



Automatic mapping of Italian forest disturbances between 1985 and 2019 using Landsat imagery and Google Earth Engine

Mappatura automatica dei disturbi forestali avvenuti in Italia negli ultimi 35 anni utilizzando immagini Landsat e Google Earth Engine

Saverio Francini ^{(a)(*)} - Costanza Borghi ^(a) - Giovanni D'Amico ^(a) - Stefano Santi ^(a) - Davide Travaglini ^(a)

^(a) Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali, Università degli Studi di Firenze, Via San Bonaventura, 13 - 50145 Firenze, Italy.

^(*) Corresponding Author; saverio.francini@unifi.it

Abstract: Forests play a key role in the carbon cycle and the fight against climate change. Long-term monitoring of forest dynamics represents a key element for understanding forests transformations due to forest harvestings and disturbances including fires, wind storms, frost or drought events, and pathogen attacks. This work aims at mapping and evaluating the forest disturbances that have occurred in Italy since 1985, using Landsat satellite imagery and apposite algorithms. We predicted about 1.8 million forest disturbances occurring during the observation period. Disturbances ranged between 27.923 ha in 2014 and 261.733 ha in 1985. Most of the forest disturbances have been identified in Sicilia and Calabria. Commission errors fluctuated between 29% in 2012 and 65% in 2001 while omission errors were between 8% in 2014 and 88% in 2003. The results that we present in this work can increase our understanding of Italian forests, and serve as basis for future research, while the methodology we applied can support the production of official statistics on forest disturbances.

Key words: remote sensing; algorithms; forest disturbance.

Citation: Francini S., Borghi C., D'Amico G., Santi S., Travaglini D., 2022 - *Mappatura automatica dei disturbi forestali avvenuti in Italia negli ultimi 35 anni utilizzando immagini Landsat e Google Earth Engine*. L'Italia Forestale e Montana, 77 (1): 5-21. <https://dx.doi.org/10.36253/ifm-1616>

Received: 19/01/2022 **Revised version:** 26/02/2022 **Published online:** 30/03/2022

1. INTRODUZIONE

Gli ecosistemi forestali assorbono nel mondo quasi 3 miliardi di tonnellate di carbonio all'anno, che rappresentano circa il 30% delle emissioni totali associate ai combustibili fossili e alla deforestazione (Canadell e Raupach, 2008). Il surriscaldamento globale porta però nuove pressioni sugli ecosistemi (Abram *et al.*,

2016), aumentando la frequenza e l'intensità dei disturbi forestali. Per questo è importante tutelare e gestire le foreste in modo sostenibile e monitorare nel tempo i disturbi forestali come tagliate (Francini *et al.*, 2022), incendi (Moriondo *et al.*, 2006; Stephens *et al.*, 2014; FAO, 2020), danni da vento (Chirici *et al.*, 2019; Senf e Seidl, 2021), danni dovuti a gelo o siccità (Millar e Stephenson, 2015; Senf *et*

al., 2020) e danni dovuti all'attacco di patogeni (Seidl *et al.*, 2011; Parisi *et al.*, 2020).

Una gestione sostenibile implica, tra l'altro, un rapporto equilibrato tra prelievi e incremento (<https://foresteurope.org/>). Per poter essere considerato sostenibile, il prelievo annuale di legna e legname da una foresta non deve superare la sua capacità di accrescimento nello stesso periodo (Ciancio e Nocentini, 2011; Nocentini *et al.*, 2017). D'altra parte, mentre la deforestazione determina un cambiamento permanente dell'uso del suolo ed ha una evidente connotazione negativa, i prelievi legnosi, se eseguiti in un contesto di pianificazione forestale, possono favorire lo sviluppo delle economie locali (Riccioli *et al.*, 2020), riducono lo sviluppo e la diffusione degli incendi boschivi (Drever *et al.*, 2006; Patto e Rosa, 2022), aumentano la resilienza e la biodiversità degli ecosistemi semplificati (Dynesius e Hylander, 2007; Nocentini, 2015), accrescono la capacità delle foreste di assorbire carbonio (Nabuurs, 1996; Cannell, 2003; Keith *et al.*, 2009). Anche per questi motivi, molti paesi hanno incluso la gestione forestale tra le azioni volte a limitare le emissioni di gas serra nell'ambito del Protocollo di Kyoto e delle sue successive modificazioni (Tognetti *et al.*, 2022).

A scala nazionale il monitoraggio forestale viene condotto attraverso gli inventari forestali nazionali, che forniscono statistiche aggiornate sullo stato e la consistenza delle foreste con cadenza periodica, generalmente ogni 10 anni. Per esempio, in Italia sono disponibili statistiche relative agli anni 1985, 2005 e 2015. Tuttavia, nel nostro paese non sono disponibili statistiche annuali associate a cartografie che descrivono la distribuzione spaziale dei disturbi forestali sul territorio nazionale (Ascoli *et al.*, 2021).

Il telerilevamento offre un'alternativa efficace ai metodi tradizionali per la mappatura dei disturbi forestali (Corona e Marchetti, 2007). In questo senso, la missione satellitare Landsat è

particolarmente interessante, fornendo immagini dal 1985 e con un tempo di rivisitazione di 15 giorni. L'analisi di queste immagini con appositi algoritmi basati su procedure automatiche (Kennedy *et al.*, 2010; Hansen *et al.*, 2013) consente di mappare i disturbi forestali dovuti, principalmente, ad utilizzazioni boschive, incendi, danni da vento e danni causati da siccità, gelate e attacchi di patogeni. Recentemente, sono stati sviluppati specifici algoritmi volti all'identificazione di tali disturbi negli ambienti mediterranei (Chirici *et al.*, 2020; Francini *et al.*, 2020; Giannetti *et al.*, 2020). Fra questi, *Three Indices Three Dimensions* (3I3D) è risultato particolarmente efficace, con errori di omissione prossimi a zero ed errori di commissione inferiori al 5.8% (Francini *et al.*, 2022).

Oltre alle sofisticate tecnologie satellitari e ai progressi nello sviluppo di algoritmi per l'identificazione automatica dei disturbi forestali, sono diventate recentemente operative piattaforme di calcolo in *cloud* ad alte prestazioni (come Sentinel Hub, Open Data Cube, SEPAL, JEODPP, pipsCloud e OpenEO). Tali piattaforme permettono di applicare algoritmi complessi su aree molto vaste (Woodcock *et al.*, 2008). *Google Earth Engine* (GEE) (Gorelick *et al.*, 2017), in particolare, possiede una serie di pregi - fra i quali semplicità nella programmazione e potenza di calcolo - che lo rendono preferibile alle altre piattaforme (Gomes *et al.*, 2020). GEE permette di elaborare gratuitamente un enorme catalogo di immagini, il quale viene continuamente aggiornato con le immagini acquisite dai vari satelliti di osservazione della terra. Per sfruttare tali potenzialità, l'algoritmo 3I3D è stato implementato su GEE (Francini *et al.*, 2022) per mappare i disturbi forestali su vasta scala e su lunghi periodi di tempo.

