

DELIBERAZIONE DELLA GIUNTA REGIONALE 8 agosto 2023, n. 1133

Legge Regionale 21 marzo 2023, n.1. Deliberazione della Giunta Regionale 24 febbraio 2021, n. 207. Adozione dell'Inventario Forestale della Regione Puglia.

L'Assessore all'Agricoltura, Industria agroalimentare, Risorse agroalimentari, Riforma fondiaria, Caccia, Pesca e Foreste, dott. Donato Pentassuglia, sulla base dell'istruttoria espletata dalla responsabile di PO "*Pianificazione e programmazione forestale ed ambientale*", dott.ssa Rosabella Milano, e confermata dal Dirigente della Sezione Gestione Sostenibile e Tutela delle Risorse Forestali e Naturali e, *ad interim*, del Servizio Risorse Forestali, dott. Domenico Campanile, riferisce quanto segue.

PREMESSO che:

Il Decreto legislativo 3 aprile 2018, n. 34 "*Testo unico in materia di foreste e filiere forestali*", stabilisce che le Regioni adottano Programmi forestali regionali e provvedono alla loro revisione periodica in considerazione delle strategie, dei criteri e degli indicatori da esse stesse individuati tra quelli contenuti nella Strategia forestale nazionale (art. 6, comma 2).

La Regione Puglia, in ottemperanza a quanto disposto dal D.Lgs 34/2018 ha in corso di redazione il Programma Forestale Regionale (PFR), con l'obiettivo di definire gli indirizzi regionali per la tutela, la valorizzazione e la gestione attiva del proprio patrimonio forestale e per lo sviluppo del settore e delle sue filiere produttive, ambientali e socio-culturali. Tale redazione scaturisce dalla convenzione stipulata in data 29/11/2017 tra la Regione Puglia e il Centro Politica e Bioeconomia del Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l'Analisi dell'Economia Agraria (CREA-PB), recante "*Riordino e aggiornamento della normativa regionale in materia di foreste e filiere forestali e redazione della proposta di piano forestale regionale*".

Con Deliberazione della Giunta Regionale 24 febbraio 2021, n. 207, avente ad oggetto "*L.R. 18/2000, art. 4, co. 1, lett. e), Redazione dell'Inventario Forestale della Regione Puglia. Approvazione schema di accordo tra Regione Puglia, Agenzia Regionale Attività Irrighe e Forestali (ARIF) e Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI) dell'Università degli Studi di Firenze.*", è stata affidata al Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari e Forestali (DAGRI) dell'Università degli Studi di Firenze la redazione dell' Inventario Forestale della Puglia.

La Legge Regionale 21 marzo 2023, n.1 "*Legge in materia di foreste e filiere forestali e disposizioni diverse*" ha definito il nuovo quadro normativo regionale in materia di foreste e filiere forestali, derivante dall'esigenza di regolamentare il settore coerentemente con quanto disposto dal decreto legislativo del 3 aprile 2018, n. 34, al fine di delineare precisi indirizzi politici di programmazione forestale che rispondano efficacemente alla realtà ambientale e territoriale della Puglia. Nello specifico, l'articolo 37 della suddetta LR 1/2023 recante "*Carta e Inventario forestale*" descrive le caratteristiche tecniche e le finalità dell'inventario forestale e dispone, al comma 5, che "*La Giunta, su proposta della struttura regionale competente, adotta l'Inventario forestale regionale (...).*"

CONSIDERATO che:

L'Accordo di cui alla suddetta DGR 207/2021 è stato firmato dalle parti e acquisito al n. 023737 di repertorio del 20/04/2021.

Il DAGRI ha consegnato la relazione tecnica e i relativi elaborati tecnici relativi all'Inventario Forestale della Puglia, acquisiti al protocollo r_puglia/AOO_036/PROT/27/01/2023/0001268 della Sezione Gestione Sostenibile e Tutela delle Risorse Forestali e Naturali. Il Comitato Tecnico, previsto dall'articolo 7 dell'Accordo tra Regione Puglia, Agenzia Regionale Attività Irrighe e Forestali (ARIF) e Dipartimento di Scienze Agro-

Ambientali e Territoriali (DISAAT) dell'Università degli Studi di Bari, ha validato il lavoro tecnico-scientifico consegnato, riportando le risultanze in apposito verbale, acquisito al protocollo r_puglia/AOO_036/PROT/08/03/2023/0003222, agli atti della Sezione Gestione Sostenibile e Tutela delle Risorse Forestali e Naturali.

Tanto premesso e considerato, si ritiene opportuno procedere all'adozione dell'Inventario Forestale della Regione Puglia e a disporre l'integrazione dei dati relativi sul Sistema Informativo Territoriale (SIT) della Regione Puglia.

Viste:

la Delibera di Giunta Regionale n. 1466 del 15/09/2021 con cui è stato approvato il documento strategico *"Agenda di genere –strategia regionale per la parità di genere in Puglia"*;

la Delibera di Giunta Regionale n. 938 del 03/07/2023 recante "DGR n. 302/2022 "Valutazione di impatto di genere". Sistema di gestione e monitoraggio". Revisione degli allegati".

Garanzie di riservatezza

La pubblicazione sul BURP, nonché la pubblicazione all'Albo o sul sito istituzionale, salve le garanzie previste dalla legge 241/1990 in tema di accesso ai documenti amministrativi, avviene nel rispetto della tutela della riservatezza dei cittadini secondo quanto disposto dal Regolamento UE n. 679/2016 in materia di protezione dei dati personali, nonché dal D.Lgs. 196/2003 ss.mm.ii., ed ai sensi del vigente Regolamento regionale 5/2006 per il trattamento dei dati sensibili e giudiziari, in quanto applicabile. Ai fini della pubblicità legale, il presente provvedimento è stato redatto in modo da evitare la diffusione di dati personali identificativi non necessari ovvero il riferimento alle particolari categorie di dati previste dagli articoli 9 e 10 del succitato Regolamento UE.

Valutazione di Impatto di Genere

Ai sensi della DGR n.398 del 03/07/2023 la presente deliberazione è stata sottoposta a Valutazione di impatto di genere

L'impatto di genere stimato è

- Diretto
- Indiretto
- Neutro**
- Non rilevato

Copertura finanziaria di cui al D.Lgs. 118/2011 e ss.mm.ii.**SEZIONE COPERTURA FINANZIARIA DI CUI AL D. LGS. 118/2011 E SS.MM.II.**

La presente deliberazione non comporta implicazioni, dirette e/o indirette, di natura economico- finanziaria e/o patrimoniale e dalla stessa non deriva alcun onere a carico del bilancio regionale.

