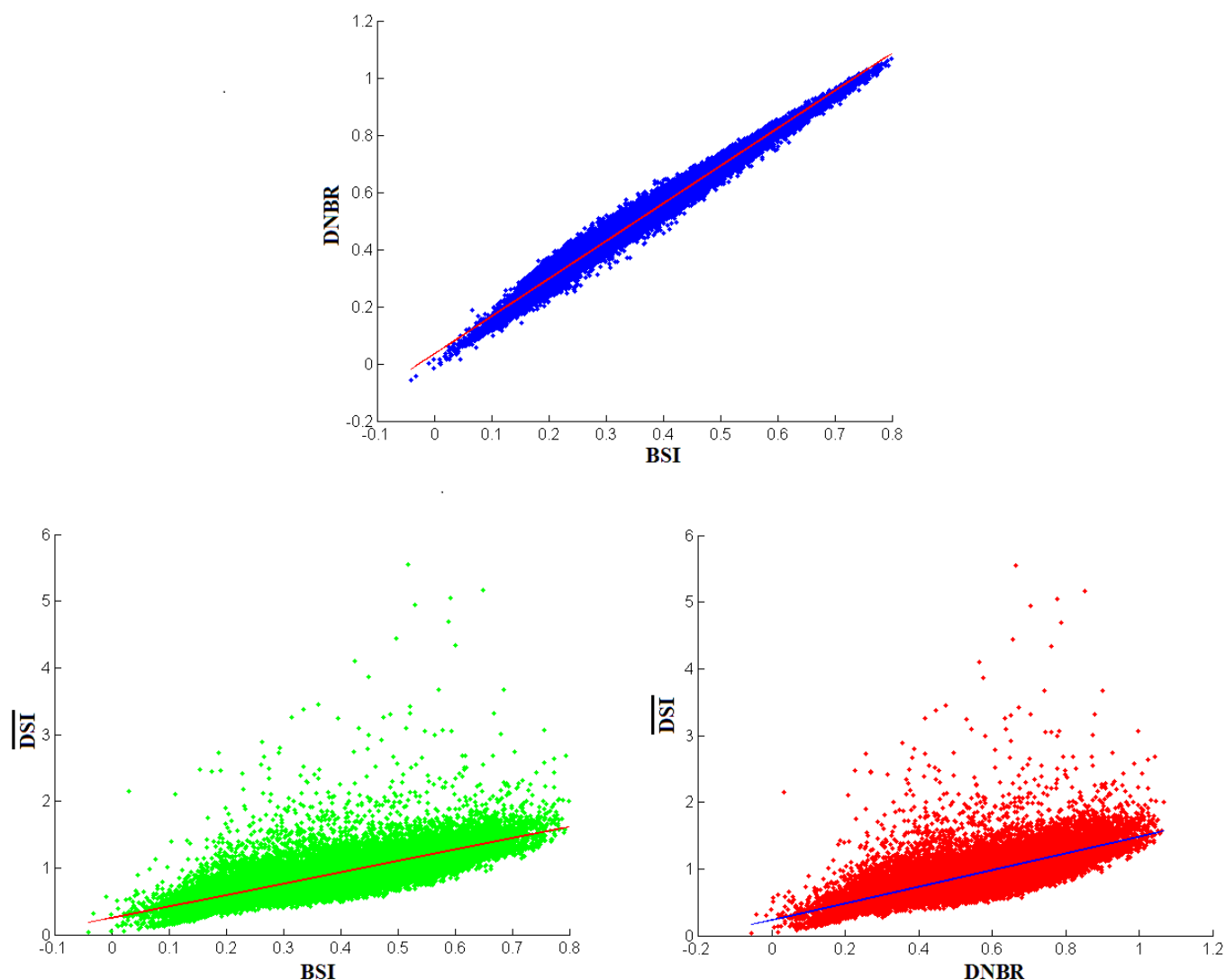
$$\overline{DSI} = \overline{MNBR}_{pre-fire} - \overline{MNBR}_{post-fire} \quad (3.17)$$

Il  $\overline{DSI}$  calcolato sull'area bruciata analizzata nel paragrafo 3.2, dopo aver applicato, alle immagini Landsat8 del 10/06/2014 e del 28/07/2014, il metodo della rimozione dell'effetto radiometrico con la relazione lineare (par. 3.3) risulta essere compreso tra 0 e 5.6.



**Figura 3.9** Mappe DNBR, BSI e  $\overline{DSI}$  per un'area bruciata della Sardegna. Le mappe sono ottenute usando il nuovo metodo di normalizzazione basato sullo studio dei pixel invarianti.

I nuovi coefficienti delle rette che legano gli indici sono riportate in tab. 3.6.



**Figura 3.10** Stima della correlazione tra i tre indici.  $DNBR = f(BSI)$   $r=0.99$ ,  $\overline{DSI} = f(BSI)$   $r=0.71$ ,  $\overline{DSI} = f(DNBR)$   $r=0.69$ .

| Metodo della rimozione dell'effetto radiometrico con la relazione lineare e $\overline{DSI}$ |                   |                   | Correlazione (r) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|
|                                                                                              | a                 | b                 |                  |
| $DBR=a*BSI+b$                                                                                | 1.313277234262787 | 0.036354221243013 | 0.99             |
| $\overline{DSI}=a*BSI+b$                                                                     | 1.706344825466141 | 0.254419070129998 | 0.71             |
| $\overline{DSI}=a*DBR+b$                                                                     | 1.248782780795886 | 0.234697322729747 | 0.69             |

**Tabella 3.6** Relazioni lineari e correlazione tra indici ottenute con il nuovo metodo di normalizzazione basato sullo studio dei pixel invarianti.

### 3.5 Effetto dell'atmosfera sulla valutazione degli indici

Le mappe degli indici dell'aree coinvolte dagli incendi del 2014 in Sardegna (parr. 3.2, 3.3, 3.4) sono state ricavate con processi di normalizzazione radiometrica diversi che hanno consentito, studiando la riflettanza dei pixel invarianti dell'immagine prima e dopo l'incendio, di correggere un'immagine relativamente all'altra. Questi processi non possono essere considerati vere correzioni atmosferiche.

Per verificare se l'atmosfera ha influenza nel calcolo di DNBR, BSI e DSI [24], si è ricorso al software PcModwin3.7 che utilizza il modello di trasferimento radiativo MODTRAN. PcModwin3.7 simula la propagazione della radiazione elettromagnetica in atmosfera, in una regione dello spettro elettromagnetico compresa tra 0.1  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ . In generale, la radianza spettrale  $L(\lambda)$ , che arriva al sensore, è la somma della radiazione diffusa dall'atmosfera, della radiazione solare riflessa ed emessa dalla Terra, e di quella emessa dall'atmosfera verso l'alto e verso la Terra.

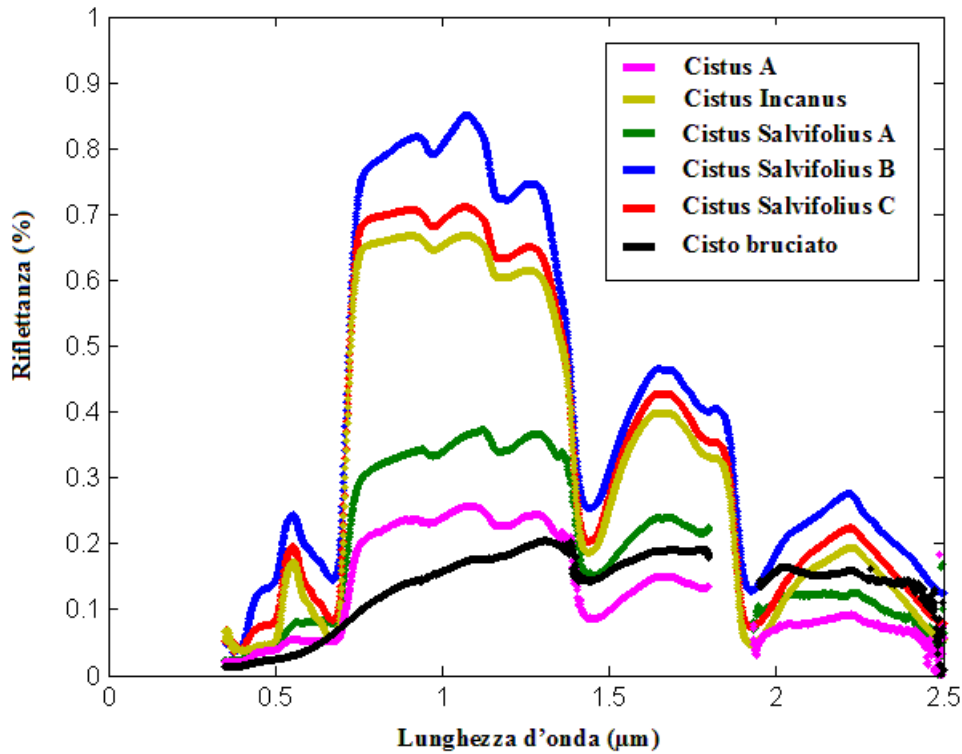
$$L(\lambda) = L(\lambda)_{\text{diffusa}} + L(\lambda)_{\text{riflessa}} + L(\lambda)_{\text{emessa}} + L(\lambda)_{\text{atmosfera\_UP}} + r \cdot L(\lambda)_{\text{atmosfera\_DOWN}} \quad (3.17)$$

Selezionando la copertura superficiale e specificando la geometria di osservazione, è quindi possibile simulare l'osservazione da satellite.

Sono stati considerati cinque tipi di cisto, un genere di arbusti sempreverdi: la fig. (3.11) mostra cinque spettri di riflettanza di vegetazione sana, ognuno corrispondente ad un tipo di cisto, e uno spettro di riflettanza corrispondente al cisto bruciato. I dati sono stati ottenuti con misure di campo.

Vengono scelti dei dati per PcModwin3.7 in modo da ricreare, al meglio, lo scenario di osservazione delle aree bruciate in Sardegna utilizzando Landsat8: nel software è stata impostata la quota del satellite pari a 100 Km (il massimo valore consentito), l'angolo di zenith di osservazione pari a  $180^\circ$  (osservazione al Nadir), l'angolo di zenith del Sole pari  $30^\circ$ , il passaggio all'equatore per Landsat avviene circa alle 10 ore locali. Viene ipotizzato che la vegetazione si trovi al livello del mare. Viene scelto un modello atmosferico, senza aerosol e copertura nuvolosa, tipico delle medie latitudini in estate (Mid Latitude Summer); vengono effettuate simulazioni anche con un modello atmosferico invernale (Mid Latitude Winter) per valutare gli effetti di una correzione atmosferica errata.

PcModwin3.7 utilizza, per ogni tipo di cisto, lo spettro assegnato come input e restituisce, nell'intervallo 0.2  $\mu\text{m}$  – 2.5  $\mu\text{m}$ , la radianza totale, l'irradianza solare, la radianza riflessa dal suolo (Ground Reflectance), la radianza diffusa e la trasmittanza.



**Figura 3.11** Spettro di riflettanza per diversi tipi di vegetazione prima e dopo l'incendio utilizzati per le simulazioni MODTRAN.

La riflettanza spettrale del cisto senza correzione atmosferica  $R(\lambda)$  viene calcolata con la relazione

$$R(\lambda) = \frac{L(\lambda)_{\text{tot}}}{I(\lambda)} \quad (3.18)$$

dove  $L(\lambda)_{\text{tot}}$  è la radianza spettrale totale: viene considerata anche la diffusione causata dalle particelle dell'atmosfera.  $I(\lambda)$  è l'irradianza spettrale. La radiazione emessa dall'atmosfera e dalla superficie possono essere trascurate alle lunghezze d'onda di interesse.

Nel secondo caso di studio viene applicata la correzione atmosferica:

$$R(\lambda)_{\text{corr-atm}} = \frac{L(\lambda)}{I(\lambda) * t(\lambda)^2} \quad (3.19)$$

$L(\lambda)$  e  $t(\lambda)$  sono rispettivamente la radianza riflessa dal suolo con la vegetazione (Ground Reflectance) e la trasmittanza atmosferica ad una data lunghezza d'onda: viene considerata solo la radiazione elettromagnetica che attraversa l'atmosfera, viene riflessa dal cisto e attraversa nuovamente l'atmosfera.

Utilizzando i valori della trasmittanza e della Ground Reflectance ottenuti da una simulazione con il modello atmosferico Mid Latitude Winter, si può studiare l'effetto di una correzione atmosferica errata:

$$R(\lambda)_A^* = \frac{L(\lambda)_{\text{Mid Lat Win}}}{I(\lambda) \cdot t(\lambda)_{\text{Mid Lat Sum}}^2} \quad (3.20)$$

$$R(\lambda)_B^* = \frac{L(\lambda)_{\text{Mid Lat Sum}}}{I(\lambda) \cdot t(\lambda)_{\text{Mid Lat Win}}^2} \quad (3.21)$$

$R(\lambda)_A^*$  indica la riflettanza ottenuta considerando, nella rimozione dell'effetto atmosferico, la Ground Reflectance corrispondente al modello atmosferico Mid Latitude Winter. La trasmittanza, in accordo con le ipotesi iniziali, è stata ottenuta da un modello Mid Latitude Summer.

$R(\lambda)_B^*$  indica invece la riflettanza ottenuta considerando, nella rimozione dell'effetto atmosferico, la trasmittanza del modello atmosferico Mid Latitude Winter. La Ground Reflectance è stata ottenuta da un modello Mid Latitude Summer.

Per lo spettro senza correzione atmosferica  $[R(\lambda)]$ , per lo spettro con correzione atmosferica esatta  $[R(\lambda)_{\text{corr-atm}}]$  e errata  $[R(\lambda)_A^*, R(\lambda)_B^*]$  e per lo spettro ottenuto dalle misure 'in situ', vengono calcolati i valori di riflettanza media considerando, come intervalli, le ampiezze spettrali per le bande 4, 5, 6 e 7 del sensore OLI.

Gli indici DNBR ( " o " ), BSI ( " \* " ) e DSI ( " . " ) così calcolati sono riportati in fig. 3.12 e fig. 3.13 per le cinque tipologie di cisto. La fig. 3.13 è un ingrandimento della regione di valori dell'indice di danno compresi tra 0 e 1.2 della fig 3.12 e viene indicata dalla freccia rossa.

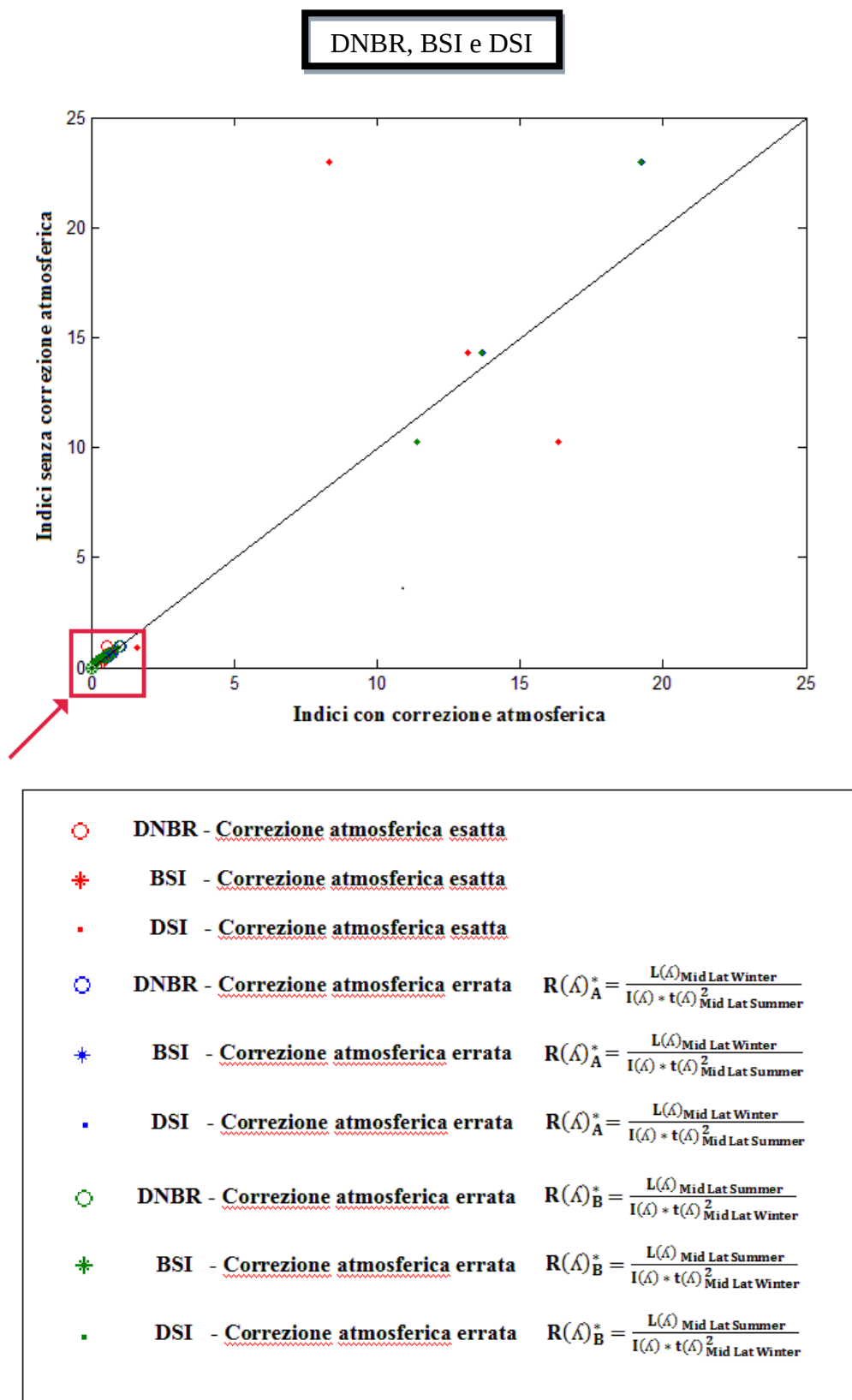
La retta in nero rispetta la relazione  $y=x$ . In ordinata sono riportati i valori degli indici senza aver rimosso l'effetto atmosferico mentre in ascissa sono riportati i valori degli indici dopo la correzione atmosferica: la legenda indica il tipo di correzione.

Gli indici sono tutti in prossimità della retta ad eccezione, solo per alcuni tipi di cisto, del DSI rappresentato con il quadratino. Quindi possiamo dedurre che, effettuando una correzione atmosferica esatta o errata o non effettuandola, la stima di DNBR e BSI non viene influenzata in modo rilevante.

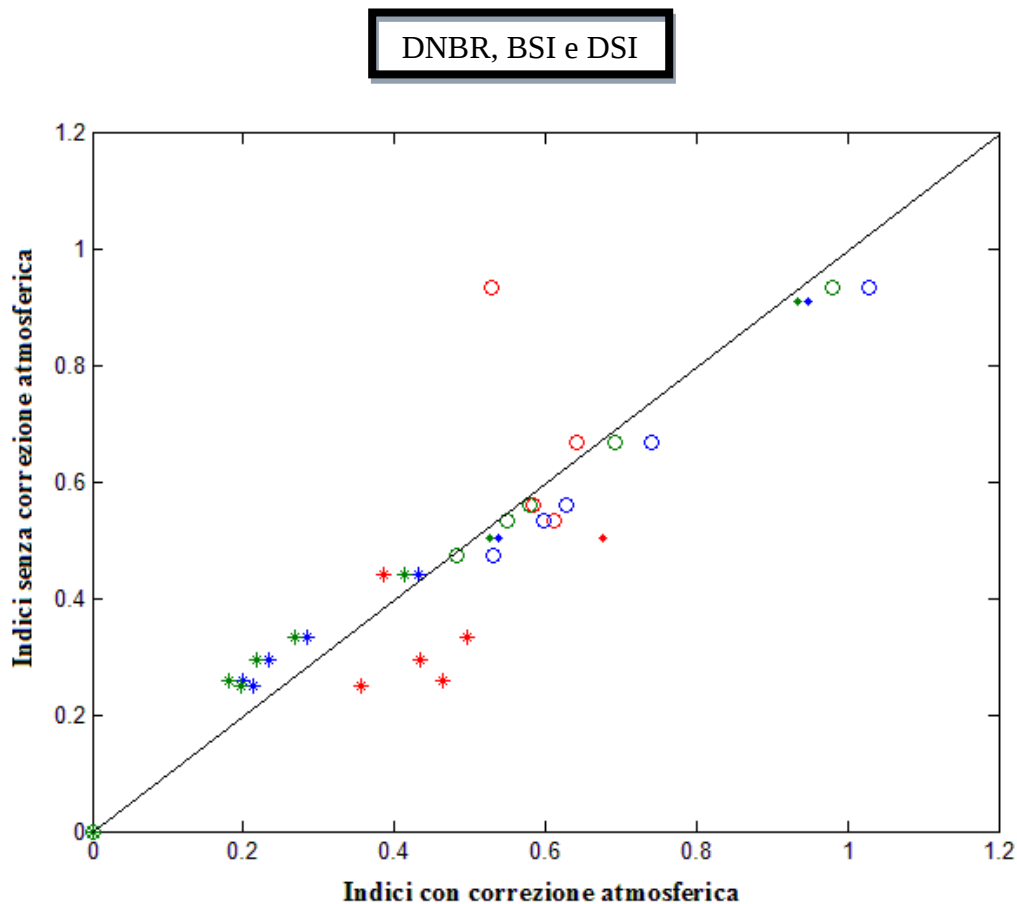
L'analisi è stata condotta considerando anche  $\overline{DSI}$  (la versione aggiornata del DSI, introdotta nel paragrafo 3.4): alcuni tipi di cisto sono caratterizzati da valori del Damage Severity Index, nella nuova versione ( $\overline{DSI}$ ), superiori rispetto a quelli del Damage Severity Index nella versione iniziale (DSI). L'indice  $\overline{DSI}$  in alcuni casi tende ad allontanarsi dalla retta  $y=x$  (fig.3.14). Questo comportamento dipende dai valori di riflettanza di alcuni tipi di cisto usati come input per le

simulazioni MODTRAN: la riflettanza a  $2.2\ \mu\text{m}$ , prima dell'incendio, per *Cistus Incanus*, *Cistus Salvifolius B* e *Cistus Salvifolius C*, è più alta della riflettanza del cisto bruciato alla stessa lunghezza d'onda (fig. 3.11). Questo è in contrasto con le ipotesi dell'indice  $\overline{\text{DSI}}$  secondo cui, dopo un incendio, la riflettanza a  $2.2\ \mu\text{m}$ , è più alta del valore iniziale 0.1 corrispondente alla vegetazione in salute. In questo caso quindi non è possibile calcolare l'indice  $\overline{\text{DSI}}$ .

Osservando la figura 3.15 (ingrandimento della figura 3.14) ed escludendo dall'analisi questi esempi, possiamo comunque concludere che applicare una correzione atmosferica o non applicarla non influisce significativamente sulla stima di  $\overline{\text{DSI}}$ , in modo simili a quanto visto per DNBR e BSI.

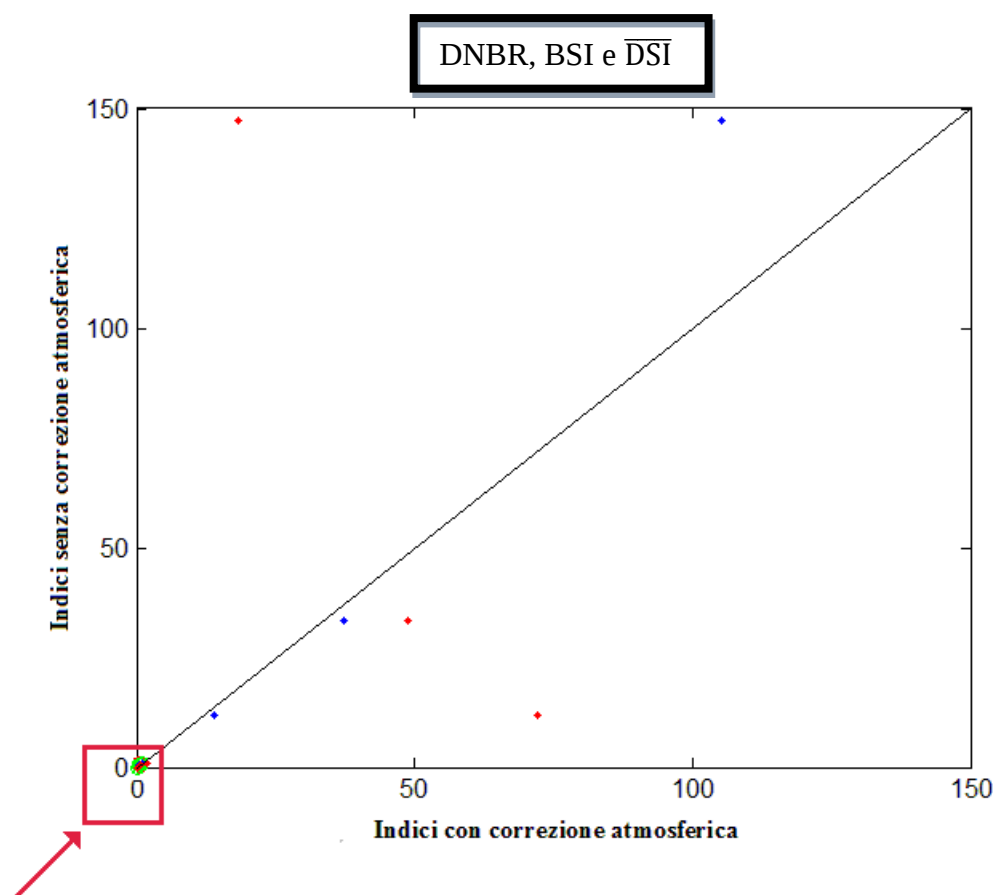


**Figura 3.12** Distribuzione degli indici DNBR, BSI e DSI con diversi tipi di correzione atmosferica.



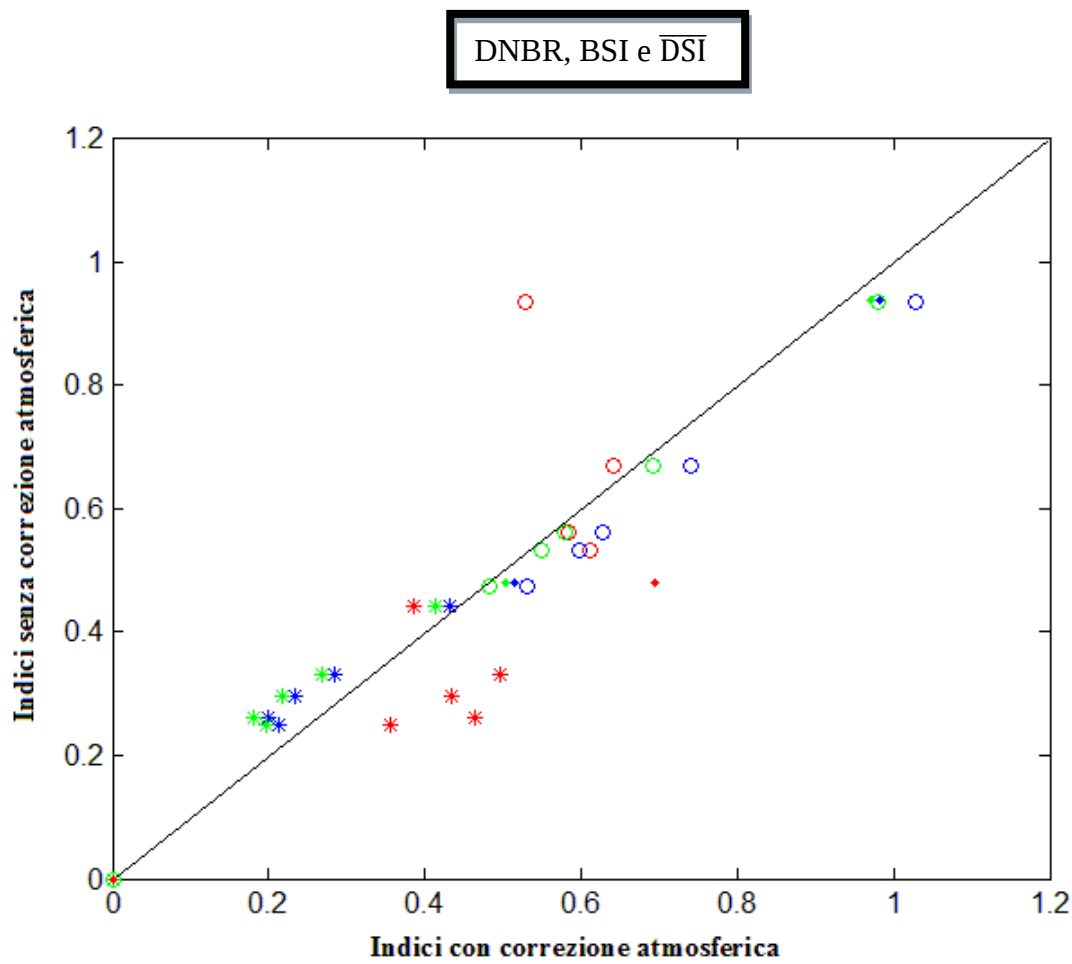
|                                      |                                             |                                                                                                                 |
|--------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <span style="color: red;">○</span>   | <u>DNBR - Correzione atmosferica esatta</u> |                                                                                                                 |
| <span style="color: red;">★</span>   | <u>BSI - Correzione atmosferica esatta</u>  |                                                                                                                 |
| <span style="color: red;">■</span>   | <u>DSI - Correzione atmosferica esatta</u>  |                                                                                                                 |
| <span style="color: blue;">○</span>  | <u>DNBR - Correzione atmosferica errata</u> | $R(\lambda)_A^* = \frac{L(\lambda)_{\text{Mid Lat Winter}}}{I(\lambda) * t(\lambda)_{\text{Mid Lat Summer}}^2}$ |
| <span style="color: blue;">★</span>  | <u>BSI - Correzione atmosferica errata</u>  | $R(\lambda)_A^* = \frac{L(\lambda)_{\text{Mid Lat Winter}}}{I(\lambda) * t(\lambda)_{\text{Mid Lat Summer}}^2}$ |
| <span style="color: blue;">■</span>  | <u>DSI - Correzione atmosferica errata</u>  | $R(\lambda)_A^* = \frac{L(\lambda)_{\text{Mid Lat Winter}}}{I(\lambda) * t(\lambda)_{\text{Mid Lat Summer}}^2}$ |
| <span style="color: green;">○</span> | <u>DNBR - Correzione atmosferica errata</u> | $R(\lambda)_B^* = \frac{L(\lambda)_{\text{Mid Lat Summer}}}{I(\lambda) * t(\lambda)_{\text{Mid Lat Winter}}^2}$ |
| <span style="color: green;">★</span> | <u>BSI - Correzione atmosferica errata</u>  | $R(\lambda)_B^* = \frac{L(\lambda)_{\text{Mid Lat Summer}}}{I(\lambda) * t(\lambda)_{\text{Mid Lat Winter}}^2}$ |
| <span style="color: green;">■</span> | <u>DSI - Correzione atmosferica errata</u>  | $R(\lambda)_B^* = \frac{L(\lambda)_{\text{Mid Lat Summer}}}{I(\lambda) * t(\lambda)_{\text{Mid Lat Winter}}^2}$ |

**Figura 3.13** Distribuzione degli indici DNBR, BSI e DSI con diversi tipi di correzione atmosferica.



|   |                                             |                                                                                                             |
|---|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ○ | DNBR - <u>Correzione atmosferica esatta</u> |                                                                                                             |
| * | BSI - <u>Correzione atmosferica esatta</u>  |                                                                                                             |
| ■ | DSI - <u>Correzione atmosferica esatta</u>  |                                                                                                             |
| ○ | DNBR - <u>Correzione atmosferica errata</u> | $R(\Delta)_A^* = \frac{L(\Delta)_{\text{Mid Lat Winter}}}{I(\Delta) * t(\Delta)_{\text{Mid Lat Summer}}^2}$ |
| * | BSI - <u>Correzione atmosferica errata</u>  | $R(\Delta)_A^* = \frac{L(\Delta)_{\text{Mid Lat Winter}}}{I(\Delta) * t(\Delta)_{\text{Mid Lat Summer}}^2}$ |
| ■ | DSI - <u>Correzione atmosferica errata</u>  | $R(\Delta)_A^* = \frac{L(\Delta)_{\text{Mid Lat Winter}}}{I(\Delta) * t(\Delta)_{\text{Mid Lat Summer}}^2}$ |
| ○ | DNBR - <u>Correzione atmosferica errata</u> | $R(\Delta)_B^* = \frac{L(\Delta)_{\text{Mid Lat Summer}}}{I(\Delta) * t(\Delta)_{\text{Mid Lat Winter}}^2}$ |
| * | BSI - <u>Correzione atmosferica errata</u>  | $R(\Delta)_B^* = \frac{L(\Delta)_{\text{Mid Lat Summer}}}{I(\Delta) * t(\Delta)_{\text{Mid Lat Winter}}^2}$ |
| ■ | DSI - <u>Correzione atmosferica errata</u>  | $R(\Delta)_B^* = \frac{L(\Delta)_{\text{Mid Lat Summer}}}{I(\Delta) * t(\Delta)_{\text{Mid Lat Winter}}^2}$ |

**Figura 3.14** Distribuzione degli indici DNBR, BSI e  $\overline{DSI}$  con diversi tipi di correzione atmosferica.



|                                      |                                             |                                                                                               |
|--------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| <span style="color: red;">○</span>   | DNBR - <u>Correzione atmosferica esatta</u> |                                                                                               |
| <span style="color: red;">✱</span>   | BSI - <u>Correzione atmosferica esatta</u>  |                                                                                               |
| <span style="color: red;">■</span>   | DSI - <u>Correzione atmosferica esatta</u>  |                                                                                               |
| <span style="color: blue;">○</span>  | DNBR - <u>Correzione atmosferica errata</u> | $R(\Delta)_A^* = \frac{L(\Delta)_{Mid Lat Winter}}{I(\Delta) * t(\Delta)_{Mid Lat Summer}^2}$ |
| <span style="color: blue;">✱</span>  | BSI - <u>Correzione atmosferica errata</u>  | $R(\Delta)_A^* = \frac{L(\Delta)_{Mid Lat Winter}}{I(\Delta) * t(\Delta)_{Mid Lat Summer}^2}$ |
| <span style="color: blue;">■</span>  | DSI - <u>Correzione atmosferica errata</u>  | $R(\Delta)_A^* = \frac{L(\Delta)_{Mid Lat Winter}}{I(\Delta) * t(\Delta)_{Mid Lat Summer}^2}$ |
| <span style="color: green;">○</span> | DNBR - <u>Correzione atmosferica errata</u> | $R(\Delta)_B^* = \frac{L(\Delta)_{Mid Lat Summer}}{I(\Delta) * t(\Delta)_{Mid Lat Winter}^2}$ |
| <span style="color: green;">✱</span> | BSI - <u>Correzione atmosferica errata</u>  | $R(\Delta)_B^* = \frac{L(\Delta)_{Mid Lat Summer}}{I(\Delta) * t(\Delta)_{Mid Lat Winter}^2}$ |
| <span style="color: green;">■</span> | DSI - <u>Correzione atmosferica errata</u>  | $R(\Delta)_B^* = \frac{L(\Delta)_{Mid Lat Summer}}{I(\Delta) * t(\Delta)_{Mid Lat Winter}^2}$ |

**Figura 3.15** Distribuzione degli indici DNBR, BSI e  $\overline{DSI}$  con diversi tipi di correzione atmosferica.

### 3.6 Effetto degli aerosol sulla valutazione degli indici

Ulteriori simulazioni sono state effettuate per verificare se la presenza di aerosol in atmosfera altera i valori degli indici DNBR, BSI e  $\overline{DSI}$ . Questo studio è utile in quanto in alcune regioni dell'Italia, prevalentemente quelle meridionali, arrivano correnti d'aria, provenienti dall'Africa, che trasportano piccole particelle di sabbia (dust). In Africa, dopo una tempesta di sabbia, le particelle più grandi e più pesanti cadono sul suolo mentre quelle più leggere rimangono sospese nell'atmosfera a lungo e percorrono, spinte dai venti, diverse centinaia di chilometri. Lo Scirocco, ad esempio, spinge gli aerosol verso l'Europa.

