

doi.org/10.83114/reticula39/04

## METODOLOGIE DI ANALISI INTEGRATE PER IL MONITORAGGIO SATELLITARE A SCALA REGIONALE DELL'INFESTAZIONE DI BOSTRICO TIPOGRAFO

[Daniele Savio](#)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Regione del Veneto - Direzione Pianificazione Territoriale

**Abstract:** Le immagini satellitari ad elevata risoluzione geometrica rappresentano la primaria fonte di dati dalla quale desumere le informazioni relative all'andamento su scala regionale dell'infestazione di bostrico tipografo (*Ips typographus* L.), che sta arrecando gravissimi danni ai boschi di abete rosso delle regioni alpine italiane. Per individuare le aree maggiormente colpite e programmare le attività di ripristino dei soprassuoli forestali distrutti dallo scoltide, la Regione del Veneto ha avviato attività di monitoraggio annuali e su area vasta, che hanno richiesto il perfezionamento di tecniche di interpretazione di immagini satellitari automatizzate e caratterizzate da livelli di accuratezza tali da ridurre al minimo le fasi di verifica supervisionata. La soluzione che è stata adottata, descritta in questo contributo, utilizza immagini satellitari PlanetScope ad 8 bande spettrali ed integra i classici metodi di sogliatura con operatori di *machine learning* implementati in modelli realizzati tramite lo *Spatial Model Editor* di ERDAS IMAGINE. Tale approccio ha risposto all'esigenza di rappresentare speditivamente e con elevato livello precisione lo stato dell'infestazione sul territorio montano del Veneto.

**Parole chiave:** bostrico tipografo, telerilevamento, monitoraggio forestale.

## INTEGRATED ANALYSIS METHODOLOGIES FOR REGIONAL-SCALE SATELLITE MONITORING OF SPRUCE BARK BEETLE INFESTATION

[Daniele Savio](#)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Veneto Region - Directorate of Territorial Planning

**Abstract:** High-geometric-resolution satellite images represent the primary source of data for deriving information on the regional scale trend of the bark beetle infestation (*Ips typographus* L.), which is causing serious damage to the spruce forests in the Italian Alps. To identify the worst affected areas and plan activities to restore forest stands destroyed by the bark beetle, the Veneto Region has launched annual and wide-area monitoring activities. These activities have required the refinement of automated satellite image interpretation techniques, characterized by levels of accuracy that minimize the need for supervised verification phases. This contribution describes the adopted solution, which uses PlanetScope satellite images with 8 spectral bands and integrates the classic thresholding methods with machine learning operators implemented in models created using the ERDAS IMAGINE Spatial Model Editor. This approach responded to the need to quickly and accurately represent the state of the infestation in the mountainous territory of Veneto.

**Key words:** bark beetle, remote sensing, forest monitoring.

## INTRODUZIONE

Il bostrico tipografo (*Ips typographus* L.) è un coleottero diffuso in tutta la regione euroasiatica. In condizioni di equilibrio endemico il suo ruolo nella perpetuazione degli ecosistemi forestali è determinante, in quanto colpisce abeti rossi vetusti o sotto stress fisiologico, avviando il processo di decomposizione del legno. Nell'ultimo quinquennio, come conseguenza della grande quantità di piante atterrate o stroncate dalla tempesta Vaia dell'ottobre 2018 ([Vaglio Laurin et al., 2021](#)) e del particolare andamento climatico, le Regioni italiane nord-orientali dell'arco alpino hanno

visto una diffusione non ordinaria di bostrico tipografo, le cui popolazioni sono passate da una presenza endemica ad una presenza epidemica ([Deganutti et al., 2024](#)), avviando la più estesa infestazione mai osservata sulle Alpi meridionali (es. Figura 1). Situazioni simili hanno riguardato anche altri Paesi europei come conseguenza dell'aumento globale delle temperature dell'aria, dei mutevoli modelli di precipitazioni e di tempeste di vento sempre più violente ([Schuldt et al., 2020](#)). Nel 2018-2019 anche la Svezia è stata oggetto di un evento epidemico che ha determinato la perdita di oltre 11 milioni di metri cubi di legname. Per



Figura 1. Infestazione di bostrico nella Valle di Gares (Unione Montana Agordina, Provincia di Belluno). Al termine della fase grigia gli abeti perdono la corteccia, esponendo i tipici solchi scavati dal bostrico (foto dell'Autore).

il futuro le prospettive non sono positive, in quanto si stima che nel decennio 2021-2030 il cambiamento climatico determinerà un aumento del 700% dei danni forestali dovuti al bostrico tipografo rispetto a quelli registrati tra il 1971-1980 ([Seidl, 2014](#); [Marini et al., 2017](#)).

In questa ricerca, è stata sviluppata una metodologia per individuare i nuclei di abete rosso nella fase rossa dell'infestazione. In questo contesto, sono state testate le potenzialità di un approccio innovativo che integra applicazioni di *machine learning* ai classici metodi di *thresolding* su analisi multitemporale. Questo approccio è stato applicato ad immagini satellitari PlanetScope, che hanno rappresentato una base informativa funzionale a determinare annualmente su area vasta, con costi e tempi contenuti, l'andamento dell'infestazione, consentendo la perimetrazione delle superfici colpite.

## AREA STUDIO E MATERIALI

La metodologia che si va a descrivere è stata inizialmente testata su un'area studio di 91 km<sup>2</sup> (Figura 2), per verificare la sua applicabilità sull'intero territorio montano della Regione Veneto a coprire una superficie complessiva di 4.785 km<sup>2</sup>.