L'Assessore relatore, sulla base delle risultanze istruttorie come innanzi illustrate, ai sensi dell'art. 37, comma 5, della L.R. 1/23, propone alla Giunta:

1. di adottare *l'Inventario forestale della Regione Puglia*, come previsto dall'articolo 37 della Legge Regionale 1/2023, riportato nell'Allegato A), parte integrante del presente provvedimento;

2. di disporre che la Sezione Gestione Sostenibile delle Risorse Forestali e Naturali renda disponibile i dati relativi all'*Inventario forestale della Regione Puglia* nella sezione tematica "*Foreste, caccia, pesca e biodiversità*" del portale Agricoltura e sul Sistema Informativo Territoriale della Regione Puglia;
3. di demandare al dirigente della Sezione Gestione Sostenibile e Tutela delle Risorse Forestali e Naturali eventuali modifiche, aggiornamenti ed integrazioni non sostanziali al precitato *Inventario forestale della Regione Puglia*;
4. di pubblicare il presente provvedimento sul BURP in versione integrale.

I sottoscritti attestano che il procedimento istruttorio loro affidato è stato espletato nel rispetto della vigente normativa regionale, nazionale e comunitaria e che il presente schema di provvedimento, dagli stessi predisposto ai fini dell'adozione dell'atto finale da parte della Giunta Regionale, è conforme alle risultanze istruttorie.

La titolare della PO "*Pianificazione e programmazione forestale ed ambientale*"
Dott.ssa Rosabella Milano

Il Dirigente della Sezione Gestione Sostenibile
e Tutela delle Risorse Forestali e Naturali
Dott. Domenico Campanile

Il Direttore di Dipartimento, in applicazione di quanto previsto dal Decreto del Presidente della Giunta regionale n. 22/2021 e ss.mm.ii., **non ravvisa** la necessità di esprimere alcuna osservazione sulla presente proposta di DGR.

Il Direttore del Dipartimento Agricoltura, Sviluppo Rurale ed Ambientale
Prof. Gianluca Nardone

L'assessore all'Agricoltura, Industria agroalimentare, Risorse agroalimentari, Riforma fondiaria, Caccia, Pesca e Foreste
dott. Donato Pentassuglia

DELIBERAZIONE DELLA GIUNTA

LA GIUNTA

Udita la relazione e la conseguente proposta dell'Assessore all'Agricoltura, Risorse agroalimentari, Alimentazione, Riforma fondiaria, Caccia, Pesca e Foreste;
Viste le sottoscrizioni poste in calce alla proposta di deliberazione;
A voti unanimi espressi nei modi di legge;

DELIBERA

1. di adottare *l'Inventario forestale della Regione Puglia*, come previsto dall'articolo 37 della Legge Regionale 1/2023, riportato nell'Allegato A), parte integrante del presente provvedimento;

2. di disporre che la Sezione Gestione Sostenibile delle Risorse Forestali e Naturali renda disponibile i dati relativi all'*Inventario forestale della Regione Puglia* nella sezione tematica "*Foreste, caccia, pesca e biodiversità*" del portale Agricoltura e sul Sistema Informativo Territoriale della Regione Puglia;
3. di demandare al dirigente della Sezione Gestione Sostenibile e Tutela delle Risorse Forestali e Naturali eventuali modifiche, aggiornamenti ed integrazioni non sostanziali al precitato *Inventario forestale della Regione Puglia*;
4. di pubblicare il presente provvedimento sul BURP in versione integrale.

Il Segretario Generale della Giunta

ANNA LOBOSCO

Il Presidente della Giunta

MICHELE EMILIANO

Allegato A
Inventario Forestale della Regione Puglia – Relazione Finale



**REGIONE
PUGLIA**



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DAGRI
DIPARTIMENTO DI SCIENZE
E TECNOLOGIE AGRARIE
ALIMENTARI, AMBIENTALI E FORESTALI

**INVENTARIO FORESTALE DELLA REGIONE
PUGLIA**
RELAZIONE FINALE

Il presente allegato è composto da n. 20 fasciate.

Il Dirigente della Sezione Gestione Sostenibile e

Tutela delle Risorse Forestali e Naturali

Dott. Domenico Campanile



Domenico Campanile
25.07.2023 15:06:25
GMT+00:00

SOMMARIO

Introduzione	3
Fasi di lavoro	7
Acquisizione materiale cartografico di riferimento.....	7
Operazioni di rilievo in campo.....	7
Operazioni preliminari con dati rilevati	9
Stima spazialmente esplicita	10
Variabili telerilevate.....	10
Metodo	11
Stima model-assisted.....	12
Risultati	14
Risultati della stima model-assisted	17
Bibliografia.....	18

Introduzione

Gli inventari forestali sono tra i più importanti strumenti conoscitivi per le decisioni di politica forestale e ambientale sia a livello regionale, che nazionale, che internazionale in quanto registrano lo stato delle risorse forestali in un determinato luogo e le sue variazioni nel tempo. A questo scopo gli inventari debbono essere periodicamente aggiornati per costituire una importante rete di monitoraggio permanente in grado di fornire risultati con una determinata sicurezza statistica.

Storicamente gli inventari forestali sono nati per la stima dell'entità e del valore delle risorse legnose di una vasta regione o di una intera Nazione, ma attualmente ricoprono una valenza più ampia poiché sono utili strumenti per la quantificazione dei molteplici servizi ecosistemici forniti dai soprassuoli forestali anche in una ottica di lotta ai cambiamenti climatici.

Gli inventari forestali permettono la stima di molte variabili forestali tradizionali connesse alla produzione legnosa, essi sono però di fondamentale importanza anche come base informativa utile a guidare le politiche di conservazione della flora della fauna. Inoltre i sistemi forestali ricoprono un ruolo fondamentale nella lotta ai cambiamenti climatici per la loro capacità di stoccare anidride carbonica sottratta dall'atmosfera.

Per questo a livello regionale è fondamentale costituire una rete di monitoraggio inventariale che sia in grado di fornire informazioni differenti sui sistemi forestali concentrandosi sulla stima di variabili forestali quali: il volume legnoso, la biomassa e la struttura delle formazioni forestali.

