

**Dati satellitari e rappresentazioni cartografiche
per l'analisi dei territori soggetti a incendi.
Il caso di San Vito Lo Capo.**

TERESA AMODIO* - ANTONELLA AMBROSINO**

Abstract

The research starts from the interest in the use of satellite data in geographic research, with the aim of testing the potential expressed by remote sensing in the acquisition of information on the earth's surface, with resolutions and timing that other information sources do not allow.

In the case proposed, the data acquisition and interpretation methodology were applied to a subject of interest for territorial analysis, i.e. the study of natural disasters and of territories subject to fire.

The area selected for the study is that of the municipality of San Vito Lo Capo, a protected area with a mature tourist vocation and recently affected by a devastating fire.

The cartographies produced and the interpretative results derived from them represent a possible reference tool for evaluations oriented towards possible forest reconstitution in areas affected by fire.

Keywords: Satellite data, fire risk, San Vito Lo Capo

1. Introduzione

La ricerca ha avuto l'obiettivo di sperimentare l'utilizzo dei dati satellitari nella ricerca geografica e di applicare le tecniche cartografiche rea-

* Teresa Amodio - Dipartimento di Scienze del Patrimonio culturale, Università degli Studi di Salerno, tamodio@unisa.it.

** Antonella Ambrosino - Dipartimento di Ingegneria civile, Università degli Studi di Salerno, aambrosino@unisa.it.

lizzabili con la finalità di ottenere un supporto all'analisi territoriale rivolta alle calamità naturali e, in particolare, ai territori soggetti ad incendi.

Il tema del monitoraggio satellitare per l'analisi e la tutela del territorio comincia ad essere maggiormente diffuso anche nella letteratura geografica (Favretto, 2017), soprattutto in relazione alle potenzialità espresse dal *remote sensing*¹, e, quindi, alla possibilità di acquisizione di informazioni sulla superficie terrestre con risoluzioni e tempistiche che altre fonti informative non consentono in maniera così specifica (Borruso, 2017; Mauro *et al.*, 2023).

Le tecniche di utilizzo di dati satellitari si fondano sulla possibilità di interpretare bande cromatiche, rappresentative di diverse lunghezze d'onda delle radiazioni elettromagnetiche che attraversano l'atmosfera. Ciò è determinato, principalmente, dalla diffusione atmosferica e dall'assorbimento da parte dei maggiori intrappolatori di radiazione solare come il vapore acqueo, il biossido di carbonio e l'ozono. Di conseguenza l'umidità, l'altimetria, l'urbanizzazione e i fattori antropici in genere diventano variabili in grado di influenzare l'assorbimento atmosferico ed i relativi effetti sull'immagine telerilevata. Questo accade in quanto le radiazioni possono interagire con molecole atmosferiche di grandezza molto inferiore rispetto alla lunghezza d'onda della luce solare incidente (Lillesand *et al.*, 2014).

Il risultato è la diminuzione del contrasto spettrale dell'immagine telerilevata (Chirici *et al.*, 2005). Quando le radiazioni incontrano particelle aventi diametro uguale o maggiore alla propria lunghezza d'onda, l'immagine risulta disturbata, in particolare nelle bande registrate nel campo dell'infrarosso. In sintesi, il colore di un oggetto nell'immagine satellitare è condizione fondamentale per la distinzione dei diversi elementi che la compongono (Noti, 2014; Shafizadeh-Moghadam, 2021).

L'analisi di immagini satellitari consente un sistematico ed efficiente processo di controllo nel tempo delle risorse naturali, ambientali e del ter-

1. Il rilevamento dallo spazio rimanda direttamente a quell'insieme di tecniche e metodologie per l'acquisizione di informazioni derivanti dalla superficie terrestre da una posizione – e da una postazione – remota: il contatto diretto con il territorio oggetto di analisi è dunque assente.

ritorio, tali per cui si è deciso di applicarla ad un caso studio relativo ad un territorio soggetto, di recente, ad incendi (Lazzeroni *et al.*, 2019).

A ciò si aggiunge il vantaggio di poter di trattare queste tipologie di dati in ambiente GIS e di aumentarne la rilevanza per la ricerca geografica (Favretto, 2006; Dainelli, 2011).

Il tema della tutela del territorio, ma anche quello dell'analisi dei danni e delle implicazioni derivanti da criticità ambientali, è, difatti, l'altro aspetto di interesse della ricerca. In particolare, il fuoco, soprattutto nella regione mediterranea, rappresenta un fattore determinante nel plasmare la vegetazione (Camia *et al.*, 2005). A fronte di orientamenti che tendono a migliorare e a tutelare la presenza di aree forestali e boschive, sia sul piano tecnico sia su quello giuridico, il problema degli incendi boschivi ha raggiunto livelli elevati di gravità malgrado l'aumento costante degli investimenti volti a prevenire e a combattere il fenomeno (Del Negro, 2010). In questo scenario, quello che ancora non è stato adeguatamente analizzato, avvalendosi anche dei moderni mezzi tecnologici a disposizione, è l'evidenziazione della risposta dell'ambiente forestale al fuoco, sia in relazione agli effetti in termini di superfici depauperata sia per gli effetti, più generali, sull'ambiente (Bovio *et al.*, 2002). L'approccio risulta utile anche nell'ottica di valutazioni orientate alla possibile ricostituzione boschiva nelle aree percorse dal fuoco (Perulli, 2012).

2. *Dati e metodologia adottata*

La ricerca è stata realizzata a partire dall'acquisizione di un set variegato di dati (Lillesand, Kiefer, 1999), messi a sistema in ambiente GIS (Chrisman, 1997).

La principale fonte di dati è costituita da *immagini satellitari* acquisite dalla piattaforma Sentinel-2A all'interno del programma europeo Copernicus sviluppato dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA)².

2. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>.

Tab. 1 - Struttura dati utilizzati

Tipologia di dati	Informazioni acquisite
Dataset satellitare	Bande spettrali utilizzate per la capacità di registrare le diverse modalità di riflettere l'energia elettromagnetica da parte degli oggetti presenti sulla superficie terrestre
Dati amministrativi e demografici	Popolazione residente al 2022
Carta della Natura	Zone classificate Direttiva Habitat
Cartografie delle aree protette dalla Rete Natura 2000	Perimetrazione SIC e ZPS

La missione spaziale è costituita da due satelliti (2A e 2B) che acquisiscono in orbita eliosincrona, mediante sensori ottici di tipo passivo. Le 13 bande spettrali delle immagini satellitari sono comprese tra le lunghezze d'onda del visibile e dell'infrarosso, con una risoluzione spaziale che varia dai 10 ai 60 metri. Il dataset utilizzato è costituito dalla coppia di immagini satellitari relative al 16.7.2023 e al 29.7.2023, acquisite dalla piattaforma Sentinel-2A.

Il download è stato effettuato utilizzando la piattaforma Open Access Hub³, dalla quale sono stati scelti prodotti di livello 2A in cui i tiles sono ortoimmagini di 110x110 km² nel sistema di riferimento cartografico UTM/WGS84 con uno step di 100 km, già corretti per la diffusione delle molecole di acqua, per gli effetti di assorbimento e diffusione dei gas atmosferici e degli aerosol (Mousivand *et al.*, 2015).

In tabella 1 sono descritte le caratteristiche delle bande Sentinel-2 utilizzate in questo lavoro, per ciascuna di esse sono riportate le risoluzioni spaziali e spettrali, queste ultime espresse in termini di valori di lunghezza d'onda centrale definita rispetto al range di riferimento di ogni banda⁴.

3. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>.

4. <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/bands/>.

Tab. 2 - Caratteristiche delle bande della missione Sentinel-2A utilizzate nel presente lavoro

Banda Sentinel	Banda Spettrale	$\lambda_{\text{centrale}}$ (μm)	Risoluzione Spaziale (m)
3	Green	0.560	10
4	Red	0.665	10
8	NIR	0.842	10
8a	Red Edge	0.865	20
11	SWIR	1.610	20
12	SWIR	2.190	20

Fonte: elaborazione a cura degli Autori

Per lo svolgimento della ricerca sono stati utilizzati anche i *limiti amministrativi a livello comunale* prodotti dall'ISTAT⁵. Il livello informativo contiene informazioni relative a macro-divisione geografica, codici identificativi regionali, provinciali e comunali, denominazione Comune, Provincia e Capoluogo di provincia.

Tra gli indicatori demografici è stato utilizzato quello relativo alla popolazione residente aggiornato al 1.1.2023⁶. Le stime sono prodotte a partire dall'analisi del bilancio provvisorio della popolazione residente al 31.12.2022 raccolto tramite le rilevazioni demografiche dell'Istat, attraverso un modello di micro-simulazione a totali vincolati, basato sul principio del cohort-component-model⁷.

Successivamente è stata considerata la *Carta della Natura* redatta dall'ISPRA in scala 1:50 000 nel sistema di riferimento cartografico UTM/

5. È stato utilizzato il dataset dell'ISTAT nel sistema di riferimento geografico WGS84 (fuso 32N), aggiornato all'1.1.2023 in formato vettoriale. <https://www.istat.it/it/archivio/222527>.

6. <http://dati.istat.it/Index.aspx?QueryId=18566#>.

7. In questo lavoro non è stata considerata la successiva scomposizione del set di informazioni aggregate nelle variabili di interesse, relative a: sesso, età, cittadinanza, territorio, origine/destinazione.

WGS84 (Fuso 33N), utilizzata in formato vettoriale, aggiornata al 2013 e scaricabile previa richiesta⁸.

Lo strato informativo riporta informazioni sulle unità ambientali omogenee suddivise secondo la “Direttiva habitat” dell’Unione Europea, che le definisce come “zone terrestri o acquatiche che si distinguono grazie alle loro caratteristiche geografiche, abiotiche e biotiche, interamente naturali o semi-naturali”, il cui riconoscimento è stato effettuato dall’analisi della copertura del suolo per l’individuazione degli elementi vegetazionali ed antropici, e delle caratteristiche lito-geomorfologiche. La legenda degli habitat adottata deriva da una selezione di codici del sistema di classificazione Corine Biotopes e comprende anche i seguenti indicatori: Valore Ecologico, Sensibilità Ecologica, Pressione Antropica e Fragilità Ambientale.

Inoltre, sono state prese in considerazione alcune *cartografie delle aree protette dalla Rete Natura 2000* redatte dal MASE nel sistema di riferimento cartografico UTM/WGS84 (Fuso 32N) in formato vettoriale e relativi formulari⁹. Questa rete ecologica è stata creata dall’Unione Europea per la protezione e la conservazione degli habitat e delle specie, animali e vegetali, identificati come prioritari dagli Stati membri. Ad oggi sono stati designati 2639 siti italiani, in particolare, sono stati individuati 2360 Siti di Importanza Comunitaria (SIC) per la tutela di flora e fauna, 2302 dei quali essendosi dotati di misure di conservazione sono stati designati a Zone Speciali di Conservazione (ZSC), e 639 Zone di Protezione Speciale (ZPS) per la tutela degli uccelli, 360 delle quali sono siti di tipo C, ovvero ZPS coincidenti con SIC/ZSC.

Per quanto riguarda il trattamento e la gestione di dati sopra indicati,

8. La richiesta avviene mediante la compilazione di un modulo. Solitamente i dati sono inviati entro qualche giorno, in formato shapefile e possono essere pienamente utilizzati con una licenza di attribuzione (CC BY 4.0 IT) purché si seguano le specifiche menzioni fornite, di seguito si riportano quelle relative ai dati utilizzati in questo lavoro. “Carte di Valore Ecologico, Sensibilità ecologica, Pressione Antropica e Fragilità Ambientale: Capogrossi R., Angelini P., Bianco P.M., 2013. Carta della Natura della Regione Sicilia: Carte di Valore Ecologico, Sensibilità Ecologica, Pressione Antropica e Fragilità Ambientale scala 1:50.000. ISPRA” <https://www.isprambiente.gov.it/it/servizi/sistema-carta-della-natura>.

9. <https://www.mase.gov.it/pagina/schede-e-cartografie>.

sono stati utilizzati i software Sentinel Application Platform (SNAP) versione 9.0.0¹⁰ e QGIS versione 3.22.6¹¹.

Il software SNAP è fornito gratuitamente da ESA/ESRIN ed è stato sviluppato per l'elaborazione e l'analisi dei dati delle missioni Sentinel del programma Copernicus e di alcuni altri sensori.

QGIS, software opensource, ha reso possibile analizzare ed editare dati spaziali sia raster che vettoriali, generare cartografia ed inoltre supporta diversi database spaziali come PostgreSQL/PostGIS o Spatialite.

In SNAP sono state create due immagini composite RGB¹² personalizzate a partire dal dataset satellitare, in modo da evidenziare le aree bruciate.

Nei canali del rosso e del verde sono state caricate rispettivamente le bande 12 e 11 le cui lunghezze d'onda sono comprese nella regione spettrale dell'infrarosso a onde corte (SWIR). Esse ben evidenziano sia il contenuto di acqua presente nella vegetazione e nel suolo in quanto l'acqua riflette tali lunghezze d'onda, sia i terreni recentemente bruciati. Mentre nel canale del blu è stata caricata la banda 8A la quale mette ben in risalto la vegetazione poiché essa riflette alle lunghezze d'onda dell'infrarosso a onde corte (NIR) e del verde. In particolare, questa banda presenta un range più ristretto rispetto alle altre, perché è stata progettata per mettere in evidenza le repentine variazioni dello stato di salute della vegetazione.

Successivamente, per minimizzare il contributo della copertura nuvolosa che rappresenta uno dei limiti dei sensori passivi, si è ritenuto op-

10. <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>.

11. QGIS permette di lavorare con i dati spaziali attraverso funzionalità di base come ad esempio: la visualizzazione, l'editing, la composizione di mappe, l'analisi dati, il campionamento, il geoprocessing, la creazione di geodatabase. Queste funzionalità possono essere estese grazie alle librerie di plugin oppure a nuove applicazioni progettate in C++ o nella console Python integrata. Inoltre, è possibile utilizzare gli strumenti integrati dei moduli GRASS o lavorare con il plugin "processing" per richiamare algoritmi sia nativi che di terze parti come GDAL, SAGA, R. QGIS può essere utilizzato come client WMS, WMTS, WMS-C o WFS e WFS-T e a sua volta il server QGIS, mediante l'utilizzo di un webservice, permette di pubblicare online i dati ottenuti attraverso i protocolli WMS, WCS e WFS. <https://www.qgis.org/it/site/forusers/download.html>.

12. La sigla RGB sta per Red, Green, Blue (rosso, verde, blu) e indica un modello di colore che usa il colore nero come base in quanto non contiene alcuna luce, ma è il punto di partenza a cui poi si aggiunge la luce in varie combinazioni di colore.

portuno creare una maschera utilizzando l'editor delle espressioni chiamato "Band Maths" il quale si basa su sintassi C.