Le immagini utilizzate provengono dalla costellazione di satelliti *PlanetScope*. L'elevata frequenza temporale di rivisitazione di questi satelliti ha permesso di sfruttare al meglio le serie temporali nell'analisi dei cambiamenti, consentendo di selezionare, per i periodi prescelti, immagini con copertura nuvolosa molto bassa o nulla.

In questa specifica applicazione sono state utilizzate le immagini con risoluzione spaziale di circa 3 m al livello di elaborazione 3A prodotte dai sensori *Dove-R* ad otto bande spettrali: *Coastal blue* (431-452 nm), *Blue* (465-515 nm), *Green 1* (513-549 nm), *Green* (547-583 nm), *Yellow* (600-620 nm),

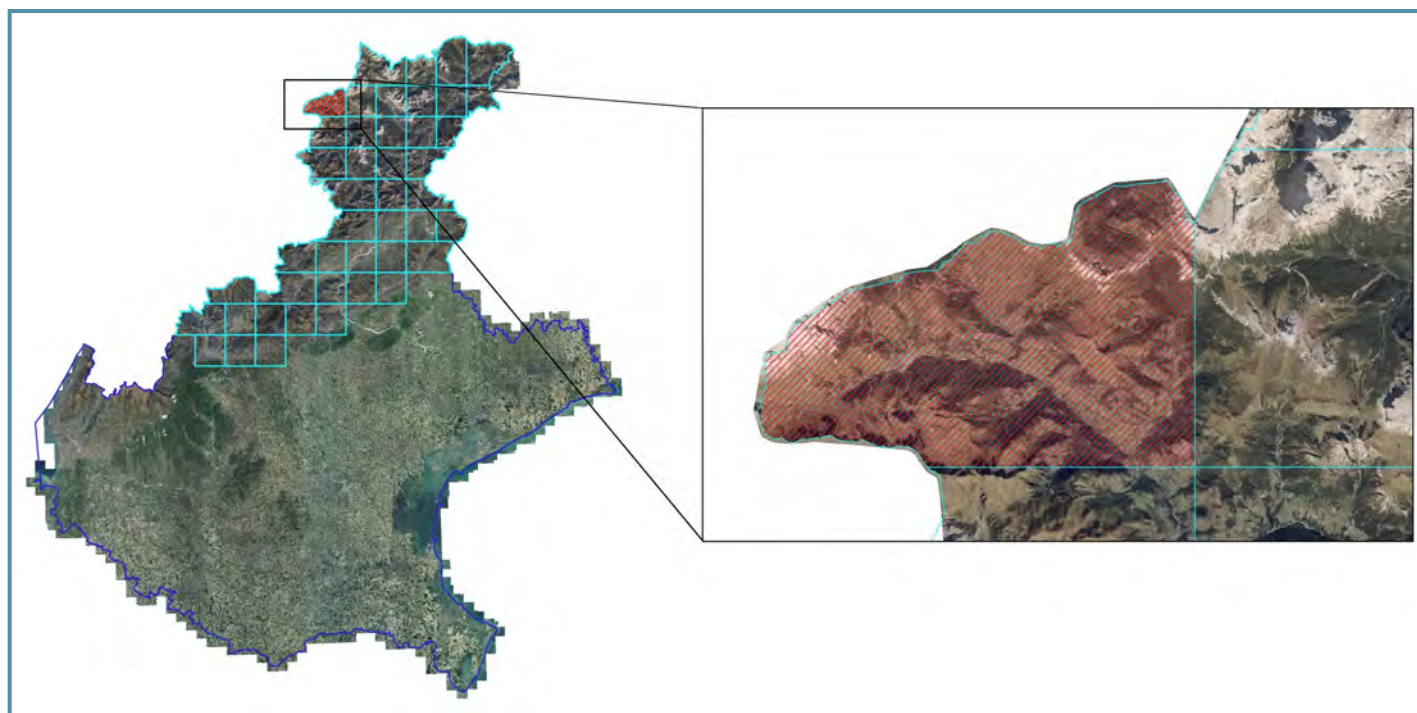


Figura 2. Area di studio nel Comune di Livinallongo del Col di Lana (fonte: elaborazione dell'Autore).

*Red* (650-680 nm), *RedEdge* (697-713 nm), *NIR* (845-885 nm).

## METODOLOGIA ADOTTATA

Il *workflow* può essere sintetizzato in sei fasi, che comprendono la selezione delle immagini satellitari, l'elaborazione degli indici vegetazionali e l'analisi multitemporale, la determinazione del valore soglia e la vettorializzazione, l'applicazione del modello di *machine learning*, una fase di verifica e correzione manuale a video, la determinazione dell'accuratezza tematica.