Le informazioni sulla foresta vengono raccolte generalmente a scale differenti e per molteplici scopi. In genere, gli inventari forestali si basano su un disegno campionario che individua delle aree a terra che devono essere misurate e sulla base delle quali vengono eseguite le stime aggregate delle variabili di interesse a scale differenti (e.g. Provincia, Regione, Nazione). Per queste finalità è necessario che le unità di campionamento misurate a terra siano distribuite

secondo un rigoroso disegno di campionamento (Tomppo et al., 2010; Tomppo et al.2011; Fridman et al.2014). Queste statistiche sono utili nel contesto di monitoraggio delle funzioni dei sistemi forestali sia a livello regionale, nazionale ed internazionali. Infatti, gli IF consentono di effettuare valutazioni sulla sostenibilità e strumenti utili alla pianificazione strategica territoriale. Storicamente, gli IF si sono concentrati sulle risorse legnose, oggi, invece gli IF forniscono informazioni su diversi importanti servizi ecosistemici (Hansen e Malmaeus 2016; Mononen et al., 2016), come la fornitura di materiale all'industria, la bioenergia, la biodiversità e i cambiamenti nello stoccaggio di carbonio (vedere ad esempio Chirici et al. 2012; Rondeux et al., 2012).

Negli ultimi dieci anni, gli IF tradizionali, si sono modificati in moltissimi paesi, passando dalla produzione di statistiche aggregate alla produzione di mappe delle risorse forestali costruite utilizzando modelli che legano i dati a terra con i dati da telerilevamento come le immagini satellitari, le scansioni Laser Scanner Aeree, o dati tridimensionali fotogrammetrici. Questi nuovi inventari possono fornire stime sullo stato delle risorse forestali attraverso varie tipologie di approcci: stime basate sul disegno, stima basate sul modello. Oppure anche in forme ibride come le stime assistite da modello.

In tutti questi casi l'utilizzo di variabili predittive ausiliarie derivanti da dati di telerilevamento consente di aumentare la precisione di stima rispetto agli inventari tradizionali riducendo anche il numero di aree campionarie a terra da acquisire, a parità di sicurezza statistica della stima. Sono diversi i metodi che possono essere utilizzati per produrre mappe delle variabili della foresta integrando osservazioni campionarie (plot) e dati telerilevati (Corona et al., 2014). Tali metodi si basano sul presupposto che sia possibile costruire un modello della relazione tra le variabili forestali da prevedere (provvigione legnosa e biomassa) e le variabili predittive disponibili per l'intera area forestale (dati satellitari, dati LiDAR, variabili cartografiche). Questi metodi includono sia tecniche parametriche (ovvero regressione lineare multipla,

regressione ponderata geograficamente), che non parametriche (ovvero k-NN, RandomForests, reti neurali, ecc.) (Barrett et al., 2016; Brosofske et al., 2014; Chirici et al. al., 2016; Moser et al., 2017) e sono già stati testati in diversi tipi di foreste e regioni (Chirici et al., 2016).

Tutti questi metodi sono stati ampiamente applicati con l'utilizzo di variabili predittive telerilevate basate su dati 3D (LiDAR, radar o fotogrammetria) (ad es. McRoberts et al., 2010a, b; Næsset, 2007; Nilsson et al., 2017; Nord-Larsen e Schumacher, 2012; Persson et al. al., 2017; Waser et al., 2017, 2015; Hobi e Ginzler, 2012; Ginzler e Hobi, 2015; Breidenbach e Astrup, 2012; Rahlf et al., 2014) o immagini multispettrali acquisite da aereo o da piattaforme satellitari (ad esempio Brosofske et al., 2014; Fernández-Landa et al., 2018; Matasci et al., 2018; Reese et al., 2002). Tutti questi approcci sono già diventati operativi in molti paesi europei (Kangas et al., 2018), mentre nelle aree Mediterranee le esperienze sono ancora limitate (Chirici et al., 2020).

Questi nuovi approcci capaci di restituire anche mappe spazialmente continue delle variabili inventariali sono particolarmente utili proprio nelle aree Mediterranee, come la Regione Puglia, dove maggiore è necessità di informazioni sullo stato delle foreste in relazione agli scenari di cambiamento climatico e ai disturbi naturali e antropici come gli incendi boschivi o i cambiamenti di uso del suolo (FAO, 2013; Scarascia -Mugnozza et al., 2000).

Per questo l'istituzione di un inventario regionale forestale della Regione Puglia (IRFP) è fondamentale per le attività di controllo e pianificazione nell'ambito della programmazione forestale regionale. Poter disporre di un moderno strumento conoscitivo su base geografica permette infatti una migliore tutela e valorizzazione delle aree forestali, del paesaggio e dell'economia rurale, in conformità anche con i contenuti del Testo unico in materia di foreste e filiere forestali (D.L. 3 aprile 2018, n. 34).

La disponibilità di informazioni dettagliate a livello locale sullo stato e sulle caratteristiche del patrimonio forestale è di primaria importanza al fine non solo della conoscenza del territorio,

ma soprattutto come base informativa e propositiva per una gestione sostenibile delle risorse naturali.

La necessità di disegnare le scelte colturali sull'individualità ecosistemica e biologica dei popolamenti forestali implica un'approfondita e puntuale conoscenza nonché la caratterizzazione delle tendenze strutturali nello sviluppo dei soprassuoli, dei caratteri stagionali condizionanti e della percorribilità delle soluzioni gestionali in rapporto alla stabilità e al dinamismo delle diverse situazioni.

L'obiettivo prioritario è quello di dotare la Regione di uno strumento che si integri con i sistemi di classificazione del patrimonio forestale pugliese, e che consenta l'analisi anche di variabili di tipo quantitativo forestale come volume legnoso e biomassa. In aggiunta, si rende necessario integrare i dati con le informazioni relative alla proprietà del territorio boscato in termini conoscitivi di proprietà privata o proprietà pubblica (vale a dire demanio statale, regionale o comunale). Questo consente alla Regione Puglia, in linea con le realtà territoriali di regioni limitrofe, di ampliare la conoscenza sui sistemi forestali pugliesi e iniziare un monitoraggio delle differenti funzioni dei sistemi forestali pugliesi.