Con la teoria di Mie e il modello MODTRAN è stato ricreato lo scenario in cui le aree coinvolte dall'incendio vengono studiate mediante misure satellitari quando in atmosfera sono presenti particelle in sospensione (aerosol). Come in precedenza, nel software PcModwin3.7, che utilizza il metodo MODTRAN, è stata impostata la quota del satellite pari a 100 Km, l'angolo di zenith di osservazione pari a  $180^\circ$ , l'angolo di zenith del Sole pari  $30^\circ$ . Viene ipotizzato che la vegetazione si trovi al livello del mare e un modello atmosferico tipico delle medie latitudini in estate (Mid Latitude Summer).

#### *Teoria di Mie*

Sono state considerate distribuzioni log-normali di particelle con raggio medio ( $R_{\text{medio}}$ ) 0.2  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  ed è stato scelto un valore della deviazione standard ( $\sigma$ ) pari a 0.5.

Nell'espressione della distribuzione log-normale

$$n(r) = \frac{N_0}{\frac{2\pi\sigma}{\lambda}} \exp \left[ -\frac{\left[ \log\left(\frac{r}{R_{\text{medio}}}\right) \right]^2}{\frac{8\pi^2\sigma^2}{\lambda^2}} \right] \quad (3.22)$$

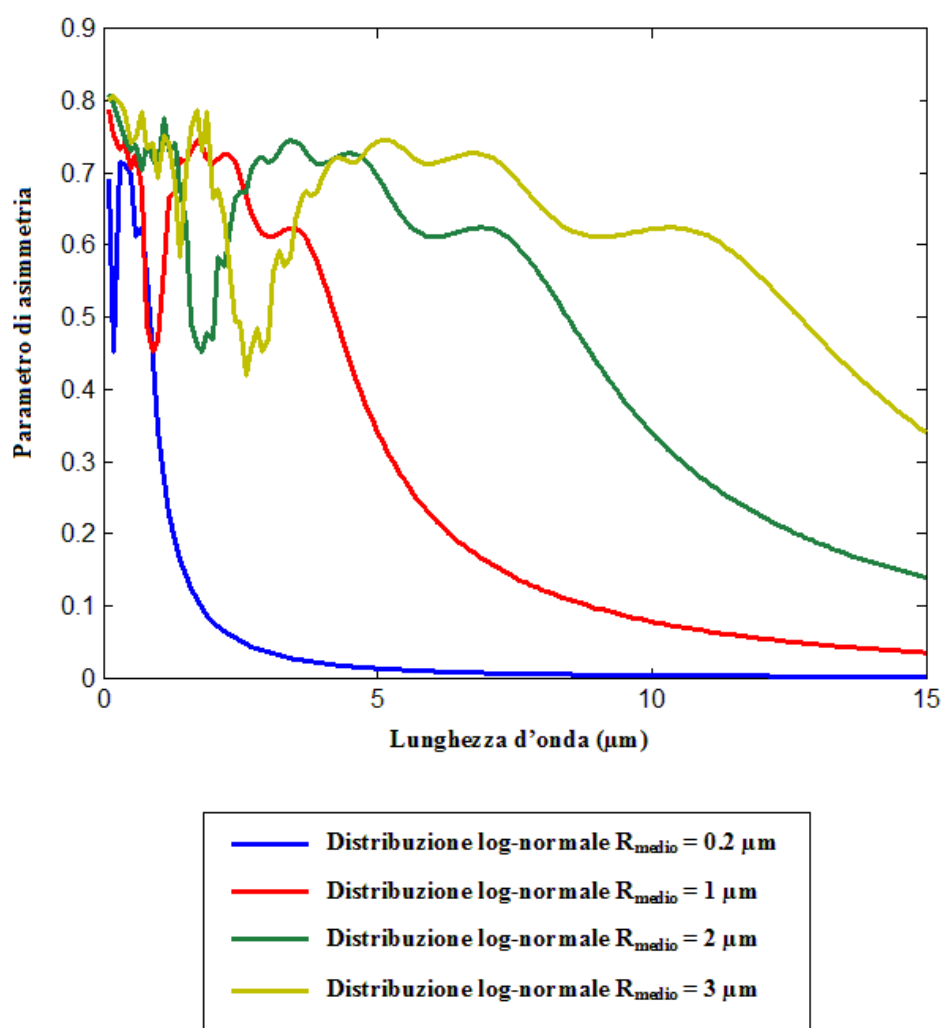
$N_0$  indica il numero totale delle particelle per unità di volume ( $\frac{\text{numero di particelle}}{m^3}$ ),  $\lambda$  la lunghezza d'onda ( $\mu\text{m}$ ) e  $n(r)$  il numero di particelle per un determinato valore del raggio nell'insieme di particelle ( $\frac{\text{numero di particelle}}{m^3}$ ).

L'indice di rifrazione dell'atmosfera è stato considerato pari a 1 mentre quello delle particelle pari a 1.53.

| Parametri utilizzati nella teoria di Mie                |                                                                         |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Indice di rifrazione dell'aria                          | 1                                                                       |
| Indice di rifrazione delle particelle di sabbia ( $m$ ) | 1.53                                                                    |
| Deviazione standard ( $\sigma$ )                        | 0.5                                                                     |
| Intervallo di analisi                                   | 0 $\mu\text{m}$ – 15 $\mu\text{m}$                                      |
| Valori dei raggi medi                                   | 0.2 $\mu\text{m}$ , 1 $\mu\text{m}$ , 2 $\mu\text{m}$ , 3 $\mu\text{m}$ |

**Tabella 3.7** Parametri utilizzati nelle simulazioni.

Con la teoria di Mie è stato ricavato il parametro di asimmetria di una particella per i raggi medi precedentemente indicati (fig. 3.16).



**Figura 3.16** Parametro di asimmetria in funzione della lunghezza d'onda per diversi valori del raggio della particella.

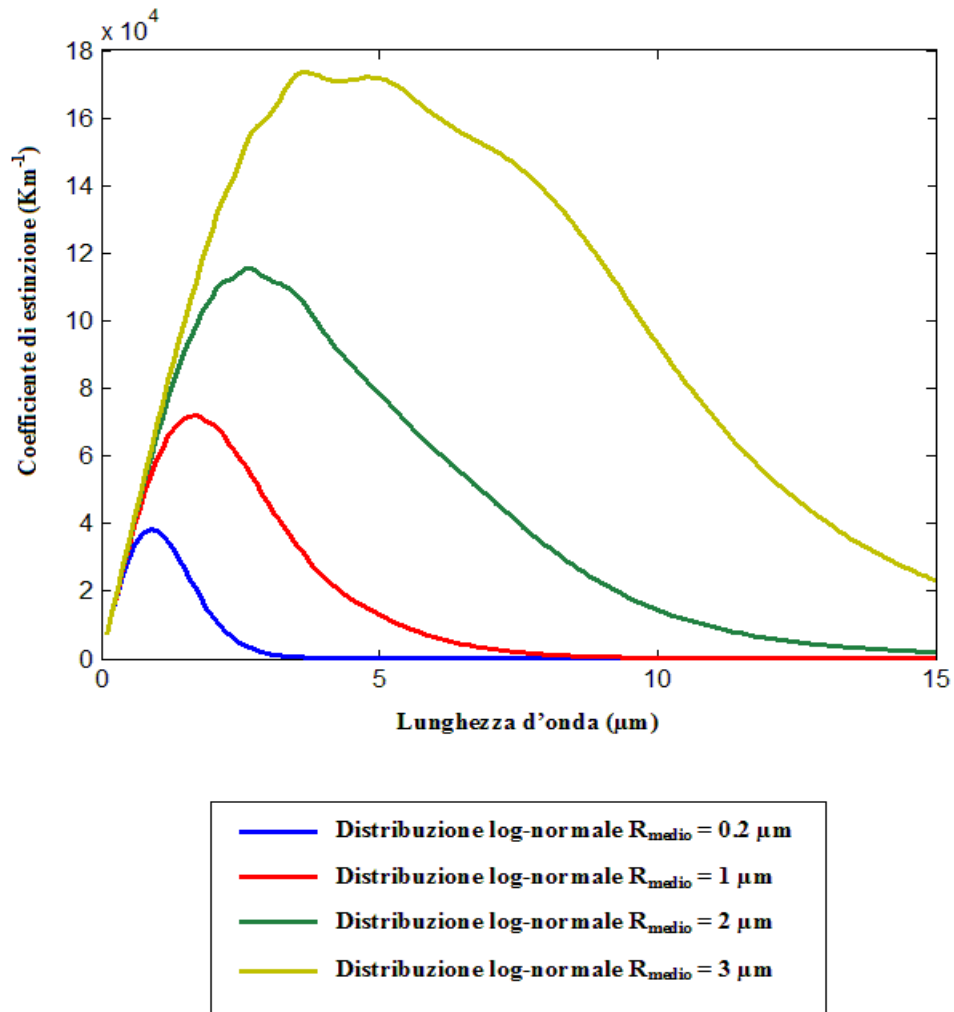
L'andamento del parametro di asimmetria, in un intervallo di lunghezze d'onda compreso tra 0  $\mu\text{m}$  e 15  $\mu\text{m}$ , mostra come la radiazione elettromagnetica viene diffusa a seguito dell'interazione con una particella. Tra 6  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$  il parametro di asimmetria cresce con il raggio, una volta fissata la lunghezza d'onda. Soltanto nel caso Rayleigh (particelle di dimensioni molto più piccole della lunghezza d'onda della radiazione) la radiazione viene diffusa nel modo più simmetrico possibile. Dopo 5  $\mu\text{m}$  il parametro di asimmetria tende a decrescere quando  $\lambda$  aumenta e questo avviene tanto meno rapidamente quanto più il raggio medio è grande. In generale la radiazione tende a ripartirsi in modo simmetrico solo quando la lunghezza d'onda è molto più grande di  $R_{\text{medio}}$ .

L'andamento, tra 0  $\mu\text{m}$  e 15  $\mu\text{m}$ , sembra essere caratterizzato da un minimo e questo è dovuto all'indice di rifrazione che non presenta una parte immaginaria.

La Cross Section ( $C$ ) o sezione d'urto della particella rappresenta un indice di quanto questa estingue la radiazione elettromagnetica.  $C$  dipende dalla dimensione del particolato secondo la relazione

$$C = \pi r^2 Q_{\text{ext}} \quad (3.23)$$

dove  $r$  è il raggio della particella e  $Q_{\text{ext}}$  il suo coefficiente di estinzione, funzione di  $\frac{2\pi r}{\lambda}$  e dell'indice di rifrazione  $m$ .



**Figura 3.17** Coefficiente di estinzione in funzione della lunghezza d'onda per diversi valori del raggio medio.

La teoria di Mie consente di calcolare anche il coefficiente di estinzione (effetto combinato dell'assorbimento e diffusione dovuti alla particella) per una distribuzione log-normale di particelle con un dato raggio medio. Il coefficiente di estinzione è definito come

$$K = \int_0^\infty \pi r^2 Q_{\text{ext}}\left(\frac{2\pi r}{\lambda}, m\right) \frac{dn(r)}{dr} dr \quad (3.24)$$

$K$  descrive l'estinzione data da un gruppo di particelle con distribuzione log-normale e con raggio medio assegnato. Viene sommato il prodotto tra la Cross Section di una particella con raggio  $r$  e il numero di particelle con quel raggio presenti nell'unità di volume, con i prodotti ottenuti volta in volta con un diverso valore di  $r$ , per  $r$  tra 0 e  $\infty$ .  $K$  quindi è dato dalla somma dei singoli contributi di estinzione e dipende, oltre che dalla particella attraverso l'indice di rifrazione  $m$ , sia da  $r$  che da  $\lambda$ . I valori del coefficiente di estinzione vengono moltiplicati per  $10^{-9}$  per poter essere espressi in  $\text{Km}^{-1}$ . PcModwin 3.7, infatti, accetta valori di  $K$  per strati atmosferici espressi in  $\text{Km}$ .

Nel grafico, ogni curva (o Extinction coefficient) corrisponde ad un insieme di elementi con distribuzione log-normale con un dato raggio medio  $R_{\text{medio}}$  e  $\sigma = 0.5$ . Si osserva il valore massimo in prossimità di  $\frac{2R_{\text{medio}}}{\lambda} = 1$ : sono gli elementi di raggio  $R_{\text{medio}}$  che comportano la massima estinzione.

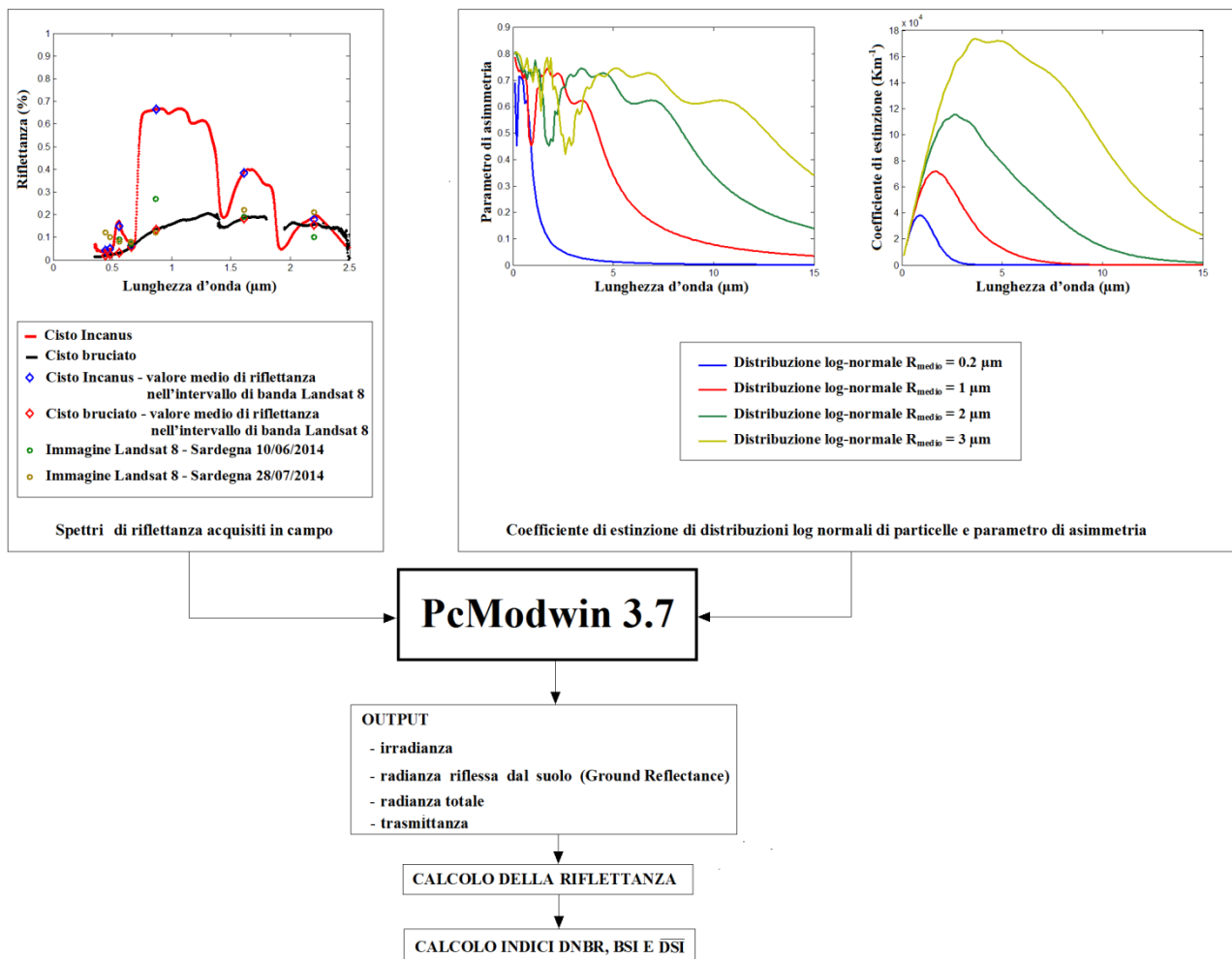
I risultati nel grafico mostrano chiaramente, per un certo insieme (consideriamo una sola curva), quanto le particelle di raggio  $R_{\text{medio}}$  siano in prevalenza numerica sulle altre: lo scattering è massimo per una lunghezza d'onda pari al diametro del singolo elemento e se si considera, in termini di estinzione, la somma dei singoli effetti di risonanza, per ogni  $\lambda$  se ne ha un valore. La somma massima si ha per le particelle che sono più presenti e ciò avviene per  $\frac{2R_{\text{medio}}}{\lambda} = 1$ . Se  $\lambda$  è superiore a  $2R_{\text{medio}}$ ,  $K$  decresce.

Si può osservare che  $K$ , per  $\lambda \leq 0.55 \mu\text{m}$ , ha un comportamento simile indipendentemente dal valore di  $R_{\text{medio}}$ , mentre per valori superiori, cresce con il raggio medio.

Il numero totale delle particelle, per unità di volume, nell'espressione della distribuzione log-normale, è stato assunto pari a 1 quindi, per considerare diversi gruppi di particelle, per ogni valore del raggio medio, la funzione integranda, che consente di ottenere  $K$ , è stata moltiplicata per diversi valori  $f$  riportati in tabella 3.8.

| <i>f</i><br>Numero di particelle<br>per unità di volume (m <sup>-3</sup> ) |
|----------------------------------------------------------------------------|
| 5000                                                                       |
| 10000                                                                      |
| 20000                                                                      |
| 40000                                                                      |
| 50000                                                                      |
| 65000                                                                      |
| 75000                                                                      |
| 85000                                                                      |

**Tabella 3.8** Numero di particelle nella distribuzione log-normale.



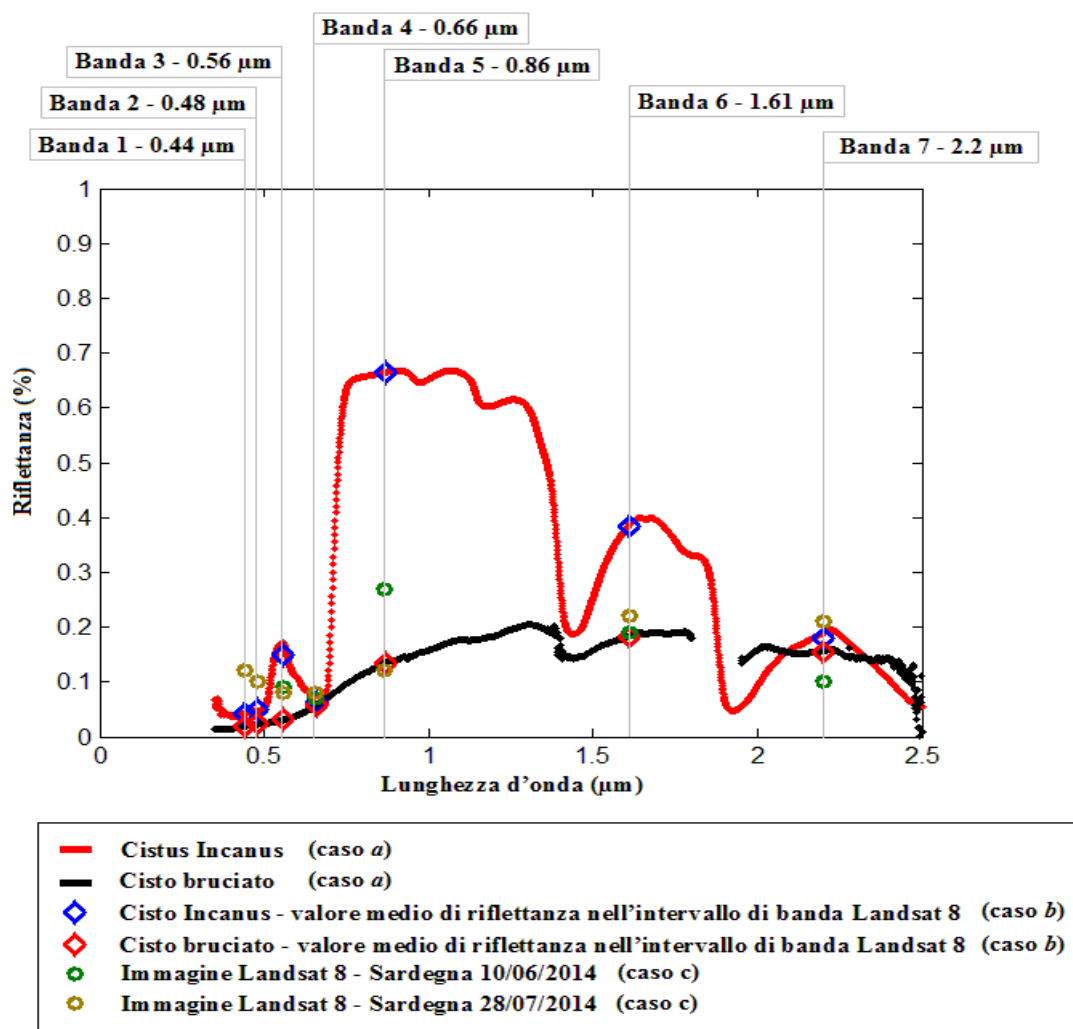
**Figura 3.18** Simulazioni MODTRAN per studiare gli indici DNBR, BSI e DSI in presenza di aerosol.

Le simulazioni sono state ottenute con il software PcModwin3.7, utilizzando, nell'intervallo  $0.2 \mu\text{m}$  –  $2.5 \mu\text{m}$ , i valori del coefficiente di estinzione delle distribuzioni log-normale di particelle, i valori del parametro di asimmetria delle particelle con raggio  $r = R_{medio}$  e i valori di riflettanza della vegetazione. I valori del coefficiente di estinzione vengono inseriti nello strato atmosferico 0- 2 Km di PcModwin mentre nello strato 2-10 Km, ipotizzando che solo le particelle più leggere rimangono sospese più a lungo, il valore dei coefficienti di estinzione sono divisi per due.

Per gli input delle simulazioni sono stati considerati tre casi (fig. 3.19):

- riflettanza della vegetazione ottenuta in laboratorio (Cistus Incanus e Cisto bruciato)
- riflettanza media negli intervalli delle bande Landsat8 utilizzando sempre gli spettri di laboratorio

c) riflettanza media ottenuta dalle immagini Landsat8 della Sardegna del 10/06/2014 (prima dell'incendio) e del 28/07/2014 (dopo l'incendio) all'interno dell'area bruciata precedentemente analizzata (par. 3.1, Fig. 3.3).



**Figura 3.19** Valori di riflettanza della vegetazione prima e dopo l'incendio ottenuti con misure in situ e misure satellitari e utilizzati nelle simulazioni MODTRAN.

Per ogni caso vengono considerati gli spettri di riflettanza corrispondenti alla vegetazione sana e quelli corrispondenti alla vegetazione bruciata (Fig. 3.19).

Si osserva che la vegetazione sana ha i valori massimi di riflettanza nella regione del vicino infrarosso, valori inferiori sono presenti nella regione dell'infrarosso medio. Nella regione del visibile, la radiazione elettromagnetica viene riflessa prevalentemente nel verde.

Dopo l'incendio, la riflettanza nel vicino e medio infrarosso diminuisce e tende a zero nel visibile.

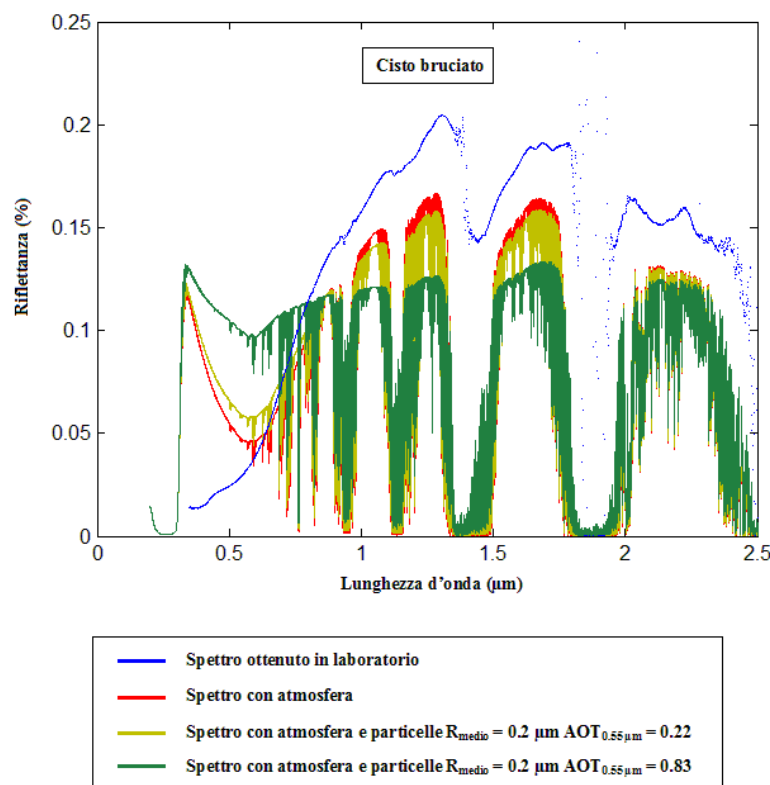
La diminuzione nell'infrarosso è più forte tra 0.72  $\mu\text{m}$  e 1.3  $\mu\text{m}$ .

PcModwin3.7 genera un file (MODOUT2) con i valori di irradianza (I), radianza totale ( $L_{\text{tot}}$ ), radianza riflessa dal suolo (Ground Reflectance (L)) e trasmittanza (t) nell'intervallo 0.2  $\mu\text{m}$  – 2.5  $\mu\text{m}$ .

Considerando l'angolo di zenith del sole ( $\theta$ ) pari a 0, l'espressione  $R(\lambda) = \frac{L(\lambda)}{\frac{I(\lambda) \cdot \cos(\theta) \cdot t(\lambda)^2}{\pi}}$  consente di calcolare la riflettanza spettrale della vegetazione per unità di angolo solido dopo aver applicato la correzione atmosferica.  $R(\lambda)$ , inoltre, corrisponde alla riflettanza acquisita con il spettroradiometro in campo.

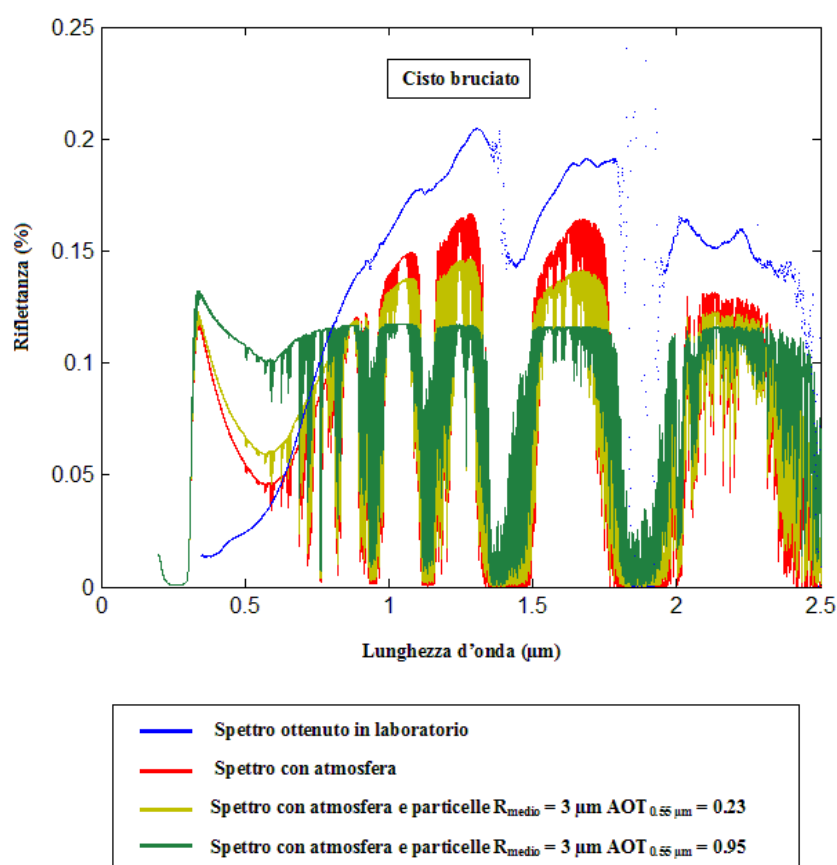
L'espressione  $R(\lambda) = \frac{L(\lambda)_{\text{tot}}}{I(\lambda)}$  consente invece di ricavare la riflettanza spettrale considerando la presenza dell'atmosfera e degli aerosols.

#### a) Riflettanza ottenuta in laboratorio



**Figura 3.20** Riflettanza in funzione della lunghezza d'onda in presenza di aerosol ( $R_{\text{medio}}=0.2 \mu\text{m}$ ) ottenuta mediante simulazioni MODTARN. Vengono utilizzati in input i valori di riflettanza calcolata da misure in situ.

In Fig. 3.20 la curva in blu corrisponde allo spettro di riflettanza della vegetazione acquisito in campo dopo l'incendio: la riflettanza nella regione del visibile è caratterizzata da valori molto bassi mentre raggiunge i valori più alti nella regione del vicino e medio infrarosso. In rosso, giallo e verde vengono rappresentati gli spettri della vegetazione bruciata considerando la presenza dell'atmosfera e degli aerosols: si osservano alti valori di riflettanza nella regione del blu dovuto allo scattering atmosferico e aerosolico; un aumento della riflettanza nel verde e nel rosso è determinato unicamente dalla presenza degli aerosols. Nella regione dell'infrarosso, l'assorbimento e lo scattering atmosferico provocano un'attenuazione della radiazione elettromagnetica quindi la radianza riflessa dalla vegetazione, misurata dal sensore, è inferiore rispetto a quella misurata in campo. La presenza degli aerosols determina un'attenuazione della radiazione elettromagnetica significativamente più intensa rispetto al caso atmosferico e quindi un'ulteriore diminuzione della riflettanza spettrale tanto più forte quanto più è alto lo spessore ottico aerosolico (AOT).

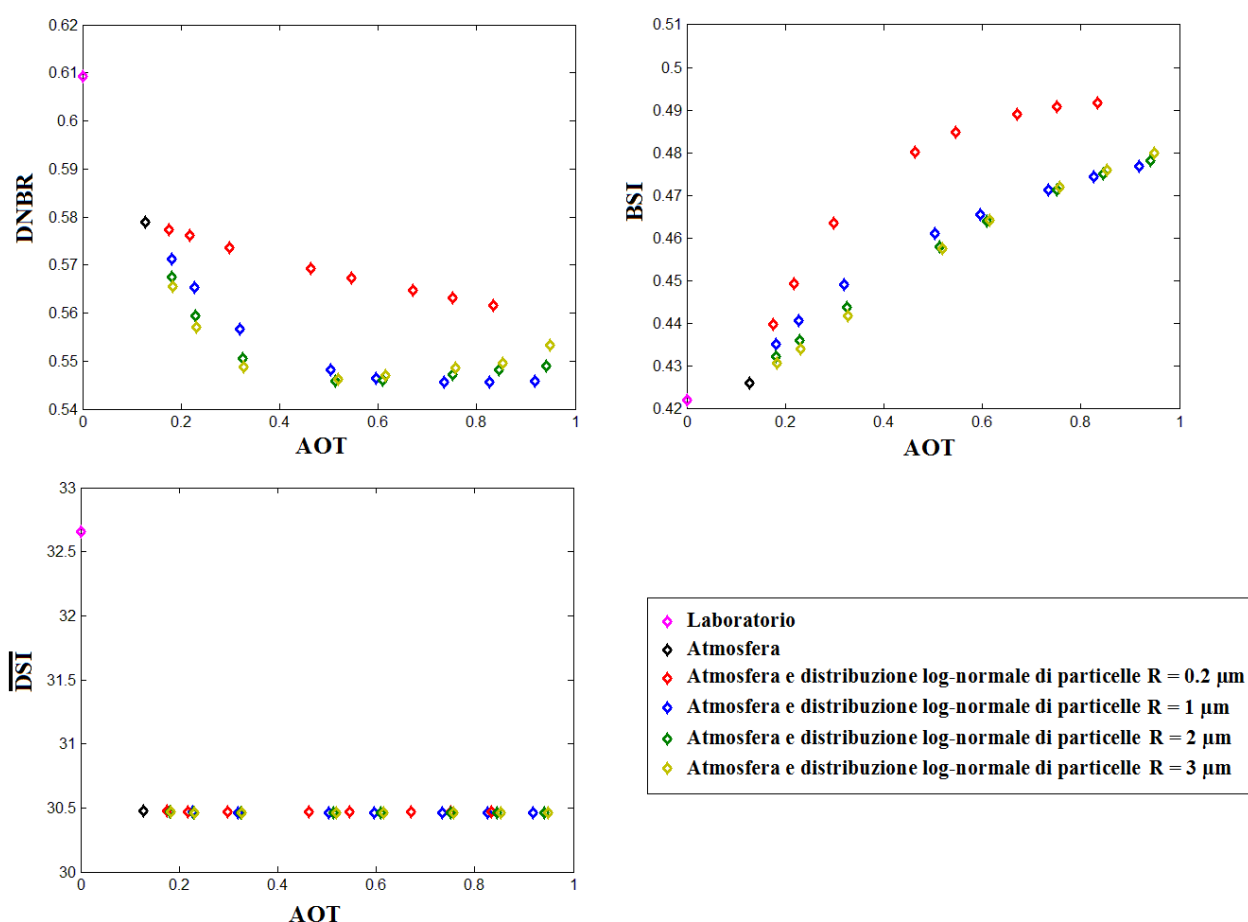


**Figura 3.21** Riflettanza in funzione della lunghezza d'onda in presenza di aerosol ( $R_{\text{medio}} = 3 \mu\text{m}$ ) ottenuta mediante simulazioni MODTARN. Vengono utilizzati in input i valori di riflettanza calcolata da misure in situ.

La Fig.3.21 mostra lo spettro di riflettanza della vegetazione bruciata acquisito in campo in blu e gli spettri con la presenza di atmosfera e distribuzioni log-normali di particelle con un valore del raggio medio diverso rispetto al caso precedente in rosso, giallo e verde. Il raggio medio pari a  $3\text{ }\mu\text{m}$  causa uno scattering maggiore a lunghezze d'onda prossime a  $6\text{ }\mu\text{m}$ . Si può confrontare la curva in giallo con AOT pari a 0.23 di Fig. 3.21 con la curva in giallo con AOT pari a 0.22 della figura precedente (Fig 3.20): l'attenuazione della radiazione elettromagnetica, per la presenza dell'atmosfera e aerosols con raggio medio  $3\text{ }\mu\text{m}$  e AOT pari 0.23, è più intensa ad alte lunghezze d'onda.

Per calcolare gli indici DNBR, BSI e  $\overline{\text{DSI}}$  vengono considerati le simulazioni con vegetazione sana con e senza atmosfera, simulazioni con vegetazione bruciata con e senza atmosfera e aerosols.

In Fig. 3.22 vengono riportati gli indici ottenuti utilizzando la riflettanza della vegetazione di laboratorio (caso “a”) come input per PcModwin 3.7.



**Figura 3.22** Variazione degli indici DNBR, BSI e  $\overline{\text{DSI}}$  considerando diversi valori dello spessore ottico aerosolico e diversi valori del raggio medio. Vengono utilizzati in input i valori di riflettanza calcolata da misure in situ.

