*Progetto SilaBioMetric: SAL 1 (Maggio 2025)*

Sommario

[Obiettivo generale di progetto 3](#_Toc210814050)

[WP1 - Obiettivi e fasi metodologiche 3](#_Toc210814051)

[Stato dell’arte 3](#_Toc210814052)

[*Dati geobotanici e faunistici pregressi (a)* 3](#_Toc210814053)

[*Aree di saggio (b)* 4](#_Toc210814054)

[*Specie target (c)* 4](#_Toc210814055)

[Prospettive di lavoro 7](#_Toc210814056)

[WP2 - Obiettivi e fasi metodologiche 8](#_Toc210814057)

[Fondamenti teorici e implementazione 8](#_Toc210814058)

[*Indice Rao’s Quadratic Entropy (RaoQ)* 8](#_Toc210814059)

[*Analisi multi-temporale per definizione strategie di campionamento in situ* 9](#_Toc210814060)

[Dataset satellitari e derivazione di Indici Multispettrali e radar (input modello) 12](#_Toc210814061)

[*Sentinel-1 (SAR)* 12](#_Toc210814062)

[*Sentinel-2 (MSI)* 13](#_Toc210814063)

[*Dati topografici e copertura del suolo* 13](#_Toc210814064)

[Modellistica per la stima della biodiversità: modelli e applicazioni 14](#_Toc210814065)

[*Modelli Supervisionati* 14](#_Toc210814066)

[Convolutional Neural Network (CNN) con meccanismi di Attention 14](#_Toc210814067)

[Vision Transformer (ViT) 14](#_Toc210814068)

[*Modelli non supervisionati* 14](#_Toc210814069)

[K-means++ 14](#_Toc210814070)

[Gaussian Mixture Model (GMM) 14](#_Toc210814071)

[*Modelli semi-supervisionati* 15](#_Toc210814072)

[Autoencoder ibrido 15](#_Toc210814073)

[Sviluppo della piattaforma SilaBiometric Viewer 15](#_Toc210814074)

[Input principali 15](#_Toc210814075)

[Output e funzionalità 15](#_Toc210814076)

[Bibliografia di riferimento 16](#_Toc210814077)

# Obiettivo generale di progetto

Il progetto SilaBioMetric mira a sviluppare, testare e validare un framework metodologico integrato per il monitoraggio, la conservazione e il ripristino della biodiversità nel comune pilota preso in considerazione ricadente nell’area del Parco Nazionale della Sila. L’approccio proposto è fortemente multidisciplinare e si basa sull’integrazione sinergica tra tecnologie di telerilevamento (Remote Sensing) e dati di monitoraggio raccolti in situ. Il progetto prevede una serie di attività suddivise in 3 work package. In questo primo SAL vengono descritte le attività svolte nel WP1 e WP2.

# WP1 - Obiettivi e fasi metodologiche

Il WP1 realizzato dal team dell’Università della Calabria si pone come obiettivo quello di rilevare i bioindicatori di biodiversità attraverso attività di monitoraggio delle biocenosi, in particolare **comunità animali, vegetali e licheniche epifitiche**,come di seguito riportato:

Sono previste le seguenti attività:

1. organizzazione di una banca dati, sulla base degli studi pregressi relativi alla distribuzione e allo stato di conservazione di specie e comunità animali e vegetali di pregio ricadenti nel territorio di Casali del Manco (CM), all’interno del quale ricadono una stazione forestale della rete Nazione delle Foreste Vetuste d’Italia, quattro diverse ZSC inclusa in rete in Rete Natura 2000 e la ZPS “Sila Grande”, e al loro interno ospitano ben 10 habitat di direttiva 92/43/CEE;
2. in collaborazione con gli operatori del WP2 (17tons) e mediante strumenti di Remote Sensing, la selezione di aree di saggio (plot sperimentali), preferibilmente incluse nelle ZSC;
3. individuazione, all’interno delle aree di saggio, delle specie di flora vascolare e lichenologica di rilevante interesse conservazionistico (specie endemiche, rare e al limite di areale), incluse nella Lista Rossa Nazionale e legate agli habitat di Direttiva;
4. previsione sulla potenziale presenza di questi bioindicatori in stazioni esterne alle aree di saggio;
5. monitoraggio dei coleotteri saproxilici, rettili e anfibi, di notevole interesse biogeografico, “termometro” dello stato di naturalità dei corsi d’acqua e degli ambienti umidi e strettamente sensibile alla pressione esercitata dalle attività antropiche e dai cambiamenti climatici.

Di seguito si riporta una sintesi dello stato dell’arte e prospettive delle attività riguardanti le comunità animali e vegetali in relazione a ciascuno dei punti previsti dal WP1.

# Stato dell’arte

## *Dati geobotanici e faunistici pregressi (a)*

In relazione al WP1 (a), attraverso il software QGIS è stata redatta una banca dati georeferenziata che annovera i dati di presenza e copertura di 77 specie vegetali in relazione a 80 plot di campionamento di 1 m2 dislocati nelle diverse tipologie di habitat presenti all’interno delle aree di saggio selezionate nell’ambito del progetto.

Tutti i dati mappati si riferiscono a campagne di rilevamento di campo estremamente recenti (stagioni 2023-2024). Nell’ambito di tali campagne, per ogni plot di campionamento sono stati registrati i dati di posizione, al fine di renderne possibile la mappatura in ambiente GIS e la successiva integrazione con ulteriori parametri ecologici dedotti dalla loro sovrapposizione con dati telerilevati multispettrali ad alta risoluzione.

Anche per quanto riguarda l’erpetofauna esiste una banca dati georeferenziata in possesso del Laboratorio di Zoologia marina ed Erpetologia del Dipartimento di Biologia, Ecologia e Scienze della Terra dell’Università della Calabria. Tale banca dati annovera dati inerenti la presenza di tutte le specie di rettili ed anfibi nel territorio regionale a partire dagli anni ’80 fino al 2025.

## *Aree di saggio (b)*

Sono state individuate tre principali aree di lavoro:

* ZSC ‘Macchia Sacra’;
* ZSC ‘Pianori di Macchialonga’;
* Carlomagno.