Fasi di lavoro

Acquisizione materiale cartografico di riferimento

In questa prima fase del lavoro è stato raccolto il seguente materiale messo a disposizione dalla Regione Puglia:

- ortofoto digitali a colori, AGEA 2019; il contenuto informativo delle ortofoto digitali, dimensione nominale di ciascun pixel, è pari a circa 0,20/0,25 metri per 0,20/0,25 in coordinate terreno per le aree di pianura e collinari e 0,5 metri per 0,5 metri in coordinate terreno per le aree montane (formato ECW)
- Carta delle Categorie forestali (Protezione Civile - Regione Puglia)
- dati LiDAR in forma di nuvole di punti da piattaforma aerea, dal 2008 al 2018 con varie intensità di punti al suolo (Protezione Civile - Regione Puglia)
- CTR10, carta tecnica regionale in formato vettoriale, con inclusi i limiti amministrativi (formato shapefile)
- DB-mobilità-strade, banca dati della viabilità della regione Puglia (formato shapefile)
- Carta dell'Uso del suolo della Regione Puglia (anno 2006) (formato shapefile)

Tutto questo materiale è in fase di organizzazione in un apposito geodatabase.

Operazioni di rilievo in campo

Sulla base della distribuzione di punti di campionamento al suolo, dipendenti dalle superfici delle diverse categorie forestali, dei dati già disponibili, e dei risultati dell'Inventario Nazionale delle Foreste e del Carbonio, allo stato attuale sono stati completati i rilievi relativi a 100 aree di saggio. Per maggiori dettagli si veda la relazione del I SAL del 30/09/2021.

I rilievi in campo hanno previsto la rilevazione delle principali variabili dendrometriche, seguendo il protocollo di rilievo già attuato nel corso dell'Inventario Nazionale delle Foreste e

dei Serbatoi Forestali di Carbonio 2005 e 2015 (Tabacchi et al., 2006; Gasparini et al., 2016). Tale protocollo prevede di rilevare all'interno di un'area di saggio (ADS) con raggio di 13 m (superficie di circa 530 m²), tutti gli alberi con diametro ad 1,30m ≥ 10 cm. Mentre in un'area circolare concentrica alla precedente con raggio di 4 m (superficie di circa 50 m²), sono stati rilevati i soggetti di piccole dimensioni (con diametro a 1,30m compreso tra 2,5 e 10 cm) (Figura 1). L'elaborazione delle ADS definisce per ciascuna area la consistenza totale per specie e per classe diametrica indicando il numero dei soggetti, l'area basimetrica, il volume e la biomassa epigea.

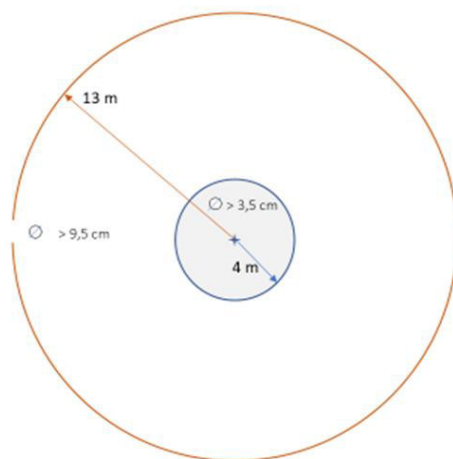


Figura 1. Rappresentazione dell'area di saggio inventariale per il rilievo della provvisione legnosa.

Dato l'utilizzo dello stesso protocollo di rilievo per l'inventario regionale e INFC, per le successive elaborazioni sono stati considerati anche i dati rilevati per l'inventario nazionale, che in Regione Puglia, risultano in complessive 156 ADS (Figura 2). I dati di volume e biomassa epigea rilevati nell'ambito dell'INFC2015 sono stati aggiornati al 2022 sommando ai valori del 2015 rispettivamente l'incremento medio di volume e di biomassa moltiplicati per 7 anni.

Operazioni preliminari con dati rilevati

Sulla base dei dati rilevati in campo nelle 256 aree di saggio complessive, sono state eseguite delle operazioni preliminari volte a convertire i dati puntuali in dati ad ettaro. Data la rilevazione parziale delle altezze, quelle mancanti sono state compensate sulla base di una curva polinomiale di secondo grado (Figura 3). Successivamente, disponendo dei dati diametrici e di altezza per ogni pianta, si è proceduto con il calcolo del volume e della biomassa epigea sulla base delle tavole di cubatura INFC (Tabacchi et al., 2011).

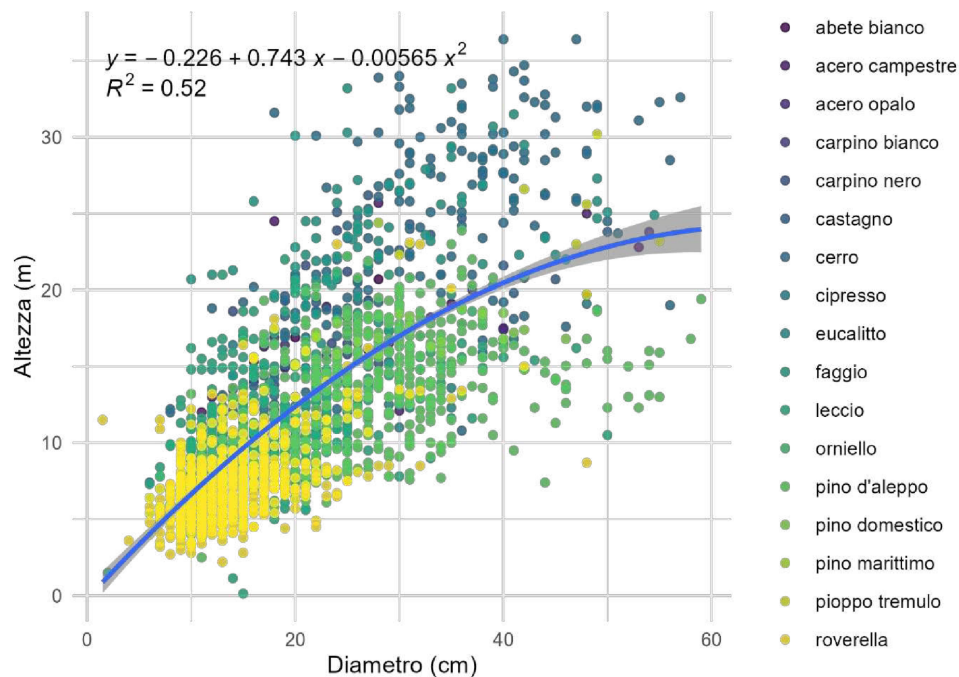


Figura 2. Curva ipsometrica. In blu i valori rilevati a terra, in verde la curva di compensazione delle altezze con la relativa funzione.