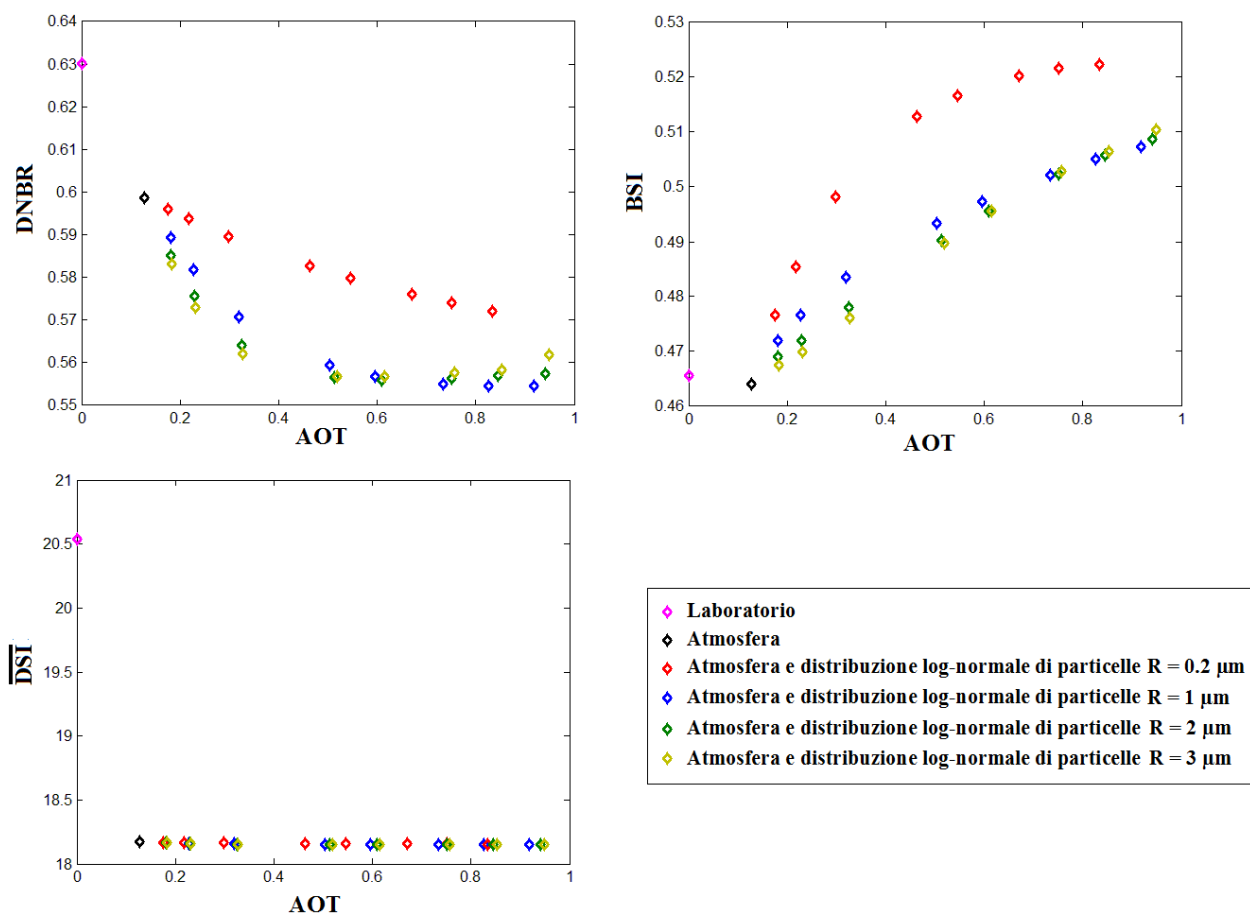
Il DNBR ha un valore più basso se non si rimuove il contributo atmosferico e presenta un andamento decrescente con l'aumentare dello spessore ottico aerosolico per un dato raggio medio. Si osserva inoltre che per un dato valore dello spessore ottico DNBR diminuisce con l'aumentare del raggio medio. Il DNBR, per la distribuzione log normale con raggio medio 3  $\mu\text{m}$ , tende ad aumentare dopo un valore di AOT pari a 0.5.

L'andamento di BSI presenta un andamento e una concavità differente rispetto al caso precedente. Osservando la figura Fig (3.20 e 3.21) si può capire che un aumento dello spessore ottico aerosolico, considerando lo spettro di vegetazione dopo l'incendio, provoca una differenza di riflettanza NIR – SWIR2 negativa e, in modulo, via via decrescente quindi 
$$\text{NBR} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR2}}{\text{NIR} + \text{SWIR2}},$$
 dopo l'incendio, da un valore negativo, tende ad aumentare e DNBR tende a decrescere. Per DNDII il ragionamento è simile. DNDVI ha un comportamento opposto: con l'aumentare dello spessore ottico aerosolico, dopo l'incendio, la differenza di riflettanza positiva NIR – RED diminuisce, quindi 
$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}}$$
 per la vegetazione bruciata diminuisce e DNDVI aumenta. Il comportamento di DNDVI prevale su quello di DNBR e DNDII e determina l'andamento crescente di BSI.

L'indice  $\overline{\text{DSI}}$  non sembra essere influenzato dalla presenza dell'atmosfera e degli aerosols.

*b) Riflettanza ottenuta in laboratori: riflettanza media negli intervalli delle bande Landsat8*

La Fig. 3.23 mostra i risultati considerando in input i valori di riflettanza medi negli intervalli delle bande Landsat 8 ottenuti dagli spettri di laboratorio. DNBR, BSI e  $\overline{\text{DSI}}$  hanno andamenti simili al caso precedente.



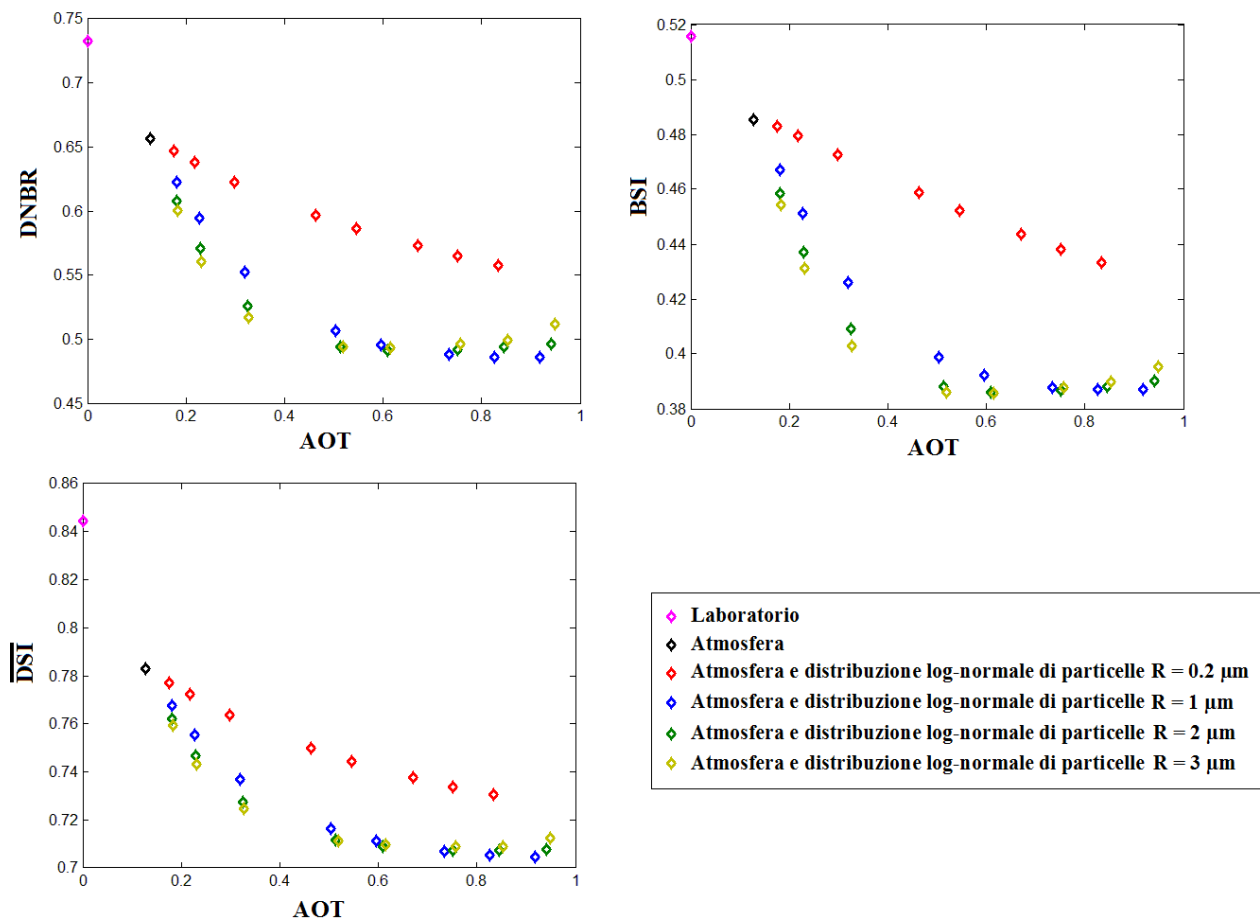
**Figura 3.23** Variazione degli indici DNBR, BSI e DSI considerando diversi valori dello spessore ottico aerosolico e diversi valori del raggio medio. Vengono utilizzati in input i valori di riflettanza media negli intervalli delle bande Landsat8 calcolati sugli spettri di laboratorio.

*c) Riflettanza media ottenuta dalle immagini Landsat8 della Sardegna del 10/06/2014 e del 28/07/2014 all'interno dell'area bruciata (par. 3.1 Fig.3.3).*

In figura 3.24 possiamo osservare gli indici quando vengono utilizzati in input i valori di riflettanza medi nell'area bruciata considerata (vedi par. 3.1 Fig. 3.3) ricavati dalle immagini Landsat 8 della Sardegna del 10/06/2014 e del 28/07/2014: l'andamento decrescente con l'aumentare dello spessore ottico aerosolico caratterizza tutti gli indici. Inoltre DNBR, BSI e  $\overline{DSI}$ , ad una data lunghezza d'onda, diminuiscono con l'aumentare del raggio medio.

Il comportamento degli indici, diverso rispetto ai casi precedenti ("a" e "b"), è dovuto all'uso di valori di riflettanza non corretti atmosfericamente come input nelle simulazioni MODTRAN. Inoltre, osservando la figura 3.19 con i dati utilizzati in PcModwin, si può notare che l'andamento

della riflettanza ottenuta da immagini Landsat 8, rispetta le ipotesi iniziali secondo cui la riflettanza nello SWIR, dopo l'incendio, tende a crescere. Al contrario, nei casi “a” e “b”, i valori di  $R(\lambda)$  nelle bande 6 e 7 di Landsat 8, ottenuti dai dati di laboratorio acquisiti dopo l'incendio, sono più bassi di quelli ottenuti dai dati di laboratorio acquisiti prima dell'incendio (fig. 3.19). Quindi si ritengono attendibili solo i risultati ottenuti da simulazioni in cui vengono utilizzati valori di riflettanza calcolati da dati Landsat 8.



**Figura 3.24** Variazione degli indici DNBR, BSI e DSI considerando diversi valori dello spessore ottico aerosolico e diversi valori del raggio medio. Vengono utilizzati in input i valori di riflettanza media nell'area bruciata calcolati con le immagini Landsat8 della Sardegna acquisite il 10/06/2014 e il 28/07/2014.

## Capitolo 4 Algoritmi

### 4.1 Algoritmi per PREFER

Durante l'attività di dottorato, è stato sviluppato un algoritmo in linguaggio MATLAB per ottenere mappe del livello di danno sulla vegetazione dovuto agli incendi. Il programma ("Calcola\_Danno"), utilizzando file scritti in formato vettoriale (shapefile) contenenti i perimetri delle aree bruciate e immagini Landsat8 relative a epoche precedenti e successive all'incendio, calcola in modo automatico gli indici di severità del danno nelle aree bruciate con superficie superiore a 10 ha e crea quindi le mappe degli indici DNBR, BDI e DSI.

Il funzionamento dell'algoritmo Calcola\_Danno si basa su un sistema a loop chiuso che consente di automatizzare il processo di monitoraggio delle zone colpite dagli incendi: un programma FTP, ogni 24 ore, verifica la presenza, sul sito del progetto PREFER, dei prodotti REC-BSHRO cioè dei file in formato shape contenenti i perimetri delle aree bruciate nelle aree test (Italia, Francia, Portogallo, Spagna e Grecia). I prodotti REC-BSHRO sono generati da alcuni partners di PREFER e vengono nominati nel modo seguente

REC-BSHRO-IT-140610L8-140728L8-1408061703

I termini che compaiono indicano:

- REC-BSHRO: il prodotto PREFER Burn Scar Map, ossia il perimetro dell'area bruciata, ottenuto mediante analisi multispettrale e multi-temporale di dati satellitari ad alta risoluzione (High Resolution Optical data).
- IT: l'area test che in questo caso è la Sardegna (Italia)
- 140610: la data di acquisizione dell'immagine Landsat8 (L8) prima dell'incendio
- 140728: la data di acquisizione dell'immagine Landsat8 dopo l'incendio
- 1408061703: la data e l'ora di elaborazione delle immagini, ossia, in questo caso, 6 Agosto 2014 ore 17:03.

Se sono presenti, i prodotti REC-BSHRO vengono spostati in una cartella: l'algoritmo *Calcola\_Danno* legge il nome del file REC-BSHRO e confronta, la data di acquisizione dell'immagine Landsat8 dopo l'incendio con quella dell'ultimo file REC-BSHRO analizzato considerando la stessa area test. Se la data letta è successiva a quella del file già analizzato significa che sono presenti nuove aree bruciate e si procede quindi con l'estrazione dei file.

L'algoritmo, dopo aver calcolato le superfici delle aree bruciate, crea una variabile Matlab con i nomi delle aree superiori a 10 ha. Questa soglia è stata scelta appositamente per studiare regioni in cui gli incendi hanno comportato perdite di biomassa rilevanti.

Successivamente ogni area bruciata di dimensioni superiori a 10 ha viene confrontata con i footprints delle immagini Landsat8 e vengono memorizzati i parametri Path e Row corrispondenti ai footprints che la contengono.

A questo punto il programma *Calcola\_Danno*, mediante le date di acquisizione prima e dopo l'incendio e i parametri Path e Row, avvia il download delle due immagini Landsat8 con le aree bruciate.

Per verificare se l'immagine è stata scaricata in modo corretto, l'algoritmo crea un file testo con informazioni sull'esito dell'operazione e in caso di errore, può ripetere il download fino a 3 volte.

Le immagini multispettrali Landsat8 vengono convertite in riflettanza e viene eseguita la normalizzazione con diversi metodi che vengono esaminati qui di seguito.

#### - Metodo IRMAD

Il metodo automatico di normalizzazione radiometrica Iteratively Re-weighted Multivariate Alteration Detection (IR-MAD) [21] è una versione migliorata del metodo MAD [22] per la normalizzazione radiometrica automatica di immagini multispettrali e iperspettrali. Il metodo IR-MAD utilizza l'analisi di correlazione canonica (CCA) [4] per costruire combinazioni lineari tra due gruppi di variabili (bande spettrali e immagini di riferimento o coppie di bande) e genera una nuova coppia di immagini multispettrali i cui elementi vengono chiamati Variabili Canoniche (Canonical Variates, CVs). Ogni coppia di variabili canoniche, massimamente correlate, è ortogonale ad altre coppie. Questo significa che la differenza tra le due nuove immagini mostrerà massimo valore nell'intensità dei pixel. Poiché le variabili MAD non sono correlate tra loro e sono invarianti se si considerano trasformazioni di una o entrambe le immagini multispettrali originali, possono essere utilizzate per individuare caratteristiche pseudo-invarianti (pseudo-invariant features, PIFs) applicando una soglia di decisione alla somma del quadrato delle variabili MAD normalizzate (valori Z). Ipotizzando che i pixel PIFs sono caratterizzati da una distribuzione normale e il loro valore Z segue una distribuzione chi-quadro con N gradi di libertà (N è pari al

numero delle bande), la soglia può essere determinata con un valore di probabilità (il valore di default è 95%). È chiaro che alta probabilità implica una ridotta quantità di pixel PIFs con alta qualità.

I PIFs, che rappresentano i pixel senza cambiamenti tra le immagini, sono stati usati per ricavare, usando una regressione lineare ortogonale, una relazione utile a normalizzare l'immagine.

- *Metodo della rimozione dell'effetto radiometrico con la relazione lineare*

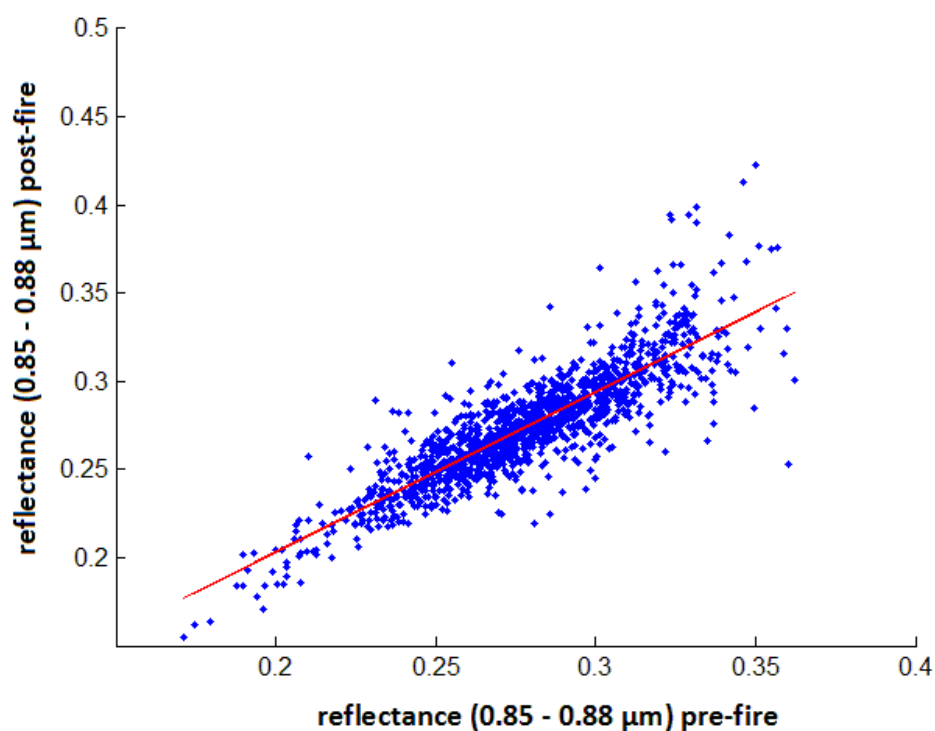
Il metodo IR-MAD non si è dimostrato sempre efficace. Sono state riscontrate infatti anomalie nell'individuazione dei pixel invarianti che hanno generato, nella nuova immagine normalizzata, vaste aree con valore costante della riflettanza. È stato sviluppato quindi un nuovo metodo che prevede l'individuazione dei pixel invarianti non in modo automatico: vengono scelti una volta per tutte, sulle immagini Landsat8 precedenti e successive all'incendio, i pixel esterni all'area bruciata che si trovano su strade, aree urbane e aeroporti dove si può ritenere che lo stato dell'oggetto non cambia tra un'immagine e l'altra e le variazioni di riflettanza spettrale sono dovute all'atmosfera e a piccoli cambiamenti della geometria di osservazione. Nella figura 4.1 sono riportati alcuni esempi di pixel invarianti individuati nelle immagini Landsat8 della Sardegna.



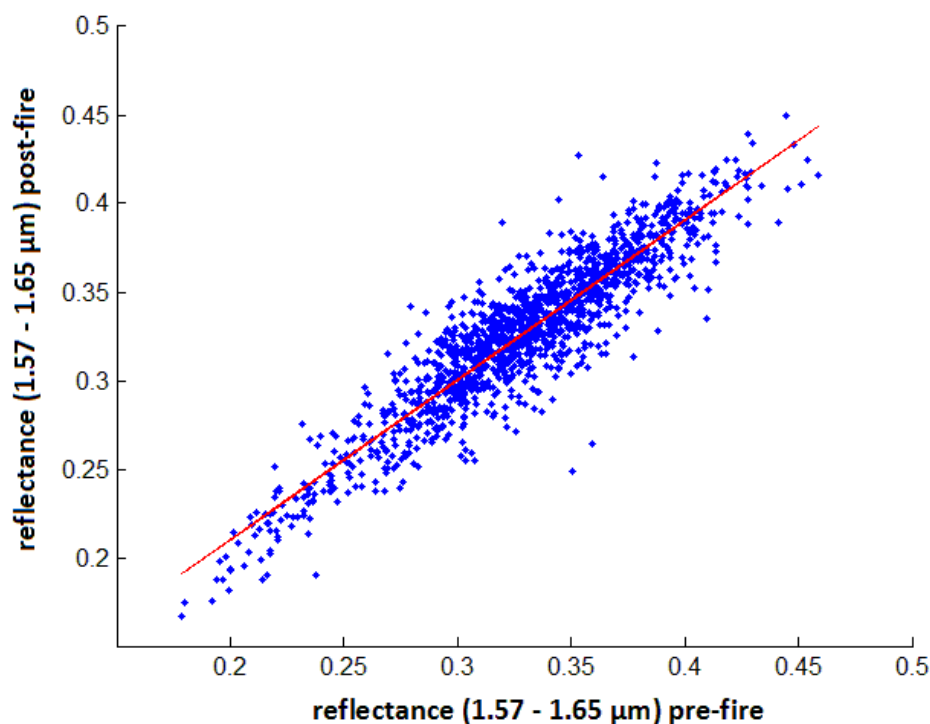
**Figure 4.1** Pixel invarianti individuati su un'immagine Landsat8 della Sardegna acquisita il 10/06/2014.

Le Figure 4.2 e 4.3 mostrano i valori di riflettanza pre e post incendio rispettivamente nelle bande 5 e 6 del sensore OLI di Landsat8 per tutti i pixel invarianti individuati nelle immagini. Questo esempio consente quindi di individuare una relazione lineare tra l'immagine prima e dopo l'incendio per la banda 5 e la banda 6.

Come descritto nel par 3.3, le relazioni, calcolate per tutte le bande Landsat8, consentono di ottenere un'immagine pre\_fire, correlata a quella post\_fire, in cui è stato rimosso l'effetto radiometrico.



**Figure 4.2** Distribuzione dei valori di riflettanza dei pixel invarianti prima e dopo l'incendio per la banda 5.



**Figure 4.3** Distribuzione dei valori di riflettanza dei pixel invarianti prima e dopo l'incendio per la banda 6.

L'algoritmo di stima del danno utilizza le immagini normalizzate con i metodi precedenti e calcola gli indici di severità del danno. In particolare utilizza le immagini in riflettanza nelle bande 4, 5, 6, e 7 di Landsat8 per ricavare NBR, NDVI, NDII e MNBR prima e dopo l'incendio e da questi calcola DNBR, BSI e DSI (par. 3.1).

Il prodotto finale generato è costituito da tre mappe, per ogni area bruciata, con i valori degli indici, che vengono salvate in formato zip in una cartella. Infine un programma FTP una volta ogni 24 ore provvede a eseguire l'upload dei risultati, se presenti, sul sito di PREFER in modo che siano disponibili per gli utenti.

L'algoritmo *Calcola\_Danno*, una volta terminata l'analisi, attende circa sei ore prima di verificare l'eventuale presenza di nuovi prodotti REC-BSHRO e iniziare nuovamente il calcolo degli indici.

## Capitolo 5 Analisi risultati (Validazione)

### 5.1 Risultati

I dati satellitari sono stati utilizzati per monitorare gli incendi boschivi in alcune aree dell'Europa e hanno consentito di generare mappe del livello di danno sulla vegetazione utili per la fase di recupero delle zone colpite. I livelli di danno, in un'area coinvolta dall'evento, sono ottenuti applicando delle soglie ai valori degli indici DNBR, BSI e DSI [4].

Per la definizione delle soglie, ossia per calibrare gli indici, è stato studiato l'impatto degli incendi, verificatisi nell'estate 2013, su aree vegetate della Sardegna: sono stati calcolati, con dati multispettrali Landsat8, gli indici DNBR, BSI e DSI su aree bruciate di dimensioni superiori a 10 ha e sono state effettuate misure in situ acquisendo dati GPS e foto che hanno permesso, mediante un'analisi visiva, di stimare l'indice CBI (par 3.1) in alcuni punti delle stesse aree.

Il confronto, nei punti dove sono state effettuate le misure in situ, tra i valori dell'indice CBI e i valori dell'indice DSI ha permesso la definizione, una volta per tutte, delle soglie di danno per l'indice DSI (tab 5.1):

- **No Damage ( $DSI \leq 0$ ):** l'area non mostra differenze dalle condizioni pre-evento
- **Very Low Damage ( $DSI < 0.5$ ) e Low Damage ( $0.5 < DSI < 1$ ):** sono presenti piccoli cambiamenti nella vegetazione in termini di copertura e mortalità.
- **Moderate Damage ( $1 < DSI < 1.5$ ):** effetti sulla vegetazione classificabili come piccoli e grandi cambiamenti.
- **High Damage ( $1.5 < DSI < 2$ ) e Very High Damage ( $DSI > 2$ ):** la vegetazione è completamente morta.

Le relazioni lineari tra gli indici, ottenute nel par. 3.2, sono state utilizzate per calcolare le soglie di danno di DNBR e BSI note le soglie di DSI (tab.5.1). I valori riportati in tabella 5.1 vengono utilizzati per creare le mappe del danno.

| Soglie di danno |                 |                    |                    |                     |                  |
|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|---------------------|------------------|
| No damage       | Very low damage | Low damage         | Moderate damage    | High damage         | Very high damage |
| $DSI \leq 0$    | $DSI < 0.5$     | $0.5 < DSI < 1$    | $1 < DSI < 1.5$    | $1.5 < DSI < 2$     | $DSI > 2$        |
| $BSI \leq 0$    | $BSI < 0.16$    | $0.16 < BSI < 0.4$ | $0.4 < BSI < 0.66$ | $0.66 < BSI < 0.9$  | $BSI > 0.9$      |
| $DBR \leq 0$    | $DBR < 0.25$    | $0.25 < DBR < 0.6$ | $0.6 < DBR < 0.94$ | $0.94 < DBR < 1.28$ | $DBR > 1.28$     |

**Tabella 5.1** Soglie del livello di danno ottenute confrontando valori dell'indice DSI con valori dell'indice CBI. Per le soglie DNBR e BSI sono state utilizzate le relazioni del par. 3.2.

Per completezza viene mostrato nelle tabella 5.2 e 5.3 come cambiano le soglie di danno se vengono utilizzate le relazioni del paragrafo 3.3 e 3.4.

| Soglie di danno ottenute dalle relazioni lineari tra indici (par 3.3) |                 |                      |                      |                      |                  |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------|
| No damage                                                             | Very low damage | Low damage           | Moderate damage      | High damage          | Very high damage |
| $DSI \leq 0$                                                          | $DSI < 0.5$     | $0.5 < DSI < 1$      | $1 < DSI < 1.5$      | $1.5 < DSI < 2$      | $DSI > 2$        |
| $BSI \leq 0$                                                          | $BSI < 0.18$    | $0.18 < BSI < 0.47$  | $0.47 < BSI < 0.77$  | $0.77 < BSI < 1.06$  | $BSI > 1.06$     |
| $DNBR \leq 0$                                                         | $DNBR < 0.26$   | $0.26 < DNBR < 0.66$ | $0.66 < DNBR < 1.07$ | $1.07 < DNBR < 1.47$ | $DNBR > 1.47$    |

**Tabella 5.2** Soglie del livello di danno ottenute confrontando valori dell'indice DSI con valori dell'indice CBI. Per le soglie DNBR e BSI sono state utilizzate le relazioni del par. 3.3.

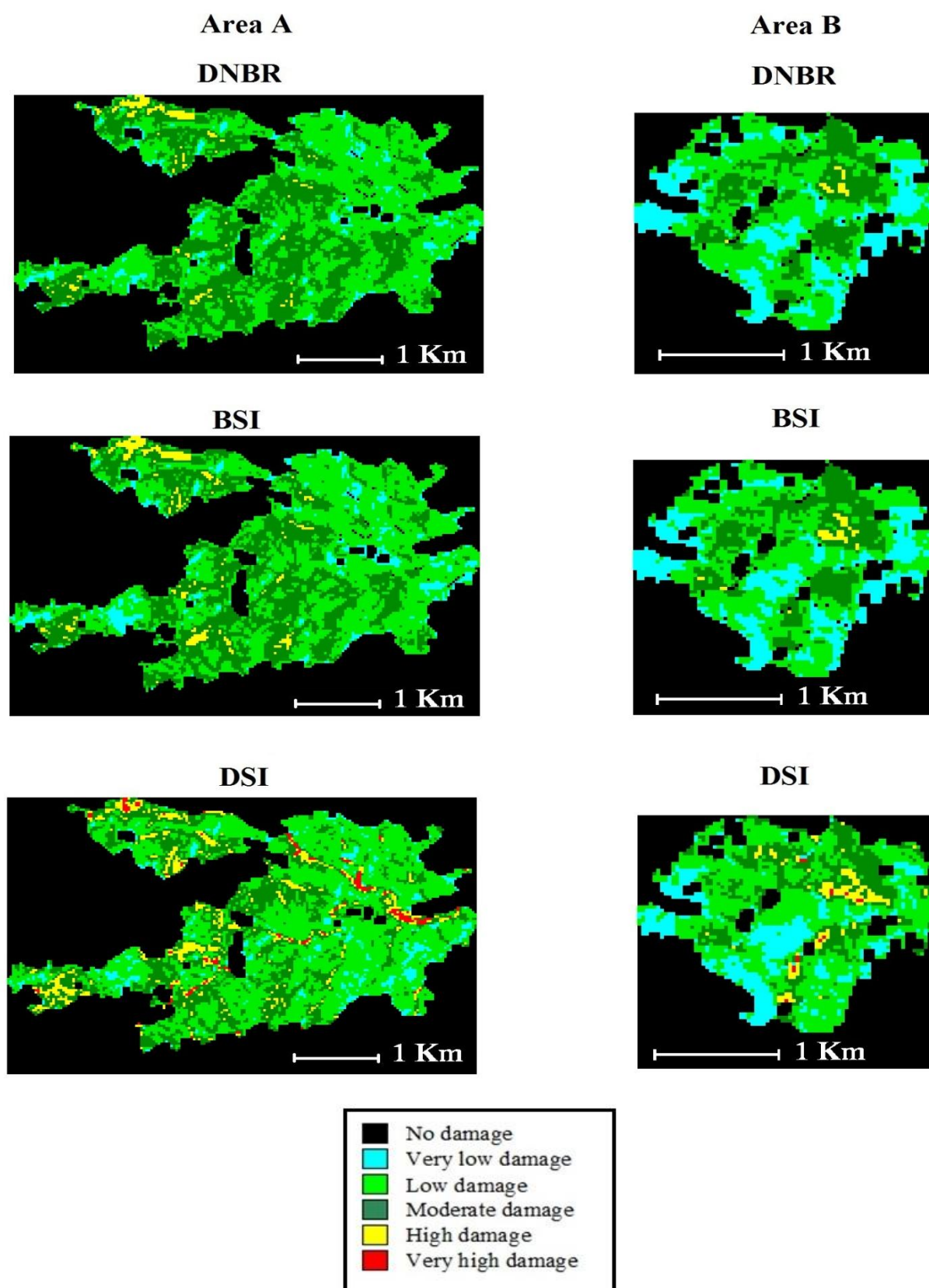
| Soglie di danno ottenute da relazioni lineari tra indici (par 3.4) |                 |                             |                             |                             |                  |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------|
| No damage                                                          | Very low damage | Low damage                  | Moderate damage             | High damage                 | Very high damage |
| DSI $\leq 0$                                                       | DSI $< 0.5$     | $0.5 < \text{DSI} < 1$      | $1 < \text{DSI} < 1.5$      | $1.5 < \text{DSI} < 2$      | DSI $> 2$        |
| BSI $\leq 0$                                                       | BSI $< 0.14$    | $0.14 < \text{BSI} < 0.44$  | $0.44 < \text{BSI} < 0.73$  | $0.73 < \text{BSI} < 1.02$  | BSI $> 1.02$     |
| DNBR $\leq 0$                                                      | DNBR $< 0.21$   | $0.21 < \text{DNBR} < 0.61$ | $0.61 < \text{DNBR} < 1.01$ | $1.01 < \text{DNBR} < 1.41$ | DNBR $> 1.41$    |

**Tabella 5.3** Soglie del livello di danno ottenute confrontando valori dell'indice DSI con valori dell'indice CBI. Per le soglie DNBR e BSI sono state utilizzate le relazioni del par. 3.4.

Il livello di danno si riferisce prevalentemente al periodo che impiega l'area con vegetazione bruciata per tornare alle condizioni precedenti l'incendio. Quindi un livello di danno basso o molto basso può caratterizzare solo aree con prato e piccoli arbusti, in quanto il periodo per la rigenerazione della vegetazione, dopo l'incendio, è breve e generalmente pari a un anno. Una foresta danneggiata dall'incendio impiega molto più tempo per tornare allo stato iniziale (decine di anni) quindi il danno è alto o molto alto.

Tuttavia il livello di danno può riferirsi anche agli effetti dell'incendio sulla vegetazione da un punto di vista strutturale. Il danno per i boschi, ad esempio, può essere molto basso o basso, moderato, alto o molto alto, in funzione della percentuale della massa bruciata dell'albero. Un'eccezione riguarda i prati e i piccoli arbusti: se sono bruciati completamente non possono essere identificati con danno moderato, alto o molto alto perché hanno un intervallo di tempo, per la rigenerazione, limitato e questo prevale sull'entità del danno strutturale.

**Sardegna, periodo dell'incendio 10/06/2014 – 28/07/2014**



**Figura 5.1** Mappe del livello di danno ottenute utilizzando le soglie della tabella 5.1 e gli indici calcolati con il metodo IR-MAD.

In Fig. 5.1 viene riportato un esempio di mappe di danno considerando 2 incendi avvenuti in Sardegna nel periodo compreso tra il 10/06/2014 e il 28/07/2014, intervallo di tempo corrispondente alle date di acquisizione delle 2 immagini Landsat 8 su cui si basa la procedura di individuazione delle aree bruciate. Le aree esaminate sono superiori a 10 ha.