La sperimentazione nell'area studio è stata condotta utilizzando le scene mosaiccate direttamente dalla piattaforma *Planet Explorer* acquisite il 21/08/2022 ed il 06/09/2023, al fine di rappresentare l'avanzamento dell'infestazione di bostrico tipografo nel periodo intercorso (circa un anno). La selezione di queste immagini è il risultato di un primo filtraggio che pone la condizione di una copertura nuvolosa inferiore al 5%. La data di acquisizione della ripresa ha rappresentato un ulteriore criterio selettivo: per contenere entro limiti accettabili l'estensione delle zone in ombra, si è optato per una soluzione di compromesso, utilizzando immagini di fine agosto/inizio settembre, che da un lato rappresentano lo stato dell'infestazione in una fase avanzata dei cicli biologici annuali del bostrico e dall'altro non presentano le estese ombreggiature dell'autunno inoltrato, che non consentirebbero l'analisi di ampie porzioni di immagine, pur fotografando la situazione in cui il coleottero cessa la sua diffusione. Nella selezione finale, che ha condotto alle due date indicate, si è tenuto conto anche della nitidezza intrinseca dell'immagine che è influenzata dal livello di umidità atmosferica al

momento dell'acquisizione.

Per entrambe le immagini, utilizzando il software *ERDAS IMAGINE*, sono stati elaborati indici selezionati tra quelli maggiormente utilizzati in letteratura per i monitoraggi fitosanitari su ampia scala ([Havašová et al., 2015](#); [Blaga et al., 2019](#)), tra cui *NDVI*, *DVI*, *GNDVI*, *MSAVI2*, procedendo per ciascun indice al calcolo della differenza multitemporale, secondo la metodologia già adottata in altri lavori ([Zovi et al., 2021](#)). Il confronto tra i risultati ha evidenziato la particolare capacità risolutiva dell'indice *NDVI* associato all'indice *NDRE*, che è stato adattato alla particolare finestra spettrale della banda *RedEdge* del sensore *Dove-R*. Precedenti ricerche ([Bijou et al., 2023](#)) dimostrano che l'indice *NDRE* fornisce migliori stime dello stato fitosanitario rispetto all'indice *NDVI* nei livelli più bassi delle chiome, in quanto la banda del *RedEdge* del *NDRE* è meno soggetta, rispetto alla banda *Red*, all'assorbimento della parte superiore delle coperture vegetali e, pertanto, è in grado di rilevare situazioni di stress fisiologico anche negli strati inferiori delle chiome. Il periodo migliore in cui effettuare l'analisi tramite l'indice *NDRE* è verso la fine del periodo vegetativo, quando il contenuto di clorofilla nelle chiome raggiunge il suo apice e la sua riduzione negli alberi infestati viene meglio rilevata. La combinazione di questi due indici, che rilevano le condizioni di sofferenza vegetativa ai diversi livelli delle chiome, si è rivelata molto efficace nel determinare con precisione le potenziali superfici infestate dal bostrico (Figura 3).

Il processo di calcolo multitemporale e di combinazione dei due indici vegetazionali è stato implementato in un modello di *Spatial Modeler* in *ERDAS IMAGINE* con una

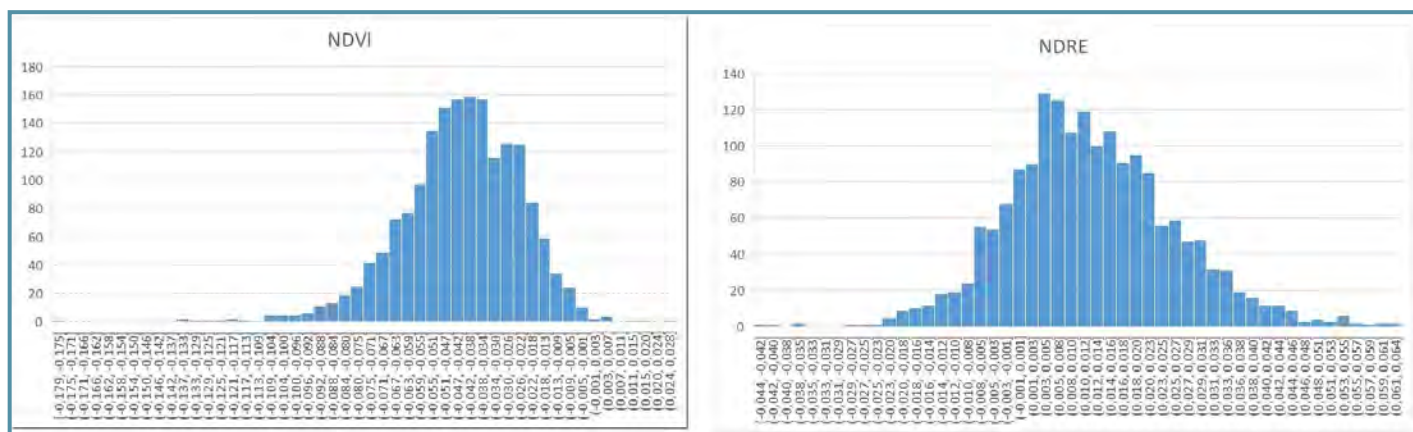


Figura 3. Distribuzione delle frequenze dei valori medi di NDVI e NDRE calcolati nelle rispettive differenze multitemporali nei poligoni classificati come superficie forestale bostricata (fonte: elaborazione dell'Autore).

modalità di iterazione che consente l'automatizzazione dell'analisi su un numero potenzialmente illimitato di coppie di immagini.

