

Ecoacustica e struttura forestale: un approccio integrato per l'analisi ecosistemica¹

Giorgia Guagliumi^{a*} | Andrea Potenza^a | Claudia Canedoli^a | Roberto Benocci^a | Giovanni Zambon^a

^a Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e della Terra,
Università degli Studi Milano-Bicocca,
Piazza dell'Ateneo Nuovo, 1, 20126 Milano

* Autore di riferimento:
g.guagliumi@campus.unimib.it

Ricevuto: 27/2/2025

Accettato: 6/5/2025

DOI: 10.3280/ria1-2025oa19517

ISSN: 2385-2615

L'ecoacustica rappresenta un approccio innovativo per lo studio delle interazioni tra struttura ecosistemica e paesaggio sonoro, fornendo metriche quantitative per l'analisi della biodiversità e degli impatti antropici. Questo studio, condotto in un Sito di Interesse Comunitario (SIC) nel Parco Regionale della Valle del Ticino, integra il monitoraggio acustico passivo con dettagliati rilievi vegetazionali per indagare le relazioni tra soundscape e complessità forestale. L'analisi delle componenti principali e la modellizzazione statistica degli indici ecoacustici e dei parametri vegetazionali rivelano una chiara associazione tra l'eterogeneità della copertura arborea e la diversità acustica, evidenziando il ruolo degli alberi maturi e della biomassa nel modulare le proprietà sonore dell'ambiente. Questi risultati confermano il valore dell'ecoacustica come strumento per la ricerca ecologica, dimostrando l'importanza di un approccio interdisciplinare nella comprensione delle dinamiche ambientali e nella definizione di strategie efficaci per la conservazione degli ecosistemi dall'inquinamento acustico.

Parole chiave: ecoacustica, rilievi vegetazionali, comunità ornitiche, rumore stradale, paesaggio sonoro

Ecoacoustics and forest structure: an integrated approach for ecosystem analysis

Ecoacoustics is an innovative approach to study the interactions between ecosystem structure and soundscape, providing quantitative metrics for the analysis of biodiversity and human impacts. This study, conducted in a Site of Community Interest (SCI) in the Ticino Valley Regional Park, integrates passive acoustic monitoring with detailed vegetation surveys to investigate the relationships between soundscape and forest complexity. Principal component analysis and statistical modelling of ecoacoustic indices and vegetation parameters reveal a clear relationship between tree cover heterogeneity and acoustic diversity, highlighting the role of mature trees and biomass in modulating the acoustic properties of the environment. These results confirm the value of ecoacoustics as a tool for ecological research and demonstrate the importance of an interdisciplinary approach in understanding environmental dynamics and defining effective strategies for protecting ecosystems from noise pollution.

Keywords: ecoacoustics, vegetation assessment, bird community, traffic noise, soundscape

1 | Introduzione

Negli ultimi decenni, il monitoraggio acustico ha acquisito un ruolo sempre più centrale nelle scienze ecologiche, grazie alla sua capacità di acquisire dati continui, non invasivi e altamente risolutivi sulla struttura e funzionalità degli ecosistemi [1]. In particolare, l'eco-acustica, disciplina che studia le componenti sonore degli ambienti naturali e antropizzati, offre una prospettiva innovativa per l'analisi delle interazioni tra processi biotici e abiotici. Il paesaggio sonoro di un'area può essere concettualmente scomposto in tre categorie fondamentali:

1. la biofonia, che comprende i segnali acustici emessi da organismi viventi;
2. la geofonia, che include i suoni di origine non biologica generati da fenomeni atmosferici e geofisici, come vento, pioggia e frane;

3. l'antropofonia, che raccoglie le emissioni sonore derivanti dalle attività umane [2, 3, 4].

Lo studio di queste componenti consente di caratterizzare la biodiversità acustica e di valutare le pressioni antropiche sull'ambiente, fornendo parametri oggettivi per la diagnosi dello stato ecologico degli habitat e per lo sviluppo di strategie di conservazione basate su evidenze acustiche [5].