I prodotti Sentinel-2 di livello 2A contengono informazioni su nuvole e cirri ottenute come prodotto della correzione atmosferica; pertanto, è stata creata una maschera contenente entrambi gli stati informati per ogni immagine del dataset satellitare.

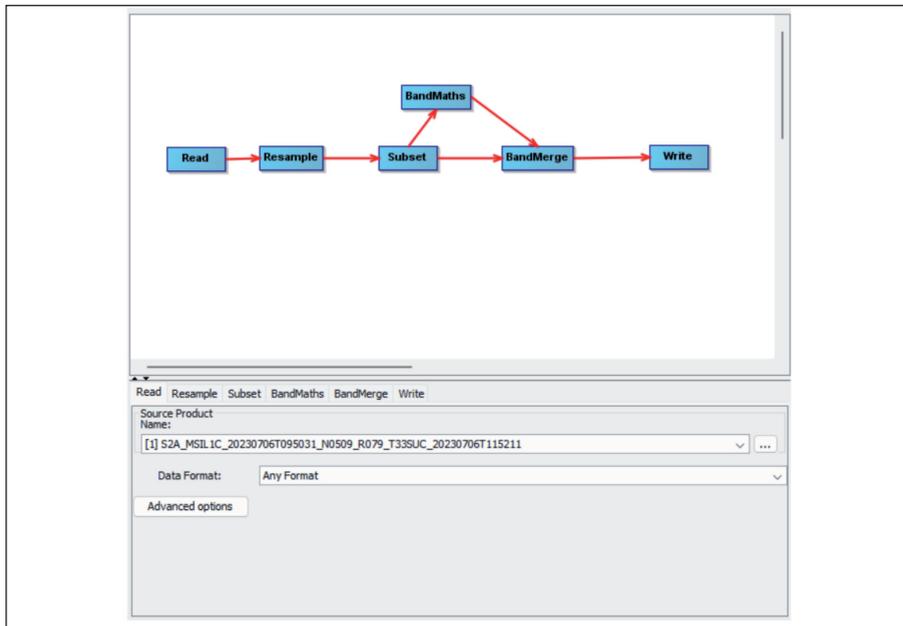
Sono state di seguito effettuate una serie di operazioni di pre-processamento del dataset eseguite contemporaneamente grazie alla funzione di elaborazione multiprodotto denominata "Batch Processing" la quale supporta il caricamento di grafici. Per questi ultimi è stato utilizzato il tool denominato "Graph Builder" in grado di assemblare grafici da un elenco di operazioni disponibili e collegare i nodi degli operatori, il grafico editato in questo lavoro è costituito dalle funzioni necessarie ad eseguire le seguenti operazioni: ricampionamento, ritaglio, editor delle funzioni e unione di bande (fig. 1).

La prima operazione di ricampionamento delle bande è stata necessaria in quanto il set utilizzato aveva una diversa dimensione spaziale. Questa funzione permette di scegliere una banda in base alla quale saranno ricampionate tutte le altre, in questo caso è stata scelta la banda 2 con una risoluzione spaziale di 20 m. Per quanto riguarda l'elaborazione del segnale digitale, per l'upsampling è stato utilizzato il metodo di interpolazione di tipo bilineare, il quale determina il nuovo valore di una cella in base a una distanza media pesata dei quattro centri delle celle di input più vicine. Mentre per il downsampling e il rispettivo flag sono stati utilizzati i parametri di default previsti dal software, i quali prevedono un sotto campionamento basato sull'aggregazione.

La seconda operazione di ritaglio ha permesso di creare un sottoinsieme spaziale e spettrale del dataset satellitare¹³, al fine di ritagliare solo l'area di interesse e velocizzare i tempi di elaborazione.

13. È stato utilizzato un poligono con le seguenti coordinate geografiche: 12.64 38.20, 12.84 38.21, 12.90 38.01, 12.65 37.99, 12.64 38.20.

Fig. 1 - Struttura del grafico utilizzato, con dettaglio delle operazioni



Fonte: elaborazione a cura degli Autori

La terza operazione ha permesso di calcolare, mediante la funzione “Band Maths”, i due indici spettrali: l’indice di vegetazione differenziale normalizzato (NDVI) e il rapporto di combustione normalizzato (NBR). In tabella 2 sono riportate le formule utilizzate per il calcolo.

L’NDVI è utilizzato per monitorare la biomassa e il contenuto d’acqua in quanto è sensibile alle variazioni del contenuto di clorofilla e degli spazi intracellulari nel mesofillo spugnoso delle foglie. Consente di valutare indirettamente lo stato di salute della vegetazione stimando la radiazione fotosinteticamente attiva assorbita, ma viene anche utilizzato per stimare altre caratteristiche come l’indice di area fogliare, la biomassa vegetale e la presenza di acqua.

I valori possono variare tra -1 e 1 : valori positivi indicano maggiore vigoria e attività fotosintetica, valori prossimi allo zero rappresentano aree antropizzate o con suolo nudo, mentre valori negativi indicano stress ve-

getativo con conseguente riduzione del contenuto di clorofilla e cambiamenti nella struttura interna delle foglie dovuti all'appassimento. Per il calcolo dell'indice si utilizzano le bande spettrali del rosso (RED) e del vicino infrarosso (NIR), che corrispondono rispettivamente alla regione spettrale in cui sono presenti i picchi di assorbimento dei pigmenti fogliari, in particolare della clorofilla, ma anche dei carotenoidi, delle xantofille e delle antocianine (RED), e alla regione spettrale in cui è presente una maggiore riflettanza della foglia (NIR) (Huang *et al.*, 2021).

L'NBR è un indice che permette di evidenziare le aree bruciate in zone interessate da incendi di grandi dimensioni. La vegetazione sana mostra una riflettanza molto elevata nel NIR e bassa nello SWIR, viceversa si osserva in aree in cui è occorso un incendio. Per tali motivi, dato che le maggiori differenze tra la vegetazione sana e quella bruciata si osservano in queste due porzioni dello spettro, la formula per calcolare l'NBR è simile all'NDVI, tranne per il fatto che combina l'uso delle lunghezze d'onda del NIR stavolta non con la regione spettrale del rosso ma con quella dello SWIR. Anche in questo caso i valori dell'indice possono variare tra -1 e 1: valori positivi indicano aree con buona copertura vegetale, valori prossimi allo zero rappresentano aree non interessate da incendio, mentre valori negativi indicano aree bruciate (Delcourt *et al.*, 2021).

L'ultima delle operazioni di pre-elaborazione del dataset satellitare è stata la fusione delle bande ottenute dai prodotti precedenti, mediante la funzione denominata "bandmerge", la quale considera un prodotto a cui si fa riferimento chiamato "master" (in questo lavoro è stato considerato l'NBR), rispetto al quale sono fusi tutti gli altri chiamati "slave".

Il dataset satellitare pre-elaborato è stato successivamente sovrapposto spazialmente mediante la funzione denominata "collocation", la quale implica che i valori dei pixel dei prodotti slave vengano ricampionati nel raster geografico del prodotto master. L'output finale è un nuovo prodotto che contiene una copia di tutti i componenti del prodotto master, ossia i dati delle bande, le griglie dei tie-point, le codifiche dei flag, le definizioni delle bitmask e i metadati, mentre i componenti dei prodotti slave sono

stati trasferiti mediante il metodo di ricampionamento del vicino più prossimo in cui il valore di ciascuna cella in un raster di output viene calcolato utilizzando il valore della cella più vicina in un raster di input. Questo processo viene ripetuto per ogni cella nel raster di output.