In Figura 3, vengono mostrati i dati di provvigione nelle aree rilevate a terra, insieme ai dati derivati da INFC.

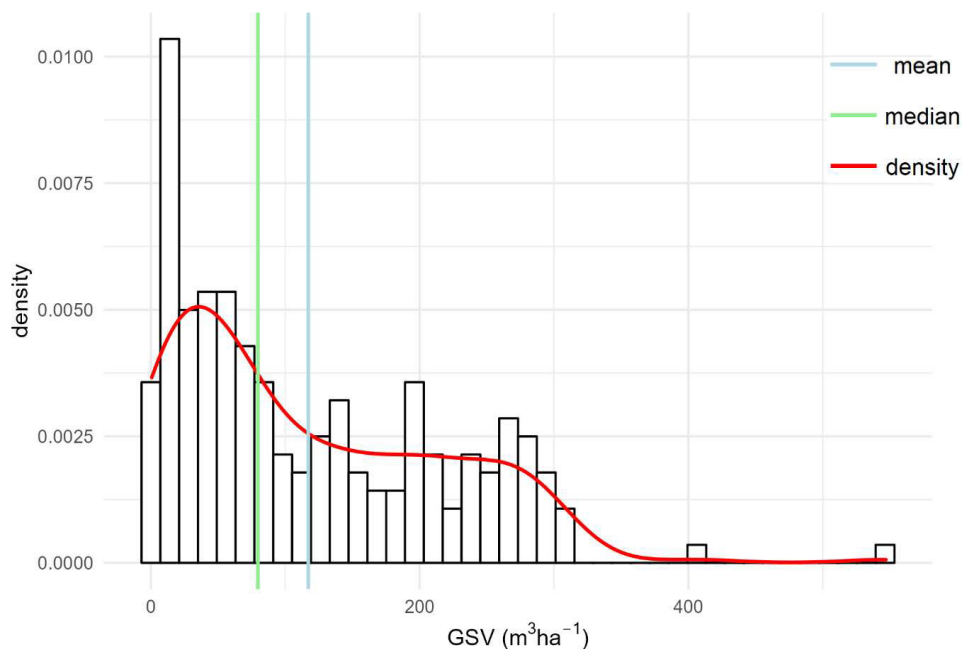


Figura 3. Distribuzione dei volumi delle ADS misurate.

Stima spazialmente esplicita

Nel seguente paragrafo viene presentata la procedura ad oggi utilizzata per la generazione della mappa del volume legnoso (m^3ha^{-1}) e della biomassa epigea ad ettaro (Mg ha^{-1}) in Regione Puglia, insieme ai risultati. Oltre ai dati rilevati a terra già descritti, sono stati utilizzati dati telerilevati, disponibili su tutto il territorio regionale.

Variabili telerilevate

Per la stima spazialmente esplicita della provvigione legnosa, sono stati utilizzati, come variabili indipendenti, dati disponibili in tutto il territorio regionale. In particolare, sono state utilizzate variabili telerilevate acquisite dalla missione spaziale Sentinel-2 nell'ambito del progetto Copernicus dell'ESA. Tutte le variabili indipendenti sono state ricampionate alla

risoluzione spaziale di 23x23 m (529 m²), concorde con la superficie delle singole ADS inventariali.

I dati satellitari delle missioni Sentinel-2 sono stati già utilizzati per condurre analisi su cambiamenti e dinamiche ambientali, grazie alla loro libera disponibilità, allo swath di 290 km, all'elevato numero di bande spettrali (13) e alla sua elevata risoluzione spaziale (10-60 m a seconda della banda) e temporale (3-5 giorni). Sulla base di tali dati, è stato realizzato un *composite cloud-free* per tutta la Regione Puglia, attraverso la piattaforma cloud Google Earth Engine.

In particolare, sono state utilizzate le immagini di Sentinel-2A e 2B Surface Reflectance disponibili nell'Earth Engine Data Catalog (Groelik et al., 2017), acquisite nel periodo vegetativo (1 Aprile - 30 Settembre). Successivamente, per ogni banda dell'immagine, sono stati mascherati i pixel coperti da nuvolosità sulla base della banda qualitativa (QA) fornita nel database delle immagini Sentinel-2 e in base al *cloud probability dataset*, ottenuto utilizzando la libreria *Sentinel2 cloud-detector* in LightGBM (light gradient boosting machine). Infine, per ogni pixel di ogni banda è stata calcolata la mediana della riflettanza su tutta l'area di interesse (Kennedy et al., 2018). Dal *composito cloud-free* è stato calcolato l'NDVI (normalized difference vegetation index) (Eq. 1), indice maggiormente utilizzato per analisi della vegetazione, anch'esso utilizzato come variabile indipendente.

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (1)$$

Metodo

Per la predizione della provvigione e della biomassa epigea in Puglia, è stato utilizzato il modello predittivo *random forests* (Breiman, 2001), implementato nel pacchetto 'ranger' di R. Il modello è stato addestrato utilizzando il volume o la biomassa misurato nei plot come variabile dipendente e le variabili spazializzate come variabili indipendenti.

In corrispondenza delle ADS, sono stati estratti i valori medi di ogni variabile indipendente in un buffer di 13 m di raggio dal centro dei plot, costituendo il set di predittori per l'addestramento dei modelli. Per evitare una scarsa performance dei modelli quando i predittori sono altamente correlati (Harrell, 2001; p. 64-65), è stata eseguita l'analisi della correlazione utilizzando il coefficiente di correlazione di Pearson (r). Nel caso di due variabili con $r > 0.85$ solo la variabile con la correlazione minore con tutte le altre è stata scelta per le successive analisi. Con lo stesso pacchetto 'ranger', sono stati ottimizzati i valori degli iperparametri del modello (m_{try} , $splitrule$, $min.node.size$), attraverso una procedura di *leave one out cross validation* in cui ogni unità dell'insieme di training viene eliminata in sequenza e predetta utilizzando le restanti unità (McRoberts et al., 2015).

Per valutare la performance del modello, sono stati calcolati il valore di R^2 e RMSE relativo rispetto alla media dei volumi osservati (RMSE%). Il RMSE e il RMSE% sono stati calcolati come:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\bar{\mu}_y}$$

dove n è uguale al numero di plot (ADS), y_i è il valore di volume misurato in campo, \hat{y}_i è il valore predetto dal modello e $\bar{\mu}_y$ il valore medio del volume misurato nei plot.