Il presente lavoro si pone come obiettivo la mappatura dei disturbi forestali avvenuti an-

nualmente in Italia nel periodo che intercorre tra il 1985 e il 2019 utilizzando immagini satellitari Landsat e l'algoritmo 3I3D.

Nel prossimo paragrafo (2) vengono descritte l'area di studio (2.1) e la procedura di mappatura automatica dei disturbi forestali attraverso l'elaborazione di immagini Landsat (2.2). In seguito (2.3), viene presentato il database di riferimento e il metodo statistico utilizzato per calcolare la performance del modello e quindi l'accuratezza delle mappe. Nei risultati (sezione 3) sono presentati i dati complessivi sui disturbi forestali individuati, la loro distribuzione spaziale e temporale, nonché la quantificazione degli errori. Nella sezione 4, i risultati sono infine discussi per evidenziare i vantaggi e i limiti del metodo proposto, le potenzialità applicative e i possibili sviluppi futuri mentre nel paragrafo 5 riportiamo le conclusioni.

2. MATERIALI E METODI

2.1 Area di studio

L'area di studio è la superficie forestale italiana (10,261 milioni di ha ovvero il 34% del territorio nazionale), delimitata tramite una maschera del bosco sviluppata da D'Amico *et al.*, (2021). La maschera forestale d'Italia è stata costruita unendo le carte forestali e di uso del suolo prodotte a livello regionale per fotointerpretazione di ortofoto digitali acquisite tra il 2000 e il 2016 (Figura 1).

La maschera del bosco, disponibile in formato raster con una risoluzione spaziale di 1 m, è stata riclassificata alla risoluzione di 30 metri per essere congrua con la geometria delle immagini Landsat utilizzate in questo lavoro.

2.2 Mappatura automatica dei disturbi forestali in Italia dal 1985 al 2019

La mappatura dei disturbi forestali (tagliate, danni da vento, incendi, danni dovuti a gelo o siccità e danni biotici) avvenuti annualmente in Italia dal 1985 al 2019 è stata eseguita utilizzando 3I3D (Francini *et al.*, 2021a; Francini *et al.*, 2021b), un algoritmo implementato recentemente su GEE (Francini *et al.*, 2022), ovvero una piattaforma *cloud* che permette di processare migliaia di immagini telerilevate in tempi rapidi (Gorelick *et al.*, 2017). 3I3D identifica i disturbi forestali analizzando, in tre anni consecutivi, l'andamento di tre indici di attività fotosintetica (3I) utilizzati come assi di uno spazio tridimensionale (3D). I tre indici sono (i) *Normalized Difference Moisture* (NDMI) (Jin e Sader, 2005), (ii) *Normalized Burn Ratio* (NBR) e (iii) *Moisture Stress Index* (MSI). In questo lavoro i disturbi forestali sono stati mappati utilizzando un'unità minima cartografabile di 5 pixel Landsat (circa 0,5 ha). Le immagini Landsat, disponibili su GEE (<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat>), contengono 3 bande

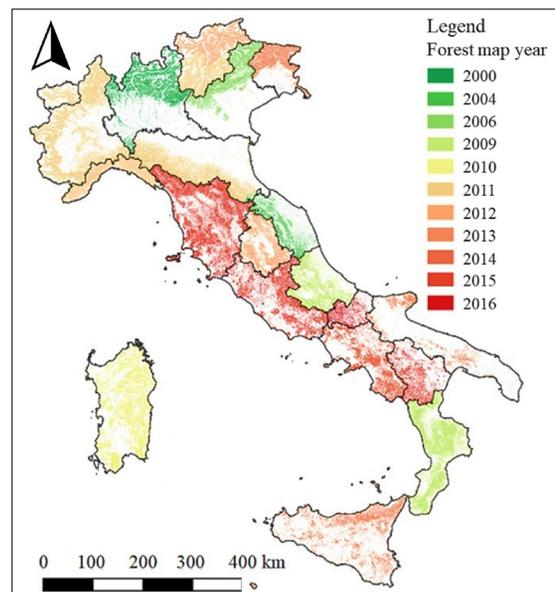


Figura 1 - Area di studio e maschera del bosco.

nello spettro del visibile (blu, verde e rosso), una banda nel vicino infrarosso (nir), 2 bande dell'infrarosso a onde corte (swir1, swir2) e una maschera, prodotta utilizzando l'algoritmo CF-MASK (Foga *et al.*, 2017), che permette di identificare e rimuovere dalle immagini nuvole, ombre, acqua e neve. Maggiori informazioni sulle bande e sul dato Landsat sono disponibili su GEE (https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC08_C02_T1_L2#bands).

Per identificare i disturbi forestali sono necessarie immagini prive di nuvole che coprono l'intera area di studio. Queste immagini, dette *composite*, sono state ottenute utilizzando l'algoritmo denominato *Best Available Pixel* (BAP) (White *et al.*, 2014), implementato di recente su GEE (https://code.earthengine.google.com/?accept_repo=users/sfrancini/bap). Una dettagliata descrizione del BAP è fornita in Griffiths *et al.*, (2013) e White *et al.*, (2014), mentre la documentazione della applicazione su GEE e delle indicazioni sui vari parametri sono disponibili su GitHub (<https://github.com/saveriofrancini/bap>). In breve, per produrre dei *composite* BAP per ogni anno dal 1985 al 2019, abbiamo selezionato tutte le immagini Landsat con una copertura nuvolosa inferiore al 40% acquisite in Italia dal primo di giugno al 31 di agosto e abbiamo eliminato da ogni immagine i pixel coperti da nuvole utilizzando la relativa maschera (Zhu e Woodcock, 2012; Zhu *et al.*, 2015). Per ogni anno, il BAP seleziona fra le immagini disponibili i pixel "migliori" sulla base di diversi criteri, fra i quali: (i) la vicinanza fra la data di acquisizione dell'immagine e la data centrale della finestra temporale utilizzata per selezionare le immagini (nel nostro caso 15 luglio), (ii) distanza del pixel da nuvole e ombre e (iii) opacità atmosferica del pixel. Utilizzando il BAP sono stati ottenuti *composite* privi di nuvole per ogni anno dal 1985 al 2019. I *composite* sono poi stati elaborati con l'algoritmo 3I3D per ottenere 35

mappe annuali dei disturbi forestali avvenuti in Italia. Producendo una mappa dei disturbi per ogni anno dal 1985 al 2019 è stato possibile mappare più disturbi forestali avvenuti in diversi anni in uno stesso pixel.

2.3 Calcolo della performance di 3I3D

Per valutare l'accuratezza delle 35 mappe dei disturbi forestali prodotte con 3I3D, è stato utilizzato un database di riferimento (Chirici *et al.*, 2020) che contiene le utilizzazioni forestali eseguite tra il 1999 e il 2016 su una superficie complessiva di 9459 ha. Queste sono state fotointerpretate in Toscana, in 3 celle di lato 15 km (Figura 2), che complessivamente includono una superficie boscata di 47.000 ha. La procedura di fotointerpretazione seguita è quella proposta da Kennedy *et al.*, (2010) rivisitata da Cohen *et al.* (2018), mentre l'unità minima cartografabile considerata è 0,1 ha.