In seguito, si è ritenuto opportuno creare in Band Maths una maschera per minimizzare il contributo della copertura nuvolosa e dell'acqua, dato che le aree bruciate mostrano valori di riflessione simili a quelli delle superfici dell'acqua. In particolare, per rilevare i corpi idrici è stato utilizzato l'indice idrico differenziale normalizzato (NDWI) proposto da McFeeters (formula in tabella 2) e basato sul rapporto della differenza e della somma delle bande della regione spettrale del Green e NIR, che corrispondono alle bande 3 e 8 di Sentinel-2.

Successivamente per identificare le aree bruciate e differenziarle dal suolo nudo e da altre aree prive di vegetazione è stato calcolato il rapporto di combustione normalizzato (dNBR) (formula in tabella 2), ottenuto dalla differenza dell'NBR pre e post incendio. Il dNBR consente di stimare la gravità dell'incendio: valori positivi corrispondono a gravi danni mentre valori negativi indicano aree di recupero e ricrescita post-incendio.

Tuttavia, il dNBR rappresenta una differenza assoluta che può presentare problemi in aree con bassa copertura vegetale pre-incendio, in cui la variazione assoluta tra NBR pre- e post-incendio è minima. Pertanto, è stato calcolato il rapporto di combustione relativizzato (RBR) ottenuto dividendo il dNBR per un aggiustamento all'NBR pre-incendio, così da evitare di rendere il denominatore nullo. In questo modo i pixel bruciati appaiono molto più luminosi in quanto la variazione tra i valori pre e post incendio è molto più elevata. Infine, è stata creata un'altra maschera contenente solo aree bruciate, impostando una soglia derivata da letteratura per classificare come "bruciati" solo un determinato range di pixel (Quintano *et al.*, 2018). Lo strato informativo è stato esportato in SNAP in formato .tiff ed importato in ambiente GIS. Per poter classificare il raster secondo gli standard dello United States Geological Survey (USGS)¹⁴ al fine

14. <https://www.usgs.gov/>.

di interpretare la gravità dell'incendio e di individuare i diversi livelli di severità all'interno dell'area bruciata, è stata utilizzata la funzione "riclassifica con tabella" contenuta in "analisi raster" nel menù degli strumenti di processing. Questa funzione riclassifica una banda raster assegnando nuovi valori di classe basati sugli intervalli definiti dall'operatore all'interno di una tabella. In questo lavoro poiché è stata considerata come banda di classificazione solo quella contenente i pixel bruciati, è stata creata una tabella con gli ultimi quattro intervalli di valori dello standard USGS¹⁵ cioè, è stato considerato il range da bassa severità ad alta severità. Per calcolare le aree delle classi ottenute è stata utilizzata la funzione denominata "rapporto sui valori univoci di un raster" anch'essa contenuta nel menù precedente, utilizzando come layer in ingresso quello riclassificato nello step precedente. Infine, il raster dell'area bruciata è stato utilizzato come maschera di ritaglio per il layer della Carta della Natura, al fine di visualizzare la tipologia delle coperture vegetali danneggiate.

Tab. 3 - Dettaglio delle formule utilizzate per il calcolo degli indici spettrali

Indice spettrale	Formula
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Kriegler, 1969)	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$
Normalized Burn Ratio (NBR) (Miller <i>et al.</i> , 2007)	$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$
Normalized Difference Water Index (NDWI) (McFeeters <i>et al.</i> , 1996)	$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$
Delta Normalized Burn Ratio (dNBR) (Miller <i>et al.</i> , 2007)	$dNBR = NBR_{pre} - NBR_{post}$
Relativized Burn Ratio (RBR) (Parks <i>et al.</i> , 2014)	$NDVI = \frac{dNBR}{NBR_{pre} + 1.001}$

Fonte: elaborazione a cura degli Autori

15. <https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/in-detail/normalized-burn-ratio>.

3. *Il territorio oggetto di studio*

Nel presente lavoro è stata analizzata la severità dell'incendio occorso il 25 luglio 2023 che si è diramato durante la notte in diverse contrade del Comune di San Vito Lo Capo, tra cui Cala 'mpiso. Qui il fuoco si è esteso velocemente fino alla scogliera, favorito dal forte vento di scirocco con raffiche di 25/30 nodi ed ha coinvolto diversi complessi turistici e residenziali le cui operazioni di evacuazione per la messa in sicurezza di circa 400 persone sono state ostacolate dal mare mosso con onde alte fino ad un metro e mezzo, come riportato da diverse testate¹⁶ e video online¹⁷. L'incendio nel complesso non ha registrato vittime, sebbene si stimino ingenti danni alla vegetazione e alle abitazioni, oltre agli impatti sul turismo di cui tener conto soprattutto in territori come San Vito Lo Capo, prevalentemente vocati a questo settore. Tra i fattori di attrazione di questa destinazione turistica, oltre alle acque cristalline e alle bellissime spiagge, si annovera il notevole interesse floro-faunistico e fitocenotico del patrimonio vegetale. Infatti, il territorio oggetto di studio ricade nell'area protetta denominata "Capo San Vito, Monte Monaco, Zingaro, Faraglioni Scopello, Monte Sparacio", facente parte della rete ecologica europea Natura2000, con il codice identificativo: "ITA010017" (fig. 2).

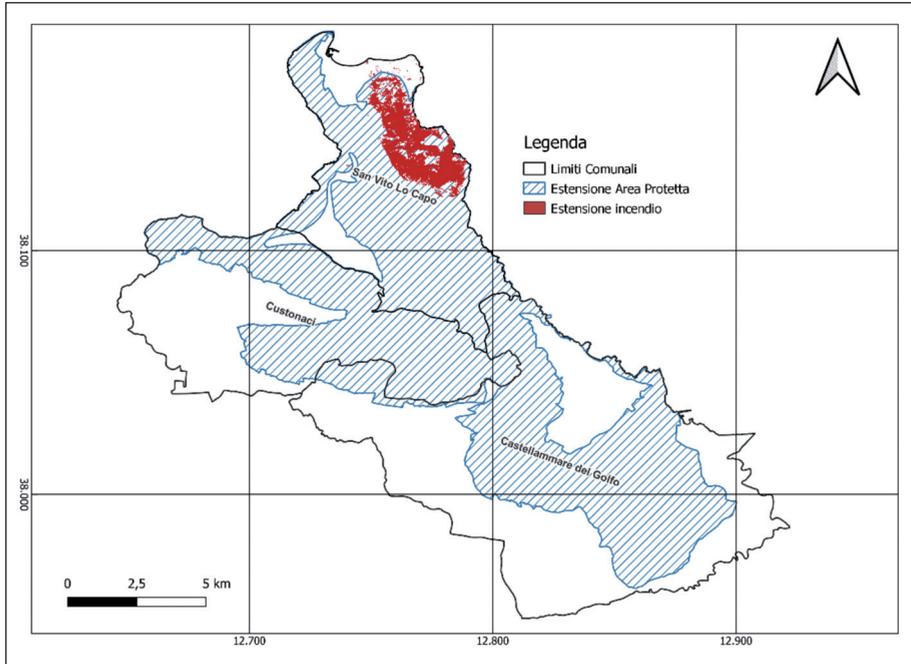
L'area è stata proposta come sito di interesse comunitario (SIC) nel settembre 1995 ed è stata designata zona speciale di conservazione (ZSC) a dicembre 2015 con DM 21.12.2015 - G.U. 8 del 12.1.2016. Il sito ha un'estensione di 7260 ettari, ricade nei Comuni di San Vito Lo Capo, Castellammare del Golfo e Custonaci lungo la fascia costiera settentrionale trapanese ed è in parte già compresa all'interno della Riserva Naturale Orientata dello Zingaro la quale è la prima area naturale protetta dell'Isola, istituita circa 40 anni fa.