Stima model-assisted

Una stima iniziale del volume e della biomassa può essere calcolata dalle mappe come:

$$\hat{\mu}_{\text{initial}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{y}_i$$

dove N è il numero di pixel che cadono in bosco nella mappa in esame e \hat{y}_i è la predizione del per l' i -esimo pixel col modello RF. Tuttavia, questo stimatore può essere distorto a causa

dell'errore sistematico di previsione del modello. L'errore di distorsione può essere stimato come:

$$\widehat{\text{Bias}}(\hat{\mu}_{\text{initial}}) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\hat{y}_j - y_j)$$

dove n è la numerosità campionaria, cioè il numero di aree di saggio usate per costruire il modello, \hat{y}_j è la predizione del modello per il j -esimo plot e y_j il valore osservato per il j -esimo plot. Sottraendo l'errore stimato dalla stima iniziale si ottiene lo stimatore model-assisted:

$$\hat{\mu}_{ma} = \hat{\mu}_{\text{initial}} - \widehat{\text{Bias}}(\hat{\mu}_{\text{initial}}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{y}_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\hat{y}_j - y_j)$$

L'errore standard (SE) per lo stimatore della media è:

$$SE(\hat{\mu}_{ma}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n (e_j - \bar{e})^2}$$

dove n è la numerosità campionaria, $e_j = \hat{y}_j - y_j$ e $\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_j$.

Similmente, lo stimatore model-assisted per il totale è:

$$\hat{t}_{ma} = \sum_{i=1}^N y_i - \frac{N}{n} \sum_{j=1}^n (\hat{y}_j - y_j)$$

dove \hat{t}_{ma} è la stima del totale, N il numero di pixel che ricadono in foresta, \hat{y}_i la predizione ottenuta col modello RF per l' i -esimo pixel. L'errore standard per \hat{t}_{ma} è fornito da d'Oliveira et al. (2012):

$$SE(\hat{t}_{ma}) = \sqrt{N^2 \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{N} \right) \sum_{j=1}^n \frac{(e_j - \bar{e})^2}{n-1}}$$

Gli stimatori model-assisted della media e del totale con i relativi stimatori degli errori standard sono stati utilizzati per la stima del volume e della biomassa epigea media e totale a livello di regione, provincia e categoria forestale.

Risultati

Delle 14 variabili considerate, 9 sono state selezionate nei modelli finali (Tabella 1).

Dopo la fase di ottimizzazione, i modelli hanno fornito valori di RMSE% del 28% e 32% con valori di R^2 0,92 e 0.88 (Figura 3). Il valore medio di volume predetto nell'area di studio è di $105 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$, mentre per la biomassa il valore medio ottenuto dalla mappa è di 88 Mg ha^{-1} . Complessivamente, i valori predetti di volume variano da un minimo di 17 a un massimo di $340 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ (Figura 4) e da un minimo di 16 a 248 Mg ha^{-1} per la biomassa epigea (Figura 5)

Tabella 1. Variabili indipendenti utilizzate nel modello

Variabili Indipendenti	Descrizione
Banda 3	Green (lunghezza d'onda 560 nm)
Banda 4	Red (lunghezza d'onda 664.5 nm)
Banda 5	Red Edge1 (lunghezza d'onda 703.9 nm)
Banda 6	Red Edge 2 (lunghezza d'onda 740.2 nm)
Banda 7	Red Edge 3 (lunghezza d'onda 782.5 nm)
Banda 8	NIR (lunghezza d'onda 835.1 nm)
Banda 11	SWIR 1 (lunghezza d'onda 1613.7 nm)
NDVI	Normalized difference vegetation index (calcolato con le bande 4 e 8)