Dal raster risultante dalla somma di questi due indici calcolati nella loro differenza multitemporale da  $T^1-T^0$ , si è proceduto a vettorializzare l'immagine, individuando il valore soglia più idoneo a discriminare il fenomeno da rappresentare<sup>1</sup>. Questa operazione ha riguardato le sole superfici con copertura forestale, utilizzando come layer per la mascheratura il *pan-European Forest Type 2018*, uno dei servizi di informazione prodotti da Copernicus, utilizzando la release con risoluzione spaziale di 10 m. L'output che ne è derivato risultava comunque affetto da un elevato numero di errori di commissione, in quanto ad un determinato valore di *DN* (*Digital Number*) corrispondevano, oltre alle superfici forestali colpite dal coleottero, altre variazioni della copertura del suolo o diverse condizioni di ombreggiatura. E difatti il valore

di *overall accuracy* raggiunto al termine di questa prima fase metodologica, che applica metodi di *thresholding* su analisi multitemporale degli indici vegetazionali, risulta insoddisfacente, attestandosi al 70,72%. Per un affinamento del risultato è stata determinante l'integrazione nel processo di classificazione di modelli basati sull'intelligenza artificiale.

## IL MODELLO DI LEARNING

La tipologia di *learning* utilizzata è di tipo *supervised* e, nell'ambito dell'area studio, è stata modulata attraverso la selezione di 293 aree *training* stratificate fra le classi "infestazione bostrico" (90 aree), "ombre" (48 aree) e "altre variazioni di copertura del suolo forestale" (155 aree). Il modello di *machine learning* ha fornito le informazioni di base all'intelletto macchina attraverso un classificatore *k-Nearest Neighbours*, ossia operante tramite un apprendimento non parametrico, che è stato modulato

<sup>1</sup>Il valore soglia di un indice vegetazionale può variare in relazione alla radiometria dell'immagine elaborata (Mugnoli e Sabbi, 2021). Questa variabilità è ancor più accentuata se il valore soglia lo si determina nella combinazione multitemporale di due indici vegetazionali.

empiricamente con un valore di  $K=5$ . Sono stati testati anche altri classificatori, quali *CART* e *RandomForest*, i quali, tuttavia, hanno prodotto output non convincenti, caratterizzati da un maggior numero di errori di omissione e di commissione. Sia il processo di formazione del *machine intellect*, sia la sua implementazione nel processo di *machine learning* applicato al layer da classificare sono stati ingegnerizzati tramite specifici operatori dello *Spatial Model Editor* integrato nel software *ERDAS IMAGINE*, consentendo la creazione di un modello che ha automatizzato i processi (Figura 4) riducendo notevolmente i tempi di elaborazione.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

L'applicazione di questo modello di *machine learning* nell'area studio selezionata ha consentito di migliorare sensibilmente il risultato della classificazione delle superfici forestali infestate dal bostrico tipografo (Figura 5) nel periodo intercorso tra le due immagini analizzate, incrementando la *overall accuracy* al 94,79%.

In questo *workflow* la fase più onerosa in termini di tempo per l'impegno che richiede al fotointerprete e necessaria alla creazione del *machine intellect* senza dubbio è rappresentata dalla selezione dei *training sites*, pertanto, per cercare di omettere questa attività, si è tentato di applicare lo stesso