L'inquinamento acustico rappresenta una delle minacce emergenti per gli ecosistemi, con effetti che possono alterare i comportamenti di molte specie, ridurre la capacità di comunicazione tra gli individui e modificare le dinamiche ecologiche su larga scala [6]. Il rumore di origine antropica, infatti, non solo si sovrappone ai segnali naturali, ma può anche determinare variazioni nei pattern di vocalizzazione di alcune specie, influenzandone la distribuzione e le interazioni all'interno degli habitat. L'ecoacustica offre strumenti innovativi per studiare tali impatti, permettendo di valutare la qualità sonora degli ambienti e di identificare eventuali segnali di stress ecologico [3, 7].

¹ Vincitrice del premio "Amedeo Giacomini" edizione 2025.

Un aspetto chiave dell'ecoacustica è l'uso di registratori automatici per il monitoraggio acustico passivo (PAM) [8, 9], una tecnica che consente di raccogliere dati in differenti aree e per lunghi periodi, senza interferire con il comportamento della fauna [10]. Il suddetto approccio rende possibile il confronto dei paesaggi sonori in diversi contesti ambientali, fornendo indicazioni sullo stato di conservazione degli habitat e sulle variazioni temporali nella presenza delle specie. Per analizzare i dati raccolti, sono stati sviluppati numerosi indici eco-acustici, che sintetizzano la complessità del soundscape e possono essere impiegati come indicatori della biodiversità e della qualità ambientale [10, 11, 12].

In questo quadro metodologico, l'obiettivo principale dello studio è quello di esaminare il paesaggio sonoro di un'area di rilevante valore ecologico, ovvero un Sito di Interesse Comunitario (SIC), e analizzare la relazione tra le caratteristiche acustiche e la struttura vegetazionale dell'area. Sebbene l'area di studio non si estenda su dimensioni particolarmente ampie, essa presenta una notevole eterogeneità ambientale, con habitat distinti che offrono un'opportunità unica per esplorare come le variabili ecologiche possano interagire all'interno di un paesaggio complesso e dinamico. L'obiettivo di tale analisi è dunque quello di verificare la presenza di correlazioni tra diversi aspetti interdisciplinari, riflettendo sulla necessità di adottare un approccio integrato, in cui la complessità dell'ambiente e le sue interazioni devono essere considerate nel loro insieme, piuttosto che isolando singoli fattori.

2 | Materiali e metodi

2.1 | Area di studio

L'area di studio si colloca presso la Lanca del Moriano, all'interno del Parco Naturale Lombardo della Valle del Ticino, nelle immediate vicinanze del comune di Bereguardo (PV). Essa si estende per circa 39 ettari lungo la sponda sinistra del fiume Ticino, in corrispondenza dell'estremità meridionale del Naviglio di Bereguardo (Fig. 1a). Il contesto geomorfologico è caratterizzato dalla presenza della depressione valliva ticinese e dalla transizione verso la bassa pianura, una zona in cui il reticolo fluviale ha inciso il paesaggio, determinando la formazione di ambienti eterogenei di elevato valore ecologico.

Un elemento di forte antropizzazione che incide sul contesto acustico e ambientale dell'area è rappresentato dall'autostrada A7, denominata "Autostrada dei Giovi", asse viario strategico che connette la conurbazione milanese con il porto di Genova. Questa infrastruttura rappresenta una fonte rilevante di pressione ambientale, associata a un gradiente di disturbo acustico crescente in funzione della densità del traffico veicolare. Oltre alle implicazioni sonore, la presenza dell'arteria stradale genera un effetto di barriera ecologica, frammentando la continuità degli ecosistemi e alterando la connettività biologica su scala paesaggistica [13].

Dal punto di vista della conservazione, il sito è incluso all'interno del Sito di Interesse Comunitario (SIC) IT2080014

"Basso Corso e Sponde del Ticino", un'area sottoposta a tutela nell'ambito della Rete Natura 2000. Tale designazione testimonia la rilevanza della zona per la salvaguardia di habitat di pregio e di specie di interesse comunitario, conformemente agli obiettivi della Direttiva Habitat (92/43/CEE).