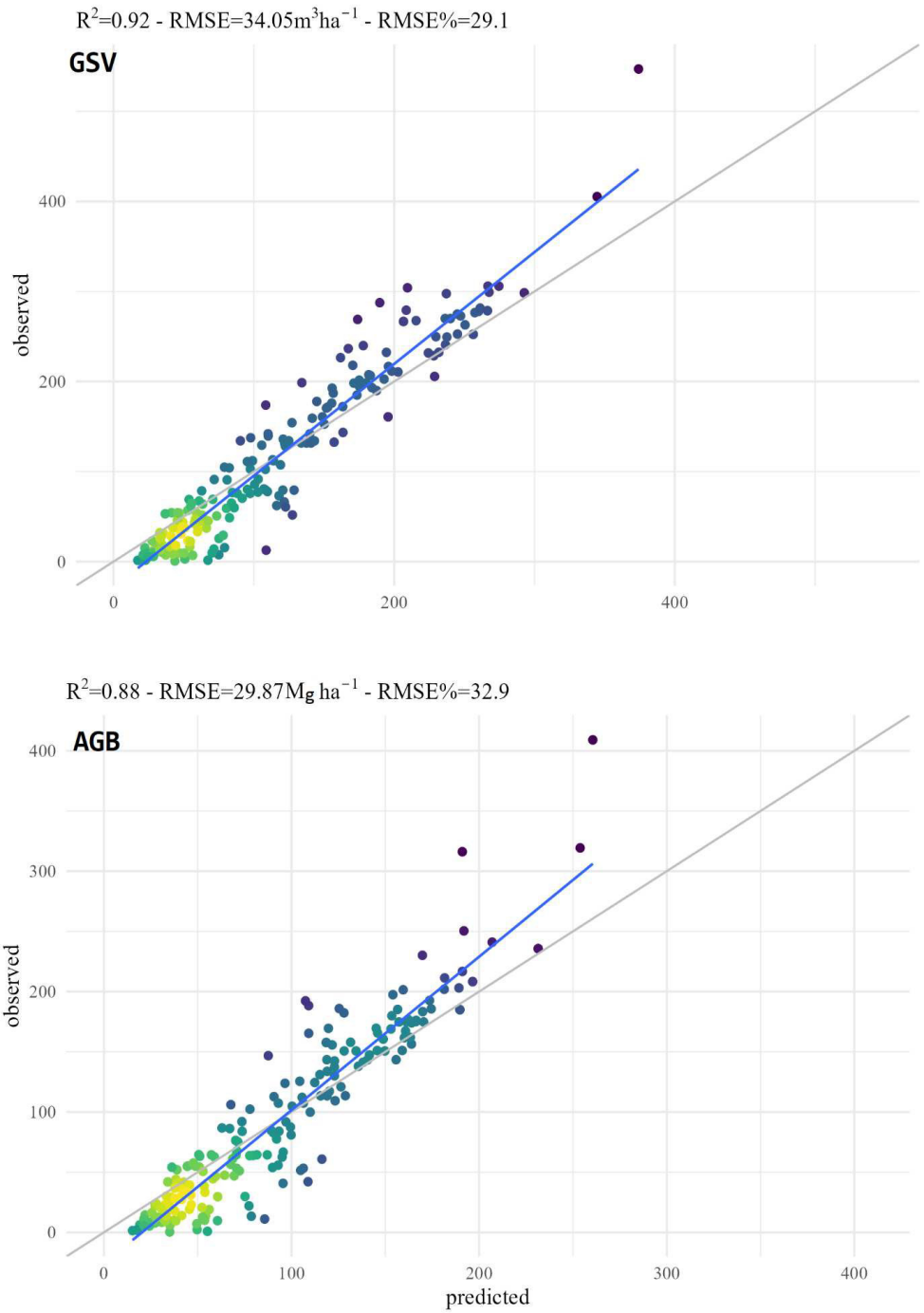


Figura 3. Valori predetti contro osservati nei plot disponibili in Regione. In alto il volume (GSV); in basso la biomassa (AGB)

In Figura 4 è presentato il risultato del modello di stima del volume a scala regionale.

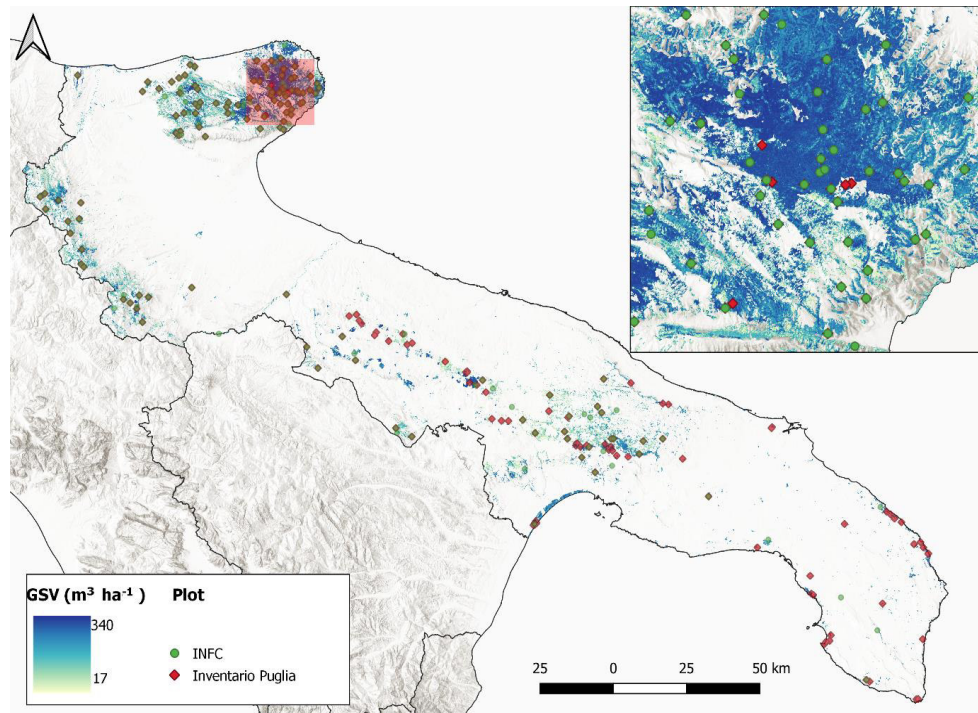


Figura 4. Mappatura del volume (GSV) in Regione Puglia in $m^3 ha^{-1}$. In verde le ADS (plot) INFC, in rosso quelle regionali.

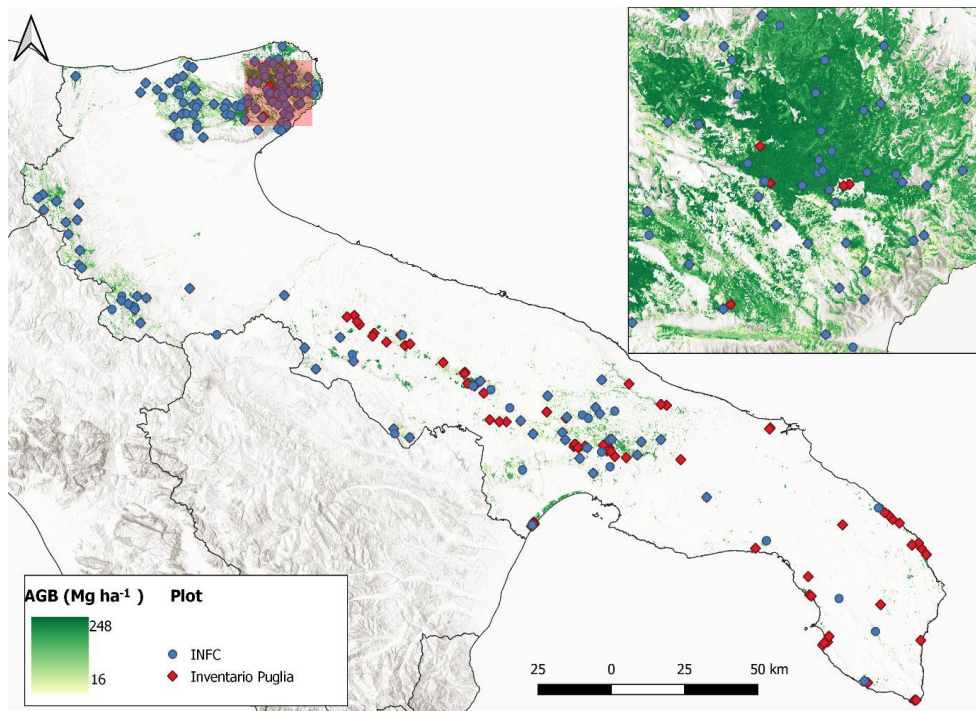


Figura 5. Mappatura della biomassa epigea (AGB) in Regione Puglia in $Mg\ ha^{-1}$. In blu le ADS (plot) INFC, in rosso quelle regionali.

Risultati della stima model-assisted

In Tabella 2 sono riportati i risultati della stima model-assisted a livello regionale e provinciale, per il volume e la biomassa epigea, mentre nella tabella 3 le stime per tipologia forestale, secondo le tipologie INFC.