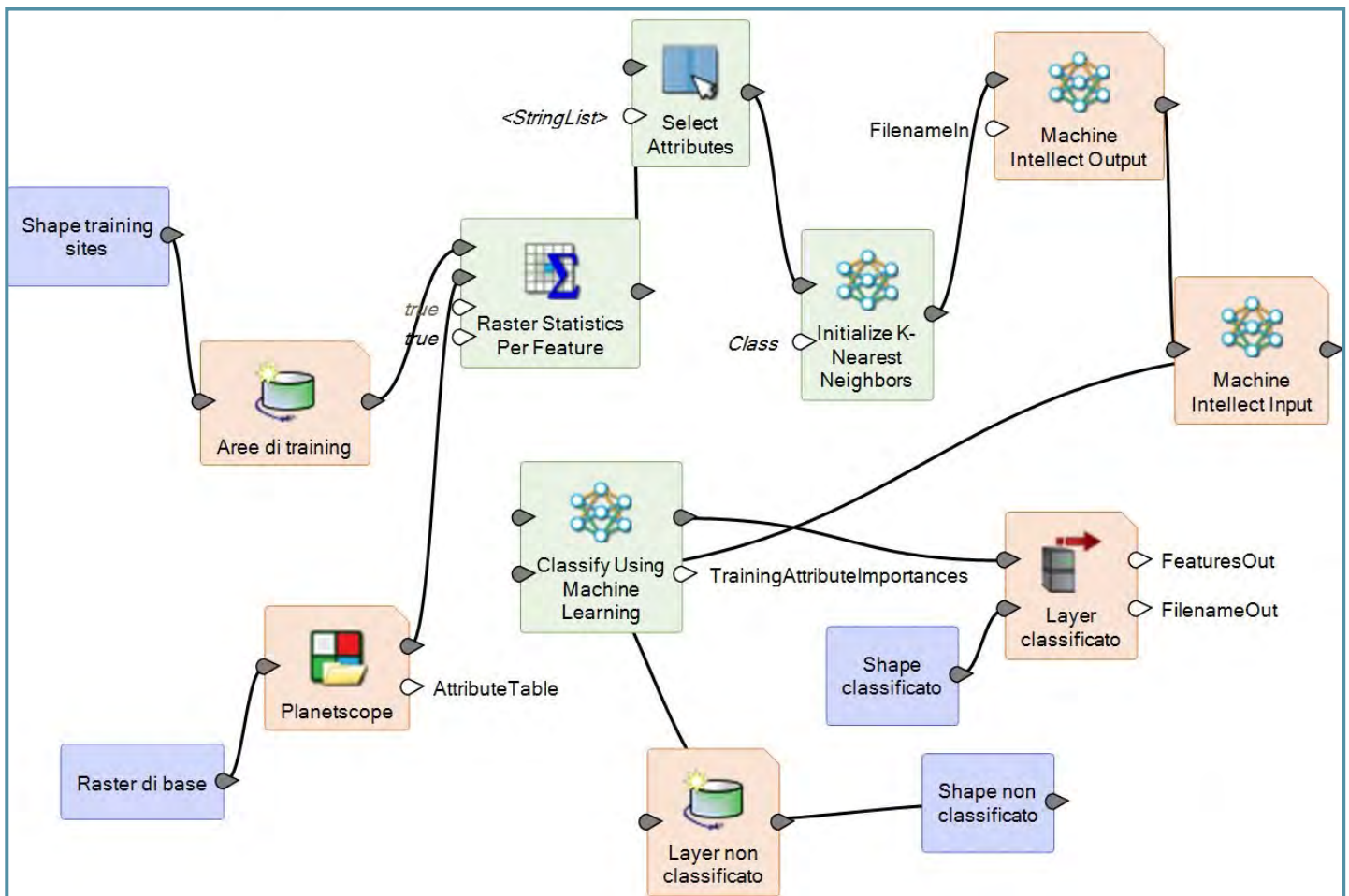


Figura 4. Modello di creazione del machine intellect e della sua applicazione al layer da classificare (fonte: elaborazione dell'Autore).

modello di apprendimento in altre aree montane del Veneto. I risultati in termini di accuratezza sono sempre stati inferiori a quelli ottenuti nell'area test per la quale il modello di apprendimento è stato generato, ma, in determinate condizioni, hanno dato esiti positivi, tali da ridurre notevolmente i tempi di revisione manuale a video. Dall'esperienza condotta è emerso che gli esiti migliori di questa semplificazione del modello, che omette la fase di selezione delle aree di *training*, sono ottenibili se le date di acquisizione delle immagini satellitari non si discostano sensibilmente da quelle dell'area di addestramento. Altra condizione determinante la qualità del risultato nell'applicazione di un modello semplificato è

l'effettiva entità delle superfici forestali bostricate nella nuova area di analisi, che deve essere quantitativamente paragonabile a quella rilevata nell'area di addestramento.

Qualora le due condizioni non siano soddisfatte è opportuno selezionare nuove *training areas* per generare un nuovo *machine intellect*, che potrà essere anch'esso applicabile a casistiche simili nell'ambito di un modello semplificato.

La metodologia descritta, ingegnerizzata nelle sue fasi attraverso una successione di modelli realizzati con lo *Spatial Model Editor* di *ERDAS IMAGINE*, è caratterizzata da una notevole speditività di analisi e, in condizioni normali, consente ad un solo operatore di coprire circa 100 km<sup>2</sup>/giorno di territorio, che