Confrontando le mappe dei disturbi forestali con il database di riferimento, sono state costruite le matrici di confusione per ogni anno dal 1999 al 2016, dalle quali è stato possibile calcolare (i) i veri positivi, corrispondenti al numero di pixel correttamente classificati come disturbo forestale, (ii) i veri negativi, corrispondenti al numero di pixel correttamente classificati come bosco non disturbato, (iii) i falsi positivi, corrispondenti al numero di pixel classificati erroneamente come disturbo forestale e (iv) i falsi negativi, corrispondenti al numero di pixel classificati erroneamente come non disturbati. Tali parametri sono stati utilizzati per calcolare gli errori di omissione e commissione (Kubat *et al.*, 1998).

3. RISULTATI

Complessivamente sono stati identificati 1.793.802 disturbi forestali avvenuti in Italia dal 1985 al 2019, corrispondenti a circa 3

milioni di ha (il 27% della superficie forestale italiana).

La superficie media dei disturbi forestali identificati è di 1,72 ha mentre la superficie mediana è pari a 0,83 ha. La superficie dei disturbi forestali varia da 27.923 ha nel 2014 (16.247 disturbi forestali identificati) a 261.733 ha nel 1985 (corrispondenti a 141.132 disturbi forestali) (Figura 2).

Si è riscontrata una buona congruenza tra i disturbi forestali presenti nel database di riferimento e quelli identificati automaticamente utilizzando 3I3D e le immagini Landsat (Figura 3). Gli errori di commissione riscontrati oscillano tra il 29% nel 2012 e il 65% nel 2001 mentre gli errori di omissione sono compresi tra il 18% nel 2014 e l'88% nel 2003.

La superficie dei disturbi forestali identificati varia molto da regione a regione (Figura 4). Nel corso dei 35 anni esaminati, la Calabria è la regione dove si sono registrati i disturbi maggiori, pari al 42,6% (408.779 ha) della superficie forestale regionale, seguita dalla Sicilia con il 37,5% (272.500 ha) del territorio forestale regionale

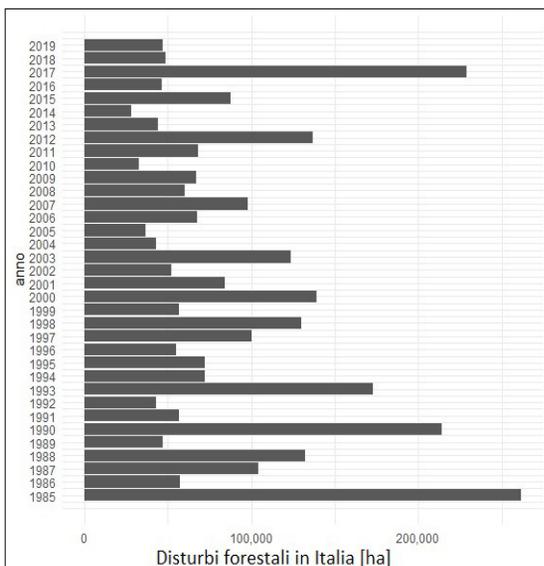


Figura 2 - Superficie dei disturbi forestali avvenuti in Italia per ogni anno dal 1985 al 2019.

interessato da disturbi. Al contrario, i valori più contenuti in termini di percentuale rispetto alla superficie forestale regionale si riscontrano in Friuli Venezia Giulia, Valle d'Aosta e Trentino Alto Adige, con valori rispettivamente pari al 4,77% (21.005 ha), 4,81% (6.938 ha) e 5,28% (52.223 ha) (Figura 5 in alto).

Facendo un focus sulla Toscana (Figura 5 in basso) - regione per la quale è disponibile il dataset di riferimento - è possibile notare una notevole variabilità fra le varie Province, anche a causa della differente estensione della superficie forestale nei diversi territori. Nella provincia di Grosseto, per esempio, abbiamo calcolato una superficie media di 3029 ha di disturbi forestali per anno, ma con una notevole variabilità nei vari anni. Infatti, in tale provincia, nel 2012 e nel 2017, la superficie dei disturbi forestali è stata particolarmente elevata, a causa di numerosi incendi che hanno interessato le foreste grossetane in quegli anni. Il dettaglio per ogni Provincia, mostrato per la Toscana in Figura 5, è disponibile in appendice per ogni altra regione italiana.

In termini di superficie dei disturbi forestali, i risultati, non sembrano presentare un trend temporale univoco. A livello provinciale, i disturbi forestali di maggiore estensione si sono infatti verificati nella prima parte del periodo esaminato (Figura 6 a sinistra), con il 37% dei disturbi verificatisi nei primi 10 anni.

4. DISCUSSIONE

Le foreste contribuiscono a ridurre le emissioni di gas serra, contengono gran parte della biodiversità terrestre e svolgono importanti funzioni ecosistemiche. Per questi motivi la protezione degli ecosistemi forestali e la loro gestione sostenibile hanno un ruolo fondamentale all'interno del *Green Deal* e della strategia Europea per la lotta ai cambiamenti climatici.

Monitorare gli ecosistemi forestali - e più nello specifico i disturbi forestali e i prelievi - è di fondamentale importanza per capire il livello di gestione di un paese e la risposta degli ecosistemi forestali al surriscaldamento globale. Tuttavia, questo tipo di monitoraggio viene svolto con sistemi standardizzati e carenti di aggiornamenti innovativi, che producono, in molti paesi Europei e in Italia, statistiche ogni 10 anni circa. In questo contesto, il telerilevamento rappresenta uno strumento particolarmente utile per il monitoraggio forestale su scala vasta, anche grazie allo sviluppo scientifico e ad evoluti sistemi di calcolo in *cloud* come GEE.