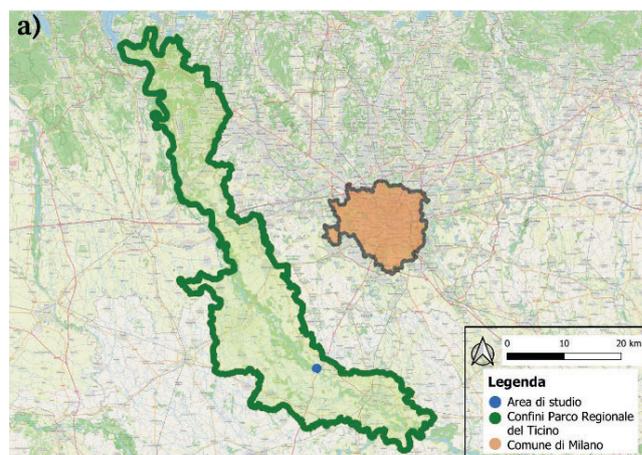


Fig. 1 – Inquadramento geografico dell'area di studio: i suoi confini, i limiti del Parco Regionale e un riferimento al comune di Milano (a); i siti di misura ed esempi degli habitat circostanti (b)
Geographic framework of the study area: its boundaries, the limits of the Regional Park, and a reference to the municipality of Milan (a); the monitoring sites and examples of the surrounding habitats (b)

2.2 | Strategia di campionamento e acquisizione dati

L'indagine acustica è stata condotta mediante una rete di nove stazioni di monitoraggio, dislocate lungo una griglia spaziale regolare, al fine di garantire una copertura rappresentativa delle diverse condizioni ambientali. La suddetta disposizione è stata concepita per esaminare la variabilità spaziale dell'impatto acustico derivante dal traffico autostradale e, contestualmente, per caratterizzare le peculiarità ecoacustiche degli ambienti ripariali rispetto a quelli più distanti dal corso d'acqua. I punti di rilevamento sono stati stratificati in tre categorie principali (Fig. 1b), definite in base alla distanza progressiva sia dal corso d'acqua sia dalla principale sorgente di disturbo antropogenico (l'autostrada A7). Tale classificazione risponde all'esigenza di rappresentare un gradiente ambientale e acustico, potenzialmente associato a variazioni nella copertura vegetale e nell'esposizione al rumore. Le fasce presentano le seguenti distanze medie dall'autostrada: 762 m per la Fascia A, 516 m per la Fascia B e 284 m per la Fascia C. Tali valori sono stati calcolati tramite la funzione "v.distance" del software QGIS, che consente di misurare la distanza minima tra ciascun punto di monitoraggio e il poligono corrispondente all'infrastruttura stradale.

Fascia A (siti 1, 2, 3): ubicata nella porzione più interna della lanca, caratterizzata da una densa copertura arborea e da una schermatura naturale più efficace rispetto alle fonti sonore esterne.

Fascia B (siti 4, 5, 6): situata nella zona di transizione, in cui la struttura forestale si presenta più rada, determinando un graduale incremento dell'esposizione alle emissioni sonore.

Fascia C (siti 7, 8, 9): collocata oltre il perimetro della lanca, in prossimità dell'autostrada A7, in un'area caratterizzata da una limitata copertura vegetale e da un'elevata incidenza del rumore antropico.

Il monitoraggio è stato eseguito nel corso della campagna primaverile 2023, svoltasi dal 13 aprile al 3 maggio, mediante sistemi di registrazione passiva. Il protocollo di acquisizione ha seguito una scansione temporale ciclica, con sessioni di registrazione della durata di 1 minuto, intervallate da 5 minuti di pausa, al fine di ottimizzare la capacità di raccolta dati nel lungo periodo senza compromettere la qualità del campionamento.

Il sistema di acquisizione era composto da sette Song Meter Micro (SMM, siti 1-7) della Wildlife Acoustics e due Soundscape Explorer Terrestrial (SET, siti 8-9) sviluppato dalla Luniletronik. Le unità SMM, dotate di un singolo microfono omnidirezionale, raggiungono una frequenza di campionamento di 96 kHz, mentre il dispositivo SET, configurato con un sistema a doppio microfono, è in grado di operare con una risoluzione massima di 192 kHz. Quest'ultimo strumento integra, inoltre, una serie di sensori ambientali per la misurazione di parametri meteorologici, tra cui temperatura, umidità, illuminazione e pressione atmosferica, fornendo un quadro più completo delle condizioni ambientali durante il monitoraggio.