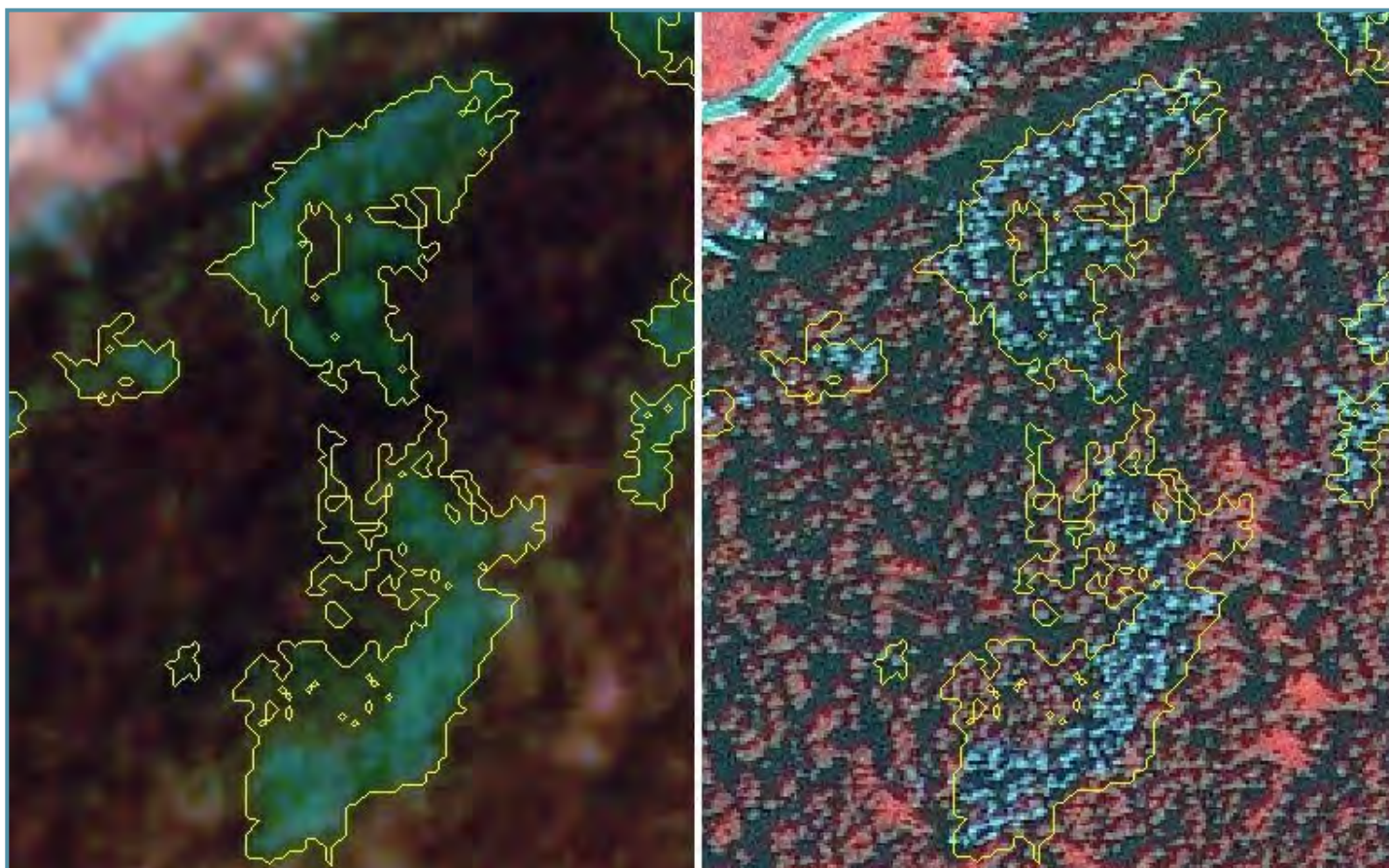


Figura 5. Esempio di output finale sovrapposto a visualizzazione FCIR dal dato PlanetScope del 06/09/2023 (a sinistra) con verifica su immagine TripletSat coeva (a destra) (fonte: elaborazione dell'Autore).

possono anche raddoppiare in ambiti territoriali particolarmente favorevoli.

Vi sono, tuttavia, due importanti limiti operativi che non vanno sottaciuti.

Il primo impedimento è rappresentato dalle ombre proiettate dai rilievi montuosi, le quali, in periodo tardo estivo possono precludere l'analisi di ampie porzioni di immagine, anche in ragione dell'orario di sorvolo dei satelliti *PlanetScope*, che nel territorio Veneto rientra tra le 9:00 e le 10:00 AM. Questa problematica determina inevitabilmente una quantificazione sottostimata dal fenomeno monitorato, che si aggiunge alla sottostima determinata dalla risoluzione spaziale delle immagini utilizzate, che difficilmente consentono una classificazione stabile di superfici forestali bostricate inferiori a 90 m<sup>2</sup> (10 pixel aggregati).

Un secondo limite, che tuttavia rientra nel target di analisi inizialmente definito, consiste nell'ampiezza dell'intervallo temporale monitorabile, che non può essere superiore ad un anno. L'analisi descritta, infatti, è atta a discriminare le aree boscate che rientrano nella "fase rossa" dell'infestazione di *Ips typographus*, ossia in quella fase dell'attacco in cui gli aghi dell'abete rosso passano da una colorazione verde al giallo/rosso mattone. Quando si manifesta questa fase, il bostrico tipografo ha già abbandonato la pianta ospite per insediarsi su un nuovo albero. L'anno successivo gli aghi cadono e rimangono solo i fusti spogli in quella che viene definita "fase grigia" (Figura 1), che, tuttavia, anche laddove i nuclei colpiti non siano stati già tagliati ed esboscati, restituisce, rispetto alla fase rossa, risposte spettrali molto differenti.

Il mondo scientifico ha già iniziato a focalizzarsi

su approfondimenti specifici, che aprono prospettive di interventi precoci e mirati a contenere l'infestazione, atti a determinare la presenza dello scolitide nella "fase verde", ossia in quella fase nella quale il coleottero inizia a deporre le uova sotto la corteccia dell'albero, ma questo non manifesta ancora sintomi osservabili all'occhio umano. In questa direzione vanno promettenti studi ([Abdullah et al., 2018](#)), che, tuttavia, per la risoluzione geometrica delle immagini satellitari utilizzate, sono applicabili solo su infestazioni di ampia consistenza, oltre ad essere stati testati in ambiti territoriali non caratterizzati dalla variabilità orografica che caratterizza l'area alpina. Ulteriori sviluppi della ricerca ([Bozzini et al., 2024](#)), che fanno uso di immagini ad altissima risoluzione geometrica riprese da drone, arrivano a determinare con accettabili livelli di accuratezza l'infestazione nella fase verde a livello di singola chioma. In tale studio il modello di apprendimento è stato modulato sulla base di un *dataset* complessivo, distribuito su due siti sperimentali, di 50 alberi di *training*, mentre l'accuratezza dei risultati è stata verificata su 45 alberi di controllo. Attualmente a scala regionale tale metodologia non appare applicabile, sia per l'insostenibilità dei tempi e dei costi che si dovrebbero affrontare nell'acquisire immagini *UAV* multispettrali a risoluzione sub-metrica, sia per l'impossibilità di effettuare una revisione sistematica dei risultati della classificazione, che non può essere realizzata tramite fotointerpretazione e, pertanto, richiederebbe complesse e tempestive verifiche in loco su un'estensione forestale potenzialmente interessata superiore a 100.000 ha.

<sup>2</sup>Stima desunta dalla Carta Regionale dei Tipi forestali ([Del Favero, 2006](#)).