In questo lavoro è stato mostrato un esempio delle potenzialità legate all'utilizzo dei dati telerilevati per l'identificazione automatica dei disturbi forestali. In particolare, sono stati mappati i disturbi avvenuti ogni anno in Italia dal 1985 al 2019 utilizzando immagini Landsat e una procedura automatica (Francini *et al.*, 2021a) implementata su GEE (Francini *et al.*, 2022). Contrariamente a quanto riportato in altri studi condotti a scala globale (Hansen *et al.*, 2013) e a livello Europeo (Senf e Seidl, 2020; Forzieri *et al.*, 2021), in Italia non è stato riscontrato un aumento nel tempo dei disturbi forestali. Il 54% dei disturbi è risultato infatti concentrato nella prima metà del periodo esa-

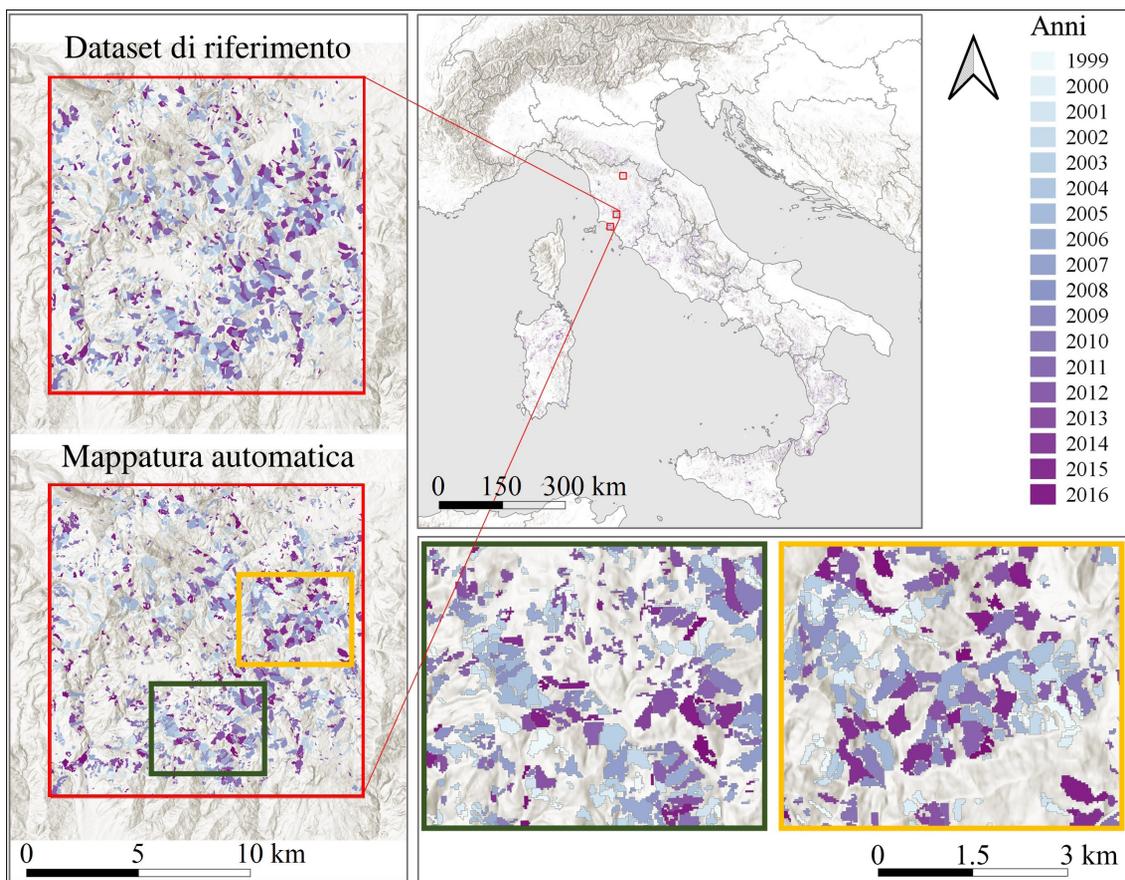


Figura 3 - In alto a destra, mappa dei disturbi forestali avvenuti in Italia e posizione delle 3 celle del database di riferimento. A sinistra, un confronto fra il database di riferimento (in alto) e la mappa prodotta automaticamente utilizzando 3I3D (in basso). In basso a destra, due zoom su delle tagliate mappate automaticamente.

minato e si tratta di fenomeni riconducibili soprattutto a stagioni invernali caratterizzate da particolari gelate (vedi 1985 e 1990 in Figura 2). Più recentemente, a causa di alcuni eventi estremi che hanno colpito il territorio italiano si sono verificati numerosi disturbi che sono stati individuati efficacemente dalla metodologia utilizzata in questo studio. Per esempio, la tempesta Vaia, avvenuta tra sabato 27 e martedì 30 ottobre 2018, ha causato ingenti danni nell'area alpina interessando i territori forestali di 494 comuni (Chirici *et al.*, 2018). Le regio-

ni principalmente colpite sono state il Veneto e il Trentino Alto Adige. Per queste due regioni i nostri risultati mostrano un picco della superficie forestale disturbata nell'anno 2019 (Figura 4). È importante precisare che le mappe dei disturbi forestali sono aggiornate nel periodo estivo, per questo motivo i danni prodotti dalla tempesta Vaia sono attribuiti all'anno 2019. Nonostante la tempesta Vaia abbia causato danni su ampi territori del nord est d'Italia, la superficie disturbata a livello nazionale risulta in linea con quella registrata in altri anni del pe-