I rilievi presenti perlopiù di natura carbonatica sono caratterizzati da una morfologia aspra; infatti, si osservano irte falesie talora orlate di note-

16. <https://www.telesudweb.it/25-07-2023/incendio-a-san-vito-lo-capo-la-guardia-costiera-salva-28-persone-dal-fuoco>.

17. <https://www.youtube.com/watch?v=wqCFGMvb2FU>.

Fig. 2 - Inquadramento territoriale: in nero si riportano i limiti amministrativi dei Comuni siciliani in cui ricade l'area protetta; in blu si riporta l'estensione dell'area protetta; in rosso si riporta l'estensione dell'area bruciata



Fonte: elaborazione a cura degli Autori

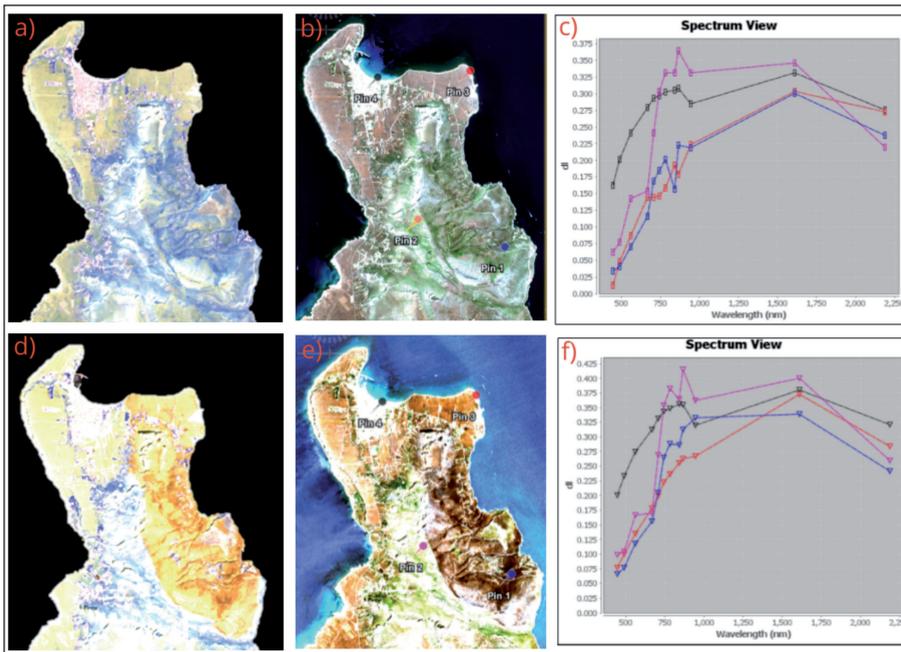
voli guglie aguzze. Per quanto riguarda il paesaggio vegetale, sebbene esso si presenti alquanto brullo e denudato poiché la vegetazione risente dei frequenti incendi occorsi nei vari decenni, sono presenti specie di notevole interesse. In particolare, la vegetazione è caratterizzata dalla dominanza delle due specie: la Palma nana (*Chamaerops humilis*) e il Saracchio (*Ampelodesmos mauritanicus*) presenti soprattutto lungo i versanti sub-costieri; altre specie sono ad esempio il Leccio (*Quercus Ilex*) in combinazione con l'Alaterno (*Rhamno-Quercus ilicis sigmetum pistacietoso terebinti*) lungo i versanti detritici, mentre nelle aree più interne si trova insieme al Lentisco (*Pistacio-Quercus virgilianae sigmetum*); sui suoli più profondi ed evoluti dell'entroterra è frequente la Roverella (*Oleo-Quercus virgilianae sigmetum*) e lungo le creste rocciose più aride è presente l'Olivastro (*Oleo-Euphorbio*

dendroidis sigmetum). Inoltre, la penisola di S. Vito è un punto di riferimento costiero nella rotta di migrazione autunnale e primaverile di numerose specie di uccelli ed ospita anche rare specie di falconiformi.

4. Risultati applicati al caso studio

I risultati ottenuti mostrano le potenzialità del telerilevamento nell'osservazione di fenomeni come gli incendi. Già a partire dal confronto dei dati grezzi pre e post incendio (fig. 3) si evincono le aree bruciate, sia dalle visualizzazioni a colori naturali che dalle composite personalizzate.

Fig. 3 - a) Immagine composita personalizzata del 16.7.23; b) immagine a colori naturali del 16.6.2023 con pins; c) grafico delle firme spettrali dei 4 pins dell'immagine b); d) Immagine composita personalizzata del 29.7.23; e) immagine a colori naturali del 29.6.2023 con pins; f) grafico delle firme spettrali dei 4 pins dell'immagine e)



Fonte: elaborazione a cura degli Autori

Quanto detto è confermato dai grafici delle firme spettrali dei pins creati. Nonostante essi riportino sull'asse delle ordinate i valori grezzi di riflettanza riferiti al top dell'atmosfera (TOA), cioè non ancora calibrati per minimizzare il contributo atmosferico, è già possibile osservare la variazione dei valori di uno stesso pin tra le scene pre e post incendio. I quattro pins sono stati posizionati a due a due sia all'interno che all'esterno dell'area bruciata, in particolare si osserva che:

- il pin 1 (in blu) corrisponde ad un'area fortemente interessata dall'incendio, infatti, dal confronto dei due grafici emerge una forte variazione dei picchi di riflettività;

- il pin 2 (in rosa) corrisponde ad un'area con vegetazione non interessata da incendio; infatti, dal confronto dei due grafici si osservano variazioni minime dovute probabilmente alle condizioni meteorologiche e ai valori di temperatura;

- il pin 3 (in rosso) corrisponde ad un'area debolmente interessata dall'incendio, infatti, dal confronto dei due grafici si osservano variazioni nella firma spettrale, ma in misura inferiore rispetto al pin 1;

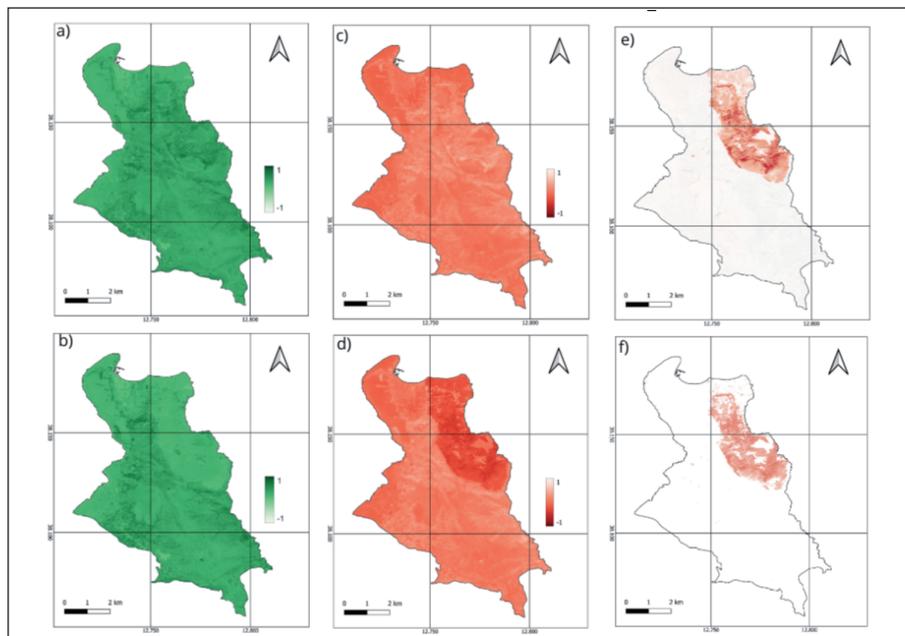
- il pin 4 (in nero) corrisponde ad un'area edificata non interessata da incendio; infatti, dal confronto dei due grafici emergono variazioni minime.