Tali aree sono state selezionate poiché ritenute idonee per lo svolgimento delle attività di campo previste, in quanto caratterizzate dalla presenza di diverse tipologie di habitat, tra cui diversi habitat di interesse comunitario, che includono habitat aperti a carattere palustre, umido, e xerico ed habitat forestali di pregio.

Con riferimento ai dati geobotanici, le informazioni presenti nell’attuale banca dati risultano distribuite come indicato di seguito:

* ZSC ‘Macchia Sacra’: 70 plot;
* ZSC ‘Pianori di Macchialonga’: 4 plot;
* Carlomagno: 6 plot.

## *Specie target (c)*

In base alle conoscenze di letteratura, alla consultazione dei formulari delle ZSC incluse nel progetto, ed alle informazioni di campo prodotte dalle recenti campagne di rilevamento, è stato definito un elenco di specie di vegetali vascolari e di briofite di rilevante interesse conservazionistico (specie endemiche, rare e al limite di areale), incluse nella Lista Rossa Nazionale e legate agli habitat di interesse comunitario da considerare utilizzare come indicatori di qualità ambientale. Tale elenco è riportato in Tabella 1.

Tabella 1: Specie vegetali selezionate come indicatori di qualità ambientale nell’ambito del progetto.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Specie** | **Gruppo biologico** | **Descrizione habitat** | **Lista Rossa Flora d'Italia** | **Note su valore conservazionistico** |
| *Abies alba* Mill. | Pianta vascolare | Faggete mesoterme | NE | Specie indicatrice di habitat di interesse comunitario |
| *Ajuga tenorei* C.Presl. | Pianta vascolare | Ambienti umidi di transizione | LC | Specie endemica indicatrice di habitat di interesse comunitario |
| *Anthemis cretica* L. subsp. *calabrica* (Arcang.) R.Fern. | Pianta vascolare | Praterie xeriche e mesofitiche | LC | Specie endemica indicatrice di habitat di interesse comunitario |
| *Armeria brutia* Brullo, Gangale & Uzunov | Pianta vascolare | Praterie mesofitiche | LC | Specie endemica indicatrice di habitat di interesse comunitario |
| *Astragalus parnassi* Boiss. subsp. *calabricus* (Fisch.) Maassoumi | Pianta vascolare | Praterice xeriche | LC | Specie endemica indicatrice di habitat di interesse comunitario |
| *Caltha palustris* L. | Pianta vascolare | Habitat rivulari | NE | Specie relitta a margine di areale indicatrice di habitat di interesse comunitario |
| *Cardamine silana* Marhold & Perny | Pianta vascolare | Habitat rivulari | EN | Specie endemica minacciata d'estinzione e indicatrice di habitat di interesse comunitario |
| *Carex echinata* Murray | Pianta vascolare | Torbiere e Cariceti | NE | Specie indicatrice di habitat di interesse comunitario |
| *Carex nigra* (L.) Reichard subsp. *intricata* (Tineo ex Guss.) Rivas Mart. | Pianta vascolare | Torbiere e Cariceti | NT | Specie quasi minacciata e indicatrice di habitat di interesse comunitario |
| *Carex pallescens* L. | Pianta vascolare | Praterie umide e cariceti | NE | Specie indicatrice di habitat di interesse comunitario |
| *Genista anglica* L. | Pianta vascolare | Praterie umide e cariceti | VU | Specie quasi minacciata e indicatrice di habitat di interesse comunitario |
| *Hypericum barbatum* Jacq. subsp. *calabricum* (Spreng.) | Pianta vascolare | Praterie mesofitiche | VU | Specie quasi minacciata e indicatrice di habitat di interesse comunitario |
| *Ludwigia palustris* (L.) Elliott | Pianta vascolare | Habitat rivulari, torbiere e cariceti | NE | Specie relitta a margine di areale indicatrice di habitat di interesse comunitario |
| *Luzula calabra* Ten. | Pianta vascolare | Giuncheti e cariceti | LC | Specie endemica indicatrice di habitat di interesse comunitario |
| *Potamogeton polygonifolius* Pourr. | Pianta vascolare | Habitat rivulari | NE | Specie relitta a margine di areale indicatrice di habitat di interesse comunitario |
| *Potentilla calabra* Ten. | Pianta vascolare | Praterie mesofitiche | LC | Specie endemica indicatrice di habitat di interesse comunitario |
| *Ranunculus ophioglossifolius* Vill. | Pianta vascolare | Habitat rivulari e torbiere | NE | Specie relitta a margine di areale indicatrice di habitat di interesse comunitario |
| *Ranunculus thomasii* Ten. | Pianta vascolare | Praterie mesofitiche, giuncheti | LC | Specie endemica indicatrice di habitat di interesse comunitario |
| *Soldanella calabrella* Kress. | Pianta vascolare | Habitat rivulari e superfici stillicidiose | VU | Specie endemica minacciata d'estinzione e indicatrice di habitat di interesse comunitario |
| *Sphagnum* sp. pl. | Briofita (muschi) | Torbiere e Cariceti | DD | Specie di interesse comunitario con rpesenza relitta a margine di areale |
| *Veronica scutellata* L. | Pianta vascolare | Habitat rivulari e torbiere | NE | Specie relitta a margine di areale indicatrice di habitat di interesse comunitario |
| *Viola palustris* L. | Pianta vascolare | Habitat rivulari, torbiere e cariceti | NE | Specie relitta a margine di areale indicatrice di habitat di interesse comunitario |

Tra i diversi gruppi faunistici, i coleotteri saproxilici emergono come indicatori particolarmente efficaci dello stato di conservazione e della naturalità degli habitat forestali silani. La presenza di una notevole diversità di insetti saproxilobionti contribuisce a fare del Parco Nazionale della Sila un "hotspot" di biodiversità entomologica. Questi insetti sono considerati indicatori sensibili all'impatto antropico e ai cambiamenti climatici, svolgendo un ruolo fondamentale nel mantenimento dei servizi ecosistemici.