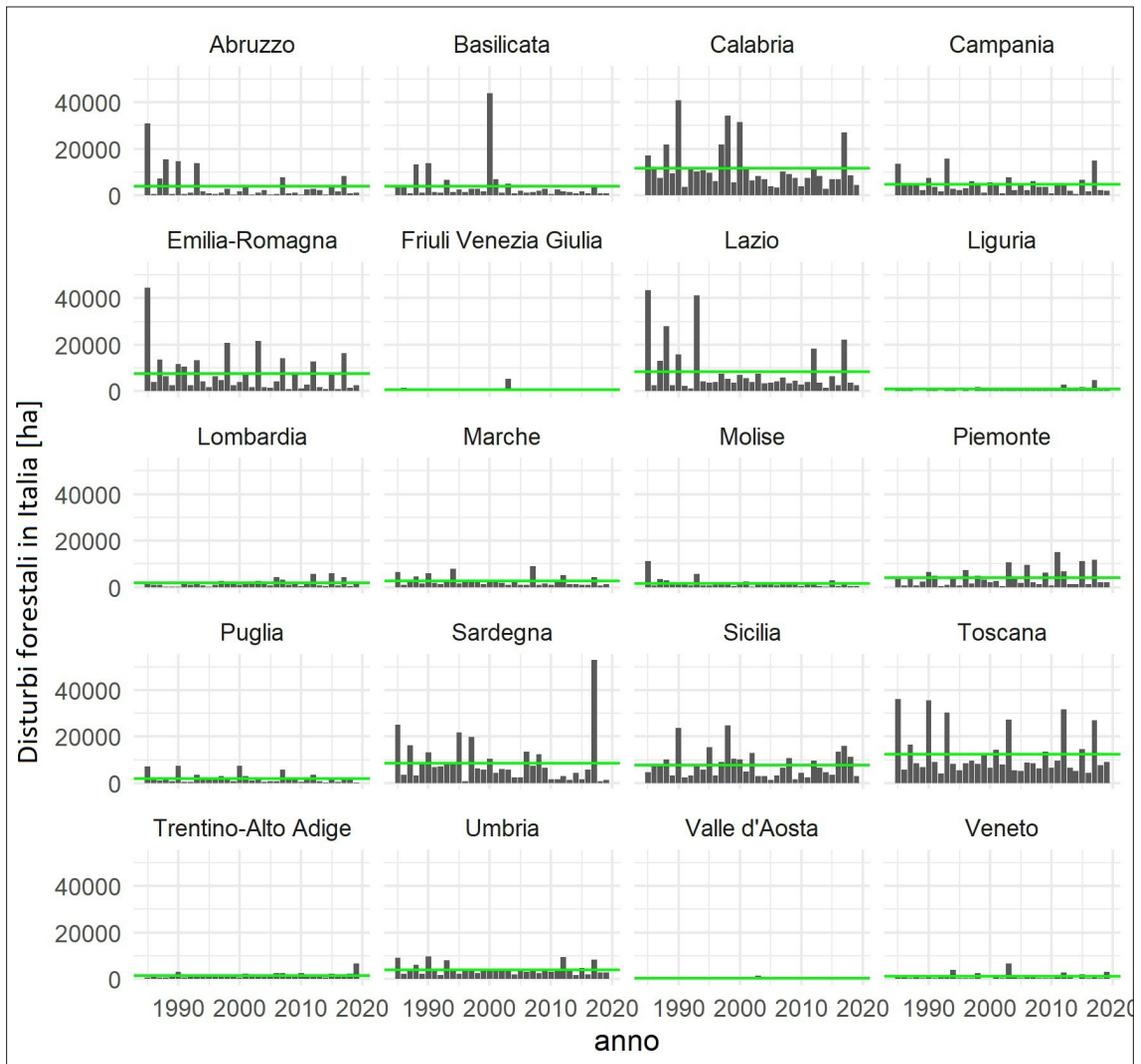


Figura 4 - Superficie dei disturbi forestali avvenuti ogni anno in ogni regione. La linea verde indica la media.

riodo esaminato. Situazione ben diversa è quella del 2017, quando una prolungata siccità estiva favorì lo sviluppo di incendi in tutta la penisola. Il 2017, insieme al 1985, sono gli anni in cui abbiamo individuato la maggiore superficie dei disturbi forestali in Italia (Figura 2).

Le differenze fra i risultati ottenuti in questo studio e quelli riportati in altri lavori di mappatura dei disturbi forestali dipendono da numerosi fattori, fra i quali le diverse accuratèzze che possono raggiungere prodotti disponibili su scala mondiale (Hansen *et al.*, 2013) o europea (Senf e Seidl, 2020) rispetto a prodotti calibrati specificatamente per un singolo Paese

(come è stato fatto in questo lavoro). Un'ulteriore giustificazione alle differenze riscontrate, è dovuta alla natura del dato. Infatti, mentre 3I3D produce una mappa per ogni anno, permettendo di identificare più disturbi avvenuti per uno stesso pixel, la mappa di Hansen *et al.* (2013) - disponibile su scala globale - identifica solo l'ultimo cambiamento forestale avvenuto e quella di Senf e Seidl (2020) - disponibile per tutta Europa - prende in considerazione soltanto il cambiamento forestale con il maggior grado di severità. L'algoritmo 3I3D, è stato sviluppato per garantire una alta sensibilità alle variazioni ed è quindi in grado di identificare

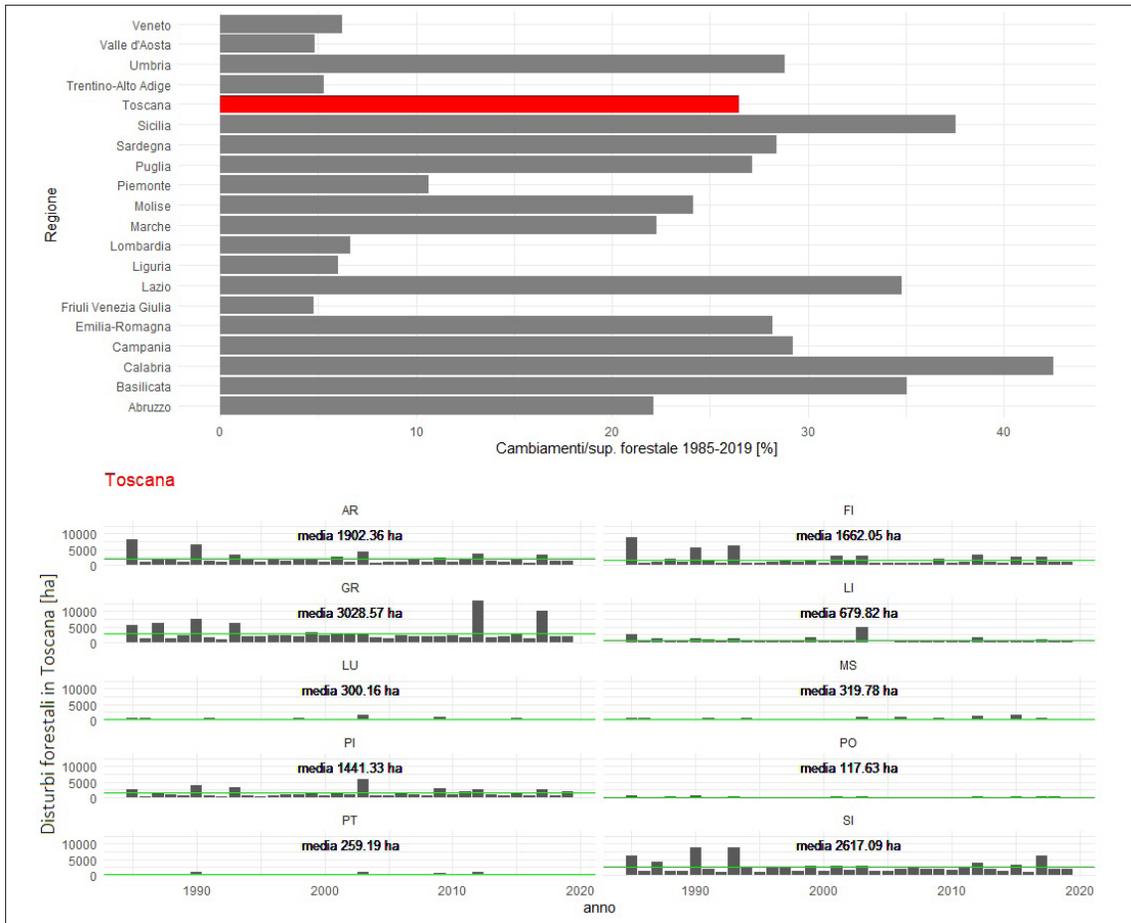


Figura 5 - In alto, percentuale del totale dei disturbi forestali avvenuti in ciascuna regione dal 1985 al 2019 rispetto alla superficie forestale regionale. In basso, la superficie dei disturbi forestali avvenuti in Toscana ogni anno e in ogni provincia. La linea verde indica la media.