## INTEGRAZIONE DEL MONITORAGGIO NELLE LINEE D'AZIONE PER CONTRASTARE L'INFESTAZIONE

Il monitoraggio precoce nella fase verde, che nel nostro territorio ha prodotto risultati incoraggianti su immagini acquisite da drone, per produrre concreti vantaggi nel contenimento dell'infestazione dovrebbe essere seguito dall'esecuzione di interventi di abbattimento ed esbosco degli alberi colpiti in tempi contestualmente molto rapidi, ovvero prima che lo scolitide abbandoni la pianta per trasferirsi su altri soggetti ospiti. Questa auspicabile prospettiva attualmente è praticabile su superfici forestali di estensione limitata, pertanto può essere sostenibilmente applicata a circoscritte aree di particolare valenza naturalistica o economica, mentre risulta inattuabile a scala regionale.

Più concrete sono state le ricadute del monitoraggio satellitare dell'infestazione nella fase rossa realizzato con la metodologia ora descritta, il quale, pur non consentendo l'attuazione di azioni tempestive finalizzate a bloccare la diffusione del bostrico tipografo, rientra tra le linee di intervento integrate nella "Strategia regionale per il contrasto al bostrico tipografo", che la Regione del Veneto ha adottato con la [D.G.R. n.833 del 12 luglio 2022, Allegato A](#). La Strategia regionale si esplica attraverso 6 linee di intervento, che hanno previsto, oltre al monitoraggio e l'aggiornamento cartografico, campagne informative, il supporto agli interventi selvicolturali di contrasto da parte dei gestori forestali, interventi in amministrazione diretta ed, infine, la programmazione di interventi di ripristino delle aree colpite.

A dare continuità a tali linee d'azione, il 12 giugno 2024, con l'[Ordinanza n.8](#), il MASAF ha previsto una serie di adempimenti nelle

cosiddette "Misure fitosanitarie d'emergenza per il contrasto di *Ips typographus* atte a contenerne la sua diffusione nel territorio della Repubblica italiana", che includono l'integrazione delle mappe di distribuzione georeferenziate con una rete di monitoraggio con trappole a ferormone.

I risultati dell'attività di monitoraggio satellitare, integrati con altre forme di rilevamento della presenza dello scolitide, quali le trappole a ferormoni o i punti di rilievo acquisiti tramite una apposita applicazione per smartphone ([Nardi et al. 2023](#)), contribuiscono a costituire un sistema informativo in continuo aggiornamento consultabile in uno specifico [WebGIS](#) ospitato dal Geoportale della Regione del Veneto, che è alla base di valutazioni statistiche sull'andamento dell'infestazione, ma risulta anche funzionale alla programmazione delle attività di ripristino delle superfici forestali danneggiate e ad una equilibrata distribuzione dei contributi destinati alla ricostituzione tramite rimboschimento dei soprassuoli forestali distrutti dallo scolitide.

## CONCLUSIONI E PROSSIMI TRAGUARDI

Le soluzioni metodologiche proposte in questo contributo hanno consentito di rappresentare le superfici forestali colpite dal bostrico tipografo con un approccio speditivo in un contesto complesso come quello montano, di spazializzare i processi di espansione dell'infestazione e di produrre prime stime quantitative sulla sua entità.

In uno scenario in cui sempre più numerosi sono gli studi volti ad identificare le situazioni di sofferenza vegetativa attraverso indici vegetazionali adeguati ai recenti sviluppi nel settore della sensoristica, con notevole incremento delle potenzialità di estrazione semantica anche in ambito forestale, si

delineano gli aspetti innovativi di questa ricerca, che integra questi approcci *pixel-based* a recenti algoritmi di *machine learning*, con risultati finali caratterizzati da valori di concordanza tematica superiori al 90%. Tale accuratezza tematica, in grado di ridurre drasticamente i tempi di revisione manuale, congiuntamente ad una automatizzazione dei processi ottenuta con la predisposizione di modelli replicabili, è garanzia di una scalabilità della procedura su area vasta.

L'applicazione di questa metodologia si è scontrata con alcune inevitabili criticità legate a limitazioni caratteristiche delle basi di dati utilizzate, che delineano, tuttavia, anche i prossimi traguardi nel miglioramento del *workflow* e dei risultati, cui si è già iniziato a lavorare, eleggendo quale nuova area studio il territorio del Comune di Comelico Superiore, fortemente colpito dalle pullulazioni dello scolitide nel corso del 2024. In questo ambito territoriale si stanno testando soluzioni di *pansharpening* tra immagini Sentinel-2 L2A e PlanetScope, indirizzate a superare i limitati di risoluzione spettrale di queste ultime, prive di bande spettrali nello *SWIR* (*Short-Wave Infrared*). Le bande *SWIR* 11 e 12 del Sentinel-2 L2A, assieme alle bande *NIR* e del bordo rosso, consentono di elaborare indici che misurano il contenuto idrico delle chiome ed offrono in un'analisi multitemporale, buone risposte, al rilevamento del danno da scolitidi ([Immitzer et al., 2019](#)). Questa evoluzione metodologica, in un'ottica di continuità temporale del monitoraggio, potrà, inoltre, essere perfezionata con l'implementazione delle immagini prodotte dalla costellazione IRIDE, ampliando notevolmente la platea dei potenziali utilizzatori.