I risultati ottenuti dal calcolo degli indici spettrali mostrano risultati confrontabili (fig. 4), in particolare:

- l'NDVI e l'NBR pre-incendio presentano valori positivi in corrispondenza di aree vegetate (in verde intenso per NDVI e in rosso per NBR) e valori prossimi allo zero in presenza di suolo nudo o aree edificate (in verde chiaro per NDVI e in rosso chiaro per NBR), mentre nella situazione post-incendio nell'area bruciata si osservano valori negativi (in verde chiaro per NDVI e in rosso intenso per NBR);

- un'identificazione grossolana dell'area incendiata è mostrata dalla mappa del dNBR, ottenuta dalla differenza dell'NBR pre e post-incendio; mentre un maggiore dettaglio si osserva dalla mappa dell'RBR in cui si minimizzano i contributi di nuvole e corpi idrici e sono selezionati solo i pixel "bruciati".

Fig. 4 - a) NDVI pre-incendio del 16.7.23; b) NDVI post-incendio del 29.7.23; c) NBR pre-incendio del 16.7.2023; e) nDBR ottenuto dalla differenza delle firme spettrali di c) e d); f) RBR ottenuto selezionando solo i pixel "bruciati".



Fonte: elaborazione a cura degli Autori

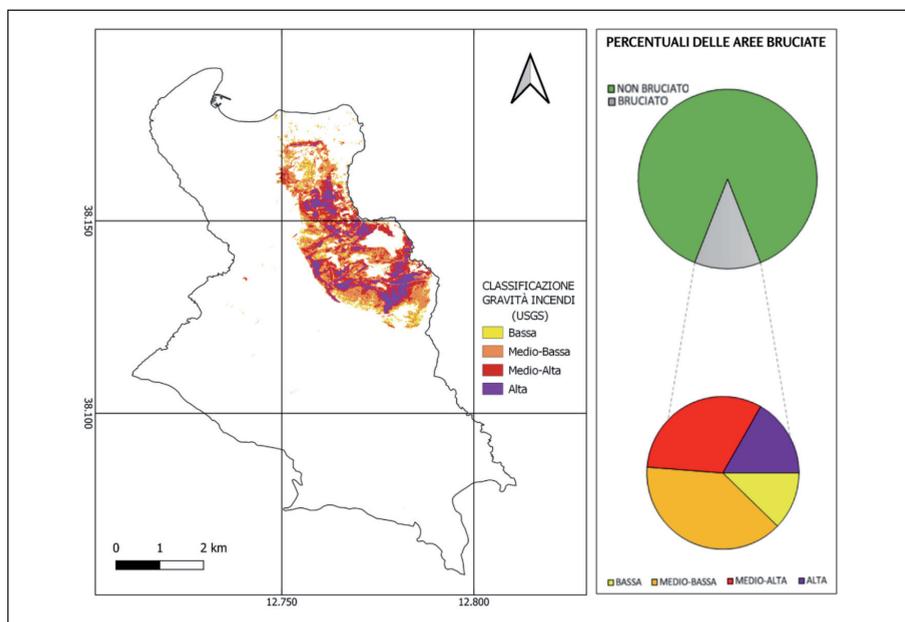
Il risultato finale è rappresentato nella figura 5 la quale mostra la classificazione dell'area bruciata secondo gli standard dell'USGS sia da un punto di vista qualitativo che quantitativo, espresso in termini percentuali. In dettaglio è possibile fare le seguenti considerazioni:

- l'area bruciata interessa una superficie di 7.2 km², che corrisponde a circa il 10% dell'estensione dell'area protetta e al 12% della superficie del Comune di San Vito Lo Capo;

- le zone in giallo sono state lievemente danneggiate dall'incendio, esse corrispondono a circa 0.9 km², cioè il 12.5% dell'area bruciata;

- le zone in arancione sono state mediamente danneggiate dall'incendio, esse corrispondono a circa 2.8 km², cioè il 38.9% dell'area bruciata;

Fig. 5 - A sinistra: mappa della gravità degli incendi basata sugli standard di classificazione USGS; a destra: percentuali delle aree bruciate



Fonte: elaborazione a cura degli Autori

- le zone in rosso sono state molto danneggiate dall'incendio, esse corrispondono a circa 2.3 km², cioè il 31.9% dell'area bruciata;
- le zone in giallo sono state severamente danneggiate dall'incendio, esse corrispondono a circa 1.2 km², cioè il 16.7% dell'area bruciata.

Da un confronto qualitativo con la Carta della Natura, nonostante essa non costituisca uno strato informativo reale dello stato dell'arte in quanto l'ultimo aggiornamento risale al 2013, si assume uno scenario verosimile considerando che l'area è soggetta a misure di conservazione speciale tutelate dal Piano di gestione Monti di Trapani decreto n. 347 del 24.6.2010, emerge che la vegetazione prevalente dell'area protetta è rappresentata da tre tipologie di habitat prevalenti. Esse sono:

- gli arbusteti termo-mediterranei e pre-desertici presenti per più di 4 000 ettari, costituiti da cenosi piuttosto discontinue la cui fisionomia è

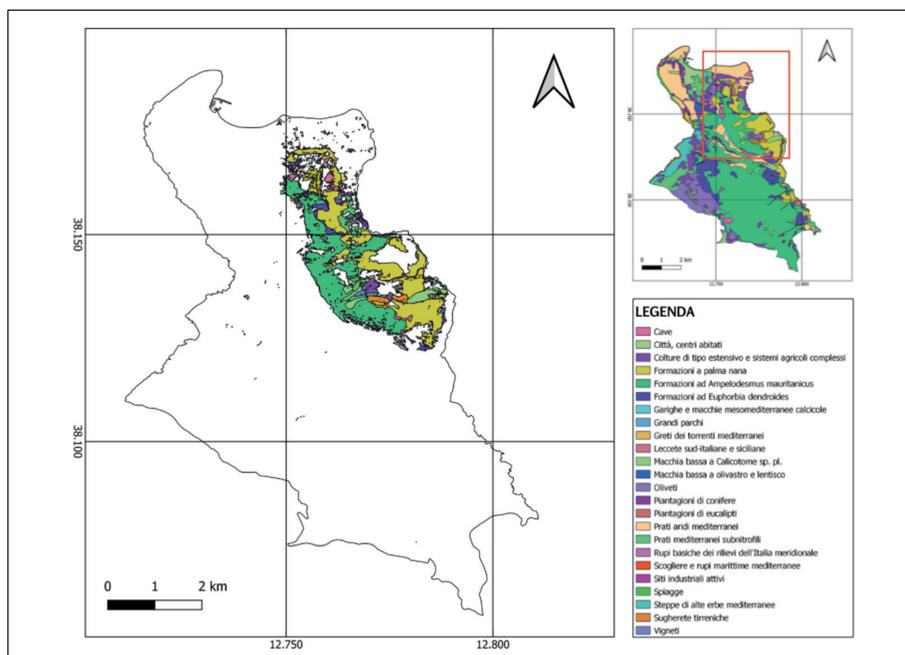
determinata sia da specie legnose come *Euphorbia dendroides* che erbacee perenni come *Ampelodesmos mauritanicus*;