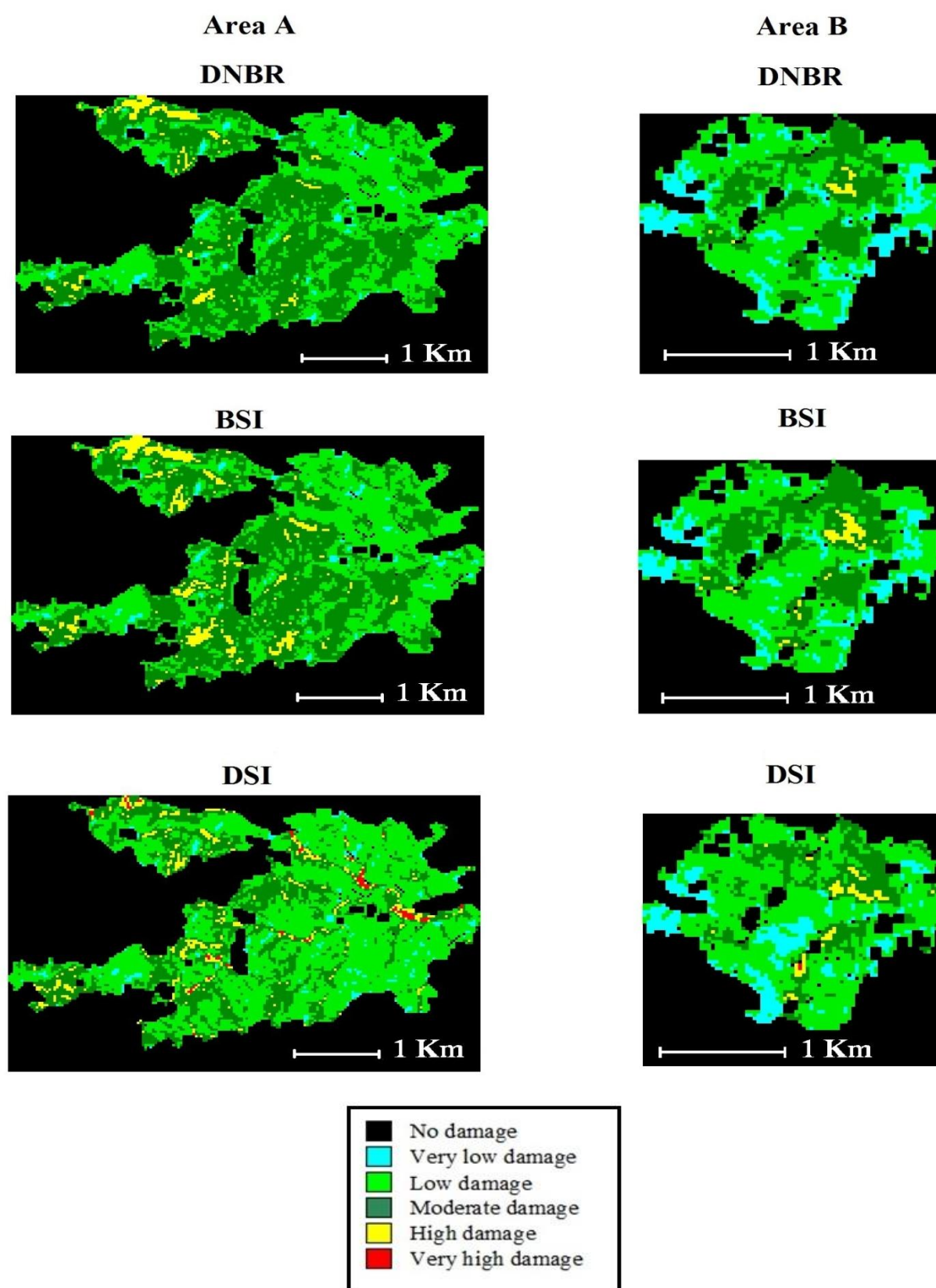
La figura 5.1 mostra i livelli di danno ottenuti, nelle aree “A” e “B”, utilizzando le soglie riportate in tabella 5.1 e gli indici DNBR, BSI e DSI calcolati con il metodo di normalizzazione IR-MAD e le immagini Landsat8 del 10/06/2014 e del 28/07/2014. Possiamo notare che le stime dei livelli di danno per DNBR e BSI sono simili in quanto i canali spettrali su cui si basa il calcolo del BSI sono correlati ai canali spettrali utilizzati per il DNBR. Il livello di danno, considerando DSI, è più alto in alcuni pixel rispetto al livello di danno ottenuto negli stessi pixel usando gli altri indici: DSI è un indice più sensibile e riesce ad analizzare il danno in modo più dettagliato dimostrando di essere una versione ottimizzata dell'indice DNBR.

Le mappe di danno per le aree “A” e “B”, ottenute dagli indici DNBR, BSI e DSI calcolati utilizzando il secondo metodo di normalizzazione e le stesse immagini Landsat8 (par.3.3), sono riportati in figura 5.2. Le soglie utilizzate sono quelle della Tabella 5.1.

Confrontando le stime di danno ottenute in questo caso studio con quelle ottenute nel caso precedente si può notare che il danno calcolato da DSI è inferiore mentre il danno calcolato da DNBR e BSI è più alto.

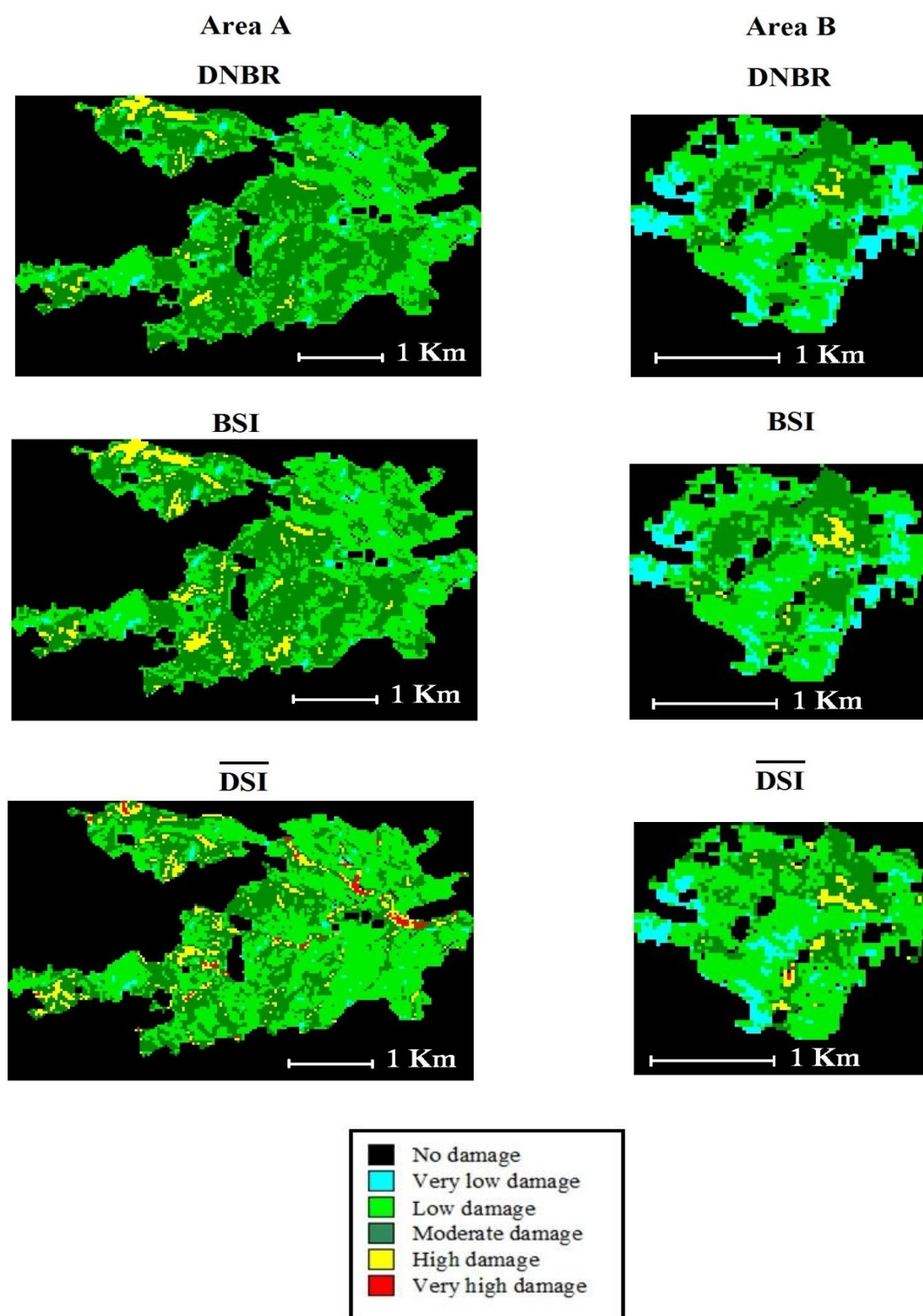
Nella figura 5.3 viene mostrato come variano le mappe del danno DSI se viene utilizzata la nuova versione  $\overline{DSI}$ , introdotta nel par. 3.4: le stime del danno sono più basse rispetto a quelle ottenute con il metodo IR-MAD ma sono più alte rispetto a quelle calcolate con il nuovo metodo di normalizzazione radiometrica.

**Sardegna, periodo dell'incendio 10/06/2014 – 28/07/2014**



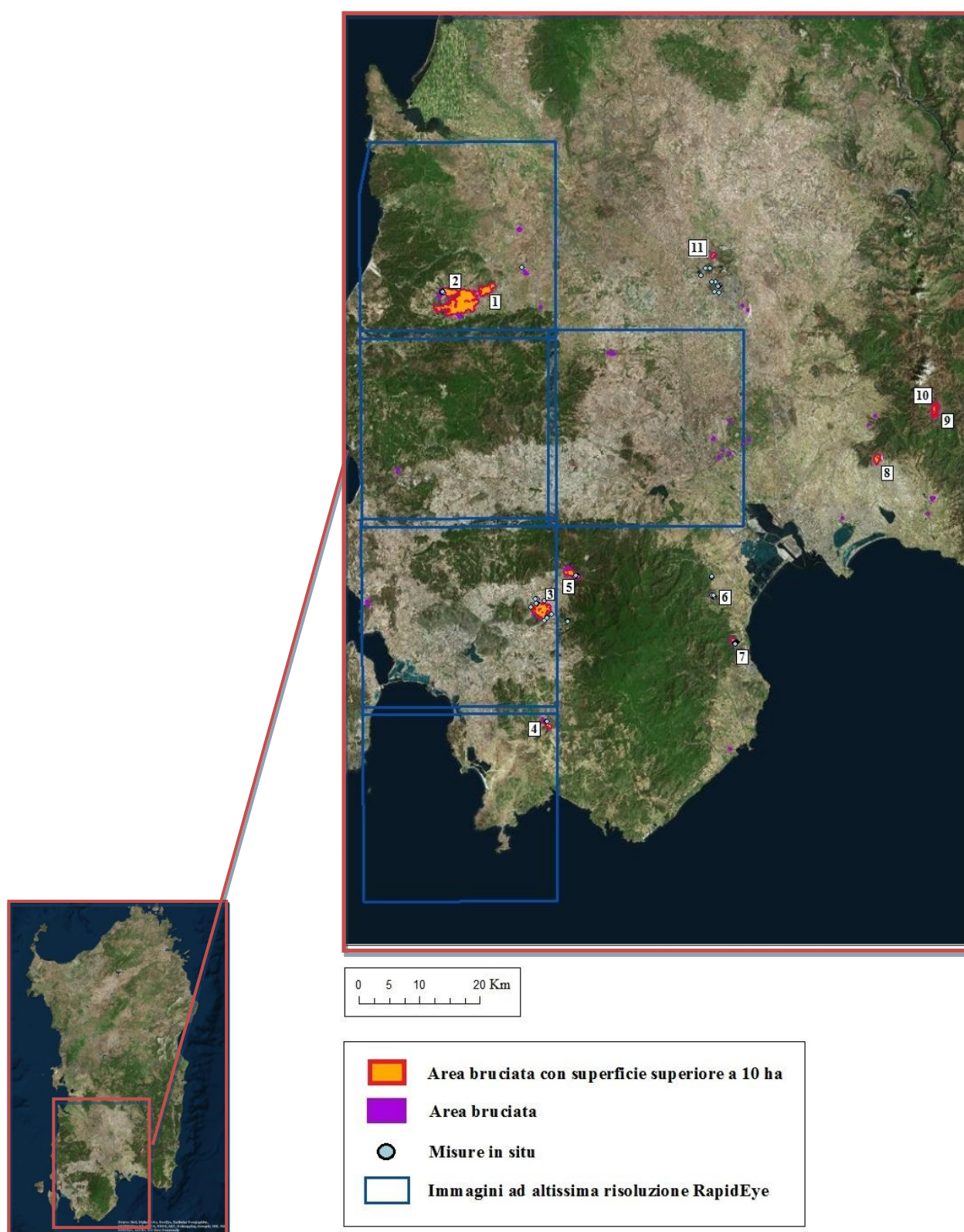
**Figura 5.2** Mappe del livello di danno ottenute utilizzando le soglie della tabella 5.1 e gli indici calcolati con il nuovo metodo di normalizzazione (par. 3.3).

**Sardegna, periodo dell'incendio 10/06/2014 – 28/07/2014**



**Figura 5.3** Mappe del livello di danno ottenute utilizzando le soglie della tabella 5.1 e gli indici calcolati con il nuovo metodo di normalizzazione (par. 3.3).

## 5.2 Validazione



**Figura 5.4** Aree in Sardegna colpite da incendi durante l'estate 2014 e immagini ad altissima risoluzione RapidEye acquisite prima dell'evento.

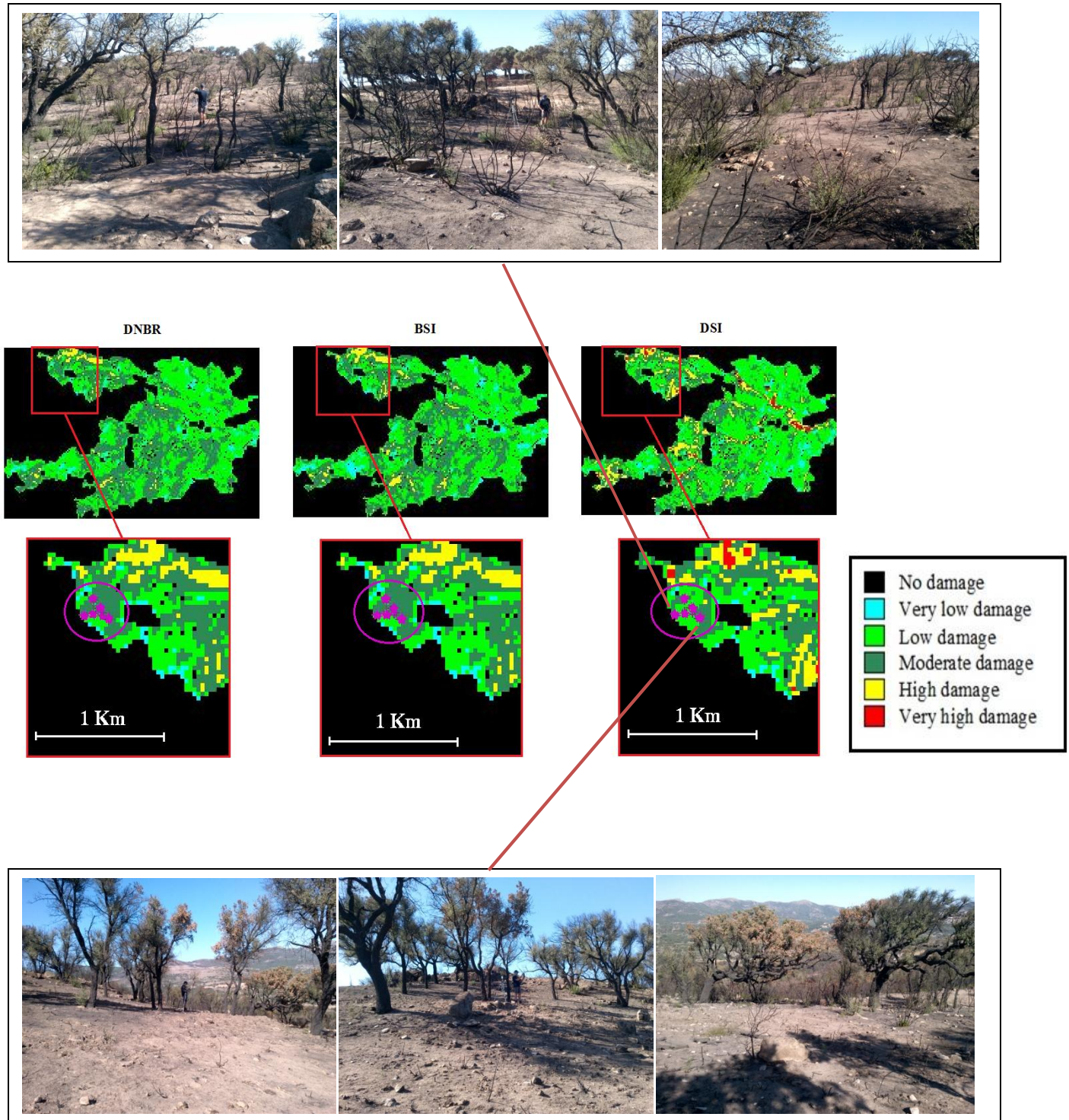
Le mappe del livello di danno, generate dall'algoritmo con immagini Landsat8, danno informazioni sull'impatto dell'incendio sulle aree vegetate. È necessario però testare l'accuratezza dell'algoritmo e validare le mappe con altri dati come misure in situ e immagini ad altissima risoluzione. Viene riportato un esempio dell'analisi del danno, in Sardegna, su aree colpite dagli incendi avvenuti tra il 10/06/2014 e il 28/07/2014. La validazione è stata effettuata acquisendo delle foto della vegetazione dopo l'incendio e immagini ad altissima risoluzione RapidEye. Nella figura 5.4 sono evidenziate in viola le aree bruciate con superficie inferiore a 10 ha mentre quelle con superficie superiore sono evidenziate in giallo. I cerchi in celeste indicano i punti dove sono stati acquisiti i dati GPS e le foto della vegetazione bruciata. In blu vengono indicati i footprint delle immagini ad altissima risoluzione RapidEye che vengono utilizzate per la validazione delle stime del danno (fig 5.4, tab. 5.6).

Nella tabella 5.4 vengono indicate le aree superiori a 10 ha nelle quali sono stati calcolati gli indici DNBR, BSI e DSI, quelle per le quali sono disponibili le immagini ad altissima risoluzione e quelle per le quali sono disponibili le foto per ottenere l'indice CBI.

| <b>Area analizzate</b> | <b>Superficie (ha)</b> | <b>Immagini RapidEye disponibili</b> | <b>Dati GPS e foto disponibili</b> |
|------------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 1                      | 148.95                 | x                                    |                                    |
| 2                      | 949.23                 | x                                    | x                                  |
| 3                      | 267.21                 | x                                    | x                                  |
| 4                      | 41.58                  | x                                    | x                                  |
| 5                      | 100.17                 |                                      | x                                  |
| 6                      | 14.67                  |                                      | x                                  |
| 7                      | 38.61                  |                                      | x                                  |
| 8                      | 55.62                  |                                      |                                    |
| 9                      | 45.09                  |                                      |                                    |
| 10                     | 11.7                   |                                      |                                    |
| 11                     | 14.67                  |                                      |                                    |

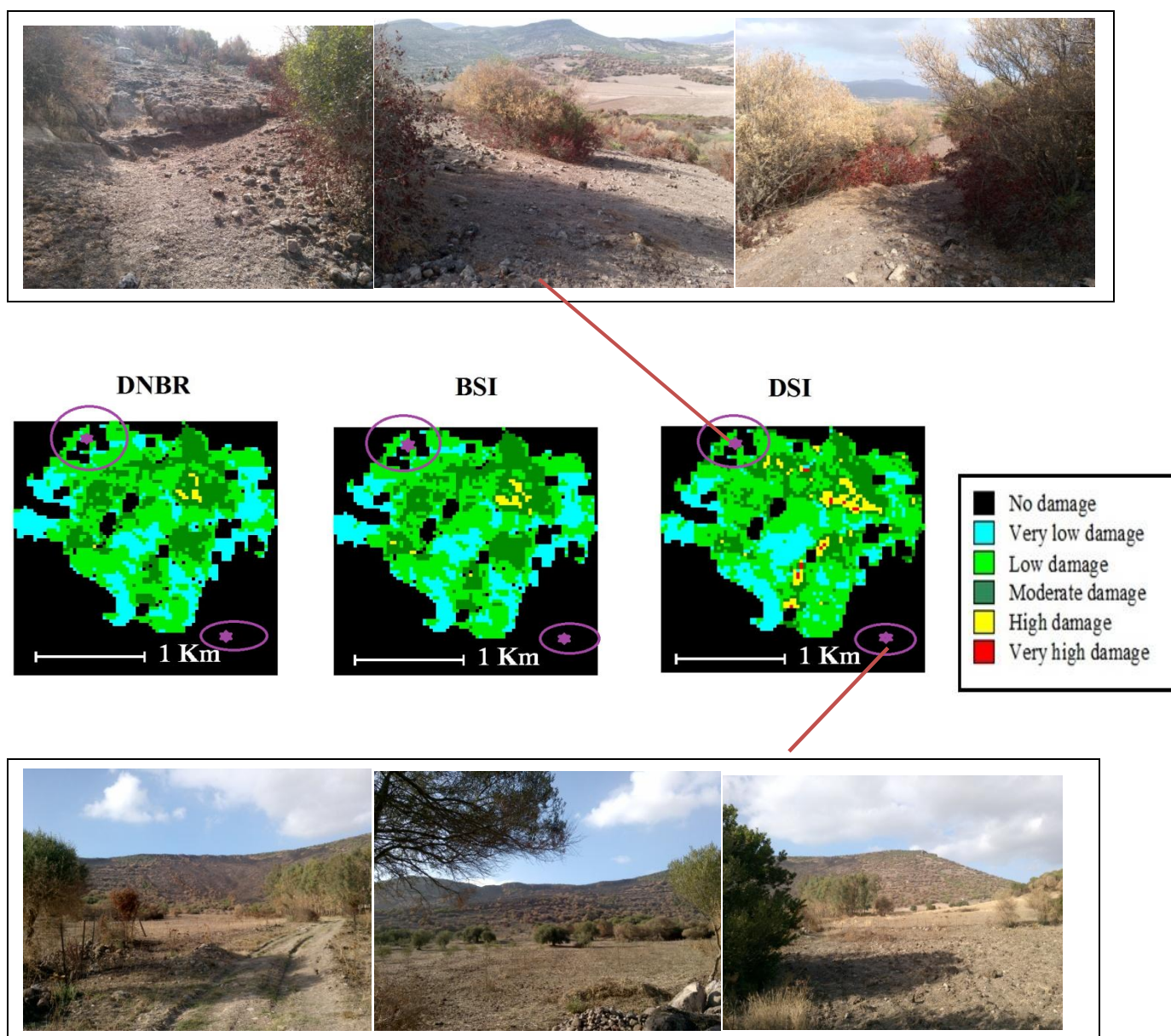
**Tabella 5.4** Aree bruciate della Sardegna superiori a 10 ha e misure per la validazione: immagini ad altissima risoluzione RapidEye e foto.

Come detto nel paragrafo 3.1, l'indice CBI è ottenuto mediante una valutazione visiva dello stato della vegetazione (considerata, in generale, costituita da tre strati: prati, arbusti e alberi) dopo l'incendio. Dopo aver annotato i dati GPS nel punto del campo dove si vuole effettuare la misura in situ, sono state acquisite le foto ed è stato stimato il danno (par. 3.1, Tab. 3.2).

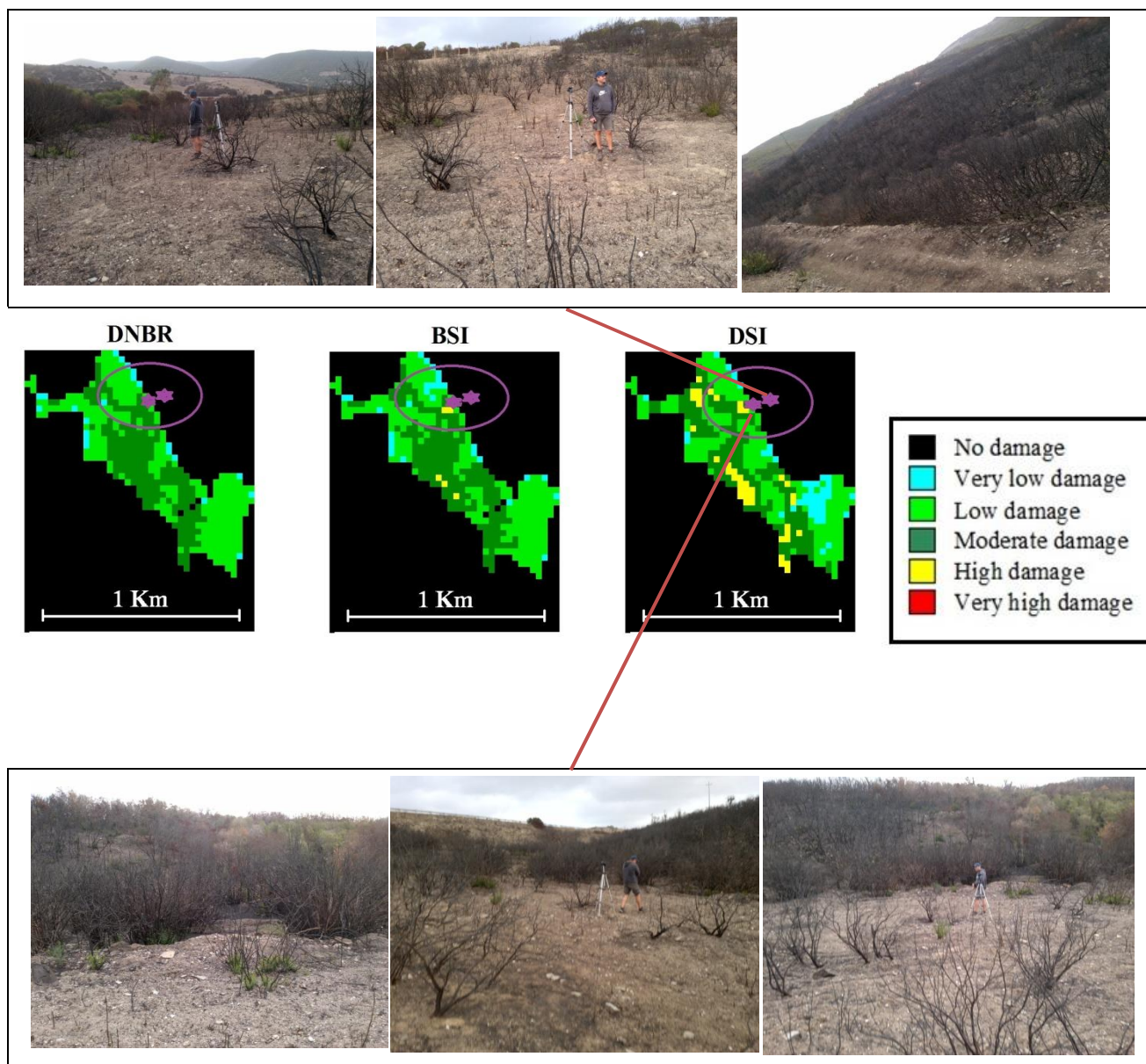


**Figura 5.5** Immagini della vegetazione danneggiata dall'incendio avvenuto durante l'estate 2014 e mappa del livello di danno per l'area 2.

La mappa del danno dell'area 2 (tab. 5.4) è ottenuta dagli indici DNBR, BSI e DSI calcolati utilizzando le immagini Landsat8 del 10/06/2014 e del 28/07/2014, il metodo di normalizzazione IR-MAD e le soglie della tabella 5.1 (fig. 5.5). Gli indici DNBR e BSI generano livelli del danno simili mentre le stime di danno più alte vengono ottenute dall'indice DSI e interessano solo un ridotto numero di pixel. La figura 5.5 mostra, in viola, i punti dell'area 2 dove sono state effettuate le misure in situ: le foto consentono di stimare un CBI pari a 2, quindi il danno è moderato. Questo risultato è in accordo con il danno stimato con le misure satellitari nei pixel corrispondenti.



**Figura 5.6** Immagini della vegetazione danneggiata dall'incendio avvenuto durante l'estate 2014 e mappa del livello di danno per l'area 3.

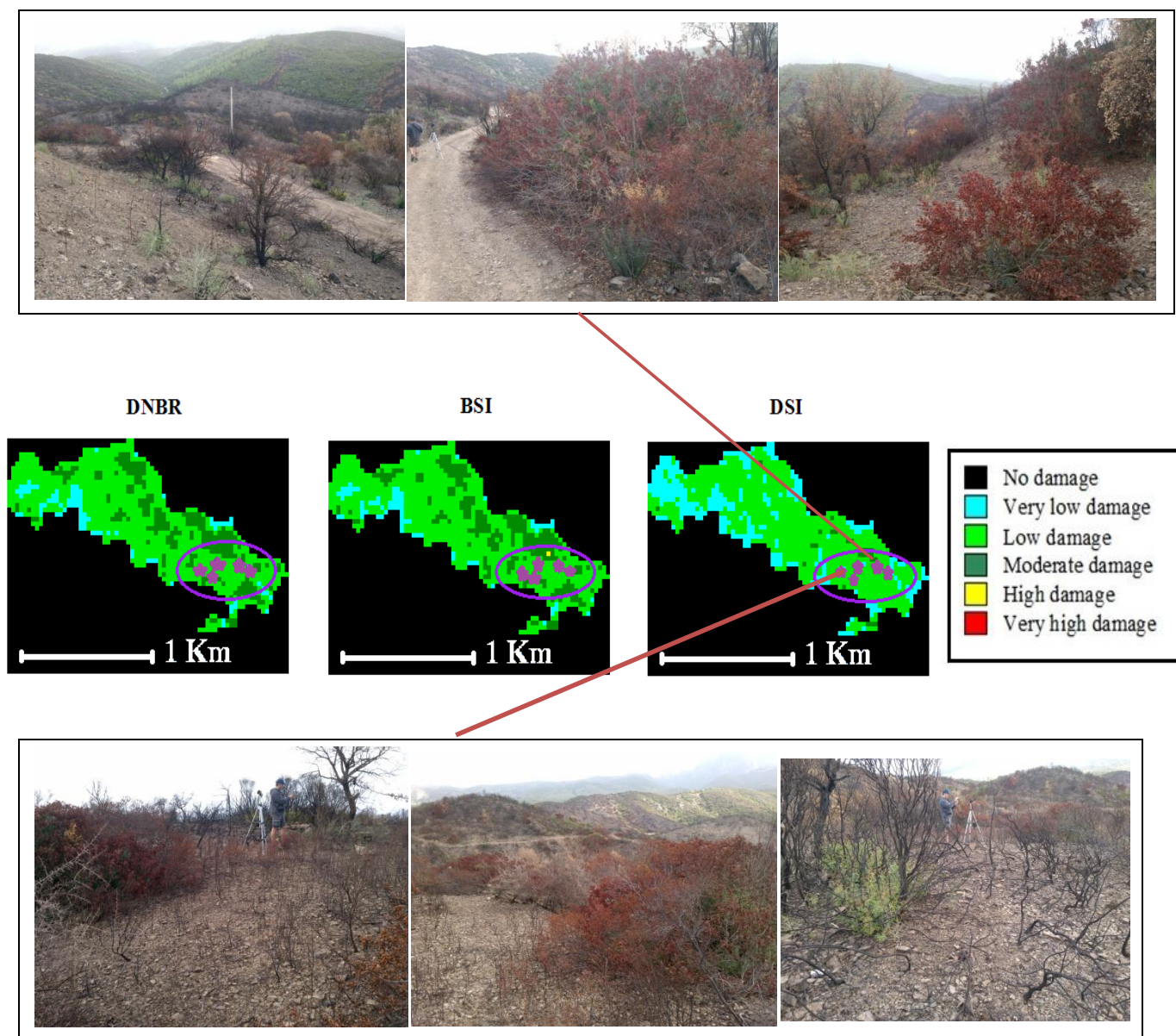


**Figura 5.7** Immagini della vegetazione danneggiata dall'incendio avvenuto durante l'estate 2014 e mappa del livello di danno per l'area 4.

Le figure 5.6 e 5.7 mostrano le mappe di danno per le aree 3 e 4 (tab. 5.4): i valori di riflettanza calcolata dalle immagini Landsat8 (10/06/2014 , 28/07/2014) conducono a valori degli indici DNBR, BSI e DSI corrispondenti a livelli di danno molto basso, basso e moderato. Esaminando l'area 3, nel punto a Nord nella mappa, le foto mostrano piccoli alberi e arbusti parzialmente danneggiati dall'incendio: al CBI è stimato pari a 1 corrispondente al livello di danno basso. Nel punto a Sud le foto mostrano il danno della vegetazione al confine dell'area 3: il CBI è 0.5 e il danno basso.

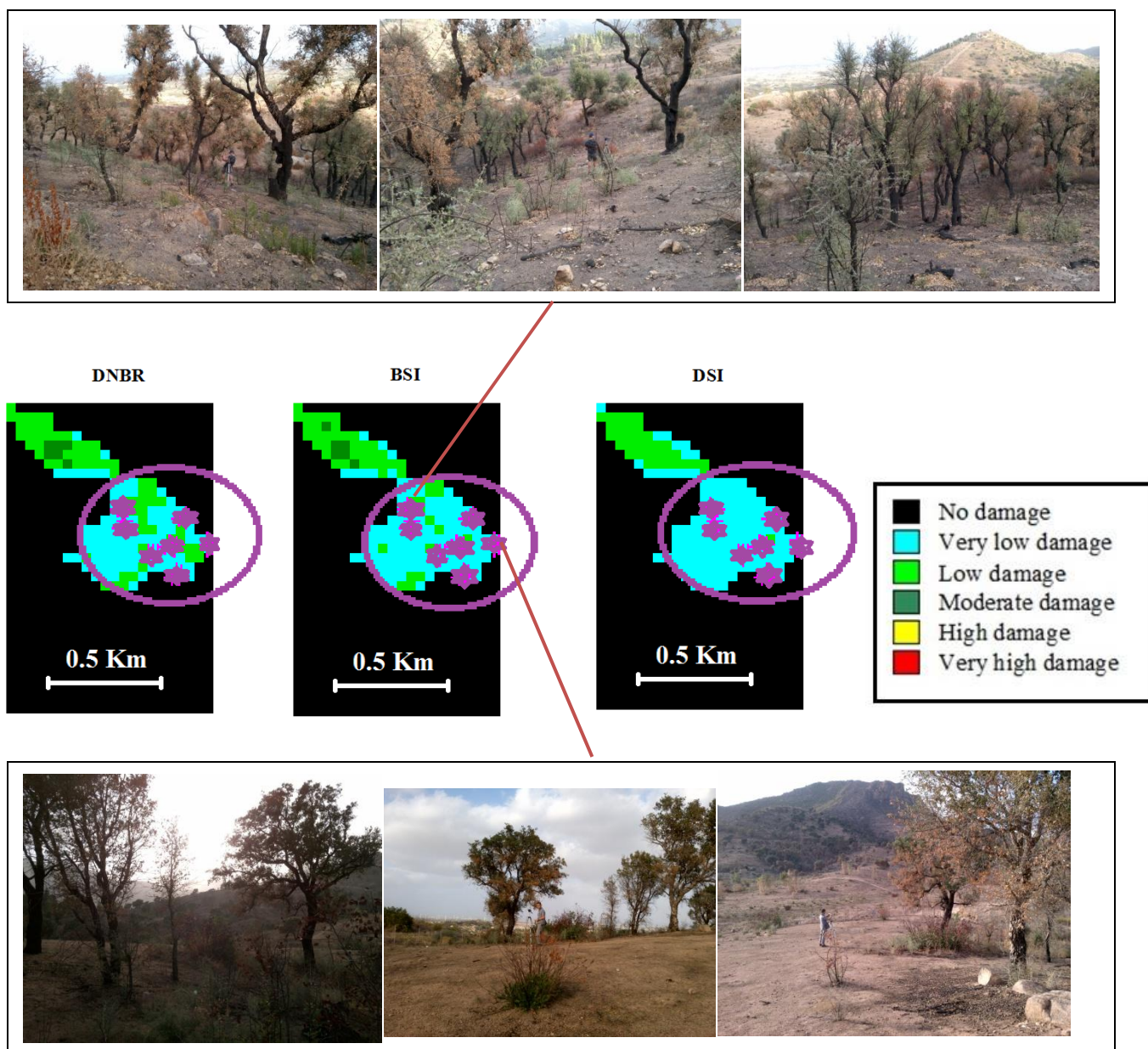
Osservando le foto dell'area 4 possiamo notare che la vegetazione non è costituita da alberi ma è più danneggiata: il CBI in questo caso assume un valore pari a 1.5 corrispondente a danno moderato.