Parallelamente al rilievo acustico, sono state condotte analisi in situ per caratterizzare la struttura vegetazionale e la copertura forestale, al fine di valutare il ruolo della componente arborea nei processi di modulazione del paesaggio sonoro e attenuazione delle emissioni di origine antropogenica.

Per quantificare la copertura vegetale nei siti di monitoraggio, è stata utilizzata una fotocamera Canon EOS M50 Mark II dotata di un obiettivo fisheye, che ha consentito di stimare l'indice di copertura fogliare. Quest'ultimo rappresenta la frazione della superficie del suolo coperta dal fogliame quando osservata da una prospettiva zenitale. Tale parametro è di particolare interesse per l'analisi dell'interazione tra vegetazione e propagazione sonora, fornendo indicazioni sulla capacità del contesto forestale di attenuare specifiche componenti spettrali del paesaggio acustico.

2.3 | Il paesaggio sonoro

2.3.1 | Calcolo e ottimizzazione degli indici eco-acustici

Nel presente studio, l'analisi e il calcolo degli indici eco-acustici sono stati eseguiti tramite l'utilizzo dell'ambiente di calcolo "R" [14], supportato dai pacchetti "tuneR", "seewave" [15] e "soundecology" [16]. La trasformata di Fourier veloce (FFT) è stata configurata con una risoluzione spettrale di 1024 punti, corrispondente a una risoluzione di 46,87 Hz, che ha consentito una precisa analisi delle caratteristiche acustiche in esame. In linea con le più recenti indicazioni metodologiche, si è scelto di non impiegare un singolo indice eco-

acustico, poiché un approccio basato su un unico parametro risulterebbe insufficiente per rappresentare la complessità intrinseca del paesaggio sonoro, limitando la comprensione complessiva dell'ambiente acustico [17]. L'adozione di un insieme diversificato di indici, invece, ha permesso di ottenere informazioni dettagliate su varie caratteristiche del suono, garantendo una maggiore flessibilità dell'analisi, e riducendo interpretazioni parziali o distorte dei dati acustici [1].

Gli indici eco-acustici considerati nel presente studio sono stati selezionati con l'obiettivo di garantire una valutazione esaustiva e approfondita delle caratteristiche del paesaggio sonoro. Tra questi, si annoverano l'Acoustic Complexity Index (ACI) [18], l'Acoustic Diversity Index (ADI) [19], l'Acoustic Evenness Index (AEI) [19], il Bioacoustic Index (BI) [20], il Normalized Difference Soundscape Index (NDSI) [21], l'Acoustic Entropy (H) [23], il Dynamic Spectral Centroid (DSC) [19] e la Zero Crossing Rate (ZCR) [23].

L'utilizzo di registratori acustici di modelli differenti ha reso necessario l'impiego di un processo di equalizzazione delle registrazioni, volto a garantire che le risposte in frequenza dei dispositivi fossero omogenee e confrontabili. È risultata quindi imprescindibile l'allineamento della risposta in frequenza dei registratori a quella di un fonometro, con l'intento di assicurare la comparabilità diretta tra i livelli sonori registrati e gli indici eco-acustici derivanti dalle registrazioni. Tale procedura è esposta nel seguente articolo [24]. La procedura di equalizzazione è stata condotta in condizioni controllate, esponendo i dispositivi a un segnale acustico standard (rumore bianco) e confrontando la risposta dei registratori con quella del fonometro. Le differenze rilevate sono state corrette mediante un filtro digitale (FIR), applicato a ciascuna registrazione per uniformarne la risposta in frequenza [25].