Due specie di coleotteri saproxilobionti rivestono particolare importanza: *Cucujus cinnaberinus* (Scopoli, 1763): questa specie protetta a livello comunitario è inserita negli Allegati II e IV della Direttiva Habitat ed è classificata come Vulnerabile (VU) nella Lista Rossa IUCN italiana. Nonostante sia rara e in declino in gran parte del suo areale, il Massiccio della Sila ospita le popolazioni più consistenti e meglio conservate d'Europa, rappresentando un importante "Biodiversity indicator" delle foreste vetuste. *Clinidium canaliculatum* Costa, 1839: Questo coleottero Rhysodidae è anch'esso classificato come Vulnerabile (VU) nella Lista Rossa IUCN italiana. Strettamente legato al legno in decomposizione di conifere, è considerato una "focal species" per il suo ruolo ecologico strategico e la sua sensibilità ai cambiamenti climatici.

In base alle conoscenze di letteratura, alla consultazione dei formulari delle ZSC incluse nel progetto, ed alle informazioni di campo prodotte dalle recenti campagne di rilevamento, è stato definito anche un elenco di specie di anfibi e rettili di rilevante interesse conservazionistico (specie endemiche, rare e al limite di areale). Tale elenco è riportato in Tabella 2.

Tabella 2: Specie di anfibi e rettili selezionate come indicatori di qualità ambientale nell’ambito del progetto.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Specie** | **Gruppo biologico** | **Note su valore conservazionistico** |
| *Anguis veronensis* Pollini 1818 | *Rettili* | *Specie endemica dell’Italia peninsulare* |
| *Bombina pachypus (Bonaparte, 1839)* | *Anfibi* | *Specie endemica dell’Italia centro-meridionale ed indicatrice di habitat di interesse* |
| *Bufo bufo (Linnaeus 1758)* | *Anfibi* | *Specie indicatrice di habitat di interesse* |
| *Coronella austriaca Laurenti 1768* | *Rettili* | *Specie indicatrice di habitat di interesse* |
| *Hierophis viridiflavus (Lacépède 1789)* | *Rettili* | *Specie endemica della penisola italiana* |
| *Hyla intermedia Boulenger 1882* | *Anfibi* | *Specie endemica della penisola italiana ed indicatrice di habitat di interesse* |
| *Lacerta bilineata Daudin 1802* | *Rettili* | *Specie endemica italiana* |
| *Natrix helvetica (Lacépède 1789)* | *Rettili* | *Specie indicatrice di habitat di interesse* |
| *Natrix tessellata (Laurenti 1768)* | *Rettili* | *Specie indicatrice di habitat di interesse* |
| *Podarcis muralis (Laurenti 1768)* | *Rettili* | *Specie indicatrice di habitat di interesse* |
| *Podarcis siculus (Rafinesque-Schmaltz 1810)* | *Rettili* | *Specie endemica della penisola italiana* |
| *Rana dalmatina Fitzinger in Bonaparte 1838* | *Anfibi* | *Specie indicatrice di habitat di interesse* |
| *Rana italica Dubois 1987* | *Anfibi* | *Specie endemica della penisola italiana ed indicatrice di habitat di interesse* |
| *Salamandra salamandra (Linnaeus 1758)* | *Anfibi* | *Specie indicatrice di habitat di interesse* |
| *Salamandrina terdigitata (Bonnaterre 1789)* | *Anfibi* | *Specie endemica dell’Italia centro-meridionale ed indicatrice di habitat di interesse* |
| *Triturus carnifex (Laurenti 1768)* | *Anfibi* | *Specie endemica della penisola italiana ed indicatrice di habitat di interesse* |
| *Vipera aspis (Linnaeus 1758)* | *Rettili* | *Specie indicatrice di habitat di interesse* |
| *Zamenis lineatus (Camerano 1891)* | *Rettili* | *Specie endemica dell’Italia centro-meridionale ed indicatrice di habitat di interesse* |

# Prospettive di lavoro

In relazione al WP1 (a) e WP1 (c) – Durante la stagione di fioritura 2025, verrà condotta una nuova campagna di rilievi faunistici, fitosociologici e demografici finalizzati a:

* incrementare le informazioni presenti nella banca dati, con particolare riguardo alla flora e vegetazione della ZSC ‘Pianori di Macchialonga’ e dell’area di lavoro di Carlomagno;
* raccogliere informazioni su distribuzione e abbondanza delle specie animali e vegetali selezionate in ciascuna delle tre aree di lavoro
* stilare la prima lista della flora lichenologica dell’area di studio
* incrementare le informazioni presenti nella banca dati, con particolare riguardo ad anfibi e rettili
* censimento dei coleotteri saproxilobionti, adottando il metodo dell'indagine diretta tramite "visual census"

In relazione al WP1 (d) – Implementazione di modelli spaziali predittivi finalizzati a rappresentare la distribuzione spaziale potenziale delle specie selezionate, ed a stimarne l’effettivo valore come indicatori biologici. Tali modelli saranno fondati sull’incrocio dei dati di presenza e abbondanza reperiti durante le attività di campo con parametri ecologici ricavati da dati satellitari multispettrali ad elevata risoluzione.

# WP2 - Obiettivi e fasi metodologiche

Il WP2 mira a definire delle correlazioni robuste tra i parametri ecologici osservabili tramite dati satellitari o da drone (es. indici spettrali, eterogeneità strutturale, condizioni topografiche) e i bioindicatori di biodiversità rilevati sul campo (nell’ambito del WP1). L’obiettivo finale è fornire strumenti scalabili e replicabili per il monitoraggio della biodiversità, validati su dati reali, che consentano di identificare in maniera precoce alterazioni ecologiche, supportare la pianificazione ambientale e contribuire attivamente alla tutela del patrimonio naturale del Parco della Sila.

In termini di attività da svolgere in carico a 17tons, il WP2 prevede in una prima fase la creazione di un modello di stima della biodiversità in un sito pilota (comune di **Casali del Manco**) e, in una seconda fase, l’applicazione del modello a tutto il Parco.

La prima fase metodologica ha riguardato un’analisi dettaglia delle caratteristiche ambientali dell’area con un particolare riguardo alla flora e fauna endemica. Quest’analisi è stata condotta tramite l’analisi della Carta della Natura del Parco Sila e dei rilievi floristici e faunistici condotti dall’Università della Calabria negli ultimi dieci anni. L’indagine preliminare ha evidenziato uno stato ambientale di alta complessità ed eterogeneità: escursioni altimetriche molto variabili, esposizioni multiple, suoli variegati e un mosaico di usi del suolo che comprende foreste naturali, impianti di conifere alloctone, prati-pascoli, lande montane e aree semi-rurali. Tale diversità paesaggistica mette in evidenza il necessario studio della biodiversità, in particolare per quanto riguarda la sua **dimensione “funzionale”**, rilevabile a partire da varie tipologie di dati acquisiti da Remote Sensing.