Confrontando stime del danno da satellite con stime del danno ottenute con misure in situ possiamo notare che per le aree 3 e 4 non esistono differenze rilevanti.



**Figura 5.8** Immagini della vegetazione danneggiata dall'incendio avvenuto durante l'estate 2014 e mappa del livello di danno per l'area 5.

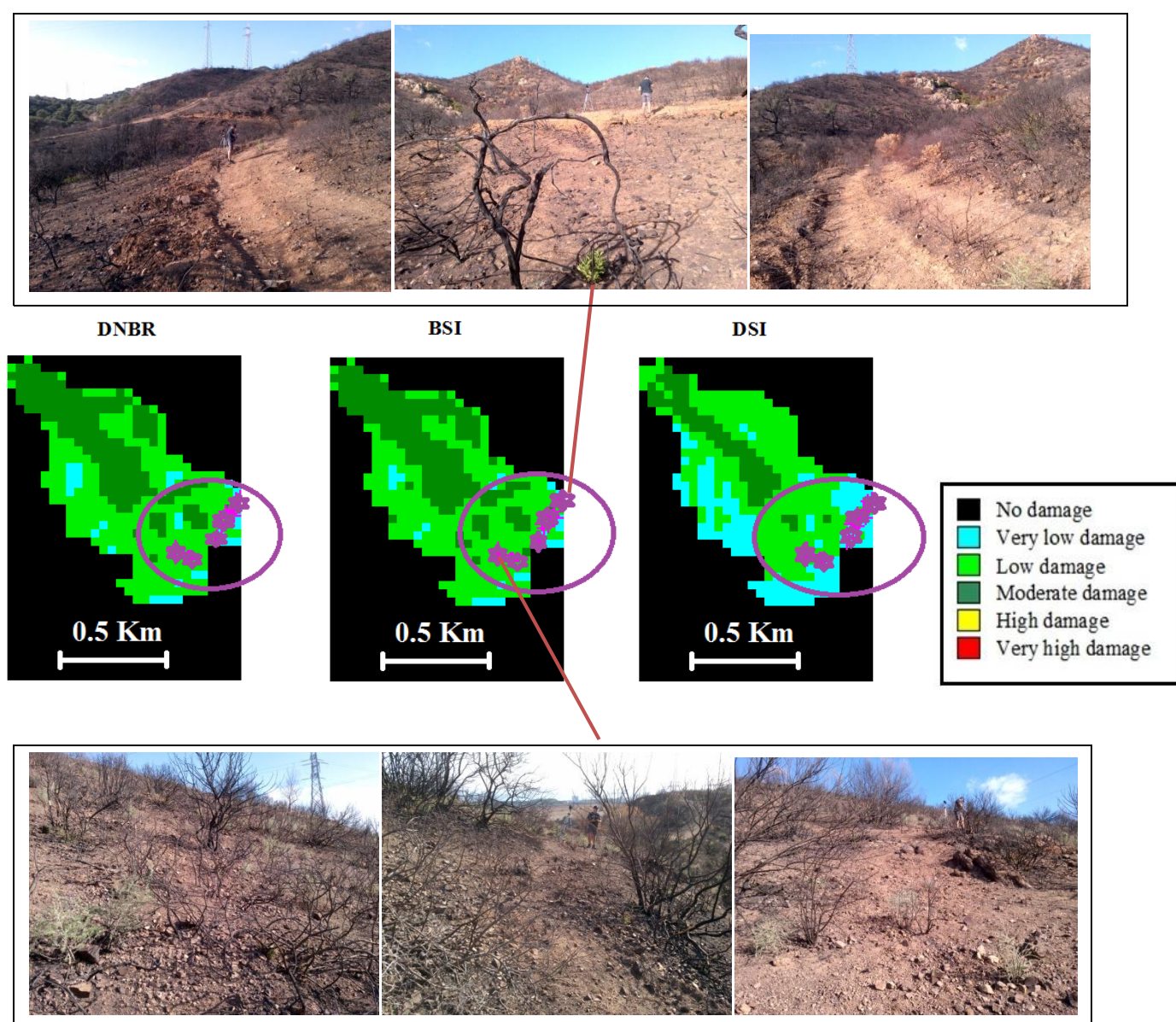
L'area 5 (tab. 5.4), analizzata con dati Landsat8, è caratterizzata prevalentemente da un livello di danno basso (fig. 5.8): con gli indici DNBR e BSI vengono individuate anche zone con danno moderato mentre con l'indice DSI le stime di danno sono più basse. Nelle foto possiamo osservare che la vegetazione, costituita da arbusti e piccoli alberi, è stata coinvolta dall'incendio ma la presenza di foglie dimostra che le piante non hanno subito un danno strutturale troppo alto. L'indice CBI è pari a 1 e il livello di danno è basso. Nella mappa, i punti delle misure in situ corrispondono a zone con livello di danno basso cioè dove sono in accordo le stime ottenute dai tre indici calcolati da misure satellitari. Questo permette di verificare la piena congruenza tra i risultati ottenuti da CBI e quelli ottenuti da DNBR, BSI e DSI.



**Figura 5.9** Immagini della vegetazione danneggiata dall'incendio avvenuto durante l'estate 2014 e mappa del livello di danno per l'area 6.

In figura 5.9 viene analizzata l'area 6 (tab. 5.4): le foto mostrano regioni con solo alberi, alcuni moderatamente danneggiati e altri in salute. Il CBI valutato nel punto a Nord nella mappa, data la presenza anche di foglie verdi, indica zone con danno basso mentre a Sud indica zone con danno moderato. Quindi nel primo caso i risultati ottenuti da DNBR, BSI e DSI sono in accordo con quelli ottenuti da CBI mentre nel secondo caso la differenza tra le stime di danno non è trascurabile.

Le foto dell'area 7 (tab. 5.4) evidenziano arbusti e piccoli alberi con un danno strutturale rilevante (fig. 5.10): il colore della vegetazione è molto scuro, tendente al nero inoltre le foglie non sono presenti. Questo permette di stimare il danno con CBI come moderato. Con gli indici DNBR, BSI e DSI si ottengono mappe di danno che non confermano i risultati ottenuti con le misure in situ: il danno in alcuni pixel è basso, in altri è molto basso.



**Figura 5.10** Immagini della vegetazione danneggiata dall'incendio avvenuto durante l'estate 2014 e mappa del livello di danno per l'area 7.

Analizzando le aree 6 e 7 (tab. 5.4) è stato verificato che l'algoritmo usato per stimare il danno sulla vegetazione dovuto all'incendio non sempre fornisce risultati accurati. Questo mostra come sia importante validare costantemente i risultati con dati ottenuti da strumenti diversi.

Un secondo metodo per testare la bontà dei risultati su una scala più ampia di quella consentita dalle misure in situ consiste nell'utilizzare immagini satellitari ad altissima risoluzione acquisite prima e dopo l'incendio. Le immagini acquisite prima dell'evento critico consentono di individuare il tipo di vegetazione (prato, arbusti o alberi) e di capire se l'algoritmo ha attribuito a pixel con solo prato un livello di danno moderato alto o molto alto, permettendo quindi di valutare l'errore. Le immagini acquisite dopo l'evento critico consentono invece di verificare il tipo di vegetazione bruciata: in questo caso il metodo di validazione è simile a quello utilizzato per calcolare l'indice CBI.

Le immagini satellitari ad altissima risoluzione RapidEye, utilizzate per validare le mappe di danno delle aree 1, 2, 3 e 4, sono state acquisite prima dell'incendio (tab 5.4, tab 5.5).

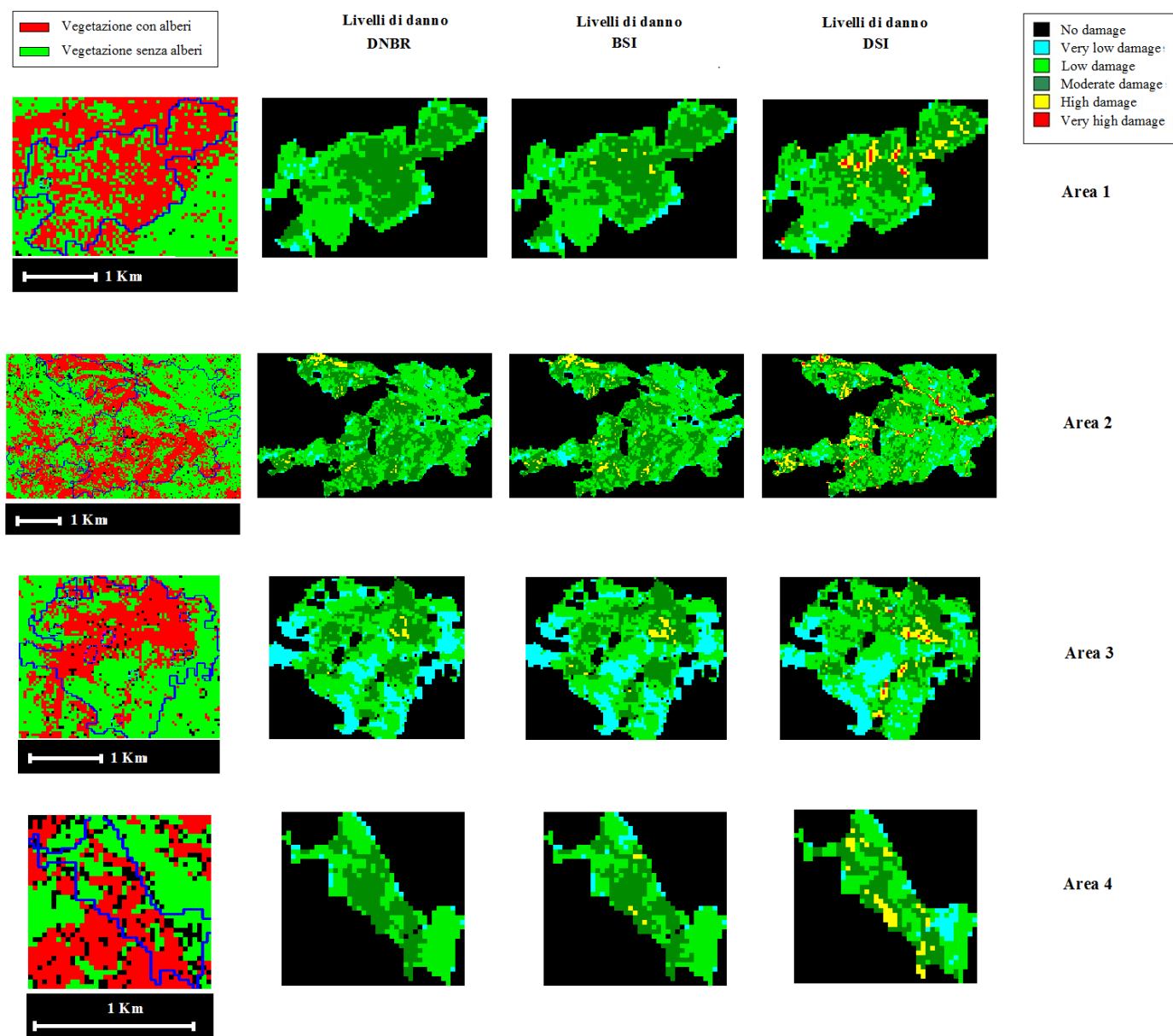
| Area analizzata | Immagini ad altissima risoluzione RapidEye |
|-----------------|--------------------------------------------|
| 1               | 3257313_2014-03-18_RE4_3A_254041           |
| 2               | 3257313_2014-03-18_RE4_3A_254041           |
| 3               | 3257113_2014-03-18_RE4_3A_254041           |
| 4               | 3257013_2013-11-25_RE5_3A_254041           |

**Tabella 5.5** Immagini ad altissima risoluzione RapidEye acquisite prima dell'incendio e utilizzate per la validazione.

| Bande RapidEye |                           |
|----------------|---------------------------|
| Bande          | Intervallo spettrale (µm) |
| Blue           | 440 – 510                 |
| Green          | 520 – 590                 |
| Red            | 630 – 685                 |
| Red Edge       | 690 – 730                 |
| NIR            | 760 – 850                 |

**Tabella 5.6** Bande spettrali RapidEye.

Grazie ai dati acquisiti nel visibile e nel vicino infrarosso (tab. 5.6) e alla risoluzione di 5 m è stato possibile individuare le zone in cui la vegetazione è costituita prevalentemente da alberi e le zone in cui prevalgono prato e arbusti (fig 5.11).



**Figura 5.11** Sardegna: mappe con aree costituite da alberi e aree costituite da prato, mappe del livello di danno.

In figura 5.11 vengono mostrate, per le aree 1, 2, 3 e 4, una mappa con le zone con alberi e le zone senza alberi e le mappe del danno ottenute da DNBR, BSI e DSI calcolati con il metodo di normalizzazione IR-MAD (par 3.2) e le soglie della tabella 5.1.

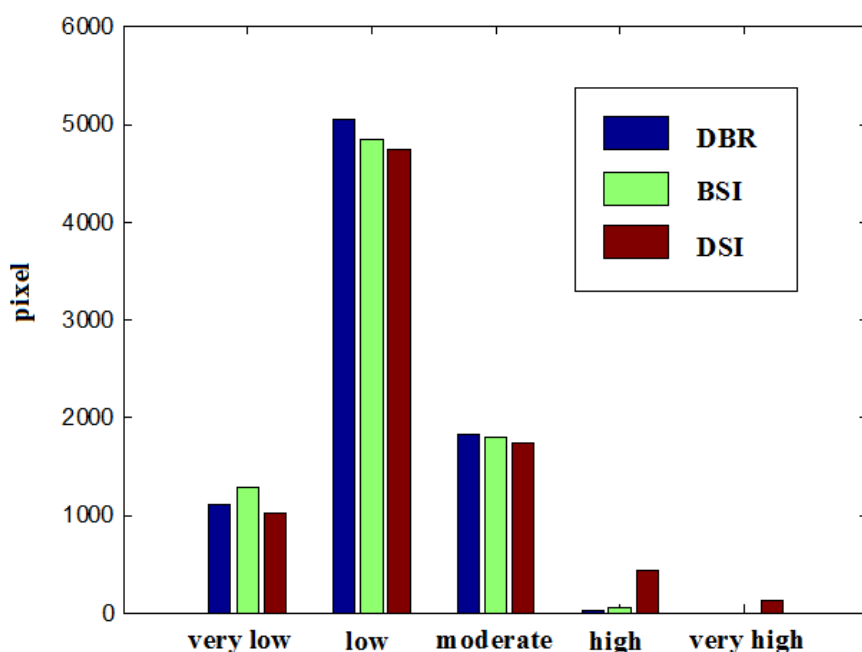
Utilizzando le immagini RapidEye è stato possibile individuare il numero di pixel senza alberi ai quali era stato attribuito erroneamente un livello di danno moderato, alto o molto alto. Infatti il danno moderato, alto o molto alto indica un lungo periodo per la rigenerazione dell'area bruciata, dell'ordine degli anni ed è tipico delle foreste.

Considerando le aree 1, 2, 3 e 4, è stato calcolato l'errore, nella stima del danno, dividendo il numero totale di pixel senza alberi con danno moderato, alto o molto alto per il numero totale di pixel (tab 5.7).

| <b>Errore</b>    |             |            |            |
|------------------|-------------|------------|------------|
| <b>Area test</b> | <b>DNBR</b> | <b>BSI</b> | <b>DSI</b> |
| Sardegna         | 12.4%       | 12.18%     | 15.05%     |

**Tabella 5.7** Errore calcolato analizzando le aree 1, 2, 3 e 4. Viene utilizzato il metodo di normalizzazione IR-MAD.

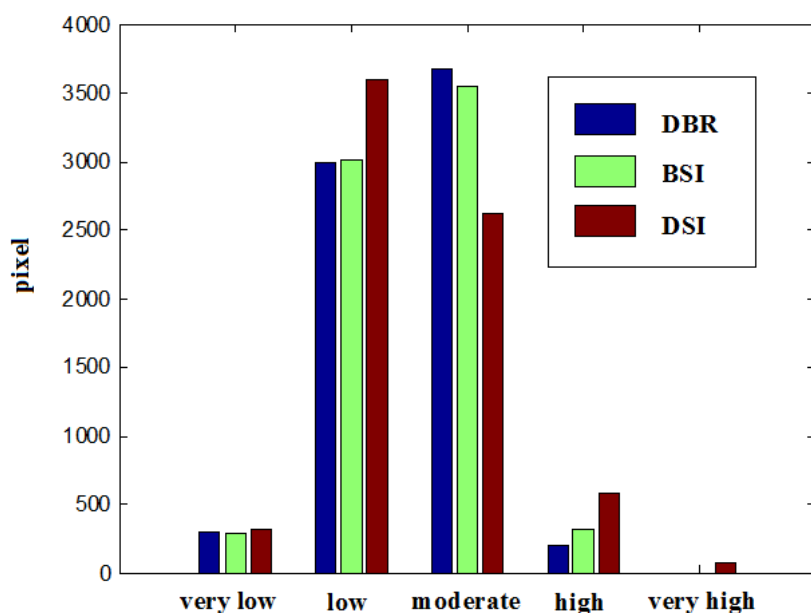
In questo caso l'errore massimo riguarda l'indice DSI. L'entità dell'errore può essere comunque ritenuto accettabile nell'analisi.



**Figura 5.12** Sardegna: numero di pixel con un dato livello di danno considerando gli indici DNBR, BSI e DSI e aree senza alberi. Per il calcolo degli indici è stato utilizzato il metodo di normalizzazione IR-MAD.

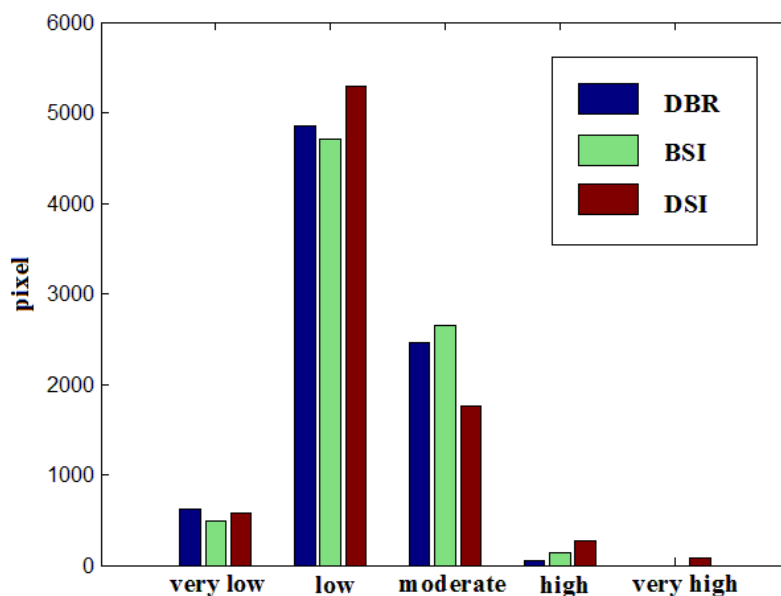
La figura 5.12 mostra che nelle aree 1, 2, 3 e 4 la maggior parte dei pixel, con prato e arbusti, è caratterizzata da un livello di danno basso. Il blu, verde e rosso indicano rispettivamente l'analisi effettuata con l'indice DNBR, BSI e DSI. Il numero di pixel, con danno moderato alto e molto alto, è diverso da 0 e determina l'errore.

La figura 5.13 invece mostra che nelle aree 1, 2, 3 e 4 la maggior parte dei pixel, con alberi, è caratterizzata da un livello di danno basso e moderato.

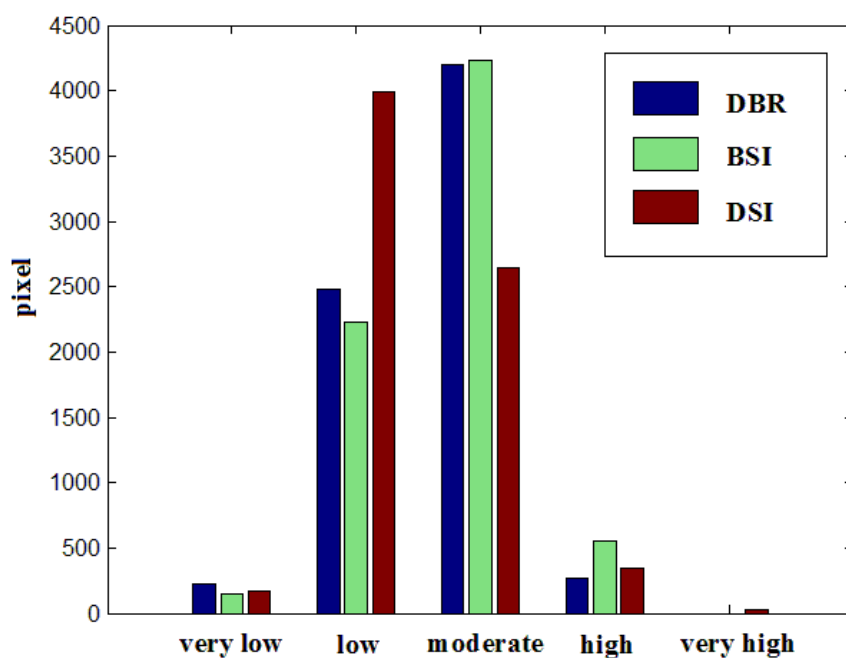


**Figura 5.13** Sardegna: numero di pixel con un dato livello di danno considerando gli indici DNBR, BSI e DSI e aree con alberi . Per il calcolo degli indici è stato utilizzato il metodo di normalizzazione IR-MAD.

Ripetendo l'analisi considerando le mappe del danno per le aree 1, 2, 3,e 4 ottenute dagli indici DNBR, BSI e DSI calcolati con il nuovo metodo di normalizzazione (par 3.3), si può osservare che nei pixel con prato e arbusti prevale sempre il livello di danno basso ma aumenta il numero di pixel con danno moderato per DNBR e BSI.



**Figura 5.14** Sardegna: numero di pixel con un dato livello di danno considerando gli indici DNBR, BSI e DSI e aree senza alberi. Per il calcolo degli indici è stato utilizzato il nuovo metodo di normalizzazione.



**Figura 5.15** Sardegna: numero di pixel con un dato livello di danno considerando gli indici DNBR, BSI e DSI e aree con alberi. Per il calcolo degli indici è stato utilizzato il nuovo metodo di normalizzazione.

La figura 5.15 mostra che nelle aree 1, 2, 3 e 4 i pixel con alberi sono caratterizzati prevalentemente da un livello di danno basso e moderato.

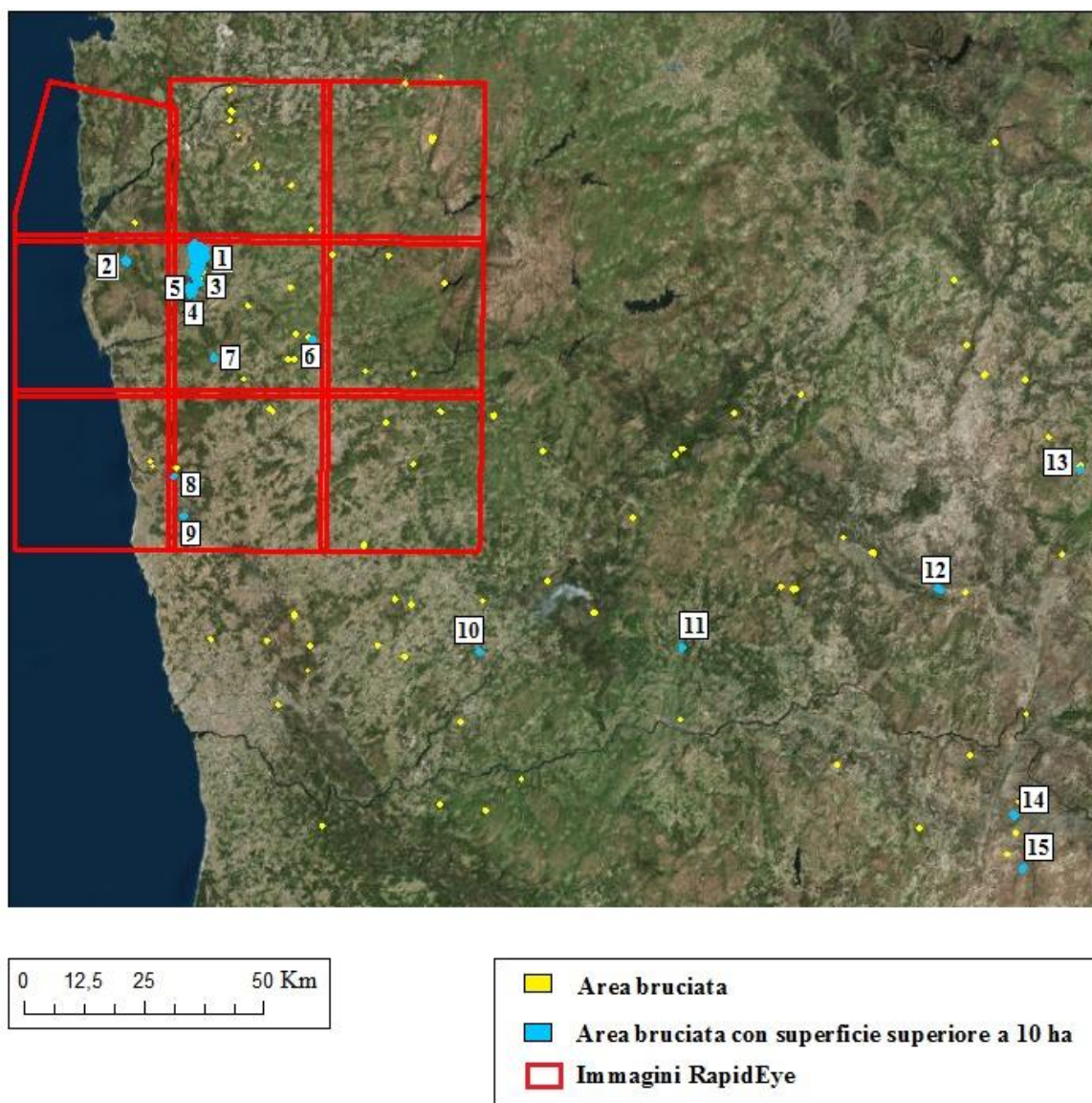
Per gli indici DNBR. e BSI l'errore è più alto rispetto a quello ottenuto dopo la normalizzazione con il metodo IR-MAD, mentre è più basso per l'indice DSI (tab. 5.8). L'errore della stima del danno aumenta se viene utilizzata la nuova versione  $\overline{DSI}$  (par. 3.4) raggiungendo un valore del 18.2%.

| <b>Errore</b>    |             |            |            |                                    |
|------------------|-------------|------------|------------|------------------------------------|
| <b>Area test</b> | <b>DNBR</b> | <b>BSI</b> | <b>DSI</b> | <b><math>\overline{DSI}</math></b> |
| Sardegna         | 16.5%       | 18.4%      | 13.9%      | 18.2%                              |

**Tabella 5.8** Errore calcolato analizzando le aree 1, 2, 3 e 4. Viene utilizzato il nuovo metodo di normalizzazione.

L'accuratezza dell'algoritmo di stima del danno è stata analizzata anche con riferimento ad una area test corrispondente ad un altro paese europeo. In particolare, oltre alla generazione di mappe di danno in Sardegna, ne sono state generate altre per diverse aree bruciate nella regione di Minho in Portogallo utilizzando immagini Landsat8 del 09/05/2015 e del 26/06/2015. In questo periodo infatti gli incendi hanno danneggiato circa 1522 ettari di aree vegetate. Nella figura 5.16 sono evidenziate in giallo le aree bruciate con superficie inferiore a 10 ha mentre quelle con superficie superiore sono evidenziate in celeste. In rosso vengono indicate le immagini ad altissima risoluzione RapidEye che vengono utilizzate per la validazione dei risultati (fig. 5.16).

Gli indici DNBR, BSI e DSI sono stati calcolati nelle aree superiori a 10 ha che vengono riportate in tabella 5.10.



**Figura 5.16** Aree in Portogallo colpite da incendi nel 2015 e immagini ad altissima risoluzione RapidEye acquisite prima dell'evento.

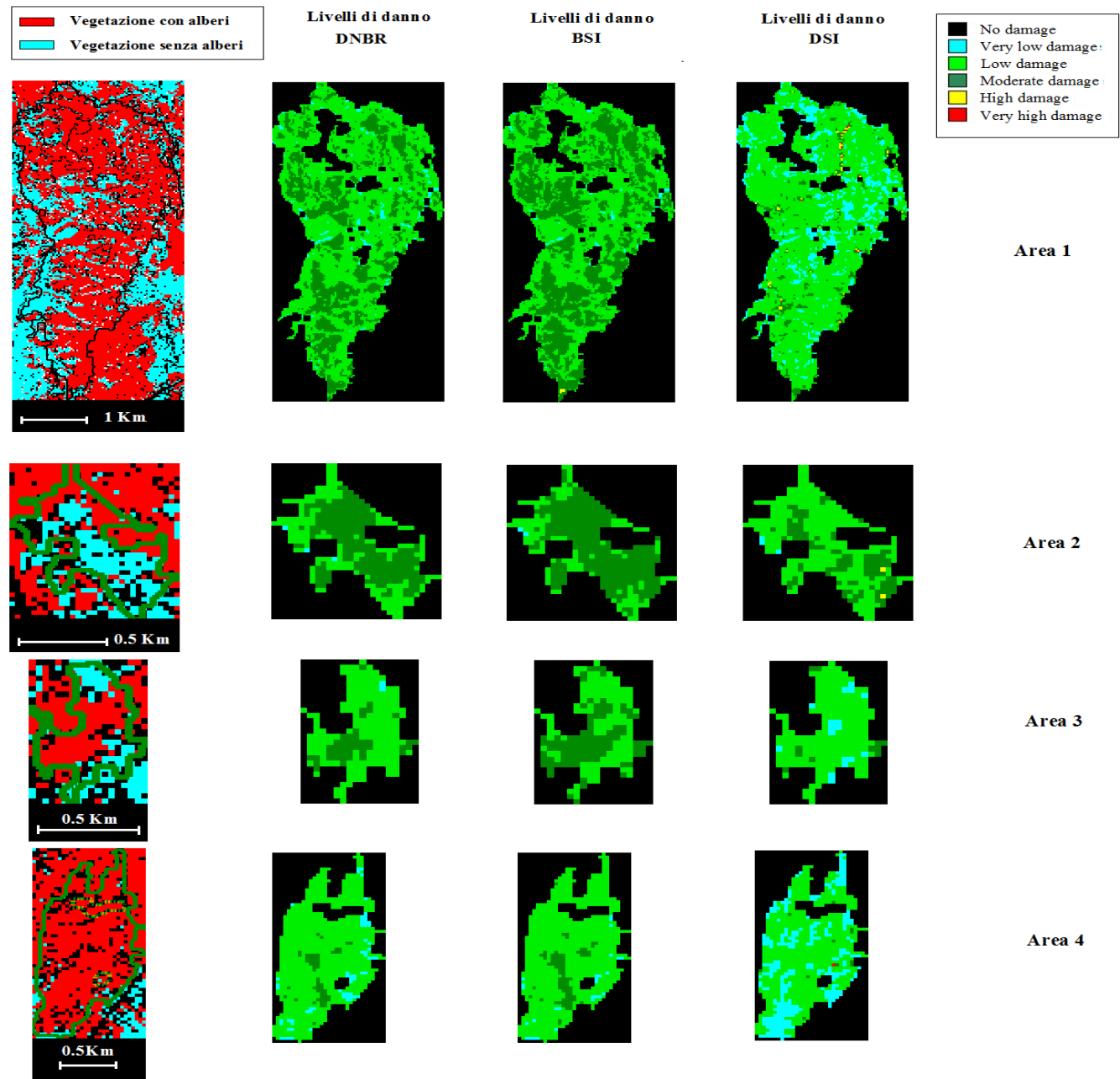
| Area analizzata | Superficie (ha) | Immagini RapidEye disponibili        |
|-----------------|-----------------|--------------------------------------|
| 1               | 914.31          | 2958316_2014-10-29_RE1_3A_254399.tif |
| 2               | 36.81           | 2958315_2014-10-29_RE1_3A_254399.tif |
| 3               | 19.53           | 2958316_2014-10-29_RE1_3A_254399.tif |
| 4               | 96.66           | 2958316_2014-10-29_RE1_3A_254399.tif |
| 5               | 22.32           | 2958316_2014-10-29_RE1_3A_254399.tif |
| 6               | 21.60           | 2958316_2014-10-29_RE1_3A_254399.tif |
| 7               | 10.53           | 2958316_2014-10-29_RE1_3A_254399.tif |
| 8               | 11.34           | 2958216_2014-10-21_RE3_3A_254399.tif |
| 9               | 12.87           | 2958216_2014-10-21_RE3_3A_254399.tif |
| 10              | 12.33           | -                                    |
| 11              | 20.07           | -                                    |
| 12              | 29.34           | -                                    |
| 13              | 11.34           | -                                    |
| 14              | 38.79           | -                                    |
| 15              | 23.40           | -                                    |

**Tabella 5.9** Aree bruciate del Portogallo superiori a 10 ha e immagini ad altissima risoluzione RapidEye acquisite prima dell'incendio.