Nel processo di selezione dei parametri per il calcolo degli indici eco-acustici, è stata adottata una metodologia definita [26], con il fine di ottimizzare le variabili in oggetto. In particolare, la soglia antropofonica è stata stabilita a 1750 Hz, come frequenza minima per il calcolo degli indici, al fine di garantire una corretta discriminazione tra suoni di origine antropogenica e suoni naturali. La frequenza massima biofonica è stata fissata a 9 kHz, sulla base delle frequenze emesse dalle principali specie aviarie presenti nell'area di studio. Infine, per quanto concerne gli indici ADI e AEI, sono stati implementati specifici adattamenti al codice sorgente originario degli indici, come delineato nel pacchetto R soundecology, tra cui l'integrazione del valore della dB threshold pari a -73 dB, al fine di migliorare l'elaborazione e l'accuratezza dei dati. Tali parametri ottimizzati permettono un confronto diretto con altre indagini nell'ambito dell'eco-acustica, assicurando l'affidabilità e la precisione delle analisi.

2.3.2 | Analisi statistica

Nell'ambito dell'elaborazione dei dati, è stata impiegata l'Analisi delle Componenti Principali (PCA), una metodologia statistica che consente di ridurre la complessità dei dataset ad

alta dimensionalità. L'approccio della PCA è particolarmente vantaggioso in contesti acustici, in cui molteplici variabili possono essere fortemente correlate tra loro. La sua applicazione consente di estrarre le informazioni essenziali (dette Componenti Principali), semplificando l'interpretazione senza sacrificare il valore informativo del dataset [27, 28].

Successivamente, le componenti principali estratte dalla PCA sono state impiegate per eseguire un'analisi di clustering, con l'obiettivo di individuare la presenza di gruppi distinti in base alle caratteristiche ecoacustiche. A tal fine, è stata implementata la funzione `clValid` [29, 30] che consente una valutazione comparativa di diversi algoritmi di clustering, tra cui k-means, hierarchical clustering, DIANA e PAM, fornendo criteri oggettivi per l'identificazione della soluzione ottimale.

La selezione del metodo di clustering più appropriato è stata effettuata sulla base di tre metriche di validazione interna:

1. il Connectivity Index, il cui valore minimo indica una migliore separazione tra cluster, riducendo il fenomeno dell'effetto chaining;
2. il Dunn Index, il cui valore massimo riflette una maggiore compattezza intracluster e separazione intercluster, migliorando la robustezza della classificazione;
3. il Silhouette Index, che misura il grado di coesione interna e distinzione tra i cluster, con valori più elevati indicativi di una struttura ben definita nel dominio dei dati [31].

Gli indici eco-acustici che hanno contribuito in misura predominante alla varianza complessiva, identificati dalle componenti principali estratte, sono stati oggetto di analisi approfondite. La suddetta selezione ha permesso di focalizzarsi sugli indici che presentano un maggiore impatto nel descrivere i fenomeni acustici rilevanti, escludendo quelli che non apportano valore significativo alla comprensione del fenomeno studiato [32].

2.4 | La struttura forestale

Per esaminare la struttura forestale, sono stati condotti rilievi di campo in nove aree (plot) campione, ciascuna delle quali è stata associata a un punto di registrazione del paesaggio sonoro. La delimitazione di ciascun plot è stata eseguita seguendo un protocollo standard, che prevede di partire dall'albero centrale, su cui è stato posizionato lo strumento di registrazione, e di definire un quadrato di lato 30 metri. L'accuratezza delle misurazioni è stata garantita mediante l'uso di un filo di misura e di una bussola e, per ogni plot, sono stati raccolti dati inerenti alle informazioni sul sito (ubicazione, data del rilievo, operatori coinvolti), alla tipologia di habitat, nonché alla presenza di alberi vivi o morti. Per ciascun albero all'interno dei plot, sono stati registrati parametri specifici, quali l'altezza, misurata tramite telemetro laser, e la circonferenza del tronco, rilevata a 1,30 metri dal suolo con un metro a nastro.

Tali misurazioni hanno permesso di calcolare differenti parametri strutturali essenziali per la descrizione della vegetazione. In particolare, il diametro a petto d'uomo (DBH) è stato calcolato sulla base della circonferenza rilevata, appli-

cando la formula del diametro (rapporto della circonferenza con il valore di π). La densità del fusto (SD), indicativa della biomassa legnosa per unità di superficie, è stata calcolata dividendo il numero totale di alberi per l'area del plot per permettere il confronto con dati provenienti dalla letteratura (risultati espressi in alberi per ettaro [alberi/ha]). Infine, l'area basale (BA), che misura la sezione trasversale del tronco a 1,30 metri dal suolo, ha fornito un'indicazione del volume della biomassa arborea, essenziale per comprendere la struttura della vegetazione e per fare previsioni sulla sua evoluzione. A partire da questi parametri, sono stati calcolati ulteriori indici descrittivi della struttura forestale, tra cui la dominanza relativa (RD), che misura la prevalenza di una specie arborea in base alla sua area basale ed è calcolata come il rapporto tra l'area basale della specie in questione e l'area basale totale del plot.