Il framework metodologico integrato sviluppato dal WP2 ha come focus:

* quantificare la **diversità spaziale e funzionale**;
* identificare **hotspot di biodiversità** e aree ad elevata eterogeneità vegetazionale;
* supportare la **modellizzazione avanzata** tramite tecniche di Machine Learning e Deep Learning.

# Fondamenti teorici e implementazione

## *Indice Rao’s Quadratic Entropy (RaoQ)*

L'indice **Rao's Quadratic Entropy (RaoQ)** rappresenta una delle metriche più avanzate per quantificare la **diversità funzionale** a partire da dati ecologici con riferimento spaziale esplicito, quindi adatto all’analisi di dati telerilevati. A differenza degli indici classici come Shannon o Simpson, che si basano solo sulla presenza e abbondanza delle entità (es. specie), RaoQ integra anche la distanza dissimilare tra le entità, ovvero una misura della loro diversità funzionale-compositiva. Nel contesto del telerilevamento, tale distanza può essere calcolata tra le firme spettrali, le bande multispettrali, o valori sintetici come l’NDVI. Questo rende RaoQ un indice capace di cogliere non solo la ricchezza di valori, ma anche quanto questi differiscono tra loro, offrendo una misura più completa della eterogeneità ecologica all'interno di una finestra spaziale definita (es. kernel mobile).

Come descritto da Rocchini et al. (2019), la formulazione matematica dell’indice è la seguente, dove:Immagine che contiene Carattere, bianco, testo, tipografia

Il contenuto generato dall'IA potrebbe non essere corretto.

S è il numero di entità (es. pixel o classi) all’interno della finestra mobile di analisi considerata, pi e pj rappresentano le proporzioni (frequenze relative) delle entità all'interno della finestra mobile, dij è la distanza funzionale tra le entità. (es distanza euclidea).

Nel contesto del presente progetto, il RaoQ è stato implementato come indice spaziale calcolato su finestre mobili di dimensione 5x5 e 7x7 pixel. I raster utilizzati come base di calcolo includono NDVI medi e mediani stagionali (2018 e 2024), derivati da Sentinel-2 e da immagini SPOT 7-8.

L’utilizzo del RaoQ ha permesso di produrre mappe continue ad alta risoluzione della **disomogeneità funzionale** della vegetazione, identificando con precisione le zone ad elevata variabilità, le transizioni ecotonali e gli habitat ad alta eterogeneità interna, aspetti cruciali per il monitoraggio e la gestione della biodiversità.

## *Analisi multi-temporale per definizione strategie di campionamento in situ*

Immagine che contiene diagramma, testo, linea, Piano

Il contenuto generato dall'IA potrebbe non essere corretto.Per fornire indicazioni utili alla pianificazione del campionamento in situ all’Università della Calabria, è stata condotta un’analisi multitemporale dell’indice RaoQ calcolato annualmente per gli anni 2018–2024, a partire da immagini SPOT 6/7 ad alta risoluzione (NDVI). Per ciascun pixel dell’area pilota di Casali del Manco, è stato costruito uno stack temporale dei valori di RaoQ. Su questa serie temporale è stata applicata una regressione LOESS (*Locally Estimated Scatterplot Smoothing*) pixel-based, una tecnica di regressione non parametrica che permette di stimare in modo flessibile l’andamento nel tempo dei valori, adattandosi localmente alla forma della curva senza imporre un modello rigido. Questo approccio consente di catturare variazioni sottili e non lineari nel tempo.

A partire dalla curva smussata ottenuta con LOESS, è stato calcolato per ogni pixel il coefficiente di variazione (CV) della pendenza temporale, secondo la procedura descritta in Rocchini et al., (2019).

Il coefficiente di variazione è stato utilizzato come proxy della variabilità temporale (collegata alla diversità funzionale), ovvero è stato calcolato quanto un pixel varia negli anni rispetto al proprio valore medio. Il risultato permette di evidenziare le aree con maggiore instabilità o dinamismo spettrale nel tempo; infatti, valori elevati di CV possono indicare dinamiche ecologiche attive, transizioni strutturali, disturbi ricorrenti o **eterogeneità funzionale**. Quest’ultima è ciò che ci interessa.

Figura 1. Valori dell’indice RaoQ per singolo pixel (P₀) nel tempo. La funzione di regressione LOESS consente di stimare l’andamento medio (trend) e la sua variabilità nel tempo (coefficiente di variazione), rappresentando così il turnover temporale della diversità funzionale. (Figura Rocchini et al., 2019).

Occorre notare però che in presenza di valori medi molto bassi di RaoQ index, il CV può risultare numericamente amplificato e fuorviante. Per questo motivo, sono stati esclusi dalla mappa finale i pixel con RaoQ medio < 0.05 e CV > 150%, considerati potenzialmente anomali. Tale mascheramento, ispirato all’approccio proposto in Rocchini et al. (2019), ha garantito una maggiore affidabilità dell’output. Per essere rappresentativi, i punti di campionamento in situ da parte del Team dell’Università della Calabria dovrebbero essere selezionati in modo da rappresentare l’intero spettro di condizioni ecologiche presenti nell’area includendo sia pixel dinamici (CV elevato) sia pixel stabili (CV basso).