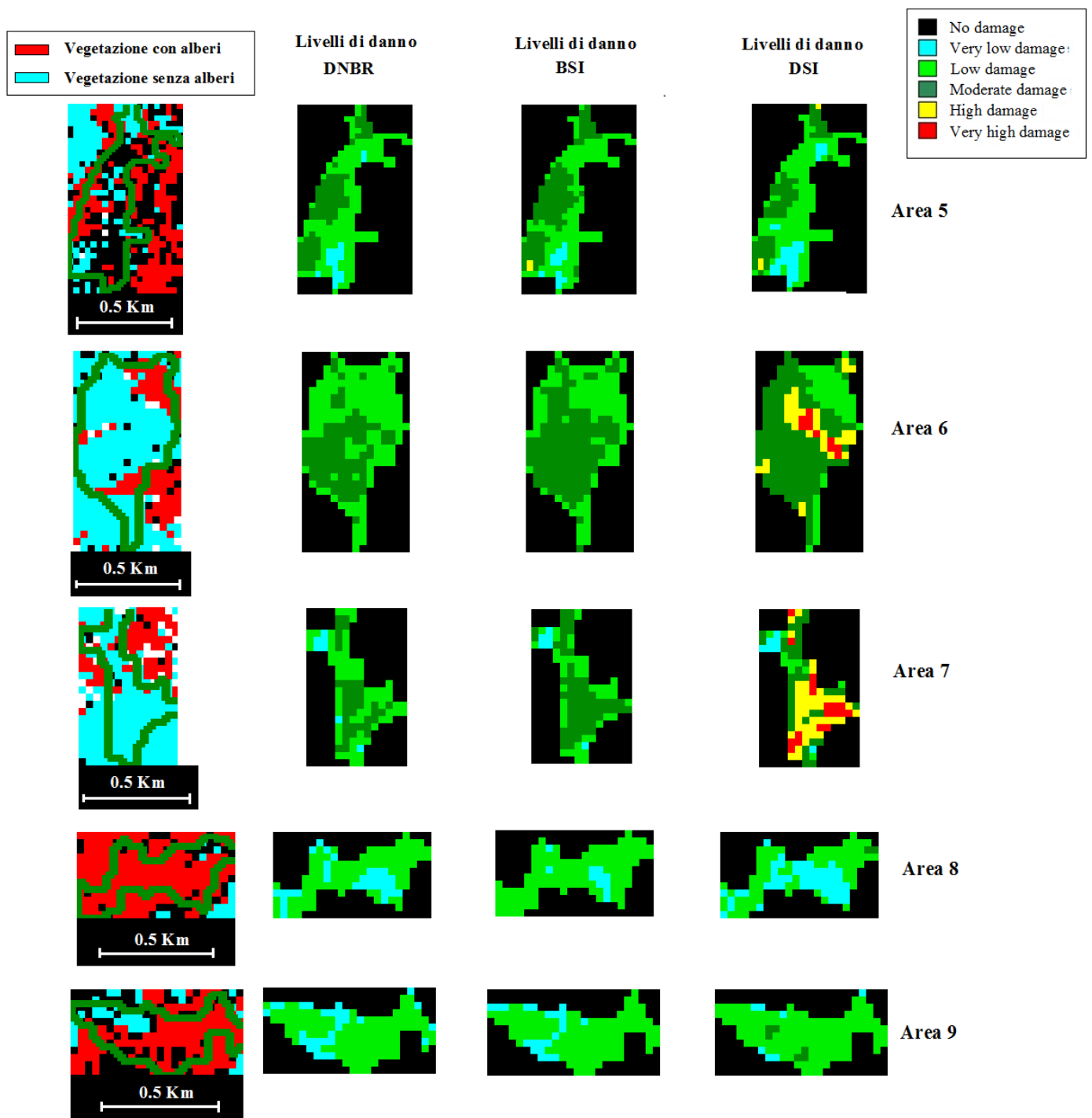
Le immagini ad altissima risoluzione, acquisite prima dell'incendio, consentono di individuare le foreste e le zone con prato e arbusti nelle prime nove aree (tab. 5.9, fig. 5.17, fig. 5.18). Possiamo osservare, che le foreste prevalgono su altri tipi di vegetazione, sono presenti nel 73.6% dei pixel delle aree mentre il restante 26.4% è occupato da prati e arbusti o suolo nudo. Le mappe del tipo di vegetazione e quelle del livello di danno consentono di identificare i pixel senza alberi dove l'algoritmo ha valutato il danno come moderato, alto o molto alto. E' possibile quindi calcolare l'errore, analogamente a quanto fatto per le aree bruciate della Sardegna. Per il calcolo dell'errore gli indici DNBR, BSI e DSI sono stati calcolati con il metodo di normalizzazione IR-MAD e le mappe del danno sono state ottenute con le soglie della tabella 5.1. L'errore, per ogni indice, è più basso rispetto a quello ottenuto studiando gli incendi in Sardegna (tab. 5.10) e questo è dovuto alla bassa percentuale di pixel senza alberi dove l'algoritmo potrebbe dare stime non corrette del danno. Infatti, la percentuale di pixel senza alberi rappresenta l'estremo superiore dell'errore.

| Errore |        |       |
|--------|--------|-------|
| DNBR   | BSI    | DSI   |
| 8.0 %  | 11.0 % | 5.0 % |

**Tabella 5.10** Errore calcolato analizzando le aree 1 – 9 (tab. 5.10). Viene utilizzato il metodo di normalizzazione IR-MAD.

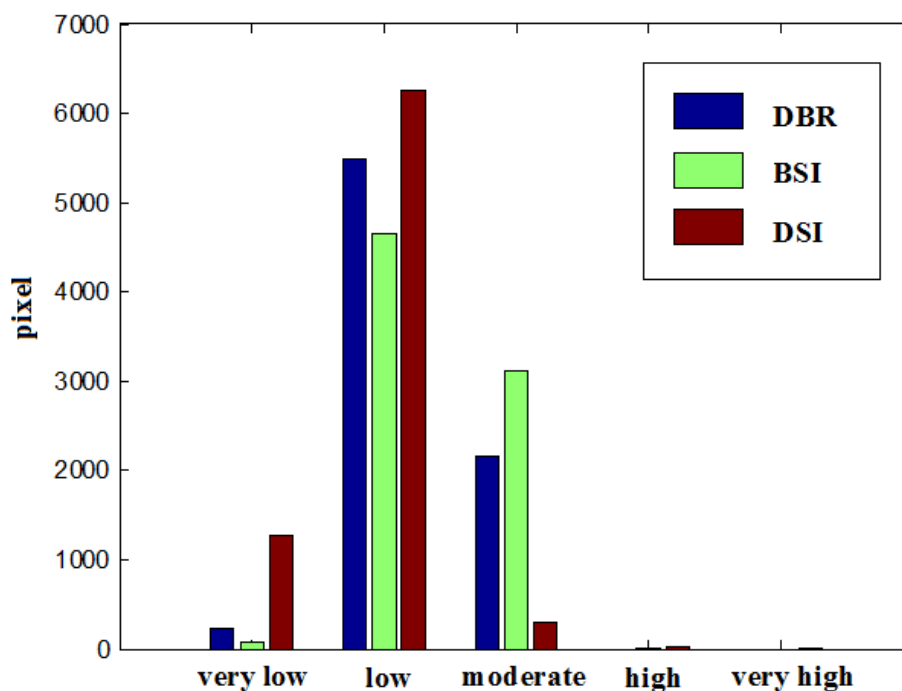


**Figura 5.17** Portogallo: mappe con aree costituite da alberi e aree costituite da prato, mappe del livello di danno.

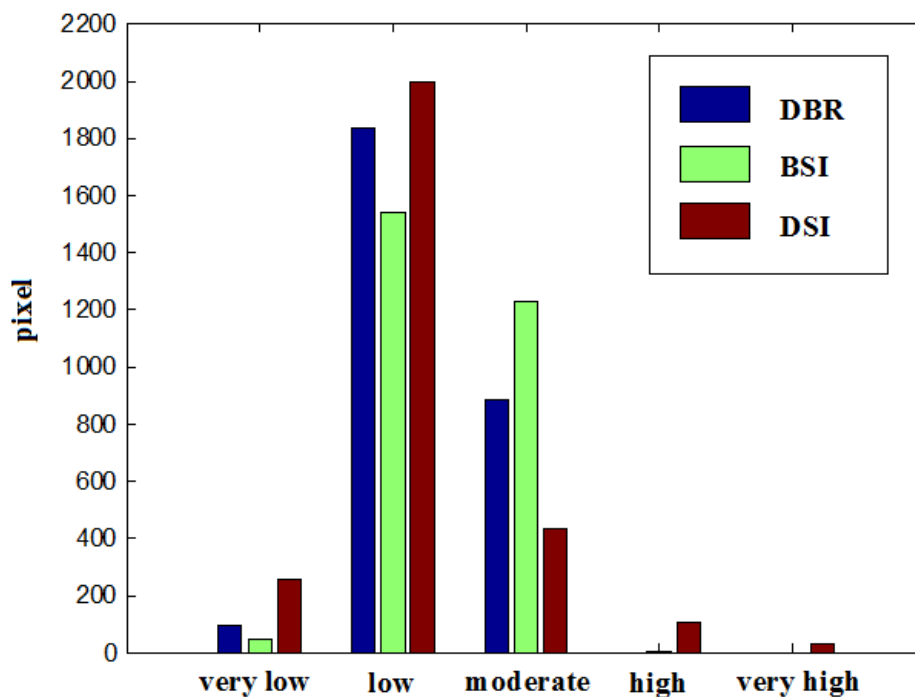


**Figura 5.18** Portogallo: mappe con aree costituite da alberi e aree costituite da prato, mappe del livello di danno.

Nelle figure 5.19 e 5.20 sono riportati, rispettivamente, il numero di pixel per i livelli di danno considerando le aree con bosco e le aree senza bosco. In entrambi i casi prevale il livello di danno basso. Il numero di pixel non coperti da vegetazione boschiva ma classificati con danno moderato, alto e molto alto nella figura 5.20 determina l'errore.

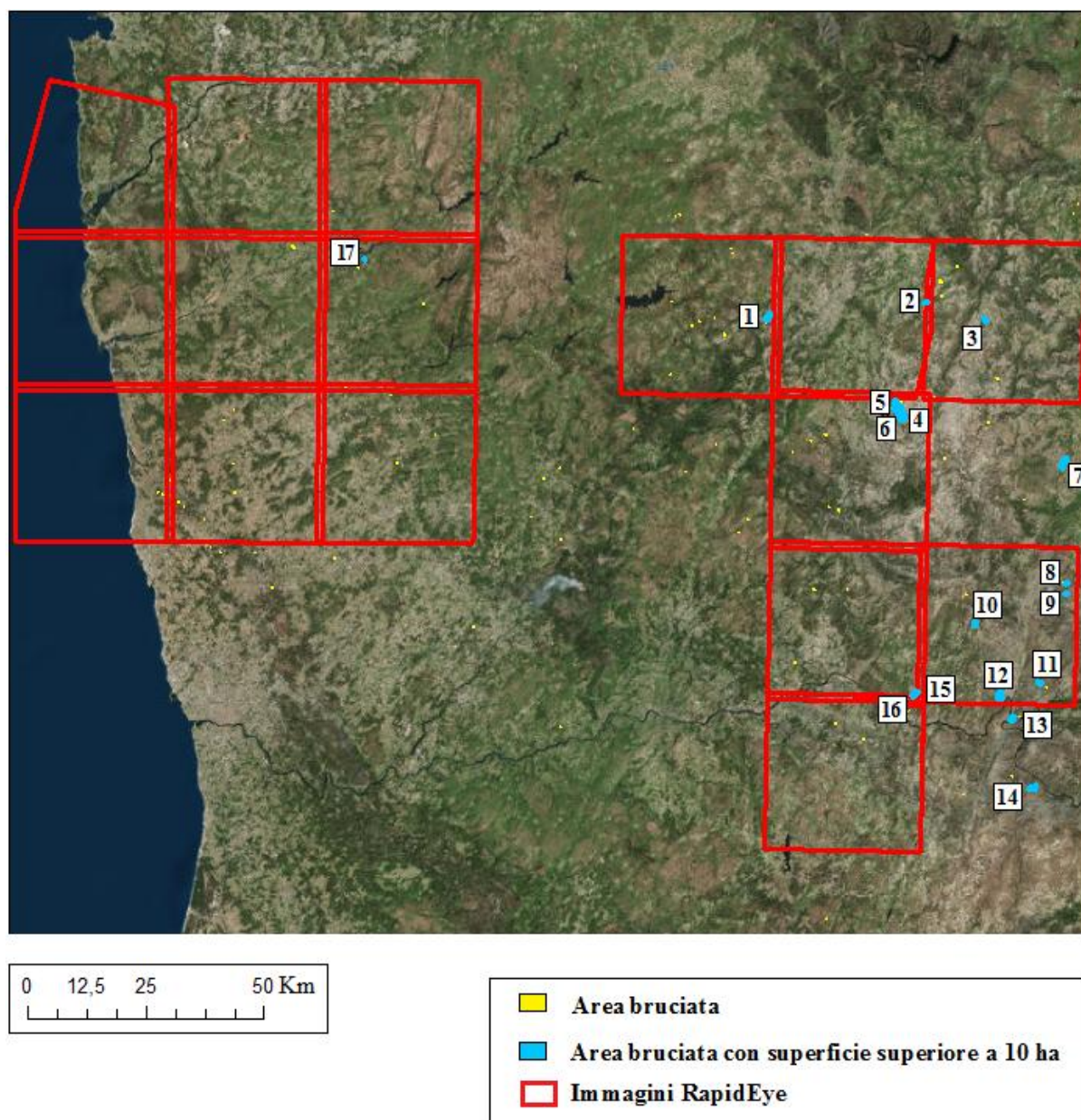


**Figura 5.19** Portogallo: numero di pixel con un dato livello di danno considerando gli indici DNBR, BSI e DSI e aree con alberi. Per il calcolo degli indici è stato utilizzato il metodo di normalizzazione IR-MAD.



**Figura 5.20** Portogallo: numero di pixel con un dato livello di danno considerando gli indici DNBR, BSI e DSI e aree senza alberi. Per il calcolo degli indici è stato utilizzato il metodo di normalizzazione IR-MAD.

Le immagini ad altissima risoluzione RapidEye della tabella 5.12 sono state acquisite dopo gli incendi avvenuti nei periodi 09/07/14 – 25/07/14 e 25/07/14 – 27/09/14 nella regione di Minho in Portogallo. Le immagini mostrano le aree bruciate e sono state utilizzate per validare i risultati ottenuti con l'algoritmo per la stima del danno in modo simile a quanto fatto con l'indice CBI per le aree bruciate della Sardegna. Le immagini Landsat8, utilizzate per generare le mappe del danno, sono state acquisite nelle date di inizio e fine periodo dell'incendio. Nella figura 5.21 vengono indicate in giallo le aree bruciate inferiori a 10 ha e in celeste quelle con superficie superiore.



**Figura 5.21** Aree in Portogallo colpite da incendi durante l'estate 2014 e immagini ad altissima risoluzione RapidEye acquisite dopo l'evento.

La validazione, in questo caso, è stata effettuata solo per le aree 1, 3, 4, 8 e 17: questo è dovuto non solo alla disponibilità delle immagini RapidEye ma anche alla copertura nuvolosa che molto spesso ne ha reso impossibile l'analisi (tab. 5.11).

| <b>Area analizzata</b> | <b>Superficie (ha)</b> | <b>Periodo dell'incendio</b> | <b>Immagini RapidEye disponibili</b>                                         |
|------------------------|------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 1                      | 54.7                   | 25/07/14 – 27/09/14          | 2958319_2014-09-21_RE2_3A_255775.tif<br>2958319_2014-08-24_RE2_3A_255775.tif |
| 3                      | 26,1                   | 09/07/14 – 25/07/14          | 2958321_2014-07-21_RE2_3A_255775.tif                                         |
| 4                      | 128                    | 25/07/14 – 27/09/14          | 2958220_2014-09-24_RE5_3A_255775.tif                                         |
| 8                      | 17.3                   | 25/07/14 – 27/09/14          | 2958121_2014-09-24_RE5_3A_255775.tif                                         |
| 17                     | 10.6                   | 25/07/14 – 27/09/14          | 2958317_2014-10-29_RE1_3A_254399.tif                                         |

**Tabella 5.11** Aree bruciate del Portogallo superiori a 10 ha e immagini ad altissima risoluzione RapidEye acquisite dopo l'incendio.

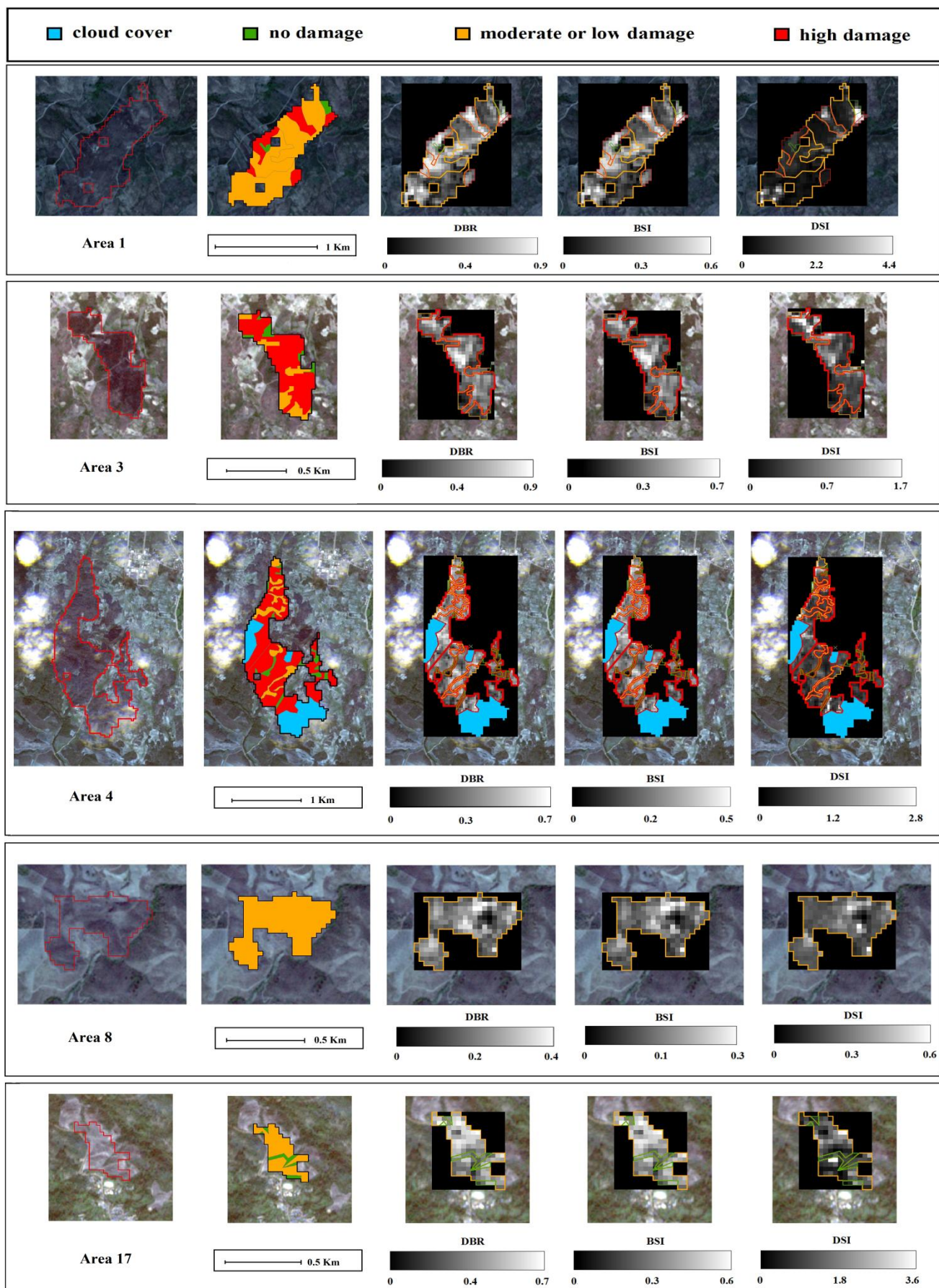
La figura 5.22 mostra, per ogni area, le zone con diversi livelli di danno ottenute osservando le immagini ad altissima risoluzione: è stato individuato il tipo di vegetazione colpita dall'incendio che ha permesso di stimare il periodo per la rigenerazione e quindi il danno. Non è stato possibile, invece, stimare la biomassa coinvolta dall'incendio. Vengono riportate, nella figura 5.22, anche le tre mappe degli indici DNBR, BSI e DSI e sulle stesse sono stati evidenziati, con diversi colori, i limiti delle zone con i diverso livello di danno. In questo modo è stato possibile verificare se all'interno di ogni zona fossero presenti pixel con valori dell'indice in accordo con il livello di danno.

Nell'area 1, per esempio, la maggior parte dei pixel con i valori più alti degli indici DNBR, BSI e DSI corrispondono alle zone rosse dove è stato stimato danno alto dalle immagini RapidEye; valori più bassi si trovano anche nelle zone gialle dove il danno è moderato.

L'area 3 è caratterizzata prevalentemente da danno alto e anche in questo caso i valori più alti degli indici sono all'interno della regione rossa.

Nell'area 4, a causa della copertura nuvolosa, è stato possibile verificare solo parzialmente la corrispondenza dei valori degli indici con il livello di danno.

Le aree 8 e 17 sono caratterizzate solamente dal livello di danno moderato e risulta difficile effettuare l'analisi. Confrontando però gli intervalli degli indici delle aree 8 e 17 con quelli dell'area 3 si può notare che non esiste incompatibilità tra valori di DNBR, BSI e DSI e il livello di danno stimato.



**Figura 5.22** Portugallo: mappe con livello di danno stimato con immagini RapiEye acquisite dopo l'evento e mappe degli indici DNBR, BSI e DSI.

## 5.3 Dimostrazione

In questo paragrafo viene descritta l'attività svolta durante la fase di dimostrazione del progetto PREFER: gli indici DNBR, BSI e DSI sono prodotti PREFER dedicati a supportare la fase di recupero e ricostruzione delle zone coinvolte dagli incendi e sono stati calcolati, per le aree di interesse (par. 2.5), sulle aree colpite da incendi durante la stagione estiva del 2015. Gli indici, che consentono di creare mappe del livello di danno mediante le soglie della tabella 5.1, sono stati calcolati su aree bruciate superiori a 10 ha con due immagini acquisite dal sensore OLI del satellite Landsat8: una prima dell'incendio e una dopo. Operativamente l'algoritmo per la stima del danno da incendio opera nel modo seguente:

- verifica inizialmente la disponibilità del prodotto REC-BSHRO cioè shapefile con i perimetri delle aree bruciate e soltanto se i file REC-BSHRO sono presenti,
- cerca le aree con superficie superiore a 10 ha e
- avvia il download delle immagini Landsat8-OLI prima e dopo l'incendio.
- Il prodotto finale, che viene reso disponibile agli utenti sul sito del progetto PREFER, corrisponde alle mappe degli indici DNBR, BSI e DSI calcolate sulle aree precedentemente individuate.

Nella tabella 5.12 sono riportati data di acquisizione e giorno dell'anno delle immagini Landsat8-Oli utilizzate nella fase di dimostrazione.

Utilizzando i dati di copertura del suolo fornite dalla Corine Land Cover (mappa di copertura del suolo a scala Europea) è stato possibile stimare le percentuali di pixel con prato, arbusti e alberi per le aree bruciate analizzate in Italia e Portogallo e vengono indicate nella tabella 5.13.

Nel 2015 gli indici di severità del danno sono stati calcolati su

- 6 aree bruciate in Sardegna
- 173 aree bruciate nella regione di Minho
- 14 aree bruciate in Corsica
- 10 aree bruciate nel Peloponneso

| Landsat 8 –OLI |           |                  |             |
|----------------|-----------|------------------|-------------|
|                | Track/row | Acquisition date | Day of year |
| FR             | 193/30    | 20151019         | 292         |
|                |           | 20150715         | 196         |
|                |           | 20150512         | 132         |
|                | 193/31    | 20150512         | 132         |
|                |           | 20150715         | 196         |

|           |        |          |     |
|-----------|--------|----------|-----|
|           |        | 20151019 | 292 |
| <b>GR</b> | 184/33 | 20150902 | 245 |
|           |        | 20150801 | 213 |
|           | 184/34 | 20150513 | 133 |
|           |        | 20150614 | 165 |
|           |        | 20150801 | 213 |
|           |        | 20150902 | 245 |
|           |        | 20150918 | 261 |
| <b>IT</b> | 193/32 | 20150629 | 180 |
|           |        | 20150715 | 196 |
|           |        | 20150917 | 260 |
|           | 193/33 | 20150629 | 180 |
|           |        | 20150715 | 196 |
|           |        | 20150917 | 260 |
| <b>PT</b> | 204/31 | 20150509 | 129 |
|           |        | 20150626 | 177 |
|           |        | 20150709 | 190 |
|           |        | 20150725 | 206 |
|           |        | 20150829 | 241 |
|           |        | 20150927 | 270 |
|           |        | 20150930 | 273 |
|           | 204/32 | 20150509 | 129 |
|           |        | 20150626 | 177 |
|           |        | 20150709 | 190 |
|           |        | 20150725 | 206 |
|           |        | 20150829 | 241 |
|           |        | 20150927 | 270 |
|           |        | 20150930 | 273 |

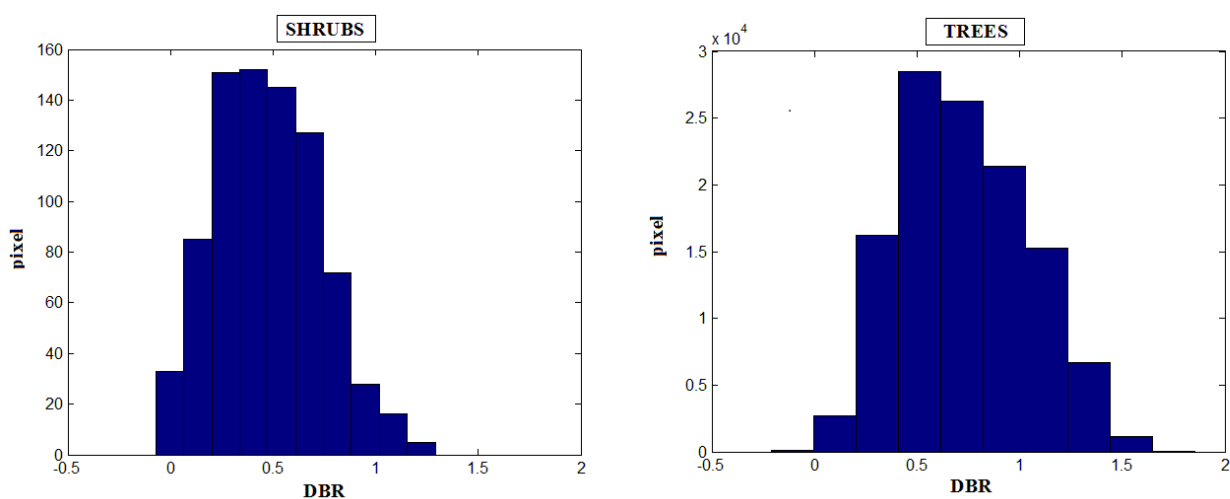
**Tabella 5.12** Elenco delle immagini Landsat 8 usate come input per il calcolo degli indici di severità del danno.

| AOI      | Land Cover |        |        |
|----------|------------|--------|--------|
|          | grass      | shrubs | trees  |
| Portugal | 0%         | 0.68%  | 99.31% |
| Italy    | 42.6%      | 47.01% | 10.38% |

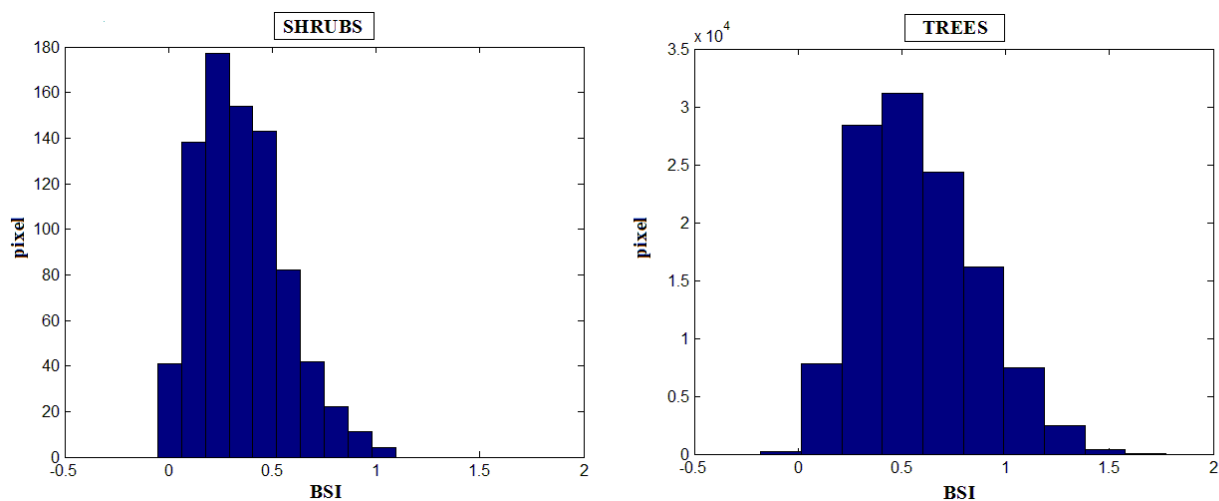
**Tabella 5.13** Distribuzione della vegetazione nelle aree bruciate stimata da mappe Land Cover.

I risultati per le aree bruciate individuate in Portogallo nel 2015 sono mostrati nelle figure 5.23, 5.24, 5.25 e 5.26.

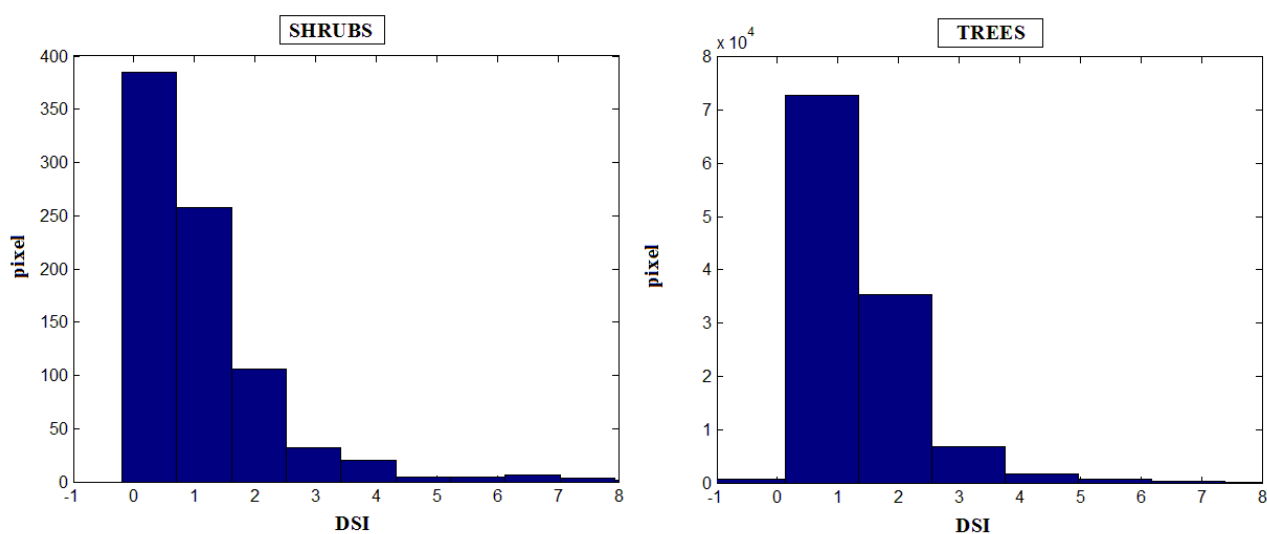
Molti pixel delle aree bruciate corrispondono a foreste e sono caratterizzati da valori di DNBR e BSI prossimi a 0.5. L'analisi del DSI mostra che molti pixel hanno valori compresi tra 0.5 e 1.



**Figura 5.23** Portogallo: istogrammi della distribuzione dei pixel con un determinato valore dell'indice DBR per suolo con arbusti e alberi.

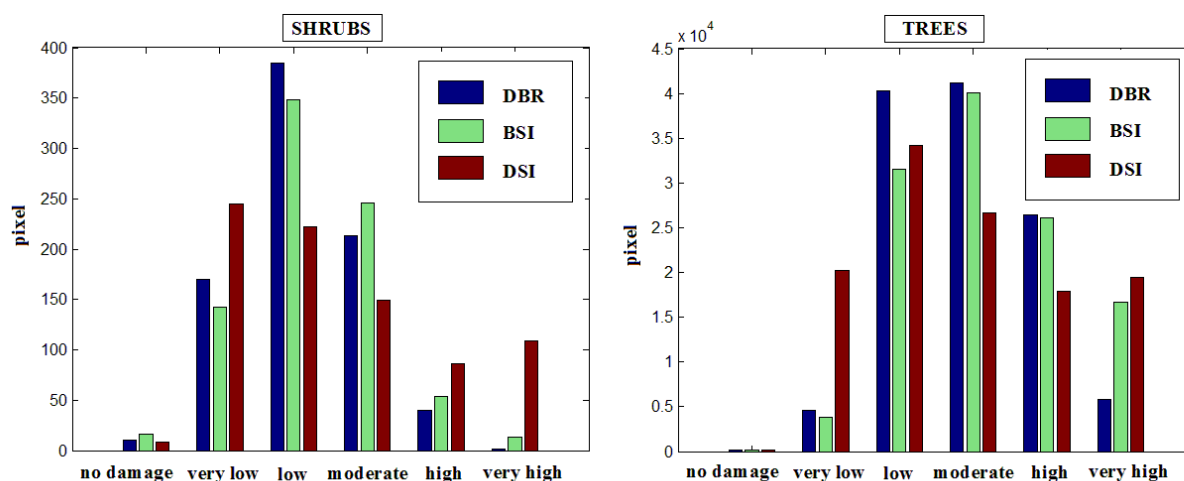


**Figura 5.24** Portogallo: istogrammi della distribuzione dei pixel con un determinato valore dell'indice BSI per suolo con arbusti e alberi.



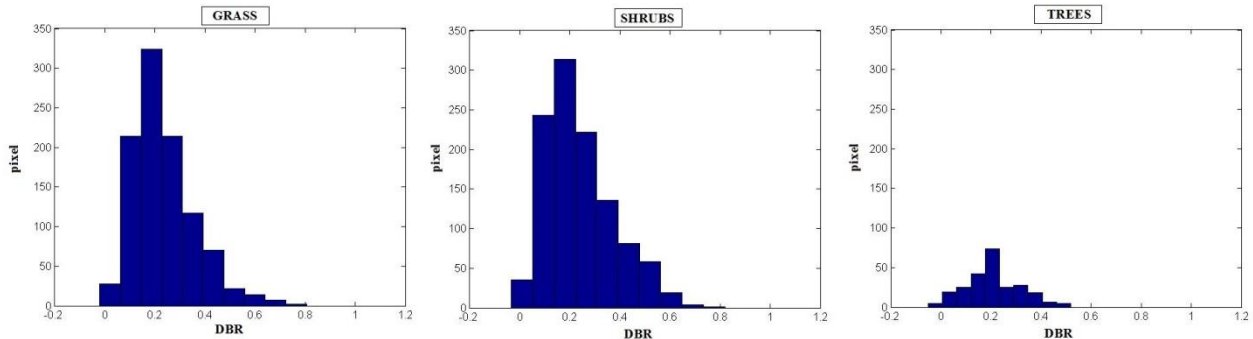
**Figura 5.25** Portogallo: istogrammi della distribuzione dei pixel con un determinato valore dell'indice DSI per suolo con arbusti e alberi.

La figura 5.26 mostra il numero di pixel corrispondenti a diversi livelli di danno, considerando DBR, BSI e DSI. La maggior parte dei pixel sono caratterizzati da danno basso, considerando il suolo con arbusti, e da danno basso e moderato considerando il suolo con foreste. I pixel con danno alto e molto alto sono presenti prevalentemente in aree con foreste infatti, come precedentemente detto, il danno alto indica un lungo periodo di rigenerazione della vegetazione dopo l'incendio. Per questo motivo, lo stesso livello di danno presente in aree con arbusti o prato viene considerato un errore.

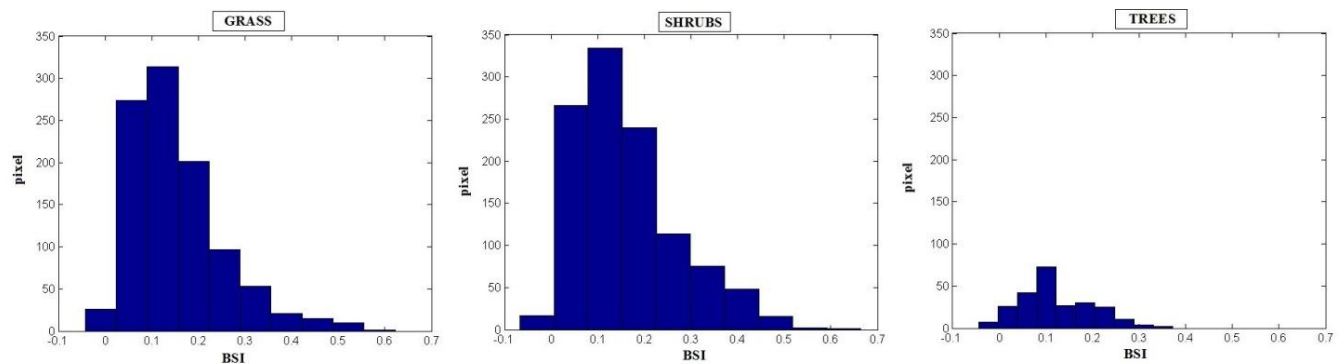


**Figura 5.26** Portogallo: distribuzione dei pixel con i livelli di danno per gli indici DBR, BSI e DSI su suolo con arbusti e alberi.