Al fine di caratterizzare in maniera più esaustiva la diversità ecologica delle comunità vegetali esaminate, sono stati calcolati due indici comunemente impiegati nella valutazione della biodiversità: la ricchezza specifica (SR), indicativa del numero complessivo di specie censite all'interno di ciascun plot, e l'indice di diversità di Shannon (HS), che integra l'informazione relativa alla numerosità delle specie (ricchezza) con quella concernente la loro distribuzione (equità), restituendo così una stima complessiva della complessità e dell'eterogeneità compositiva della comunità.

Successivamente, è stata effettuata la stima della biomassa arborea epigea attraverso l'applicazione di modelli allometrici specie-specifici, derivanti da parametri dendrometrici essenziali, quali il DBH e l'altezza degli individui. Nei casi in cui quest'ultima non fosse impiegata all'interno del modello, la stima è stata condotta impiegando esclusivamente il diametro. La selezione delle equazioni allometriche è stata eseguita mediante `GlobAllomeTree` [33], una piattaforma scientifica di riferimento per l'accesso e la condivisione di equazioni allometriche a livello globale. Tale strumento, sviluppato grazie alla collaborazione tra la Food and Agriculture Organization (FAO), il Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) e il Dipartimento per l'Innovazione nei Sistemi Biologici, Agroalimentari e Forestali (DIBAF) dell'Università della Tuscia (UNITUS), fornisce un quadro metodologico standardizzato per la quantificazione della biomassa arborea. La selezione dell'equazione più idonea per ciascuna specie rilevata è stata condotta sulla base di criteri dettagliati, volti a minimizzare le incertezze nella stima, privilegiando (Fig. 2):

- a) affinità geografica del modello allometrico con l'area di studio, prediligendo equazioni sviluppate in contesti ecologicamente affini o nello stesso Paese;
- b) integrazione di variabili dendrometriche chiave, con preferenza per equazioni che considerano sia il diametro sia l'altezza, al fine di migliorare la precisione della stima;
- c) esaustività nella caratterizzazione delle frazioni biometriche, includendo componenti quali corteccia, rami morti, rami grossolani ($D > 7$ cm), rami fini ($D < 7$ cm), foglie, radici principali e secondarie, radici fini, ceppi ed organi riproduttivi (frutti/semi).

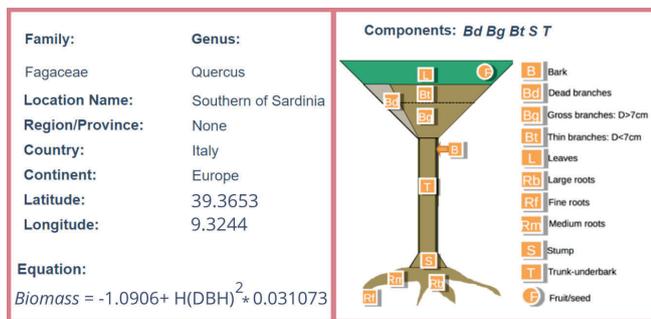


Fig. 2 – Esempio di selezione dell'equazione allometrica più idonea per la specie *Quercus robur*, adottando criteri dettagliati per minimizzare le incertezze nella stima [33]

Example of selecting the most suitable allometric equation for the species *Quercus robur*, adopting rigorous criteria to minimize estimation uncertainties [33]

L'adozione di questo approccio metodologico ha consentito di ottenere una caratterizzazione quantitativa dettagliata della biomassa epigea, fornendo una base solida per l'analisi della struttura e della funzionalità degli ecosistemi forestali.