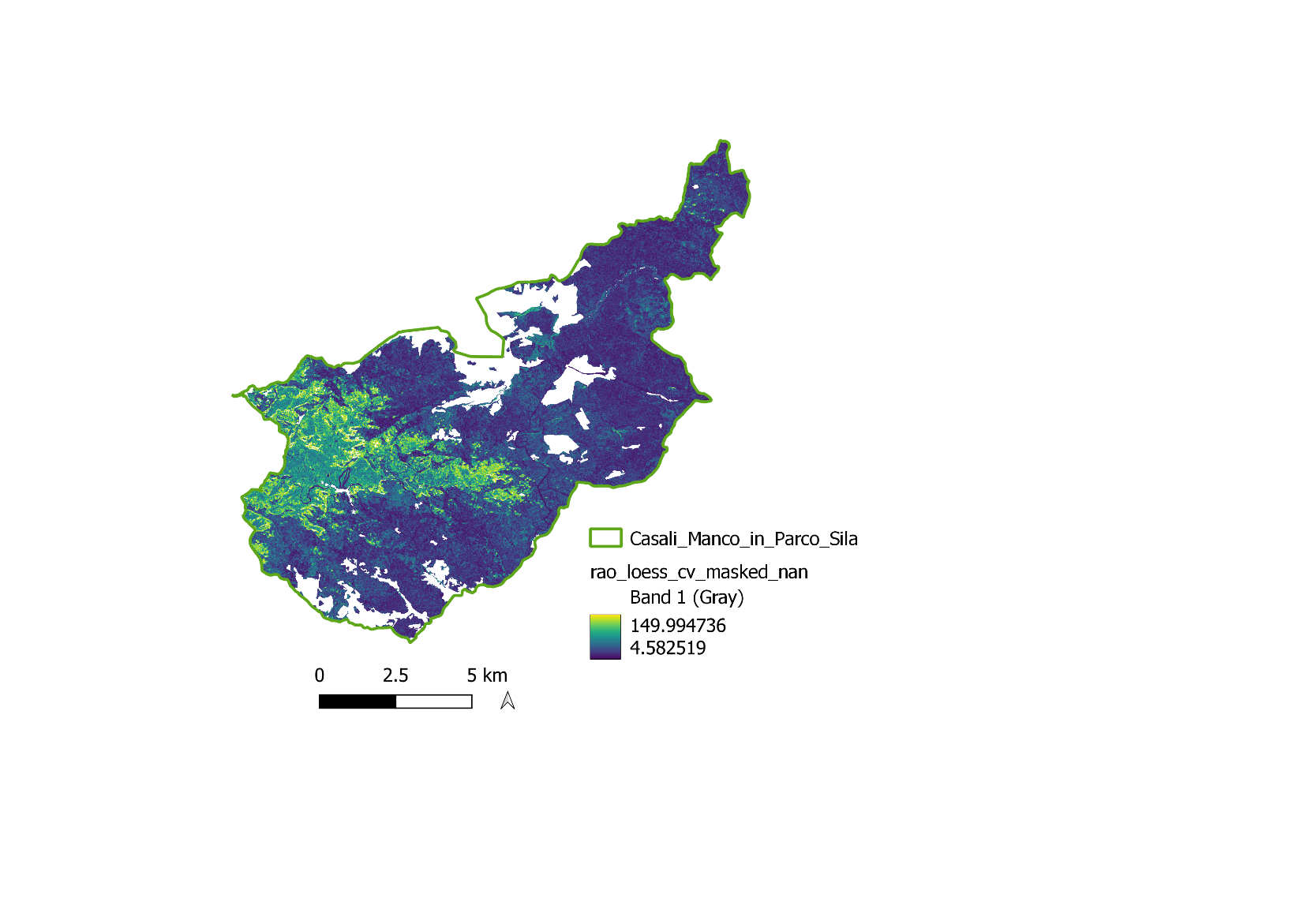


Figura 2. Mappa della variabilità spaziale e temporale dell’indice RaoQ nell’area pilota di Casali del Manco (2018-2024). Il coefficiente di variazione (CV) della pendenza della serie temporale del RaoQ è utilizzato come proxy della diversità funzionale e dell’instabilità spettrale. Le aree con CV elevato indicano potenziali zone a dinamismo ecologico attivo o eterogeneità strutturale.

La stratificazione del campionamento in campo dovrà inoltre essere guidata dalle **maschere vettoriali di “Foresta” e “Prateria”**, derivate dalla Carta della Natura del Parco della Sila, aggiornata al 2024. Queste due tipologie, che costituiscono il riferimento su cui sarà costruito e validato il modello di stima della biodiversità, sono state selezionate per includere gli habitat maggiormente rappresentati e rilevanti per la biodiversità all’interno dell’area di studio (riferimento a ZSC e ZPS), sia nel sito pilota di Casali del Manco che in un’ottica di scalabilità del modello, all’intero territorio del Parco.

Più nel dettaglio, la maschera “Foresta” include le classi (così come definite nella Carta della Natura): *Faggete dell'Italia meridionale, Boschi di conifere alloctone o fuori dal loro areale, Pinete di pino laricio*. La maschera “Prateria” comprende invece le classi (così come definite nella Carta della Natura):*Praterie aride temperate e submediterranee dell'Italia centrale e meridionale, Praterie compatte montane acidofile dell'Appennino centrale e meridionale, Brughiere oromediterranee ad arbusti spinosi dell'Appennino centrale e meridionale e delle Madonie*. Di conseguenza, il campionamento in campo dovrà essere stratificato coerentemente, garantendo una copertura equilibrata delle principali classi forestali e prative selezionate.

Immagine che contiene testo, mappa, diagramma

Il contenuto generato dall'IA potrebbe non essere corretto.

Figura 3. Principali categorie vegetazionali in riferimento alla Carta della Natura (2024) ricadenti nelle maschere vettoriali “Foresta” e “Prateria” nell’area pilota di Casali del Manco.

Infine, per integrare l’analisi delle aree forestali (maschera “Foresta”) con un’informazione strutturale ad alta risoluzione, è stato scaricato e ritagliato sull’area di studio il Canopy Height Model (CHM) fornito da Meta. Questo dato rappresenta l’altezza della copertura vegetale e costituisce un proxy efficace della complessità verticale della struttura forestale. La componente strutturale fornita dal CHM è particolarmente utile per distinguere tra tipologie forestali che presentano firme spettrali simili, ma che differiscono in modo significativo nella loro organizzazione tridimensionale (es. stratificazione verticale, età e densità del popolamento). Il CHM rappresenta quindi uno strumento chiave per stratificare ulteriormente il campionamento in campo sulla base della struttura forestale, consentendo di distribuire i rilievi tra diverse categorie, quali formazioni arboree omogenee o disomogenee, popolamenti giovani o maturi.

Immagine che contiene testo, mappa

Il contenuto generato dall'IA potrebbe non essere corretto.