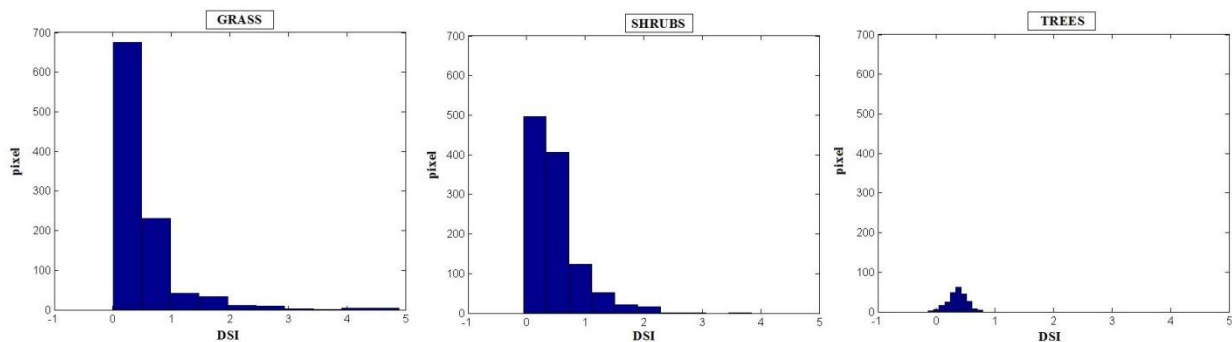
Le figure 5.27, 5.28, 5.29 e 5.30 mostrano i risultati per le aree bruciate in Italia. Molti pixel delle aree bruciate sono su suolo con prato e arbusti e la maggior parte sono caratterizzati da valori di DBR e BSI compresi tra 0.1 e 0.2. I valori di DSI sono compresi invece tra 0 e 0.3.



**Figura 5.27** Italia: istogrammi della distribuzione dei pixel con un determinato valore dell'indice DBR per suolo con prato, arbusti e alberi.

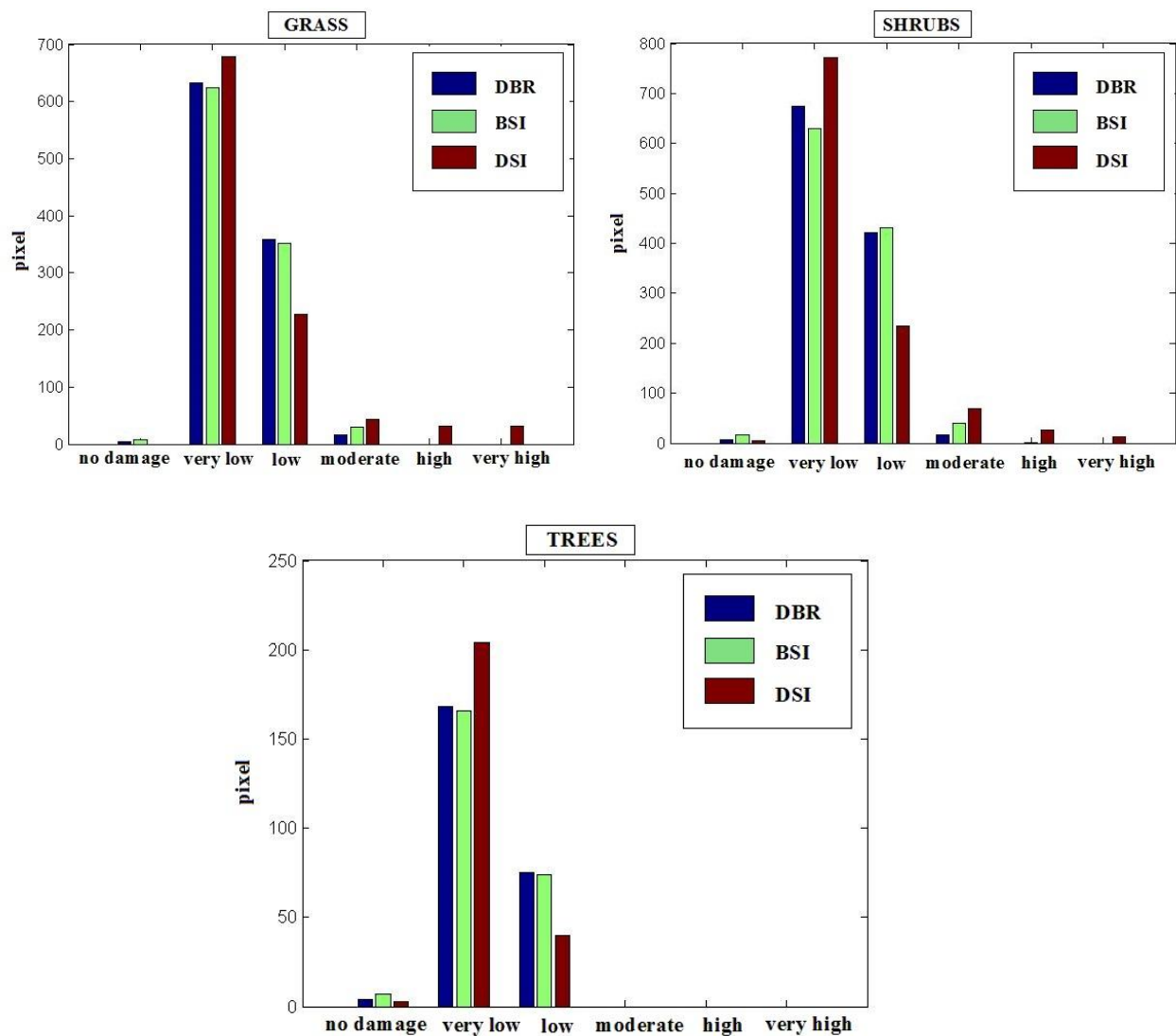


**Figura 5.28** Italia: istogrammi della distribuzione dei pixel con un determinato valore dell'indice BSI per suolo con prato, arbusti e alberi.



**Figura 5.29** Italia: istogrammi della distribuzione dei pixel con un determinato valore dell'indice DSI per suolo con prato, arbusti e alberi.

Il numero di pixel con diversi livelli di danno, per gli indici DBR, BSI e DSI, sono indicati nella figura 5.30. La maggior parte dei pixel sono caratterizzati da un livello di danno molto basso e questo accade per ogni tipo di vegetazione. Alcuni pixel, corrispondenti ad aree con prato e arbusti, sono caratterizzati invece da danno alto e molto alto. In questo caso la frazione di pixel rappresenta un errore nella stima dell'indice.



**Figura 5.30** Italia: distribuzione dei pixel con i livelli di danno per gli indici DBR, BSI e DSI su suolo con prato, arbusti e alberi.

## 5.4 Effetto dell'atmosfera sui livelli di danno

Nel paragrafo 3.5 è stato studiato come variano gli indici DNBR, BSI e DSI quando alle misure satellitari viene applicata una correzione atmosferica esatta, una correzione atmosferica errata o quando il contributo atmosferico non viene rimosso. In particolare gli spettri di riflettanza della figura 3.11 sono stati utilizzati per effettuare simulazioni con il modello MODTRAN e per calcolare, dai dati di riflettanza spettrale, gli indici di severità del danno.

La riflettanza è stata calcolata nei casi (3.18), (3.19), (3.20) e (3.21).

Ai valori degli indici DNBR, BSI e DSI sono state applicate le soglie di danno ottenute utilizzando le soglie DSI e le relazioni lineari viste nel paragrafo 3.3 (tab 5.14).

Il livello di danno, per gli stessi indici, è stato calcolato usando anche parametri di soglia da altri autori [15]: soglie BSI e DSI sono state ottenute da quelle DNBR (Cocke, Epting e Hall) con le relazioni del paragrafo 3.3. I nuovi parametri vengono riportati in tabella 5.15, 5.16 e 5.17.

Nella figura 5.31 e 5.32 vengono riportati i livelli di danno per i diversi tipi di cisto, per gli indici DNBR, BSI e DSI, considerando le soglie ottenute da soglie DSI e quelle dell'articolo [15]. Il blu indica che è stata applicata una correzione atmosferica esatta alla misura satellitare ottenuta con PcModwin, il celeste invece indica che i dati di riflettanza non sono stati corretti. Il giallo e il rosso indicano che nel processo di rimozione del contributo atmosferico sono stati considerati due modelli di atmosfera differenti: uno per la radianza riflessa dal suolo e l'altro per la trasmittanza. Le figure 5.31e 5.33 mostrano che nella maggior parte dei casi, utilizzando le soglie ottenute da DSI (tab. 5.14), non ci sono differenze nella stima del livello di danno se si applica o no una correzione atmosferica esatta o non corretta: per DNBR, due esempi su cinque evidenziano che si passa da un livello di danno moderato a un livello di danno basso se si rimuove in modo corretto il contributo atmosferico.

Un comportamento anomalo, in un uno dei cinque esempi, riguarda il passaggio da danno basso a moderato per BSI e il passaggio da danno basso a alto per DSI quando si effettua una correzione atmosferica esatta sui dati satellitari (fig. 5.31).

Dal confronto dei risultati si può notare come le stime del danno ricavate con le soglie DSI (tab. 5.14) siano inferiori a quelle ottenute usando le soglie delle tabelle 5.15, 5.16 e 5.17: le differenze sono dovute ai valori più bassi delle soglie Cocke, Epting e Hall.

| No damage                                              | Very low damage                                                 | Low damage                  | Moderate damage                                                 | High damage                               | Very high damage |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------|
| The area is indistinguishable from pre-fire conditions | Little change in cover and mortality of structurally vegetation |                             | Mixture of effects ranging in the pixel from low to high change | Vegetation has high to complete mortality |                  |
| DSI $\leq 0$                                           | DSI $< 0.5$                                                     | $0.5 < \text{DSI} < 1$      | $1 < \text{DSI} < 1.5$                                          | $1.5 < \text{DSI} < 2$                    | DSI $> 2$        |
| BSI $\leq 0$                                           | BSI $< 0.18$                                                    | $0.18 < \text{BSI} < 0.47$  | $0.47 < \text{BSI} < 0.77$                                      | $0.77 < \text{BSI} < 1.06$                | BSI $> 1.06$     |
| DNBR $\leq 0$                                          | DNBR $< 0.26$                                                   | $0.26 < \text{DNBR} < 0.66$ | $0.66 < \text{DNBR} < 1.07$                                     | $1.07 < \text{DNBR} < 1.47$               | DNBR $> 1.47$    |

**Tabella 5.14** Soglie del livello di danno ottenute confrontando valori dell'indice DSI con valori dell'indice CBI. Per le soglie DNBR e BSI sono state utilizzate le relazioni del par. 3.3.

| Cocke <i>et al.</i> 2005                               |                                                                 |                                                                 |                                           |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Unburned                                               | Low                                                             | Moderate                                                        | High                                      |
| The area is indistinguishable from pre-fire conditions | Little change in cover and mortality of structurally vegetation | Mixture of effects ranging in the pixel from low to high change | Vegetation has high to complete mortality |
| DNBR $\leq 0.05$                                       | $0.05 < \text{DNBR} < 0.24$                                     | $0.24 < \text{DNBR} < 0.57$                                     | DNBR $\geq 0.57$                          |
| BSI $\leq 0.01$                                        | $0.01 < \text{BSI} < 0.15$                                      | $0.15 < \text{BSI} < 0.41$                                      | BSI $\geq 0.41$                           |
| DSI $\leq 0.24$                                        | $0.24 < \text{DSI} < 0.48$                                      | $0.48 < \text{DSI} < 0.88$                                      | DSI $\geq 0.88$                           |

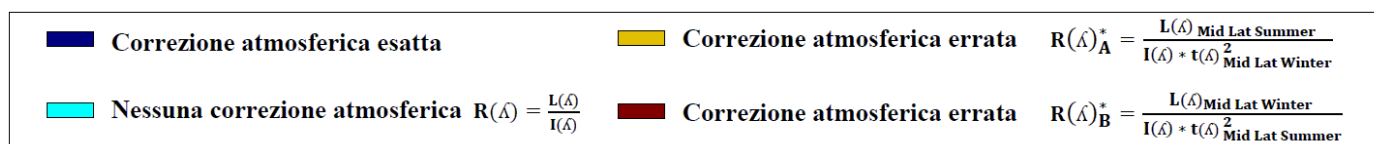
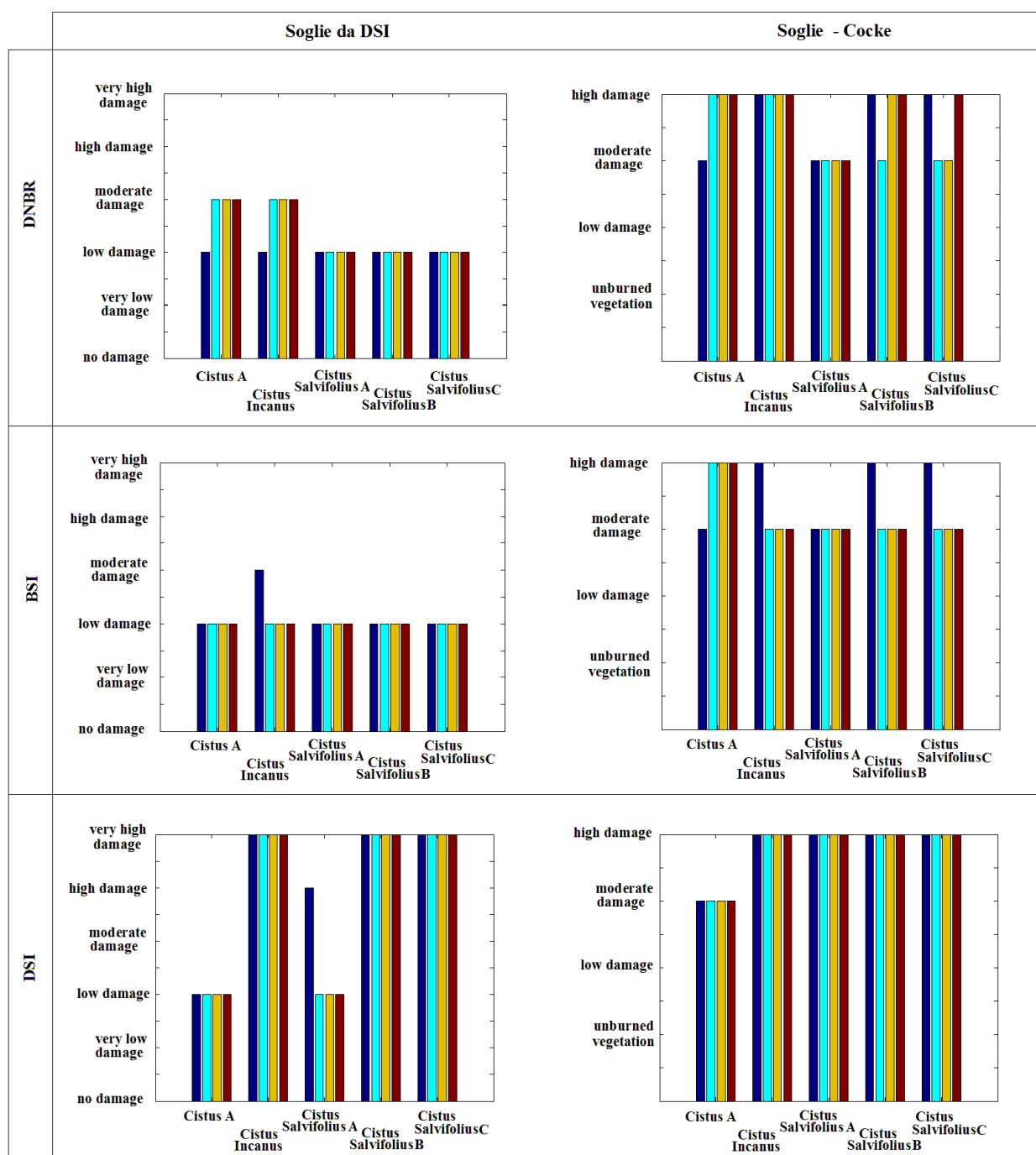
**Tabella 5.15** Soglie del livello di danno ottenute utilizzando le soglie DNBR [29] le relazioni del par. 3.3.

| Epting <i>et al.</i> 2005                              |                                                                 |                                                                 |                                           |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Unburned                                               | Low                                                             | Moderate                                                        | High                                      |
| The area is indistinguishable from pre-fire conditions | Little change in cover and mortality of structurally vegetation | Mixture of effects ranging in the pixel from low to high change | Vegetation has high to complete mortality |
| DNBR $\leq 0.09$                                       | $0.09 < \text{DNBR} < 0.27$                                     | $0.27 < \text{DNBR} < 0.68$                                     | DNBR $\geq 0.68$                          |
| BSI $\leq 0.04$                                        | $0.04 < \text{BSI} < 0.18$                                      | $0.18 < \text{BSI} < 0.49$                                      | BSI $\geq 0.49$                           |
| DSI $\leq 0.29$                                        | $0.29 < \text{DSI} < 0.52$                                      | $0.52 < \text{DSI} < 1.02$                                      | DSI $\geq 1.02$                           |

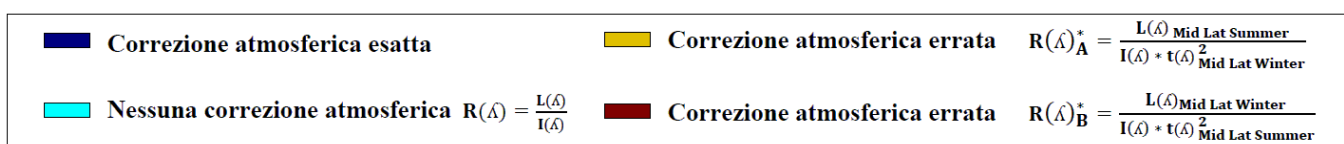
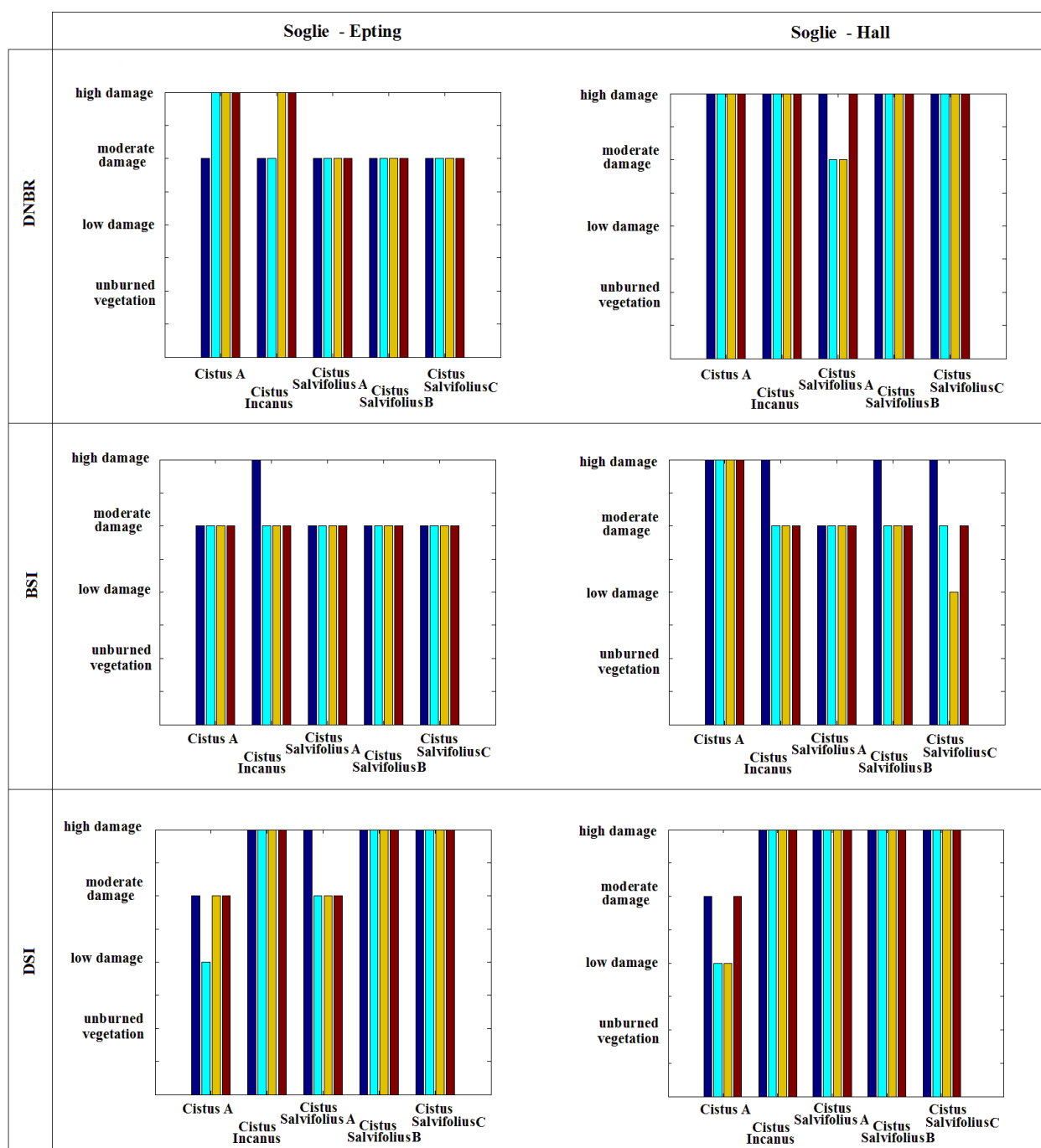
**Tabella 5.16** Soglie del livello di danno ottenute utilizzando le soglie DNBR [29] le relazioni del par. 3.3.

| Hall <i>et al.</i> 2008                                |                                                                 |                                                                 |                                           |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Unburned                                               | Low                                                             | Moderate                                                        | High                                      |
| The area is indistinguishable from pre-fire conditions | Little change in cover and mortality of structurally vegetation | Mixture of effects ranging in the pixel from low to high change | Vegetation has high to complete mortality |
| DNBR $\leq 0.04$                                       | $0.04 < \text{DNBR} < 0.28$                                     | $0.28 < \text{DNBR} < 0.51$                                     | $\text{DNBR} \geq 0.51$                   |
| BSI $\leq 0.003$                                       | $0.003 < \text{BSI} < 0.188$                                    | $0.188 < \text{BSI} < 0.363$                                    | $\text{BSI} \geq 0.363$                   |
| DSI $\leq 0.23$                                        | $0.23 < \text{DSI} < 0.53$                                      | $0.53 < \text{DSI} < 0.81$                                      | $\text{DSI} \geq 0.81$                    |

**Tabella 5.17** Soglie del livello di danno ottenute utilizzando le soglie DNBR [29] le relazioni del par. 3.3.

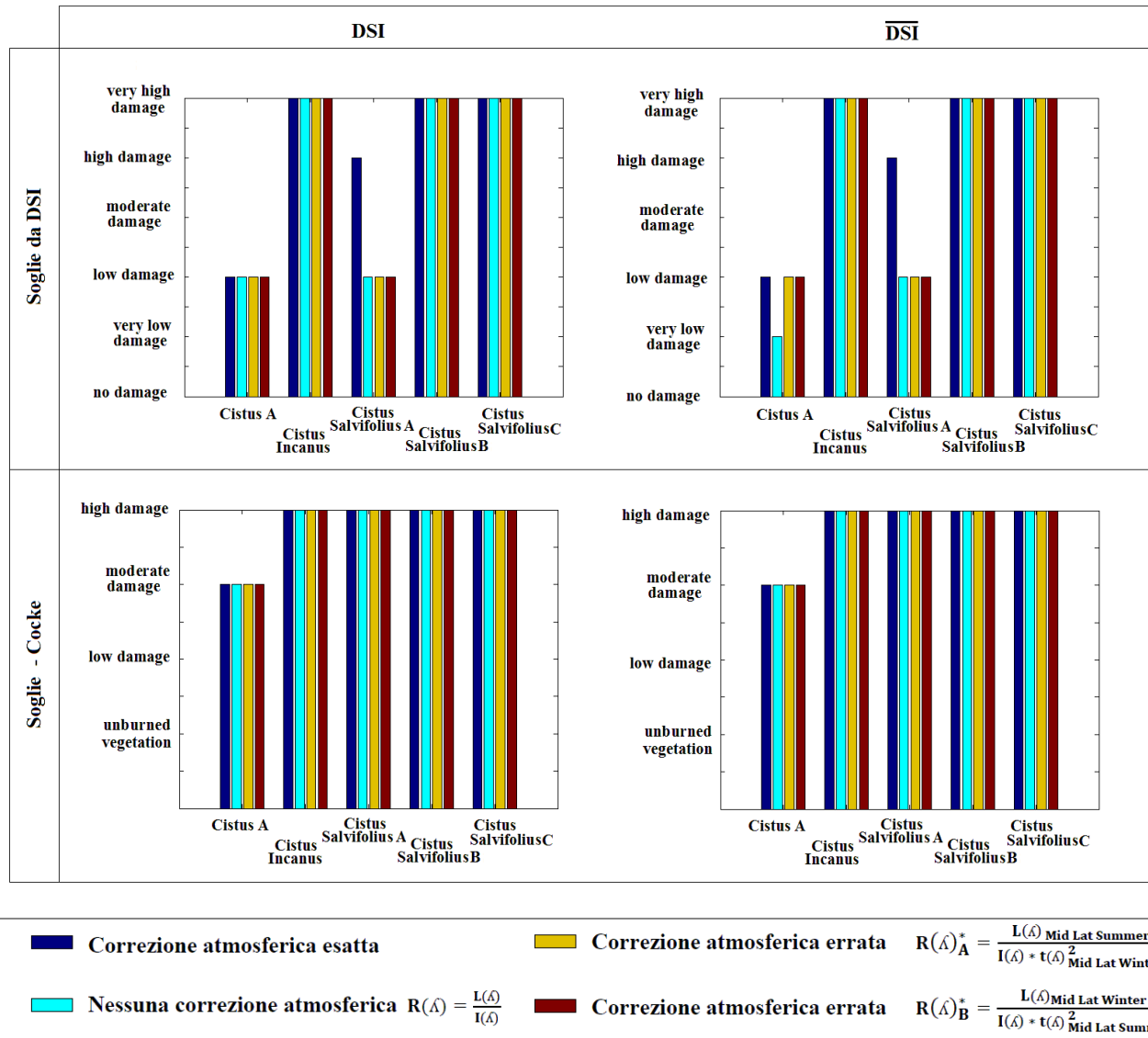


**Figura 5.31** Livelli di danno da DNBR, BSI e DSI per diversi di tipi di vegetazione (fig. 3.11) ottenuti con simulazioni MODTRAN. Sono stati considerati tipi differenti di correzione atmosferica e le soglie di tabella 5.14, 5.15.



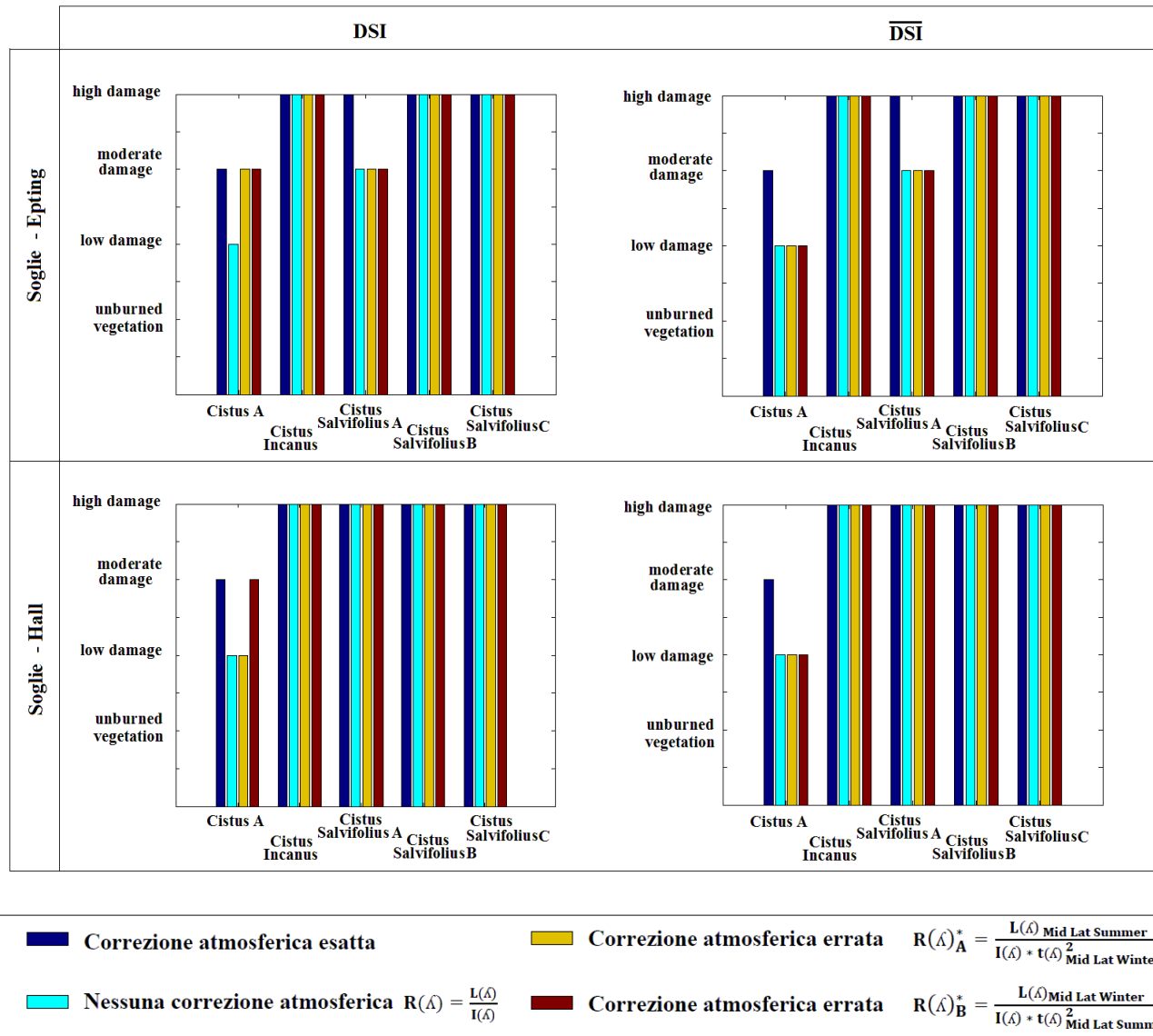
**Figura 5.32** Livelli di danno da DNBR, BSI e DSI per diversi di tipi di vegetazione (fig. 3.11) ottenuti con simulazioni MODTRAN. Sono stati considerati tipi differenti di correzione atmosferica e le soglie di tabella 5.16 e 5.17.

Le figure 5.31, 5.32 mostrano che il danno da BSI, ottenuto applicando una correzione atmosferica errata, è più basso se si applicano le soglie della tabella 5.14, al posto delle soglie delle tabelle 5.15, 5.16 e 5.17.



**Figura 5.33** Livelli di danno da DSI e  $\overline{DSI}$  per diversi di tipi di vegetazione (fig. 3.11) ottenuti con simulazioni MODTRAN. Sono stati considerati tipi differenti di correzione atmosferica e le soglie di tabella 5.14, 5.15.

Le Figure 5.33 e 5.34 mostrano come varia la stima del danno se viene utilizzata la nuova versione  $\overline{DSI}$ . Possiamo notare che, nel caso dell'analisi effettuata con le soglie ottenute da DSI (fig. 5.33), il comportamento anomalo, precedentemente riscontrato, non viene eliminato.



**Figura 5.34** Livelli di danno per diversi di tipi di vegetazione (fig. 3.11) ottenuti con simulazioni MODTRAN. Sono stati considerati tipi differenti di correzione atmosferica e le soglie di tabella 5.16 e 5.17.

L'analisi è stata effettuata anche con la nuova versione  $\overline{DSI}$ .

## 5.5 Effetto degli aerosol sui livelli di danno

L'effetto degli aerosol sulla stima dei livelli di danno è stato studiato applicando le soglie di tab. 5.2 agli indici DNBR, BSI e  $\overline{DSI}$  ottenuti mediante simulazioni MODTRAN e riportati nelle figure 3.22, 3.23 e 3.24 nel paragrafo 3.6. Le simulazioni sono state effettuate utilizzando il coefficiente di estinzione di distribuzioni log-normali di particelle e il parametro di asimmetria delle particelle. Inoltre sono stati considerati tre casi diversi utilizzando come input per il software PcModwin

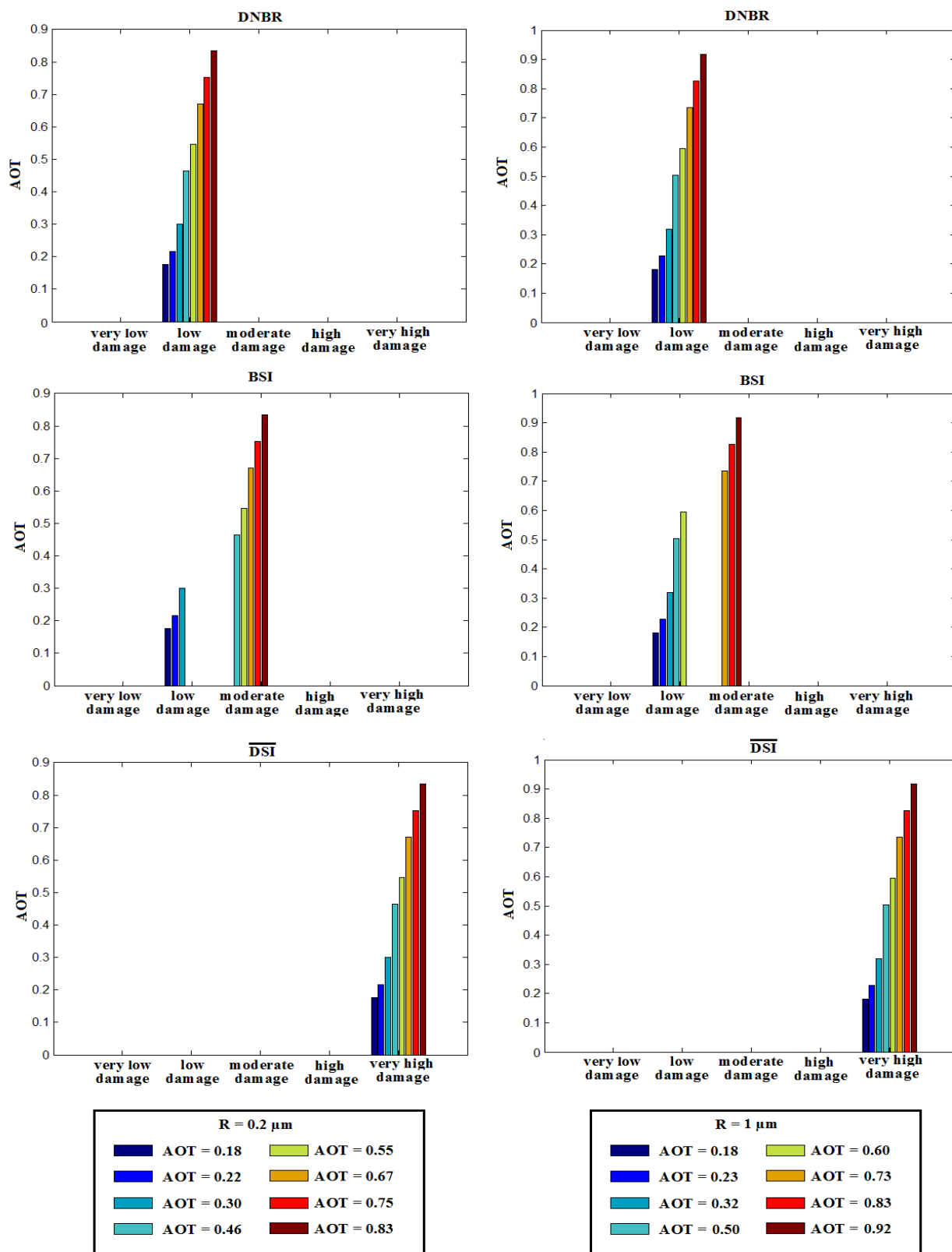
- a) lo spettro di riflettanza ottenuto in campo con il fotospettroradiometro (Cistus Incanus)
- b) i valori di riflettanza media nelle bande Landsat8 calcolati sullo spettro acquisito in campo
- c) i valori di riflettanza, nelle aree bruciate, delle immagini Landsat8 acquisite prima e dopo l'incendio (10/06/2014 e 28/07/2014)

Le figure 5.35 - 5.36 (corrispondenti al caso *a*) e 5.37 - 5.38 (corrispondenti al caso *b*), indicano che il livello di danno, considerando distribuzioni log-normali di particelle con diversi raggi medi, è basso per DNBR, basso e moderato per BSI e molto alto per DSI. In alcuni casi, aumentando solo il contenuto di particelle in atmosfera, il livello di danno ottenuto dall'indice BSI passa da basso a moderato.