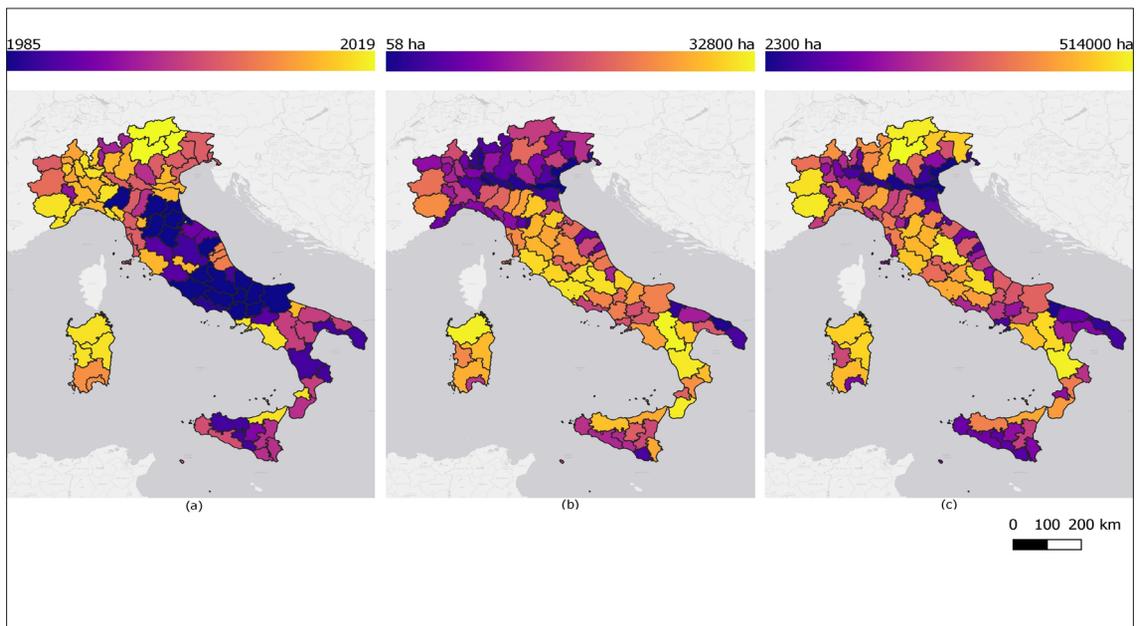


Figura 6 - Disturbi forestali a livello provinciale. Anno con più disturbi forestali (a sinistra), superficie dei disturbi forestali negli stessi anni (al centro) e superficie forestale di ogni provincia (a destra).

anche disturbi forestali che non implicano una perdita di biomassa ma solo uno stato di sofferenza, anche temporaneo, dell'ecosistema forestale (come può avvenire per gelate o eventi di siccità). Altri metodi di analisi potrebbero invece identificare una minore percentuale di questo tipo di disturbi forestali. Infatti, è noto che la *Global Forest Change map* (Hansen *et al.*, 2013) e la mappa di Senf e Seidl (2020) identificano solo una parte dei tagli eseguiti nei boschi cedui rispetto agli algoritmi specificamente sviluppati per ecosistemi Mediterranei (Giannetti *et al.*, 2020) e rispetto a 3I3D (Francini *et al.*, 2021). Questo è dovuto alla rapida ripresa vegetativa che caratterizza i cedui rispetto a quella di altri ecosistemi forestali come le foreste boreali (Chirici *et al.*, 2020). Infine, la natura dell'intervento selvicolturale può condizionare l'efficacia degli algoritmi di identificazione automatica dei disturbi. Infatti, diradamenti di intensità bassa o moderata in genere non comportano variazioni a livello di chioma tali da essere visibili dai dati satellitari.

Le mappe dei disturbi forestali prodotte in questo lavoro forniscono informazioni utili per il monitoraggio forestale. Tuttavia, la metodologia utilizzata non consente di discriminare le diverse tipologie di disturbo come i prelievi, gli incendi, i danni da insetti, i danni vento e i danni dovuti al gelo o alla siccità. Per potere differenziare i tipi di disturbo forestale riteniamo necessario integrare le metodologie automatiche qui proposte con rilievi in campo o con altri dati di riferimento acquisiti per fotointerpretazione. Ulteriori studi sono quindi necessari per sviluppare metodologie automatiche per la caratterizzazione dei disturbi forestali.

Un altro interessante ambito non sufficientemente esplorato riguarda l'utilizzo delle mappe dei disturbi forestali per selezionare aree campione dove acquisire dati di riferimento che, insieme ad appositi stimatori, permettano di ottenere stime sufficientemente accurate delle superfici interessate dai disturbi forestali (Francini *et al.*, 2022). Le mappe prodotte automaticamente da immagini telerileva-

te contengono infatti delle imprecisioni e non dovrebbero essere utilizzate direttamente per ottenere statistiche ufficiali. Alcuni errori sono per esempio dovuti a inesattezze nella maschera forestale utilizzata, errori che potrebbero tradursi in disturbi forestali identificati in aree non forestali. Un ulteriore problema noto in letteratura (Hermosilla *et al.*, 2015) è quello legato alla difficoltà di identificare correttamente i margini dei disturbi forestali, i quali possono essere spesso sottostimati. Questo tipo di problema è stato riscontrato anche in 3I3D ed è soprattutto legato alla risoluzione spaziale delle immagini telerilevate. Nonostante lo sviluppo scientifico e il progresso tecnologico che hanno caratterizzato il campo del telerilevamento soprattutto negli ultimi anni, l'enorme variabilità nei fenomeni naturali implica la presenza di un margine di incertezza nelle mappe prodotte attraverso procedure completamente automatiche (Chirici *et al.*, 2020). Questo fa sì che le mappe non debbano essere utilizzate direttamente per produrre statistiche ma piuttosto rappresentano uno strumento efficace per guidare la selezione di aree dove concentrare le analisi, aumentando la precisione delle stime delle superfici dei disturbi forestali e riducendo contemporaneamente gli sforzi e le spese necessarie per l'acquisizione dei dati (Olofsson *et al.*, 2014; Marcelli *et al.*, 2020).

5. CONCLUSIONI

Gli ecosistemi forestali sono una componente fondamentale nel ciclo del carbonio e svolgono un ruolo importante nella lotta al cambiamento climatico. I cambiamenti climatici, però, rischiano allo stesso tempo di minacciare gli ecosistemi forestali e i benefici che le foreste erogano per il benessere dei cittadini. La gestione sostenibile delle foreste e il monitoraggio forestale giocano un ruolo

fondamentale e il telerilevamento, unitamente a nuove piattaforme di calcolo a elevate prestazioni e a nuovi sofisticati algoritmi, permette di produrre tempestivamente mappe accurate dei disturbi forestali.

In questo lavoro sono stati mappati circa 1,8 milioni di disturbi forestali avvenuti in Italia dal 1985 al 2019 fornendo (i) informazioni che contribuiscono ad accrescere le conoscenze sulle foreste italiane e (ii) mappe annuali dei disturbi forestali che possono essere impiegate per sviluppare ulteriori indagini di supporto alla produzione di statistiche forestali.