– i percorsi sub-steppici di graminacee e piante annue dei Thero-Brachypodietea per circa 700 ettari, costituiti da praterie xerofile e discontinue di piccola taglia a dominanza di graminacee, su substrati di varia natura, spesso calcarei;

– le foreste di *Quercus ilex* e *Quercus rotundifolia* per oltre 300 ettari. In particolare, il leccio rappresenta la formazione arborea più caratteristica di tutta la fascia costiera mediterranea, infatti anticamente ricopriva di folte foreste le coste del Mediterraneo; tuttavia, nel corso del tempo questa longeva quercia sempreverde è andata via via scomparendo a causa dei processi di antropizzazione e di fenomeni come gli incendi. Ad oggi della vera lecceta sopravvivono solo rari esemplari, infatti quasi ovunque è stata sostituita dalla boscaglia sempreverde litoranea costituita da arbusti alti pochi metri come il mirto, il lentisco, il corbezzolo e l'alaterno. Per ulteriore sfruttamento dalla macchia si passa prima alla gariga costituita da vegetazione cespugliosa diradata e, poi alla steppa: tutti questi stadi di degradazione sono presenti nell'area oggetto di studio.

Il Comune di San Vito Lo Capo e in particolare l'area interessata dall'incendio (fig. 6) sono perlopiù caratterizzati da formazioni a Palma Nana e ad *Ampelodesmos Mauritanicus*. La Palma Nana è una specie rara, simbolo emblematico della Riserva Naturale dello Zingaro che si estende immediatamente più a sud dell'area studio. Essa è l'unica palma spontanea in Italia, è una pianta longeva dal portamento policormico che grazie al robusto apparato radicale permette di consolidare il terreno e sembra sia molto resistente agli incendi. Mentre le praterie steppiche di *Ampelodesmos Mauritanicus* rappresentano formazioni secondarie di sostituzione dei boschi del *Quercion ilicis*, cioè la foresta mediterranea sempreverde. La steppa, infatti, costituisce lo stadio più degradato della macchia mentre il leccio ne è la formazione climax; pertanto, la presenza di specie come *A. Mauritanicus* è un indicatore fondamentale per ricostruire le formazioni iniziali.

Fig. 6 - Mappa della Carta della Natura dell'area bruciata, con inquadramento territoriale riferito all'intero Comune di San Vito Lo Capo e legenda



Fonte: elaborazione a cura degli Autori

In conclusione, dalle analisi condotte nel presente lavoro è possibile affermare che l'incendio, occorso il 25 luglio 2023 nell'area nord-orientale del Comune di San Vito Lo Capo all'interno dell'area protetta "Capo San Vito, Monte Monaco, Zingaro, Faraglioni Scopello, Monte Sparacio", ha interessato un'area di circa 7.2 km² di cui più del 50% è ascrivibile come "incendio ad elevata gravità".

Quanto accaduto, oltre a rappresentare una minaccia sia per la popolazione in quanto è stato necessario mettere in salvo circa 400 persone, sia per il patrimonio naturale dato che è andata bruciata vegetazione ad elevato valore ecologico, andando a depauperare un'area riconosciuta a livello europeo come zona speciale di conservazione, ha determinato anche un danno per l'economia locale basata prevalentemente sul turismo.

Com'è noto l'archivio dei dati ISTAT¹⁸ classifica i Comuni italiani sia in base alla categoria turistica prevalente, individuata sulla base di criteri geografici e antropici, sia in base alla densità turistica. Questa è descritta da quattro indicatori statistici espressi in termini di quantili, definiti per misurare: la presenza di dotazioni infrastrutturali (indice D), i flussi turistici (indice P), l'incidenza delle attività economiche *tourism oriented* (indice T) e dall'indice S ottenuto dalla sintesi dei tre precedenti.

A tale proposito, il Comune di San Vito Lo Capo è un territorio a vocazione marittima (tipo C) e presenta una densità turistica molto elevata in quanto tutti i quattro indicatori ricadono nel 5° quintile. Il dato è confermato anche dai report del Libero Consorzio Comunale di Trapani¹⁹ secondo i quali nel 2021 (ultimo aggiornamento) la città di San Vito Lo Capo ha registrato circa 500.000 presenze tra esercizi alberghieri ed extra-alberghieri, classificandosi al primo posto come movimento turistico ricettivo tra tutte le città della provincia di Trapani, capoluogo compreso.

Questa ultima considerazione genera una riflessione, in prospettiva, connessa con le ricadute socioeconomiche degli incendi sul territorio analizzato, denotato da forte vocazione turistica. L'analisi di carattere ecologico-ambientale basata su immagini satellitari fornisce, infatti, elementi conoscitivi all'analisi geografica centrata sugli aspetti socio-economici, così da favorire un approccio sinergico e integrato tra diversi ambiti disciplinari e di ricerca. Più precisamente, il tema della tutela del patrimonio boschivo andrebbe utilmente collocato al centro di strategie di policy nella misura in cui il paesaggio e il patrimonio in esso incorporato sono considerabili a tutti gli effetti un bene territoriale, dal valore patrimoniale, da tutelare.

Il sistema economico locale, difatti, beneficia di valori paesaggistici e naturalistici che generano attrattività turistica e indotto di vario genere, a fronte del quale anche la risorsa boschiva contribuisce in maniera significativa.

18. <https://www.istat.it/it/archivio/247191>.

19. <http://www.provincia.trapani.it/provinciatp/zf/index.php/servizi-aggiuntivi/index/index/idtesto/190>.

Su tali basi, la multifunzionalità delle aree boschive richiede una attenta conoscenza degli impatti a livello geografico al fine di definire strategie che assicurino la ripresa dei territori colpiti e siano coerenti con le necessità delle comunità locali. Le azioni mirate a promuovere resilienza e la resistenza del capitale naturale vanno accompagnate da politiche che assicurino il recupero del territorio attraverso pianificazione e governance multisettoriali. L'approccio adottato, promuovendo una migliore comprensione delle dinamiche che caratterizzano la risposta dei sistemi ambientali agli eventi estremi, può facilitare la definizione di interventi e strategie che diminuiscano la vulnerabilità del patrimonio naturalistico, valorizzandone allo stesso tempo gli aspetti economici e socioculturali.

Le azioni di tutela assumono il significato della protezione ambientale, in termini più generali, ma di salvaguardia del valore aggiunto territoriale, in maniera più strettamente correlata alle funzioni e alle vocazioni locali.