Con il fine di ampliare il database analitico, sono stati esaminati ulteriori parametri ecologici: l'Indice di Area Fogliare (PAI) e la Frazione di Copertura Vegetale (FCover). Il PAI risulta cruciale per descrivere la struttura e la produttività vegetale di un determinato sito [34], e rappresenta una misura quantitativa della densità e distribuzione del fogliame all'interno dell'ecosistema, esprimendo la proporzione tra la superficie vegetale e quella terrestre sottostante. La Frazione di Copertura Vegetale (FCover), invece, quantifica la porzione di suolo coperta da vegetazione, rivelandosi particolarmente utile nel monitoraggio dei mutamenti della copertura vegetale nel tempo.

Per la stima di tali indici (PAI e FCover), sono state acquisite immagini emisferiche tramite una fotocamera Canon EOS M50 MARK II, equipaggiata con un obiettivo fisheye. In ciascun sito d'indagine sono state scattate cinque fotografie: una direttamente sotto l'albero ospitante lo strumento di registrazione acustica e le altre quattro, disposte lungo i vertici di un quadrato immaginario a cinque metri di distanza dal punto centrale. Le immagini sono successivamente state analizzate con il software CAN-EYE [35], che ha consentito di eseguire una classificazione delle immagini, sia automatica che manuale, finalizzata alla distinzione tra i pixel relativi alla copertura del cielo e quelli associati alla vegetazione [36].

Infine, per una caratterizzazione complessiva della struttura forestale, le specie arboree sono state classificate in base al diametro a petto d'uomo (DBH), suddividendole in classi diametriche con intervalli di 10 cm. In ogni area di indagine, sono stati conteggiati gli individui appartenenti a ciascuna classe diametrica e suddivisi in funzione della specie. I dati raccolti sono stati successivamente espressi in unità per ettaro, al fine di consentire un confronto omogeneo tra le diverse aree di studio. Per ciascuna area, sono stati registrati diversi parametri: I. il numero di individui per ciascuna classe diametrica e per specie; II. il totale degli individui per ciascuna specie; e III. la somma complessiva degli individui presenti

nell'area, ottenuta aggregando tutte le specie individuate. Tali risultati hanno permesso di analizzare la composizione specifica della vegetazione e la distribuzione dimensionale della popolazione arborea.

2.5 | Correlazioni tra paesaggio sonoro e struttura forestale

L'analisi delle correlazioni è stata eseguita considerando gli indici ecoacustici più rilevanti, selezionati mediante la PCA, le variabili vegetazionali non correlate e la distanza di ciascun sito dall'autostrada (calcolata tramite il software QGIS []). Al fine di garantire la correttezza dell'approccio statistico, è stata preliminarmente verificata la distribuzione dei dati attraverso il test di Shapiro-Wilk, il quale ha permesso di valutare l'assunzione di normalità delle variabili analizzate. In base ai risultati ottenuti, le variabili sono state distinte in distribuite normalmente e non normalmente, adottando conseguentemente il coefficiente di correlazione di Pearson per le prime e il coefficiente di Spearman per le seconde.

Un aspetto centrale dell'indagine ha riguardato la relazione tra la struttura forestale e la ricchezza in specie aviaria, con particolare attenzione al ruolo ecologico degli alberi di grandi dimensioni [38]. Quest'ultimi rappresentano elementi chiave per la biodiversità, offrendo siti di nidificazione e risorse trofiche, in particolare per le specie insettivore che dipendono dagli artropodi presenti nella corteccia, nei tessuti legnosi e negli strati epifiti delle chiome più alte. L'analisi ha considerato sia le specie nidificanti primarie (cavity nester primari), come i Picidi, che scavano autonomamente le proprie cavità, sia le specie nidificanti secondarie (cavity nester secondari), che utilizzano cavità preesistenti [39]. Tra queste ultime rientrano *Cyanistes caeruleus* (cinciarella), *Poecile palustris* (cincia bigia) e *Certhia brachydactyla* (rampichino): la prima, probabilmente a causa delle sue ridotte dimensioni, predilige boschi di transizione, mentre *Poecile palustris* e *Certhia brachydactyla* mostrano una preferenza per foreste mature, rendendoli indicatori di ambienti boschivi consolidati e di lunga data.