In conclusione, lo studio dimostra le potenzialità delle applicazioni del telerilevamento a supporto del monitoraggio forestale e della produzione di statistiche ufficiali sui prelievi e sui disturbi forestali nel nostro paese.

RIASSUNTO

Le foreste svolgono un ruolo fondamentale per il ciclo del carbonio e la lotta ai cambiamenti climatici. Il monitoraggio di lungo periodo delle dinamiche forestali rappresenta un elemento chiave per conoscere le trasformazioni che avvengono nelle foreste e per capire l'evoluzione in atto negli ecosistemi forestali anche alla luce dei cambiamenti climatici.

In questo lavoro viene presentata una metodologia di analisi volta a mappare i disturbi forestali avvenuti ogni anno in Italia dal 1985 al 2019, utilizzando procedure automatiche e immagini satellitari Landsat. I disturbi forestali analizzati includono tagliate, incendi, danni da vento, danni dovuti a gelo o siccità e danni dovuti all'attacco di patogeni. Complessivamente, nel periodo di osservazione sono stati identificati circa 1,8 milioni di disturbi forestali. La superficie forestale interessata annualmente dai disturbi varia tra 27.923 ha nel 2014 e 261.733 ha nel 1985. La maggior parte dei disturbi forestali è stata identificata in Sicilia e Calabria. Gli errori di commissione oscillano tra il 29% nel 2012 e il 65% nel 2001 mentre gli errori di omissione variano tra il 18% nel 2014 a l'88% nel 2003.

I risultati prodotti in questo lavoro contribuiscono ad accrescere le conoscenze sulla estensione e distribuzione spaziale dei disturbi che hanno interessato an-

nualmente le foreste italiane in un arco temporale di 35 anni. Tali informazioni costituiscono una base di dati utile per futuri lavori e approfondimenti. La metodologia applicata rappresenta uno strumento utile per supportare la produzione di statistiche ufficiali sui disturbi forestali a scala nazionale.

BIBLIOGRAFIA

- Abram N.J., McGregor H.V., Tierney J.E., Evans M.N., McKay N.P., Kaufman, D.S., 2016 - *Early onset of industrial-era warming across the oceans and continents*. *Nature*, 536: 411-418. <https://doi.org/10.1038/nature19082>
- Ascoli D., Chirici G., Francini S., Marchetti M., Motta R., Vacchiano G., 2021 - *Forest harvesting in Europe: a healthy scientific debate*. *Forest@ - Rivista di Selvicoltura ed Ecologia Forestale*, 18: 35-37. <https://doi.org/10.3832/efor3892-018>
- Canadell J.G., Raupach M.R., 2008 - *Managing Forests for Climate Change Mitigation*. *Science*, 320 (5882): 1456-1457. <https://doi.org/10.1126/science.1155458>
- Cannell M.G.R., 2003 - *Carbon sequestration and biomass energy offset: theoretical, potential and achievable capacities globally, in Europe and the UK*. *Biomass and Bioenergy*, 24: 97-116. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00103-4](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00103-4)
- Chirici G., Giannetti F., McRoberts R.E., Travaglini D., Pecchi M., Maselli F., Chiesi M., Corona P., 2020 - *Wall-to-wall spatial prediction of growing stock volume based on Italian National Forest Inventory plots and remotely sensed data*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 84: 101959. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101959>
- Chirici G., Giannetti F., Travaglini D., Nocentini S., Francini S., D'Amico G., Calvo E. *et al.*, 2019 - *Forest damage inventory after the "Vaia" storm in Italy*. *Forest@ - Rivista di Selvicoltura ed Ecologia Forestale*, 16: 3-9. <https://doi.org/10.3832/efor3070-016>
- Ciancio O., Nocentini S., 2011 - *Biodiversity conservation and systemic silviculture: Concepts and applications*. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspect Plant Biology*, 145: 411-418. <https://doi.org/10.1080/11263504.2011.558705>
- Cohen W.B., Yang Z., Healey S.P., Kennedy R.E., Gorelick N., 2018 - *A LandTrendr multispectral ensemble for forest disturbance detection*. *Remote Sensing of Environment*, 205: 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.015>
- Corona P., Marchetti M., 2007 - *Outlining multi-purpose forest inventories to assess the ecosystem approach in forestry*. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspect Plant Biology*, 141: 243-251. <https://doi.org/10.1080/11263500701401836>
- D'Amico G., Vangi E., Francini S., Giannetti F., Nicolaci A., Travaglini D., Massai L. *et al.*, 2021 - *Are we ready for a National Forest Information System? State of the art of forest maps and airborne laser scanning data availability in Italy*. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 14: 144-154. <https://doi.org/10.3832/ifor3648-014>
- Drever C.R., Peterson G., Messier C., Bergeron Y., Flannigan M., 2006 - *Can forest management based on natural disturbances maintain ecological resilience?* *Canadian Journal of Forest Research*, 36: 2285-2299. <https://doi.org/10.1139/x06-132>
- Dynesius M., Hylander K., 2007 - *Resilience of bryophyte communities to clear-cutting of boreal stream-side forests*. *Biological Conservation*, 135: 423-434. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.10.010>
- FAO, 2020 - *Global Forest Resources Assessment 2020*.
- Foga S., Scaramuzza P.L., Guo S., Zhu Z., Dilley R.D., Beckmann T., Schmidt G.L. *et al.*, 2017 - *Cloud detection algorithm comparison and validation for operational Landsat data products*. *Remote Sensing of Environment*, 194: 379-390. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.026>
- Forzieri G., Girardello M., Ceccherini G., Spinoni J., Feyen L., Hartmann H., Beck P.S.A. *et al.*, 2021 - *Emergent vulnerability to climate-driven disturbances in European forests*. *Nature Communications*, 12: 1081. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21399-7>
- Francini S., D'Amico G., Mencucci M., Seri G., Gravano E., Chirici G., 2021a - *Remote sensing and automatic procedures: useful tools to monitor forest harvesting*. *Forest@ - Rivista di Selvicoltura ed Ecologia Forestale*, 18: 27-34. <https://doi.org/10.3832/efor3835-018>
- Francini S., McRoberts R.E., D'Amico G., Coops N.C., Hermosilla T., White J.C., Wulder M.A. *et al.*, 2022 - *An open science and open data approach for the statistically robust estimation of forest disturbance areas*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 106: 102663. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102663>
- Francini S., McRoberts R.E., Giannetti F., Marchetti M., Scarascia Mugnozza G., Chirici G., 2021b - *The Three*