Figura 4. **Canopy Height Model (CHM) dell’area di studio** derivato da dati Meta ad altissima risoluzione (1 m), rappresenta l’altezza della copertura forestale e costituisce un indicatore chiave per valutare la complessità strutturale verticale della vegetazione, utile per la differenziazione ecologica delle formazioni forestali.

# Dataset satellitari e derivazione di Indici Multispettrali e radar (input modello)

## *Sentinel-1 (SAR)*

L’utilizzo delle immagini radar Sentinel-1, che operano nella banda C a doppia polarizzazione (VV e VH), ha consentito di integrare informazioni **strutturali** e **biomorfologiche** della vegetazione. L’insensibilità del radar alla copertura nuvolosa rende questi dati particolarmente adatti per acquisizioni multitemporali robuste.

A partire da stack mensili della missione Sentinel-1, sono stati calcolati i percentili (25°, 50°, 75°) delle bande VV e VH, successivamente trasformati in scala lineare. Da questi, sono stati derivati i seguenti indicatori:

* **VV\_iqr** e **VH\_iqr**, che rappresentano l'intervallo interquartile della risposta radar per ciascuna polarizzazione e riflettono la variabilità microstrutturale delle coperture vegetali
* **RVI (Radar Vegetation Index)**, correlato con la densità del manto vegetale, utile per distinguere formazioni erbacee da coperture forestali più compatte
* **RFDI (Radar Forest Degradation Index)**, sensibile alla degradazione forestale, defogliazione o taglio selettivo

Questi indici forniscono una dimensione strutturale complementare rispetto alla sola informazione ottica.

## *Sentinel-2 (MSI)*

Le immagini multispettrali Sentinel-2, grazie alla copertura in 13 bande ottiche e alla risoluzione di 10-20 m, sono state utilizzate per l’elaborazione di **indici vegetazionali** fondamentali nella valutazione della funzionalità fotosintetica e dell'umidità della vegetazione.

Dopo aver applicato una maschera di nubi (basata su QA60) e normalizzato i valori di riflettanza, sono stati calcolati:

* **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)**, indicatore classico di vigore fotosintetico;
* **EVI (Enhanced Vegetation Index)**, più sensibile in coperture dense, meno soggetto a saturazione rispetto all'NDVI;
* **SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)**, utile in ambienti a copertura rada grazie alla correzione dell'effetto suolo;
* **NDII (Normalized Difference Infrared Index)**, indice sensibile al contenuto idrico della vegetazione, utile per monitorare lo stato idrico e le variazioni dovute a stress o stagionalità;
* **NDWI (Normalized Difference Water Index)**, indice che rileva la presenza di acqua e l’umidità del suolo e della vegetazione, efficace nell’individuare zone umide, habitat favorevoli alla biodiversità e le rispettive variazioni stagionali.

Le serie temporali di questi indici sono state aggregate su base mensile nel periodo **maggio–settembre**, selezionato appositamente per escludere i mesi invernali soggetti a copertura nevosa e successivamente sintetizzate come **medie e mediane stagionali** **per ciascun anno** considerato (2018 e 2024) al fine di sintetizzare in modo robusto l’intero ciclo vegetativo dell’area di studio.

## *Dati topografici e copertura del suolo*

A completamento del quadro spettrale e strutturale, sono stati integrati layer topografici ed etichette di copertura del suolo per una caratterizzazione più realistica delle condizioni ecologiche locali.

Il **Canopy Height Model (CHM)** è stato utilizzato in due versioni complementari: una ad altissima risoluzione (1 metro), fornita da Meta (Tolan et al., 2024) e una a 10 metri, prodotta da ETH Zürich (Lang et al., 2023), più adatta all’integrazione con dati Sentinel-2. Il CHM fornisce una rappresentazione quantitativa dell’altezza del soprassuolo, e quindi della **struttura verticale della vegetazione**. Questa informazione è cruciale per distinguere formazioni forestali complesse e stratificate (es. foreste mature, multilivello) da sistemi più semplici, come boschi giovani, impianti artificiali o aree recentemente disturbate. L’integrazione del CHM consente quindi di interpretare in modo più preciso l’eterogeneità ecologica, andando oltre quanto osservabile dai soli indici spettrali.

Il **Modello Digitale del Terreno (DTM)** è stato ricavato da dati a 5 metri e interpolato rispettivamente a 6 e 10 metri per garantire compatibilità spaziale con le immagini SPOT 7-8 e Sentinel-2. Da questo sono stati derivati **Slope** (pendenza), **Aspect** (esposizione) ed **Elevation** (quota), tre variabili ambientali fondamentali per la caratterizzazione delle condizioni ecologiche locali che influenzano la distribuzione e la composizione delle comunità biologiche.

Infine, è stato incluso il prodotto **Dynamic World**, da cui è stata estratta la **moda annuale** della copertura del suolo per il periodo maggio-settembre, nei sette anni compresi tra il 2018 e il 2024. Le classi di maggiore interesse (es. trees, grass) sono state filtrate e utilizzate come layer semantico per stratificazioni supervised, confronti ecologici o masking nelle analisi di diversità.

# Modellistica per la stima della biodiversità: modelli e applicazioni

L'integrazione di modelli di Machine Learning e Deep Learning è fondamentale per esplorare e prevedere la distribuzione spaziale della biodiversità. Alcuni tra i modelli selezionati, che saranno testati nei prossimi mesi di progetto e coprono uno ampio spettro di approcci: supervisionati, semi-supervisionati e non supervisionati. Ogni modello è stato selezionato per la sua capacità di rappresentare strutture ecologiche latenti, correlazioni complesse o mancanza di annotazioni nei dati. In questa prima fase si è proceduto alla ricerca e lo studio dei modelli di ML/DL più utilizzati ed efficienti per la generazione di output inerenti alla biodiversità. La ricerca, che è stata condotta facendo un approfondito studio della bibliografia scientifica disponibile, ha permesso di selezionare cinque tipologie di modelli, per i quali sono presentati le caratteristiche principali e il loro campo applicativo.