Tabella 2. Risultati delle stime model-assisted a livello regionale e provinciale

Province	Volume (GSV)				Biomassa epigea (AGB)			
	totale (m3)	SE%	media ($m^3\ ha^{-1}$)	SE%	totale (Mg)	SE%	media ($Mg\ ha^{-1}$)	SE%
Bari	1625394.3	5.8	83.3	5.7	1262542	6.6	64.7	6.5
Brindisi	331437.1	10.5	118.2	10.4	239915.2	11.0	85.6	11.0
Barletta-Andria-Trani	410651.5	10.9	100.4	10.9	297511.6	12.4	72.7	12.4
Foggia	10041938.6	3.5	106.6	3.4	7701266	3.8	81.8	3.7
Lecce	680267.4	4.0	141.6	4.0	513417	4.5	106.9	4.4
Taranto	2189231.7	6.0	92.8	5.9	1822376	7.7	77.3	7.6
Totale	14691303	2.5	106.6	2.3	10216961	3.1	82	2.6

Tabella 3. Risultati delle stime model-assisted a livello di tipologie forestali
INFC

Categorie INFC	Decodifica	Volume				Biomassa epigea			
		Totale (m ³)	SE%	media (m ³ ha ⁻¹)	SE%	Totale (Mg)	SE%	media (Mg ha ⁻¹)	SE%
5	Pinete di pino nero, pino laricio e pino loricato	241854.3	11.1	149.6	11.1	166278.6	10.3	102.9	10.3
6	Pinete di pini mediterranei	4208211.1	3.1	146.3	3.1	3049844	3.5	106.0	3.5
7	Altri boschi di conifere, pure e miste	149934.0	10.4	146.9	10.4	108237.6	8.7	106.1	8.7
8	Faggete	801170.9	5.3	200.4	5.3	630950.5	6.2	157.8	6.2
9	Querceti a rovere, roverella e farnia	1272000.5	7.3	69.1	7.3	1006601	8.7	54.7	8.6
10	Cerrete, boschi di farnetto, fragno, vallonea	5080839.6	5.9	99.7	5.9	4022706	6.5	78.9	6.5
11	Castagneti	63383.8	10.4	94.2	10.4	48180.58	9.9	71.6	9.9
12	Ostrieti e carpineti	560706.2	26.1	103.9	26.1	450248.6	26.9	83.5	26.9
13	Boschi igrofili	255672.1	17.1	78.3	17.1	203708	15.0	62.3	15.0
14	Altri boschi caducifogli	466871.1	19.2	75.1	19.1	384550.3	22.9	61.9	22.7
15	Leccete	1735803.5	6.5	103.4	6.5	1496436	7.7	89.1	7.7
16	Sugherete	6898.8	13.4	97.5	13.4	5067.283	16.6	71.6	16.7
17	Altri boschi di latifoglie sempreverdi	129658.6	9.6	38.2	9.6	78497.5	22.1	23.1	22.1

Bibliografia

- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45(1), 5-32
- 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. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 84, 101959. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2019.101959>.
- D'Oliveira, M.V.; Reutebuch, S.E.; McGaughey, R.J.; Andersen, H.-E. 2012. Estimating Forest biomass and identifying low-intensity logging areas using airborne scanning lidar in Antimary State Forest, Acre State, Western Brazilian Amazon. *Remote. Sens. Environ.* **2012**, 124, 479–491, doi:10.1016/j.rse.2012.05.014
- Fibbi, L., Chiesi, M., Moriondo, M., Bindi, M., Chirici, G., Papale, D., Maselli, M., 2016. Correction of a 1 km daily rainfall dataset for modelling forest ecosystem processes in Italy. *Meteorol. Appl.* <https://doi.org/10.1002/met.1554>.
- Gasparini P., Di Cosmo L., Floris A., Notarangelo G., Rizzo M., 2016 – Guida per i rilievi in campo. INFC2015 – Terzo inventario forestale nazionale. Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria, Unità di Ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale (CREA-MPF); Corpo Forestale dello Stato, Ministero per le Politiche Agricole, Alimentari e Forestali. 341 pp.

- Genuer, R., Poggi, J. M., & Tuleau-Malot, C. (2015). VSURF: an R package for variable selection using random forests. *The R Journal*, 7(2), 19-33.
- 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.
- Harrell, F.E., 2001. *Regression Modeling Strategies with Applications to Linear Models, Logistic Regression, and Survival Analysis*.
- Kennedy, R. E., Yang, Z., Gorelick, N., Braaten, J., Cavalcante, L., Cohen, W. B., & Healey, S. (2018). Implementation of the LandTrendr algorithm on google earth engine. *Remote Sensing*, 10(5), 691.
- Kennedy, R.E.; Yang, Z.; Gorelick, N.; Braaten, J.; Cavalcante, L.; Cohen, W.B.; Healey, S. Implementation of the LandTrendr Algorithm on Google Earth Engine. *Remote Sens.* 2018, 10, 691.
- Maselli, F., Pasqui, M., Chirici, G., Chiesi, M., Fibbi, L., Salvati, R., Corona, P., 2012. Modeling primary production using a 1 km daily meteorological data set. *Clim. Res.* 54, 271–285.
- Panagos, P. (2006). The European soil database. *GEO: connexion*, 5(7), 32-33.
- Tabacchi G., Scrinzi G., Tosi V., Floris A., Paletto A., Di Cosmo L., Colle G., 2006. Procedure di posizionamento e di rilievo degli attributi di terza fase con istruzioni per l'impiego degli applicativi NAV3 e RAS3. *Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio*. MiPAF - Ispettorato Generale del Corpo Forestale dello Stato, CRA-ISAFA, Trento.
- Tarquini S., Isola I., Favalli M., Battistini A. (2007) TINITALY, a digital elevation model of Italy with a 10 meters cell size (Version 1.0) [Data set]. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/TINITALY/1.0>.
- Vangi, E.; D'Amico, G.; Francini, S.; Giannetti, F.; Lasserre, B.; Marchetti, M.; McRoberts, R.; Chirici, G. The Effect of Forest Mask Quality in the Wall-to-Wall Estimation of Growing Stock Volume. *Remote Sens.* 2021, 13, 1038. <https://doi.org/10.3390/rs130510380>

Rappresentazione grafica riassuntiva dell'Inventario Forestale della Puglia