Bibliografia

- BLASI C. ed Altri, *Incendi e complessità ecosistemica. Dalla pianificazione forestale al recupero ambientale*, Roma, Palombi, 2004.
- BORRUSO G., *Nuovi strumenti di diffusione e comunicazione geografica, cartografia e GIS. Utilizzabilità e confronti*, Atti 11 Conferenza Asita, 2017, <http://atti.asita.it/ASITA2017/Pdf/201.pdf>.
- BOVIO G. ed Altri, "Gli incendi boschivi nelle aree a rischio di desertificazione: analisi a scala regionale", *L'Italia Forestale e Montana*, 3 (2002), pp. 208-224.
- BOVIO G. ed Altri, "Valutazione della biodiversità forestale dopo il passaggio del fuoco", *L'Italia Forestale e Montana*, 4 (2005), pp. 463-480.
- BRIVIO P.A. ed Altri, *Il telerilevamento da aereo e da satellite*, Sassari, Carlo Delfino Editore, 1992.
- CAMIA A. ed Altri, "Mappatura delle componenti ambientali predisponenti il rischio di incendi boschivi in Italia", *L'Italia Forestale e Montana*, 6 (2001), pp. 455-447.
- CHIRICI G. ed Altri, "Applicazioni del telerilevamento multispettrale per la mappatura dei tipi della vegetazione forestale e dei suoi attributi biometrici", *Informazione Botanica Italiana*, 37 (2005), pp. 268-269.
- CHIRICI G. - CORONA P., *Utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione nel rilevamento delle risorse forestali*, Roma, Aracne, 2006.
- CHRISMAN N., *Exploring Geographic Information Systems*, New York, Wiley, 1997.
- CONEDERA M. - MORETTI M., "Gli incendi di bosco: le conseguenze sull'ecosistema", *Dati statistiche e società*, 1 (2005), pp. 14-24.
- DAINELLI N., *L'osservazione della Terra. Telerilevamento. Manuale teorico-pratico per l'elaborazione delle immagini digitali*, Palermo, Flaccovio, 2011.

- DEL NEGRO L., *Il fuoco alle porte. Manuale per la difesa dagli incendi boschivi*, Torino, Blu Edizioni, 2010.
- DELCOURT C.J. ed Altri, "Evaluating the differenced normalized burn ratio for assessing fire severity using Sentinel-2 imagery in Northeast Siberian Larch Forests", *Remote Sensing* 13(2021), 12, pp. 2311-2333.
- DERMANIS A. - BIAGI L., *Telerilevamento. Informazione territoriale mediante immagini da satellite*, Milano, Casa editrice ambrosiana, 2002.
- FAVRETTO A., *IT e metodologie di analisi del territorio* Andrea Favretto, Atti 11 Conferenza Asita, 2017, <http://atti.asita.it/ASITA2017/Pdf/201.pdf>.
- FAVRETTO A., *Strumenti per l'analisi geografica: GIS e telerilevamento*, Bologna, Pàtron, 2006.
- GOMARRASCA M., *Elementi di Geomatica*, AIT Associazione Italiana di Telerilevamento, 2004.
- HUANG S. ed Altri, "A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing", *Journal of Forestry Research* 32 (2021), 1, pp. 1-6.
- KRIEGLES F.J., *Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition*, proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment, 1969.
- LAZZARONI M., ed Altri, "La ricerca geografica sull'innovazione e l'informazione: nuovi approcci, ambiti di studio e strumenti di analisi", *Geotema*, 59(2019), pp. 3-10.
- LILLESAND T. ed Altri, *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York, Wiley Ed, 2014.
- LILLESAND T.M. - KIEFER R.W., *Remote sensing and image interpretation*, New York, John Wiley & Sons, 1999.
- MATHER P.M., *Computer Processing of Remotely-Sensed Images*- Third Edition, Chichester, John Wiley & Sons, 2004.
- MAURO G. ed Altri, "Telerilevamento mediante l'ausilio di Google Earth Engine per il monitoraggio del consumo del suolo e della riduzione del verde urbano: un caso studio nel Casertano", *BSGI*, serie 14, 6.1(2023), pp. 65-91.
- MAZZOLENI S. - ARONNE G., *Introduzione all'ecologia degli incendi*, Napoli, Liguori.
- MCFEETERS - STUART K., "The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features", *International journal of remote sensing*, 17 (1996), 7, pp. 1425-1432.
- MILLER JAY D. ed Altri, "Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR)", *Remote sensing of Environment*, 109 (2007), 1, pp. 66-80.
- MOUSIVAND A. ed Altri, "Modeling Top of Atmosphere Radiance over Heterogeneous Non-Lambertian Rugged Terrain", *Remote Sensing*, 7 (2015), pp. 8019-8044.
- NOTI V., *GIS open source per geologia e ambiente. Analisi e gestione di dati territoriali e ambientali con QGIS*, Palermo, Flaccovio, 2014.
- PARKS S.A. ed Altri, "A New Metric for Quantifying Burn Severity: The Relativized Burn Ratio", *Remote Sensing*, 6 (2014), pp. 1827-1844.
- PERULLI G. (a cura di), *Il danno ambientale*, Torino, Giappichelli, 2012.
- QUINTANO C. ed Altri, "Combination of Landsat and Sentinel-2 MSI data for initial assessing of burn severity", *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 64 (2018), pp. 221-225.
- SARTORI F. - GALLINARO N. (a cura di), *A fiamme spente. Gestire il dopo incendio nelle foreste*, Caselle di Sommacampagna, Cierre, 2006.
- SHAFIZADEH-MOGHADAM H. ed Altri, "Google Earth Engine for large-scale land use and land cover mapping: an object-based classification approach using spectral, textu-

ral and topographical factors”, *GIScience & Remote Sensing*, 58 (2021), 6, pp. 914-928.

SKIDMORE A. - PRINS H., *Environmental Modelling with Gis and Remote Sensing*, London, Taylor and Francis, 2002.

TSO B.K.C. - MATHER P.M., *Classification Methods for Remotely Sensed Data*, London, Taylor & Francis Ltd. 2001.

Parole chiave: telerilevamento, analisi territoriale, incendi

Résumé

La recherche part de l'intérêt pour l'utilisation des données satellitaires dans la recherche géographique, dans le but de tester le potentiel exprimé par la télédétection dans l'acquisition d'informations sur la surface de la terre, avec des résolutions et des délais que d'autres sources d'information ne permettent pas.

Dans le cas proposé, la méthodologie d'acquisition et d'interprétation des données a été appliquée à un sujet d'intérêt pour l'analyse territoriale, à savoir l'étude des catastrophes naturelles et, en particulier, des territoires soumis à des incendies.

La zone choisie pour l'étude est celle de la municipalité de San Vito Lo Capo, une zone protégée avec une vocation touristique mature et récemment touchée par un incendie dévastateur.

Les cartographies produites et les résultats interprétatifs qui en découlent représentent un outil de référence possible pour les évaluations orientées vers une éventuelle reconstitution forestière dans les zones touchées par les incendies.

Mots clés: Données satellitaires, risque d'incendie, San Vito Lo Capo

Resumen

La investigación parte de un interés por el uso de datos de satélite en la investigación geográfica, con el objetivo de comprobar el potencial expresado por la teledetección en la obtención de información sobre la superficie terrestre, con resoluciones y escalas temporales que otras fuentes de información no permiten.

En el caso propuesto, la metodología se aplicó a un tema de interés para el análisis territorial, como es el estudio de las catástrofes naturales y, en particular, de los territorios sometidos a incendios.

La zona seleccionada para el estudio es la del municipio de San Vito Lo Capo, una zona protegida con una madura vocación turística y recientemente afectada por un devastador incendio.

Las cartografías elaboradas y los resultados interpretativos derivados de ellas representan una posible herramienta de referencia para evaluaciones orientadas a una posible reconstitución forestal en zonas afectadas por incendios.

Palabras clave: Datos por satélite, riesgo de incendios, San Vito Lo Capo