## *Modelli Supervisionati*

### Convolutional Neural Network (CNN) con meccanismi di Attention

I CNN rappresentano la spina dorsale dell'analisi di immagini spaziali grazie alla loro capacità di apprendere gerarchie di feature visive attraverso convoluzioni locali. In questo contesto, l'architettura CNN può essere potenziata con meccanismi di attention spaziale, che permettono al modello di concentrare l'attenzione su regioni informativamente rilevanti (es. bordi tra ecosistemi, patch ecotonali, discontinuità morfologiche). **Applicazioni**: classificazione degli habitat, mappatura fine della struttura forestale, individuazione di aree transizionali tra formazioni prative e boschive.

### Vision Transformer (ViT)

I Vision Transformer si differenziano dalle CNN per la loro capacità di modellare interazioni spaziali non locali attraverso self-attention. Invece di usare kernel convoluzionali, il ViT codifica l'immagine in patch (es. 16x16 pixel), le trasforma in token, e li processa con meccanismi di attention multi-head. Questo consente una visione più olistica della scena, utile per pattern ecologici che si estendono su più scale. **Applicazioni**: regressione sul RaoQ index, classificazione ecologica multi-label, identificazione di pattern spaziali strutturali.

## *Modelli non supervisionati*

### K-means++

Il K-means++ rappresenta un'estensione del classico algoritmo di clustering, migliorando l'inizializzazione dei centroidi per evitare convergenze sub-ottimali. Applicato a indici vegetazionali (NDVI, SAVI), strutturali (RVI, CHM) e topografici (slope, elevation) consente di rilevare cluster ecologici coerenti con le tipologie vegetazionali osservate. Questo tipo di modello mostrata buona capacità di separazione delle classi funzionali, anche in assenza di annotazioni esplicite. **Applicazioni**: segmentazione funzionale, delimitazione automatica di unità ecologiche, clusterizzazione di hotspot biodiversi.

### Gaussian Mixture Model (GMM)

GMM è un modello di clustering probabilistico che assume che i dati siano generati da una combinazione di distribuzioni gaussiane. Rispetto al K-means, consente cluster sovrapposti e gestione dell'incertezza. Generalmente testato su variabili continue (RVI, CHM, elevation), ottiene buoni risultati nel rappresentare transizioni ecotonali e zone miste. **Applicazioni**: modellazione continua della diversità funzionale, individuazione di confini ecologici deboli, stratificazione pre-clustering per modelli supervised.

## *Modelli semi-supervisionati*

### Autoencoder ibrido

L'autoencoder ibrido è costituito da due componenti principali: un encoder-decoder che comprime e ricostruisce l'informazione spaziale (es. patch multispettrali, profili radar) e un classificatore supervisionato che sfrutta la rappresentazione latente per effettuare previsioni. Questo approccio è particolarmente efficace quando si dispone di pochi dati etichettati ma molti dati non annotati permettendo una rappresentazione compatta e discriminativa dello spazio funzionale. **Applicazioni**: pre-training di feature extractor, classificazione presenza/assenza con etichette parziali, miglioramento della separabilità ecologica tra coperture simili.

# Sviluppo della piattaforma SilaBiometric Viewer

La piattaforma web sviluppata da 17tons per il progetto SilaBioMetric nasce come single-page application leggera, costruita con Vite e Leaflet per offrire una consultazione rapida degli output telerilevati e dei layer di riferimento prodotti nei WP1 e WP2. Il codice integra un server di sviluppo Node che emula i servizi dati di produzione e un front-end che gestisce il rendering ad alte prestazioni su canvas, così da mantenere fluida la navigazione anche in presenza di GeoTIFF multi-band di grandi dimensioni.

### Input principali

L’applicativo lavora su un set di input organizzato in cartelle dedicato:

* (i) i raster scientifici in formato GeoTIFF, raccolti nella directory biodiversity\_rasters, rappresentano l’indice di biodiversità normalizzato tra 0 e 1, dove 0 indica le aree a biodiversità più bassa e 1 quelle a biodiversità più elevata;
* (ii) le geometrie vettoriali delle aree di lavoro (ZSC, Carlomagno, ecc.) sono archiviate in areas/ come GeoJSON e forniscono i poligoni per filtrare e mascherare i dati;
* (iii) un’eventuale cache di tasselli di basemap (basemap\_tiles/) consente di lavorare offline o con date specifiche.

Il middleware Node espone questi asset tramite API locali (/api/rasters, /api/basemaps, /rasters) che restituiscono liste ordinate e gestiscono la lettura parziale dei file per ridurre i tempi di caricamento. In fase di visualizzazione, il motore rileva automaticamente gli EPSG dichiarati, applica eventuali riproiezioni in WGS84 e calcola gli envelope geografici per inquadrare correttamente ogni dataset.

### Output e funzionalità

L’output è un viewer interattivo che combina basemap dinamiche (NASA GIBS o cache locale) con overlay scientifici selezionabili. L’interfaccia consente di accendere più raster in parallelo, regolarne l’opacità, scegliere scale cromatiche percettivamente uniformi e modulare la resa (smooth/pixel perfect) in base al contesto analitico. L’attivazione di uno strato aggiorna automaticamente la data del basemap e rende disponibile lo zoom ai limiti effettivi del dataset; la selezione di un’area di saggio applica maschere raster e mantiene in evidenza le geometrie WP1. In questo modo il tool restituisce un cruscotto operativo pronto per la validazione sul campo, facilitando il confronto tra serie temporali, layer strutturali e output modellistici del framework di biodiversità.