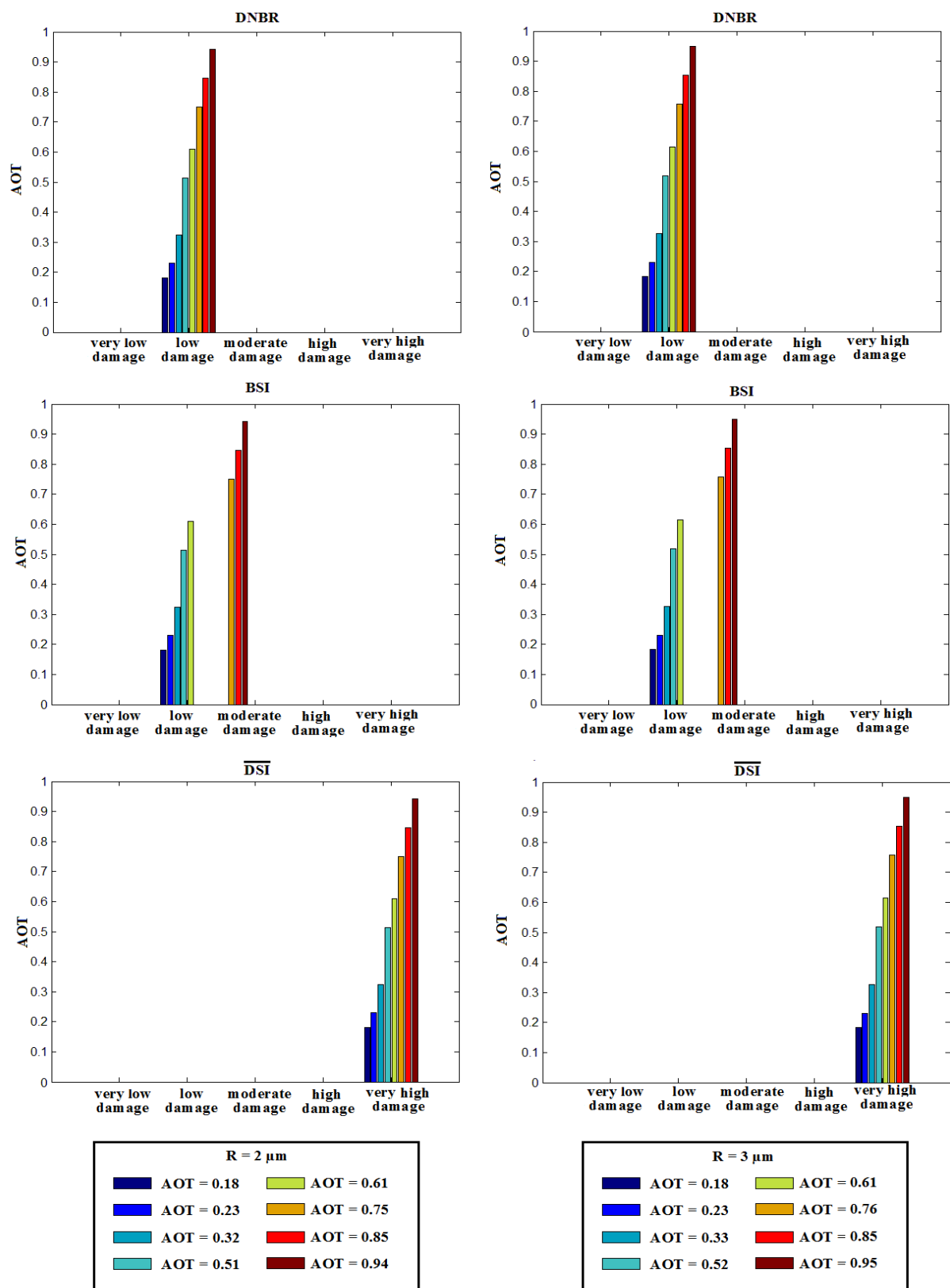
Il livello di danno è invece quasi sempre basso per tutti gli indici se, per le simulazioni MODTRAN, vengono utilizzati in input i dati Landsat8 (caso *c*, fig. 5.39, 5.40).

Le differenze nei risultati sono dovute quindi ai diversi spettri di riflettanza che vengono usati come input per PcModwin: considerando il caso *c* in figura 3.19, nelle bande 5 e 6 di Landsat8, la riflettanza ottenuta dall'immagine acquisita prima dell'incendio (10/06/2014) ha valori più bassi rispetto a quella ottenuta da misure in campo pre-evento (Cistus Incanus) e nella banda 7 è inferiore a quella calcolata dall'immagine acquisita dopo l'incendio (28/07/2014). Questo è dovuto essenzialmente al valore medio della radianza nel generico pixel Landsat8 che dipende da diversi tipi di vegetazione e copertura del suolo. Considerando invece i casi *a* e *b* in fig. 3.19, si può notare che, nella banda 7, il valore di riflettanza prima dell'incendio è superiore a quello dopo l'incendio e questa condizione non rispetta l'ipotesi iniziale secondo cui la riflettanza nello SWIR, dopo l'incendio, tende ad aumentare.

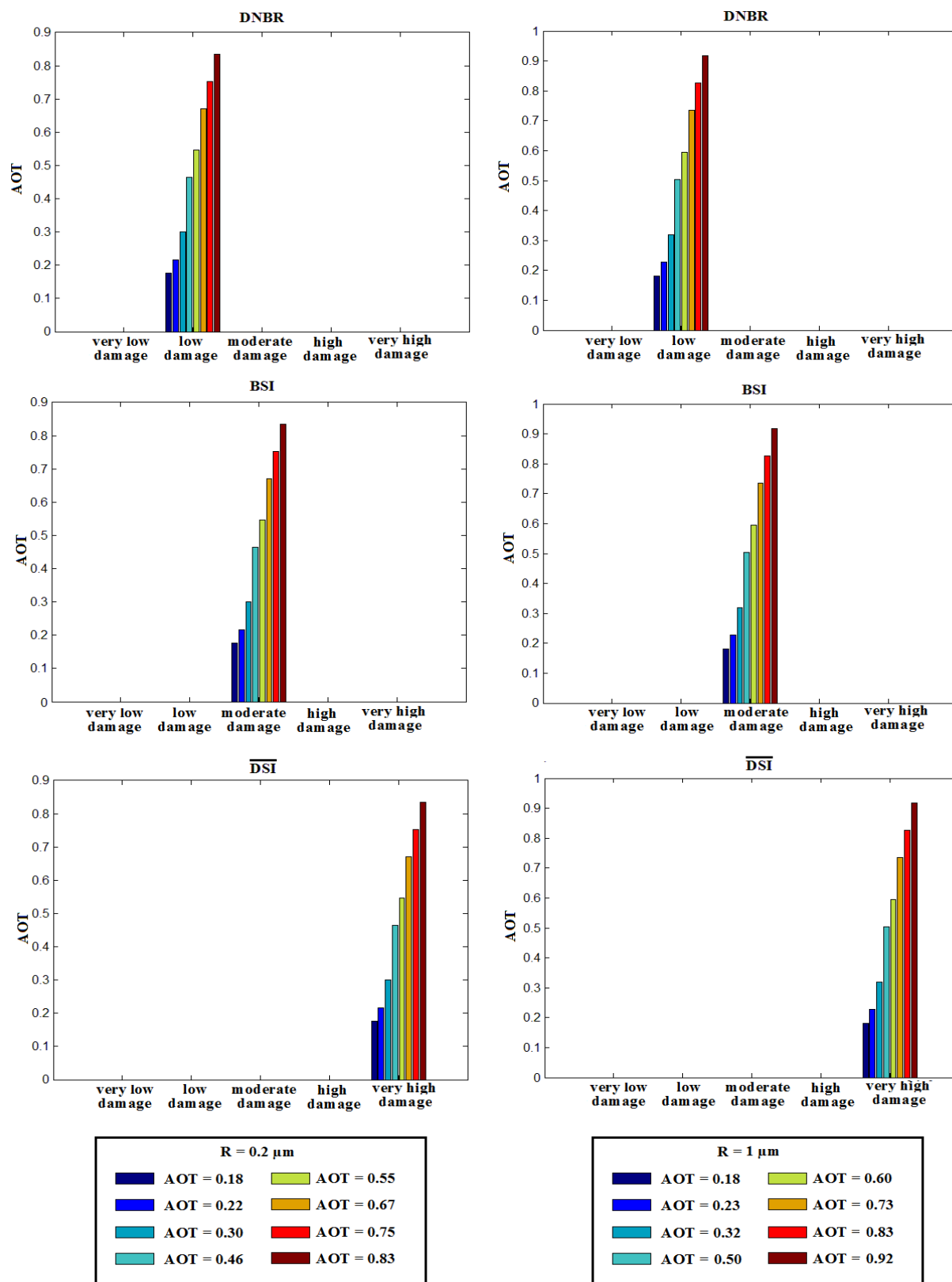
Si possono ritenere attendibili quindi solo le stime dei livelli di danno ottenute effettuando simulazioni MODTRAN con dati di riflettanza in input calcolati da immagini Landsat8 (caso *c*): il danno sulla vegetazione non è influenzato dalla presenza di particelle in atmosfera.



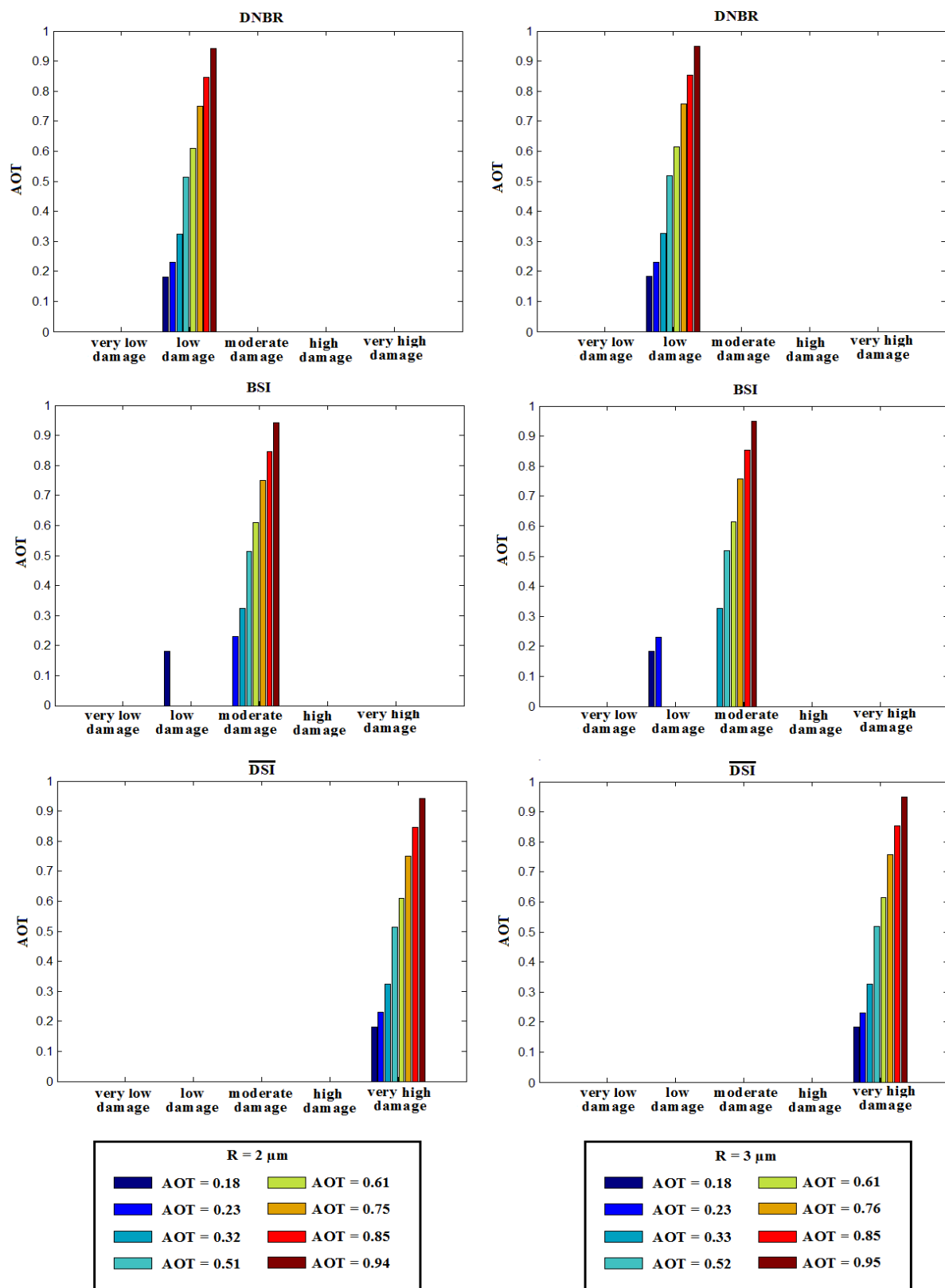
**Figura 5.35** Livelli di danno in presenza di aerosol ottenuti con simulazioni MODTRAN. Sono stati utilizzati in input distribuzioni log-normali di particelle con diversi valori del raggio medio e valori di riflettanza calcolati da dati di laboratorio (fig 3.19). Sono state applicate le soglie di tabella 5.14.



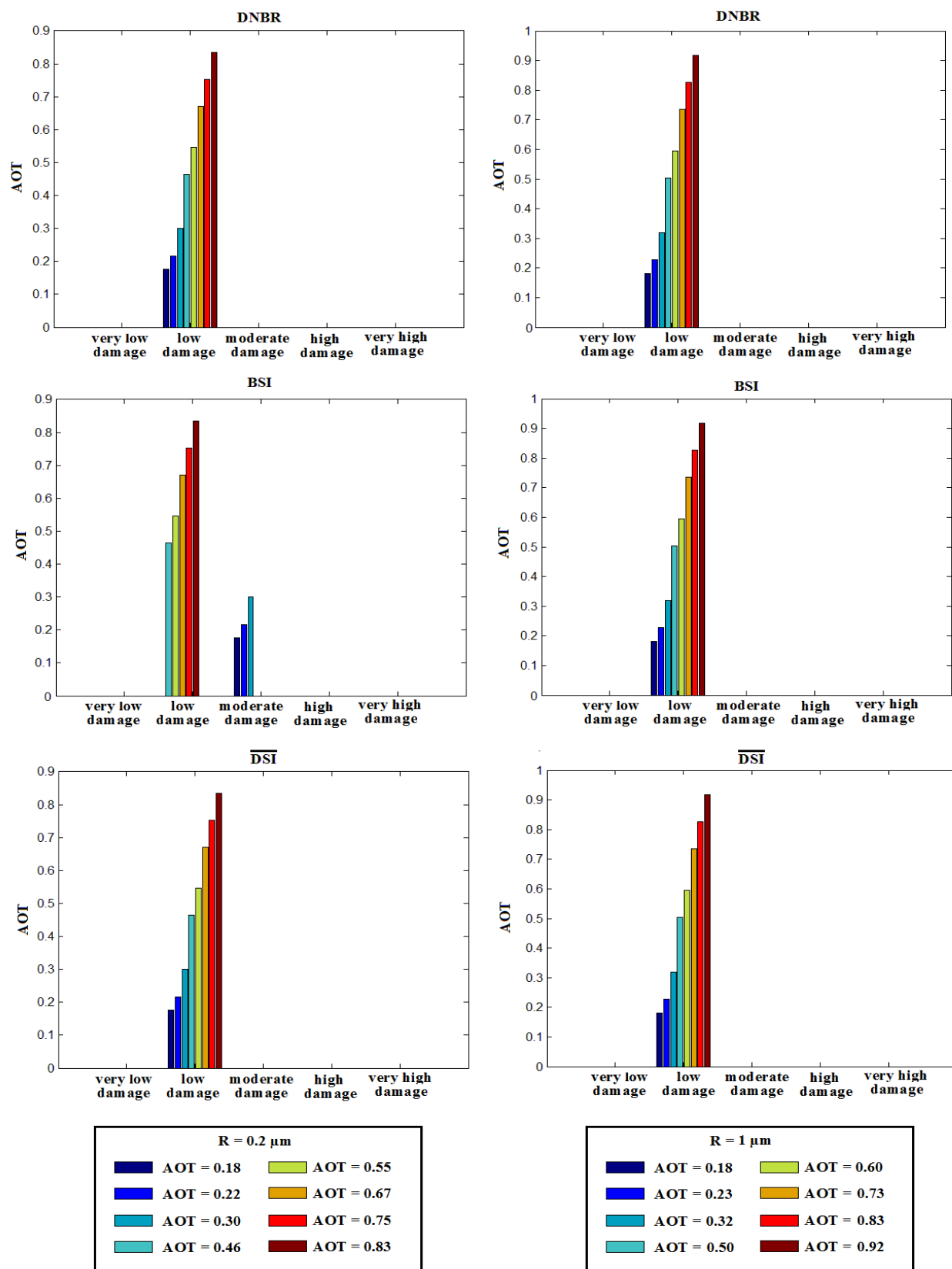
**Figura 5.36** Livelli di danno in presenza di aerosol ottenuti con simulazioni MODTRAN. Sono stati utilizzati in input distribuzioni log-normali di particelle con diversi valori del raggio medio e valori di riflettanza calcolati da dati di laboratorio (fig 3.19). Sono state applicate le soglie di tabella 5.14.



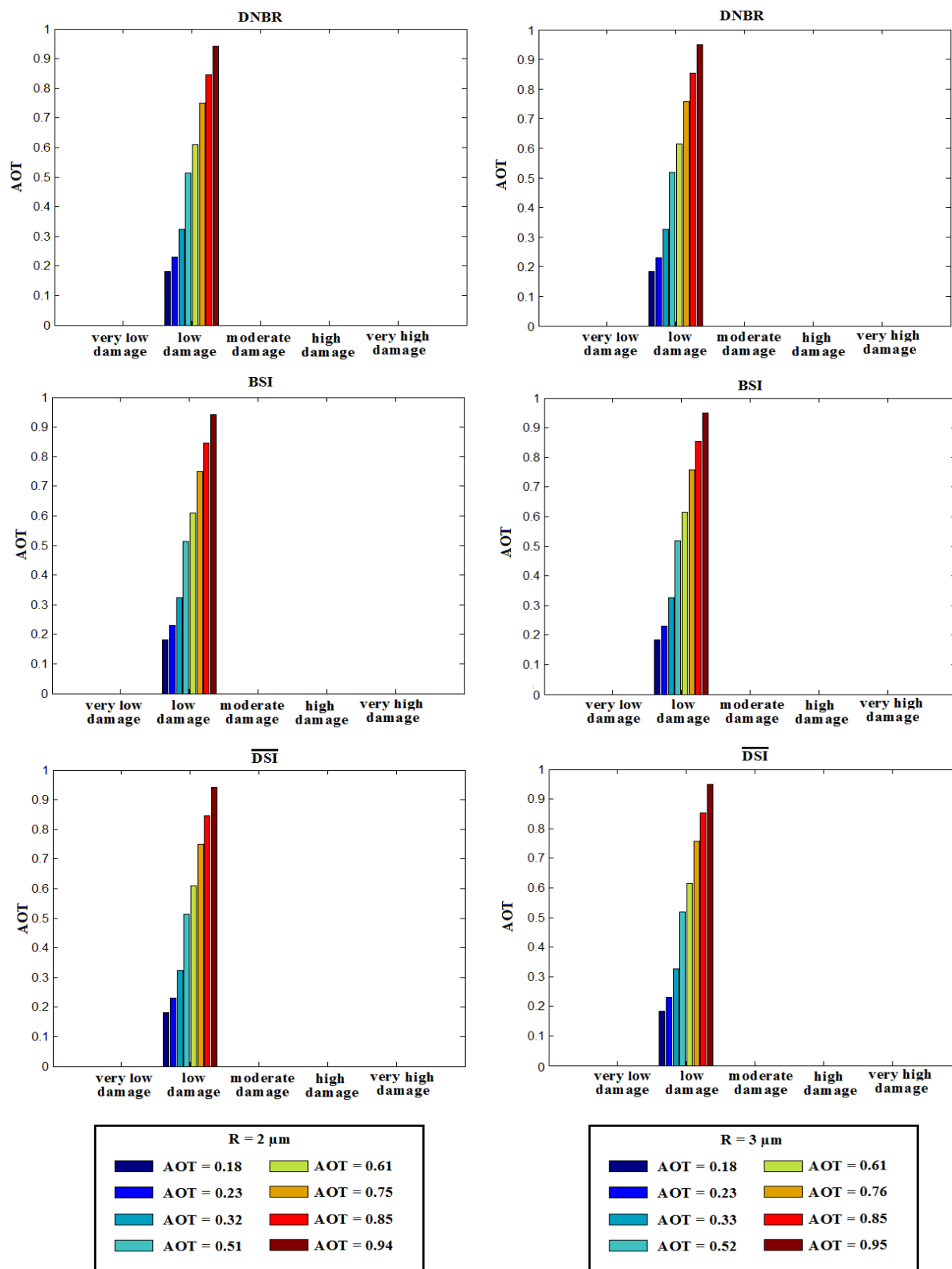
**Figura 5.37** Livelli di danno in presenza di aerosol ottenuti con simulazioni MODTRAN. Sono stati utilizzati in input distribuzioni log-normali di particelle con diversi valori del raggio medio e valori di riflettanza media negli intervalli delle bande Landsat8 calcolati sugli spettri di laboratorio (fig 3.19). Sono state applicate le soglie di tabella 5.14.



**Figura 5.38** Livelli di danno in presenza di aerosol ottenuti con simulazioni MODTRAN. Sono stati utilizzati in input distribuzioni log-normali di particelle con diversi valori del raggio medio e valori di riflettanza media negli intervalli delle bande Landsat8 calcolati sugli spettri di laboratorio (fig 3.19). Sono state applicate le soglie di tabella 5.14.



**Figura 5.39** Livelli di danno in presenza di aerosol ottenuti con simulazioni MODTRAN. Sono stati utilizzati in input distribuzioni log-normali di particelle con diversi valori del raggio medio e valori di riflettanza media nell'area bruciata (fig 3.3) calcolati con le immagini Landsat8 della Sardegna acquisite il 10/06/2014 e il 28/07/2014 (fig 3.19). Sono state applicate le soglie di tabella 5.14.



**Figura 5.40** Livelli di danno in presenza di aerosol ottenuti con simulazioni MODTRAN. Sono stati utilizzati in input distribuzioni log-normali di particelle con diversi valori del raggio medio e valori di riflettanza media nell'area bruciata (fig 3.3) calcolati con le immagini Landsat8 della Sardegna acquisite il 10/06/2014 e il 28/07/2014 (fig 3.19). Sono state applicate le soglie di tabella 5.14.

## Conclusioni

Il dottorato è stato dedicato allo sviluppo di una metodologia che utilizza misure satellitari per monitorare l'effetto degli incendi sulla vegetazione. In Italia, Francia, Portogallo, Spagna e Grecia, ogni anno, centinaia di migliaia di ettari di foreste vengono distrutte dagli incendi. I danni causati dagli incendi hanno un immediato riscontro economico, legato al valore del legname distrutto, ai costi di prevenzione, di estinzione e di bonifica delle aree percorse ed alle spese che si rendono necessarie per il ripristino dei soprassuoli. Meno facilmente quantificabili, dal punto di vista economico, sono invece i danni subiti dalle aree boscate in quanto parte integrante dell'intero ecosistema (alterazione di popolamenti vegetali, riduzione della difesa idrogeologica, depauperamento della vocazione paesaggistica e turistico-ricreativa, ecc.).

Il fenomeno ha spesso implicazioni drammatiche sui territori agricoli ed urbanizzati inglobati nel bosco o ad esso strettamente connessi, inoltre è caratterizzato da una grande dilatazione temporale, interessando il territorio sia durante la stagione invernale sia in quella estiva. A ciò si aggiunge una diffusa instabilità dei versanti, una geo-morfologia accidentata, un clima con frequenti periodi predisponenti il verificarsi degli eventi, tali da ostacolare lo sforzo generale di contenimento del problema.

In questo scenario il progetto europeo **PREFER** (Space-based Information Support for **P**revention and **RE**covery of Forest Fires **E**mergency in the **MediteR**anean Area) mira a fornire informazioni, basate su dati da satelliti di telerilevamento, potenzialmente utili a supportare le attività di prevenzione incendi e di recupero e ricostruzione post-evento.

La metodologia messa a punto nel corso del dottorato si basa sull'uso e miglioramento di indici di severità del danno per valutare gli effetti sulla vegetazione provocati dagli incendi e ha rappresentato il contributo dell'Università Sapienza nell'ambito del progetto **PREFER**.

Gli indici **DNBR** (differential Normalized Burn Ratio), **BSI** (Burn Severity Index) e **DSI** (Damage Severity Index) sono calcolati utilizzando i valori di riflettanza spettrale nel regione del rosso (**RED**), del vicino infrarosso (**NIR**) e dell'infrarosso a onda corta (**SWIR**) poichè in tali canali spettrali si evidenzia meglio il diverso comportamento della riflettanza della vegetazione in salute e della vegetazione bruciata. **DNBR**, **BSI** e **DSI** si ottengono dalla differenza degli indici **NBR**, **NDVI**, **NDII** e **MNBR** calcolati prima e dopo l'incendio con immagini satellitari.

Il confronto tra l'indice **CBI**, (Composite Burn Index) ottenuto mediante analisi visiva e foto acquisite in campo, e l'indice **DSI**, stimati sulle stesse aree, ha consentito di definire le soglie del livello di danno per il **DSI** (ossia la calibrazione dell'indice).

Nell'ambito dell'attività di tesi è stato sviluppato un software in ambiente Matlab che a partire dalle immagini multispettrali Landsat8 consente di calcolare, in modo automatico, gli indici DNBR, BSI e DSI su aree superiori a 10 ha. Questi prodotti costituivano uno degli output del progetto PREFER. La stima degli indici era originariamente effettuata usando il metodo di normalizzazione radiometrica IR-MAD. Per superare alcune errori che tale metodo presentava è stato sviluppato un nuovo metodo di normalizzazione radiometrica (par 3.3) ed è stata introdotta una nuova versione del DSI ( $\overline{DSI}$ ) che tiene conto in modo più accurato delle caratteristiche spettrali della vegetazione prima dell'incendio.

Mediante le relazioni tra gli indici ottenuti con il metodo di normalizzazione radiometrica IR-MAD, sono state ottenute anche le soglie di danno per DNBR e BSI che hanno consentito di stimare il livello di danno nelle aree bruciate. I risultati dell'analisi effettuata con DNBR e quelli dell'analisi effettuata con BSI sono simili in quanto i canali spettrali utilizzati per calcolare BSI sono correlati a quelli utilizzati per calcolare il DNBR. Le stime di danno ottenute dal DSI, caratterizzate da valori più alti, dimostrano invece come DSI sia un indice ottimo e come consenta di effettuare un'analisi in modo più dettagliato. Nei capitoli precedenti è stato dimostrato inoltre che il nuovo metodo di normalizzazione radiometrica fornisce, considerando DSI, stime più basse del livello di danno rispetto al metodo IR-MAD. Per lo stesso metodo di normalizzazione radiometrica, le stime di danno ottenute dall'indice  $\overline{DSI}$  sono superiori a quelle ottenute da DSI.

Le mappe di danno ottenute applicando gli algoritmi descritti nel paragrafo 4.1 sono stati validati in diversi modi:

- misure di campo per la stima visuale del CBI;
- analisi di immagini ad altissima risoluzione RapidEye, acquisite prima degli incendi
- analisi di immagini ad altissima risoluzione RapidEye, acquisite dopo l'incendio

La validazione ha consentito di verificare che l'errore per DSI diminuisce utilizzando il nuovo metodo di normalizzazione radiometrica. Utilizzando invece la nuova versione del Damage Severity Index,  $\overline{DSI}$  l'errore aumenta.

Uno studio particolare ha riguardato la valutazione dell'effetto dell'interazione della radiazione elettromagnetica con l'atmosfera e gli aerosol. Le simulazioni, effettuate con il software MODTRAN, permettono di concludere che il livello di danno viene scarsamente influenzato dall'effetto atmosferico. Anche la presenza di aerosol in atmosfera (con AOT inferiore a 1) non altera la stima del grado di danno.

Comunque lo studio sull'effetto dell'atmosfera (con e senza aerosol) si può ritenere puramente teorico e sarà necessario un confronto con risultati ottenuti utilizzando immagini satellitari che si riferiscano ad un caso reale.

## Bibliografia

- [1] G. Schmunk, R. E. San-Miguel-Ayanz, J. F. Camia, C. H. Durrant, N. C. Boca and L. J. Libertà, "Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa, 2012," JRC Tech. Rep., Joint report of JRC and Directorate-General Environment, 2013.
- [2] G. Laneve *et al.*, "PREFER FP7 project for the management of the pre- and post-fire phases: Presentation of the products," in *Advances in Forest Fire Research*, Impresa de Universidade de Coimbra, Portugal, Nov. 2014 [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.14195/978-989-26-0884-6>.
- [3] L. Fusilli *et al.*, (2014). "PREFER products handbook," [Online]. Available: <http://www.prefer-copernicus.eu/index.php/downloads/viewcategory/29-pub-deliverables-24m>
- [4] G. Laneve, L. Fusilli, G. Bernini *et al.*, Development and Validation of Fire Damage-Severity Indices in the Framework of the PREFER Project, IEEE J. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 9, no. 6, June 2016, pp. 2806 - 2817.
- [5] Laneve, G. Dispense del corso di SISTEMI DI OSSERVAZIONE E SORVEGLIANZA, Ingegneria spaziale e astronautica, Università di Roma La Sapienza, Anno Accademico 2014-2015.
- [6] C. A. Parra and E. Chuvieco, "Assessing burn severity using Hyperion data," in *Proc. 5th Int. Workshop Remote Sens. GIS Appl. For. Fire Manage. Fire Eff. Assess.*, 2005, pp. 239–244 [Online]. Available: <http://earsel-ffsig.web.auth.gr/publication/>.
- [7] R. F. Kokaly, B. W. Rockwell, S. L. Haire, and T. V. V. King, "Characterization of postfire surface cover, soils, and burn severity at the Cerro Grande fire, New Mexico, using hyperspectral and multispectral remote sensing," *Remote Sens. Environ.*, vol. 106, no. 3, pp. 305–325, 2007.
- [8] J. W. Van Wagendonk, R. R. Root, and C. H. Key, "Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity," *Remote Sens. Environ.*, vol. 92, no. 3, pp. 397–408, 2004.
- [9] S. S. Veraverbeke, S. J. Hook, and S. Harris, "Sinergy of VSWIR (0.4–2.5  $\mu\text{m}$ ) and MTIR (3.5–12.5  $\mu\text{m}$ ) data for post-fire assessments," *Remote Sens. Environ.*, vol. 124, pp. 771–779, 2012.
- [10] G. Laneve, R. de Bonis, and L. Fusilli, "Development of a vegetation damage severity index based on hyperspectral sensor data," in *Proc. 33rd EARSeL Symp.*, 2013, pp. 711–715 [Online]. Available: [http://www.earsel.org/symposia/2013-symposium-Matera/pdf\\_proceedings/EARSeL-Symposium-2013\\_12\\_5\\_debonis.pdf](http://www.earsel.org/symposia/2013-symposium-Matera/pdf_proceedings/EARSeL-Symposium-2013_12_5_debonis.pdf)
- [11] K. Hyde, S. W. Woods, and J. Donahue, "Predicting gully rejuvenation after wildfire using remotely sensed burn severity data," *Geomorphology*, vol. 86, pp. 496–511, 2007.
- [12] C. H. Key, N. C. Benson, "Landscape assessment," in *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System*, D. C. Lutes *et al.*, Eds. FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system, Fort Collins, CO, USA: USDA For. Serv. Rocky Mt. Res. St., Gen. Tech. Report RMRS-GTR-164-CD, 2006.
- [13] N. O. Soverel, D. D. B. Perrakis, and C. Coops, "Estimating burn severity from Landsat dNBR and RdNBR indices across Western Canada," *Remote Sens. Environ.*, vol. 14, pp. 1896–1909, 2010.

- [14] L. B. Lentile, Z. A. Holden, A.M. S. Smith, M. J. Falkowski, A. T. Hudak, and P. Morgan, "Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects," *Int. J. Wildland Fire*, vol. 15, pp. 319–345, 2006.
- [15] R. J. Hall, J. T. Freeburn, W. J. de Groot, J. M. Pritchard, T. J. Lynham, and R. Landry, "Remote sensing of burn severity: Experience from Western Canada boreal fires," *Int. J. Wildland Fire*, vol. 17, pp. 476–489, 2008.
- [16] J. Epting, D. Verbyla, and B. Sorbel, "Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+," *Remote Sens. Environ.*, vol. 96, pp. 328–339, 2005.
- [17] A. De Santis and E. Chuvieco, "GeoCBI: A modified version of the composite burn index for the initial assessment of the short-term burn severity from remotely sensed data," *Remote Sens. Environ.*, vol. 113, no. 3, pp. 554–562, 2009.
- [18] C. H. Key and N. Benson, "Landscape assessment: Ground measure of severity, the composite burn index; and remote sensing of severity, the normalized burn ratio," D. C. Lutes, R. E. Keane, J. F. Caratti, C. H. Key, N. C. Benson and L. J. Gangi (Eds.), FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System USDA Forest Service. (CD:LA1–LA51), Rocky Mt. Res. Station Gen, Ogden, UT, USA. Tech. Rep. RMRS-GTR-164, 2005.
- [19] D. P. Roy, L. Boschetti, and S. N. Trigg, "Remote sensing of fire severity: Assessing the performance of the normalized burn ratio," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 3, no. 1, pp. 112–116, Jan. 2006.
- [20] S. Escuin, R. Navarro, and P. Fernandez, "Fire severity assessment by using NBR (normalized burn ratio) and NDVI (normalized difference vegetation index) derived from LANDSAT TM/ETM images," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 29, no. 4, pp. 1053–1073, 2008.
- [21] M. J. Canty, A. A. Nilsen, and M. Schmidt, "Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively re-weighted MAD transformation," *Remote Sens. Environ.*, vol. 112, pp. 1025–1036, 2008.
- [22] M. J. Canty and A. A. Nilsen, "Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery," *Remote Sens. Environ.*, vol. 91, pp. 441–451, 2004.
- [23] L. S. Bernstein, X. Jin, B. Gregor, and S. M. Adler-Golden, "The quick atmospheric correction (QUAC) code: Algorithm description and recent upgrades," *SPIE Opt. Eng.*, vol. 51, no. 11, pp. 111719-1–111719-11, 2012.
- [24] L. Fang and J. Yang, "Atmospheric effects on the performance and threshold extrapolation of multi-temporal Landsat derived dNBR for burn severity assessment," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 34, no. 5, pp. 1254–1265, Dec. 1996.