- Indices Three Dimensions (3I3D) algorithm: a new method for forest disturbance mapping and area estimation based on optical remotely sensed imagery.* International Journal of Remote Sensing, 42: 4697-4715. <https://doi.org/10.1080/01431161.2021.1899334>
- Francini S., McRoberts R.E., Giannetti F., Mencucci M., Marchetti M., Scarascia Mugnozza G., Chirici G., 2020 - *Near-real time forest change detection using PlanetScope imagery.* European Journal of Remote Sensing, 53: 233-244. <https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1806734>
- Giannetti F., Pegna R., Francini S., McRoberts R.E., Travaglini D., Marchetti M., Scarascia Mugnozza G., Chirici G., 2020 - *A New Method for Automated Clearcut Disturbance Detection in Mediterranean Coppice Forests Using Landsat Time Series.* Remote Sensing, 12, 3720. <https://doi.org/10.3390/rs12223720>
- Gomes V., Queiroz G., Ferreira K., 2020 - *An Overview of Platforms for Big Earth Observation Data Management and Analysis.* Remote Sensing, 12: 1253. <https://doi.org/10.3390/rs12081253>
- Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R., 2017 - *Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone.* Remote Sensing of Environment, 202: 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Griffiths P., van der Linden S., Kuemmerle T., Hostert P., 2013 - *A Pixel-Based Landsat Compositing Algorithm for Large Area Land Cover Mapping.* IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 6: 2088-2101. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2228167>
- Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D. et al., 2013 - *High-Resolution Global Maps of 21st Century Forest Cover Change.* Science, 342 (6160): 850-853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Hermosilla T., Wulder M.A., White J.C., Coops N.C., Hobart G.W., 2015 - *Regional detection, characterization, and attribution of annual forest change from 1984 to 2012 using Landsat-derived time-series metrics.* Remote Sensing of Environment, 170: 121-132. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.09.004>
- Jin S., Sader S.A., 2005 - *MODIS time-series imagery for forest disturbance detection and quantification of patch size effects.* Remote Sensing of Environment, 99: 462-470. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.09.017>
- Keith H., Mackey B., Berry S., Lindenmayer D., Gibbons P., 2009 - *Estimating carbon carrying capacity in natural forest ecosystems across heterogeneous landscapes: addressing sources of error.* Global Change Biology, 16 (11): 2971-2989. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02146.x>
- Kennedy R.E., Yang Z., Cohen W.B., 2010 - *Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr - Temporal segmentation algorithms.* Remote Sensing of Environment, 114: 2897-2910. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.008>
- Kubat M., Holte R.C., Matwin S., 1998 - *Machine learning for the detection of oil spills in satellite radar images.* Machine Learning, 30: 195-215. <https://doi.org/10.1023/a:1007452223027>
- Marcelli A., Mattioli W., Puletti N., Chianucci F., Gianelle D., Grotti M., Chirici G. et al., 2020 - *Large-scale two-phase estimation of wood production by poplar plantations exploiting Sentinel-2 data as auxiliary information.* Silva Fennica, 54. <https://doi.org/10.14214/sf.10247>
- Millar C.I., Stephenson, N.L., 2015 - *Temperate forest health in an era of emerging megadisturbance.* Science, 349 (6250): 823-826. <https://doi.org/10.1126/science.aaa9933>
- Moriondo M., Good P., Durao R., Bindi M., Gianakopoulos C., Corte-Real J., 2006 - *Potential impact of climate change on fire risk in the Mediterranean area.* Climate Research, 31: 85-95. <https://doi.org/10.3354/cr031085>
- Nabuurs G.-J., 1996 - *Significance of wood products in forest sector carbon balances* (MJ Apps & DT Price, A c. di). Forest eco. Springer, Berlin.
- Nocentini S., 2015 - *Managing forests as complex adaptive systems: an issue of theory and method.* In: Atti del Secondo Congresso Internazionale di Selvicoltura = Proceedings of the Second International Congress of Silviculture. Accademia Italiana di Scienze Forestali, p. 913-918.
- Nocentini S., Buttoud G., Ciancio O., Corona P., 2017 - *Managing forests in a changing world: the need for a systemic approach. A review.* Forest Systems, 26, eR01. <https://doi.org/10.5424/fs/2017261-09443>
- Olofsson P., Foody G.M., Herold M., Stehman S.V., Woodcock C.E., Wulder M.A., 2014 - *Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change.* Remote Sensing of Environment, 148: 42-57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- Parisi F., Frate L., Lombardi F., Tognetti R., Campanaro A., Biscaccianti A.B., Marchetti M., 2020 - *Diversity patterns of Coleoptera and saproxylic communities in unmanaged forests of Mediterranean mountains.*

- Ecological Indicators, 110, 105873. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105873>.
- Patto J.V., Rosa R., 2022 - *Adapting to frequent fires: Optimal forest management revisited*. Journal of Environmental Economics and Management revisited, 111, 102570. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2021.102570>
- Riccioli F., Fratini R., Marone E., Fagarazzi C., Calderisi M., Brunialti G., 2020 - *Indicators of sustainable forest management to evaluate the socio-economic functions of coppice in Tuscany, Italy*. Socio-economic Planning Sciences, 70, 100732. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2019.100732>
- Seidl R., Schelhaas M.-J., Lexer M.J., 2011 - *Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe*. Global Change Biology, 17. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02452.x>
- Senf C., Buras A., Zang C.S., Rammig A., Seidl R., 2020 - *Excess forest mortality is consistently linked to drought across Europe*. Nature Communications, 11, 6200. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19924-1>
- Senf C., Seidl R., 2020 - *Mapping the forest disturbance regimes of Europe*. Nature Sustainability, 4: 63-70. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00609-y>
- Senf C., Seidl R., 2021 - *Storm and fire disturbances in Europe: Distribution and trends*. Global Change Biology, 27: 3605-3619. <https://doi.org/10.1111/gcb.15679>
- Stephens S.L., Burrows N., Buyantuyev A., Gray R.W., Keane R.E., Kubian R., Liu S. *et al.*, 2014 - *Temperate and boreal forest mega-fires: characteristics and challenges*. Frontiers in Ecology and the Environment, 12: 115-122. <https://doi.org/10.1890/120332>
- Tognetti R., Smith M., Panzacchi P., 2022 - *Climate-Smart Forestry in Mountain Regions*. Springer International Publishing, Cham.
- White J.C., Wulder M.A., Hobart G.W., Luthé J.E., Hermosilla T., Griffiths P., Coops N.C. *et al.*, 2014 - *Pixel-Based Image Compositing for Large-Area Dense Time Series Applications and Science*. Canadian Journal of Remote Sensing, 40: 192-212. <https://doi.org/10.1080/07038992.2014.945827>
- Woodcock C.E., Allen R., Anderson M., Belward A., Bindschadler R., Cohen W., Gao F. *et al.*, 2008 - *Free Access to Landsat Imagery*. Science, 320 (5879): 1011-1011. <https://doi.org/10.1126/science.320.5879.1011a>
- Zhu Z., Wang S., Woodcock C.E., 2015 - *Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4-7, 8, and Sentinel 2 images*. Remote Sensing of Environment, 159: 269-277. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.12.014>
- Zhu Z., Woodcock C.E., 2012 - *Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery*. Remote Sensing of Environment, 118: 83-94. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.028>

APPENDICE

Superficie dei disturbi forestali avvenuti nelle province italiane dal 1985 al 2019. La linea verde indica la media.