# 

# Bibliografia di riferimento

* Natura 2000. Standard data form – IT9310073 ‘Macchia Sacra’
* Natura 2000. Standard data form – IT9310073 ‘Pianori di Macchialonga’
* Rossi G., Montagnani C., Gargano D., Peruzzi L., Abeli T., Ravera S., Cogoni A., Fenu G., Magrini S., Gennai M., Foggi B., Wagensommer R.P., Venturella G., Blasi C., Raimondo F.M., Orsenigo S. (Eds), 2013. Lista Rossa della Flora Italiana. 1. Policy species e altre specie minacciate. Comitato Italiano IUCN e Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare
* Rossi G., Orsenigo S., Gargano D., Montagnani C., Peruzzi L., Fenu G., Abeli T., Alessandrini A., Astuti G., Bacchetta G., Bartolucci F., Bernardo L., Bovio M., Brullo S., Carta A., Castello M., Cogoni D., Conti F., Domina G., Foggi B., Gennai M., Gigante D., Iberite M., Lasen C., Magrini S., Nicolella G., Pinna M.S., Poggio L., Prosser F., Santangelo A., Selvaggi A., Stinca A., Tartaglini N., Troia A., Villani M.C., Wagensommer R.P., Wilhalm T., Blasi C., 2020. Lista Rossa della Flora Italiana. 2 Endemiti e altre specie minacciate. Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare
* Brandmayr P., Mazzei A., Bologna M. A., Rovelli V., Zapparoli M., 2016 – Invertebrati, Cucujus cinnaberinus (Scopoli, 1763). In: Stoch F., Genovesi P. (ed.), Manuali per il monitoraggio di specie e habitat di interesse comunitario (Direttiva 92/43/CEE) in Italia: specie animali. ISPRA, Serie Manuali e linee guida, 141/2016;
* Mazzei A., 2015 – Contributo scientifico COLEOTTERI. Report: Costituzione delle reti dei boschi vetusti nei parchi nazionali dell’Appennino meridionale. Biodiversità dei boschi vetusti della Sila – RENDE febbraio 2015. Responsabili scientifici: Prof. Pietro Brandmayr e Prof. Giuliano Menguzzato. Elaborato per: Ente Parco Nazionale della Sila;
* Audisio P., Baviera C., Mazzei A., Brandmayr P., Biscaccianti A.B., 2014 – Famiglia Cucujidae. In: Audisio P., Baviera C., Carpaneto G.M., Biscaccianti A.B., Battistoni A., Teofili C., Rondinini C. (compilatori) 2014: Lista Rossa IUCN dei Coleotteri saproxilici Italiani. Comitato Italiano IUCN e Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Roma;
* Antonio Mazzei e Pietro Brandmayr 2016 - I coleotteri del Parco nazionale della Sila. Specie saproxilobionti di maggior interesse comunitario, faunistico e conservazionistico. Editore: Parco Nazionale della Sila, Collana: Parco, Nr. 14. Pag. 190. ISBN-13: 9788897750130;
* Amori G., Mazzei A., Storino P., Urso S., Luzzi G., Aloise G., Gangale C., Ouzounov D., Luiselli L., Pizzolotto R., Brandmayr P., (2022). Forest management and conservation of faunal diversity in Italy: a review. Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology, (1-14) DOI: 10.1080/11263504.2021.2013334;
* Mazzei A., Audisio P., Vigna Taglianti A. and Brandmayr P. 2019. Geographical distribution and conservation status of the threatened saproxylic beetles Rhysodes sulcatus (Fabricius, 1787), Clinidium canaliculatum (O.G. Costa, 1839) and Omoglymmius germari (Ganglbauer, 1891) in Italy (Coleoptera: Rhysodidae). Fragmenta Entomologica. 51, 1 (May 2019), 89-96. DOI: doi.org/10.4081/fe.2019.337;
* Mazzei A., Bonacci T., Horákb J., Brandmayr P., 2018 – The role of topography, stand and habitat features for management and biodiversity of a prominent forest hotspot of the Mediterranean Basin: Saproxylic beetles as possible indicators. Forest Ecology and Management 410 (2018) 66–75;
* Bonacci T., Mazzei A., Naccarato A., Elliani R., Tagarelli A., & Brandmayr P., 2018 - Beetles “in red”: are the endangered flat bark beetles Cucujus cinnaberinus and C. haematodes chemically protected? (Coleoptera: Cucujidae), The European Zoological Journal, 85:1, 129-137, DOI: 10.1080/24750263.2018.1449906;
* Bonacci T., Mazzei A., Naccarato A., Elliani R., Tagarelli A., & Brandmayr P., 2018 - Beetles “in red”: are the endangered flat bark beetles Cucujus cinnaberinus and C. haematodes chemically protected? (Coleoptera: Cucujidae), The European Zoological Journal, 85:1, 129-137, DOI: 10.1080/24750263.2018.1449906;
* Bonacci T, Mazzei A, Horák J, Brandmayr P (2012) - Cucujus tulliae sp. n. – an endemic Mediterranean saproxylic beetle from genus Cucujus Fabricius, 1775 (Coleoptera, Cucujidae), and keys for identification of adults and larvae native to Europe. ZooKeys 212: 63–79. doi: 10.3897/zookeys.212.3254;
* Mazzei A., Bonacci T., Contarini T., Zetto T., Brandmayr P., 2011 - Rediscovering the “umbrella species” candidate Cucujus cinnaberinus (Scopoli, 1763) in Southern Italy (Coleoptera Cucujidae), and notes on bionomy – Italian Journal of Zoology, June 2011; 78(2): 264–270;
* Carpaneto G.M., Baviera C., Biscaccianti A.B., Brandmayr P., Mazzei A., Mason F., Battistoni A., Teofili C., Rondinini C., Fattorini S., Audisio P. (2015): A Red List of Italian Saproxylic Beetles: taxonomic overview, ecological features and conservation issues (Coleoptera). Fragmenta entomologica, 47 (2): 53-126. eISSN: 2284-4880 (online version);
* Lang, N., Jetz, W., Schindler, K., Wegner, J.D., 2023. A high-resolution canopy height model of the Earth. Nat Ecol Evol 7, 1778–1789. https://doi.org/10.1038/s41559-023-02206-6;
* Rocchini, D., Marcantonio, M., Da Re, D., Chirici, G., Galluzzi, M., Lenoir, J., Ricotta, C., Torresani, M., Ziv, G., 2019. Time-lapsing biodiversity: An open-source method for measuring diversity changes by remote sensing. Remote Sensing of Environment 231, 111192https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.05.011;
* Tolan, J., Yang, H.-I., Nosarzewski, B., Couairon, G., Vo, H.V., Brandt, J., Spore, J., Majumdar, S., Haziza, D., Vamaraju, J., Moutakanni, T., Bojanowski, P., Johns, T., White, B., Tiecke, T., Couprie, C., 2024. Very highresolution canopy height maps from RGB imagery using self-supervised vision transformer and convolutional decoder trained on aerial lidar. Remote Sensing of Environment 300, 113888. https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113888.