Un secondo elemento limitante è rappresentato dalla modesta precisione

geometrica della maschera utilizzata per isolare la vegetazione forestale, desunta del layer *pan-European Forest Type 2018*, prodotto da Copernicus, che è all'origine di alcuni errori di attribuzione (falsi positivi). Questa criticità verrà risolta ricorrendo ad una nuova perimetrazione dei soprassuoli forestali, geometricamente molto più precisa, contenuta nell'aggiornamento al 2021 della Carta della Copertura del Suolo della Regione Veneto, prodotta tramite fotointerpretazione da ortofoto AGEA coeve. Questo nuovo layer, grazie alla sua articolazione tematica, consentirà anche di escludere i soprassuoli forestali potenzialmente non suscettibili all'attacco del bostrico, quali i boschi di latifoglie e le formazioni di conifere in cui l'abete rosso non è prevalente o consociato.

Più difficili paiono le prospettive di superare le limitazioni poste dalle coperture nuvolose, che possono ridurre notevolmente le aree analizzabili, introducendo inevitabili sottostime nella quantificazione dell'infestazione. L'impiego di dati SAR in questo contesto risolverebbe tale problematica, ma la scarsa letteratura disponibile al momento non è univocamente orientata su metodiche specifiche nel rilevamento dello scolitide ([Hollaus e Vreugdenhil, 2019](#)), dimostrando la difficoltà di elaborazione ed interpretazione di queste basi di dati, il cui trattamento sta catalizzando l'interesse della comunità scientifica per le nuove importanti potenzialità applicative anche in ambito forestale.

## BIBLIOGRAFIA

Abdullah H., Skidmore A.K., Darvishzadeh R., Heurich M., 2018. [Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark](#)

[beetle \(\*Ips typographus\*, L.\) compared with Landsat-8](#). Remote sensing in Ecology and Conservation, Volume 5, Issue 1, 87-106.

Bijou S., Kupková L., Potůčková M., Červená L., Lysák J., 2023. [Evaluation of the bark beetle green attack detectability in spruce forest from multitemporal multispectral UAV imagery](#). ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 2023, 1033–1040.

Blaga L., Josan I., Herman G.V., Grama V., Nistor S., Suba N., 2019. [Assessment of the forest health through remote sensing techniques in Valea Rosie Natura 2000 site, Bihor county, Romania](#). Journal of applied engineering sciences 9 (22), 207-215.

Bozzini A., Brugnaro S., Morgante G., Santoiemma G., Deganutti L., Finozzi V., Battisti A., Faccoli M., 2024. [Drone-based early detection of bark beetle infested spruce trees differs in endemic and epidemic populations](#). Front. For. Glob. Change 7:1385687.

Deganutti L., Biscontin F., Bernardinelli I., Faccoli M., 2024. [The semiochemical push-and-pull technique can reduce bark beetle damage in disturbed norway spruce forests affected by the Vaia storm](#). Agricultural and Forest Entomology 26, 1, 115–125.

Del Favero R., 2006. [Carta Regionale dei Tipi forestali: documento base](#). Regione del Veneto, Direzione Foreste ed Economia Montana.

Havašová M., Bucha T., Ferenčík J., Jakuš R., 2015. [Applicability of a vegetation indices-based method to map bark beetle outbreaks in the High Tatra Mountains](#). Annals of Forest Research 58(2), 295-310.

Hollaus M., Vreugdenhil M., 2019. [Radar Satellite](#)

[Imagery for Detecting Bark Beetle Outbreaks in Forests](#). Curr Forestry Rep 5, 240–250.

Immitzer M., Atzberger C., Koukal T., 2019. [Detection of bark beetle infestation using Sentinel-2 time series data](#). Remote Sensing. 11(14), 1741.

Mugnoli S., Sabbi A., 2021. [Indici radiometrici per il calcolo del verde totale nelle maggiori aree urbane](#). Atti Conferenza ESRI.

Marini L., Økland B., Jönsson A.M., Bentz B., Carroll A., Forster B., Grégoire J.C., Hurling R., Nageleisen L.M., Netherer S., Ravn H.P., Weed A., Schroeder M., 2017. [Climate drivers of bark beetle outbreak dynamics in Norway spruce forest](#). Ecography 40, 1426-1435.

Nardi D., Bozzini A., Morgante G., Gaccione A., Finozzi V., Battisti A., 2023. [Participatory ground data are complementary to satellite bark beetle detection](#). Annals of Forest Science 80, 46.

Schuldt B., Buras A., Arend M., Vitasse Y., Beierkuhnlein C., Damm A., Gharun M., Grams T.E.E., Hauck M., Hajek P., Hartmann H., Hiltbrunner E., Hoch G., Holloway-Phillips M., K'orner C., Larysch E., Lübbe T., Nelson D.B., Rammig A., Rigling A., Rose L., Ruehr N.K., Schumann K., Weiser F., Werner C., Wohlgemuth T., Zang C.S., Kahmen A., 2020. [A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests](#). Basic Appl. Ecol. 45, 86–103.

Seidl R., Schelhaas M.J., Rammer W., Verkerk P.J., 2014. [Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage](#). Nat. Clim. Chang. 4, 806–810.

Vaglio Laurin G., Puletti N., Tattoni C., Ferrara

C., Pirotti F., 2021. [Estimated biomass loss caused by the Vaia windthrow in northern Italy: evaluation of active and passive remote sensing options.](#) Remote Sensing 13, 23, 4924.

Zovi D., Cavalli R., Favero P., Pellegrini M., Savio D., 2021. [Cent'anni sull'Altopiano - Dalla Grande Guerra a Vaia.](#) Club Alpino Italiano - Gruppo Regionale del Veneto, 96-113.