Per una caratterizzazione dettagliata della comunità aviaria, è stata identificata la specie arborea dominante in ciascun sito. I dati acustici sono stati elaborati mediante il software Raven Pro [40], che ha permesso l'identificazione delle specie attraverso l'analisi delle vocalizzazioni registrate nelle ore di maggiore attività acustica, ovvero tra le prime ore del mattino e il sorgere del sole (5:00-8:00). L'attribuzione tassonomica è stata successivamente validata mediante confronto con la libreria BirdNET [40], verificando la corrispondenza tra le specie rilevate e quelle documentate nel Parco. Questa procedura ha consentito di escludere eventuali identificazioni errate e di confermare la presenza effettiva delle specie target nell'area di studio.

La relazione tra la ricchezza specifica aviaria e la struttura della comunità arborea è stata analizzata utilizzando la media ponderata degli individui di *Quercus robur* nelle diverse classi diametriche. Questo approccio consente di valutare l'influenza degli alberi di grandi dimensioni sulla composizione

ne della comunità ornitica, poiché tiene conto non solo della presenza della specie dominante, ma anche della sua distribuzione strutturale. Al fine di consolidare l'interpretazione dei risultati, la medesima analisi è stata estesa a *Carpinus betulus*, una specie arborea più giovane e caratterizzata da un minor sviluppo in termini di dimensioni, per verificare se l'associazione tra struttura forestale e diversità aviaria fosse principalmente guidata dalla presenza di alberi di grandi dimensioni piuttosto che dalla semplice abbondanza di individui arborei.

3 | Risultati

3.1 | Gli indici ecoacustici

L'analisi delle componenti principali applicata agli indici ecoacustici ha permesso di individuare tre componenti principali, le quali complessivamente spiegano il 78.3% della varianza totale osservata. Nello specifico, la prima componente principale (PC1) contribuisce per il 44.9%, la seconda (PC2) per il 19.9% e la terza (PC3) per il 13.5% (Fig. 3). L'analisi dei coefficienti di correlazione ha evidenziato che PC1 è fortemente influenzata dagli indici H, ADI e ZCR, delineando un asse informativo strettamente correlato alla diversità acustica e alla distribuzione energetica del segnale. PC2 è dominata dall'ACI, dal NDSI e dal DSC, descrivendo principalmente la complessità strutturale del segnale acustico, il rapporto tra componenti biofoniche e antropiche e la variabilità spettrale nel tempo. Infine, PC3 risulta caratterizzata principalmente dal BI, rappresentativo della ricchezza delle componenti biofoniche del paesaggio sonoro.

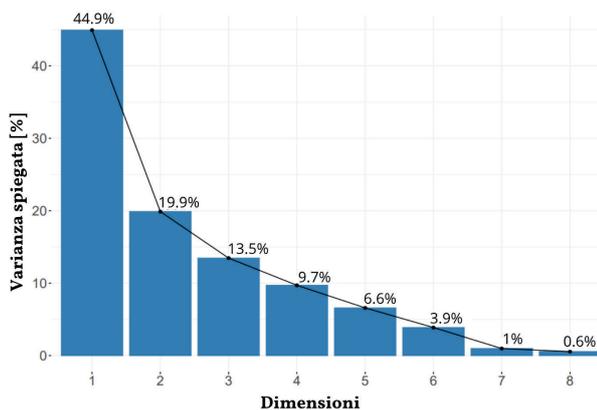


Fig. 3 – Contributo delle componenti principali alla varianza totale osservata nel dataset ecoacustico
Contribution of the principal components to the total variance observed in the ecoacoustic dataset

L'analisi delle variazioni temporali ha rivelato significative differenze spaziali tra i siti di monitoraggio, evidenziando la presenza di un gradiente acustico determinato dalla distanza rispetto alla fonte di disturbo antropico. In generale, le aree situate all'interno della Lanca, corrispondenti alle fasce A e

B, mostrano valori sistematicamente più elevati per gli indici associati alla biodiversità acustica, mentre i siti collocati in prossimità dell'infrastruttura autostradale, appartenenti alla fascia C, presentano valori sensibilmente inferiori, unitamente a una ridotta variabilità temporale.

H evidenzia valori più elevati nei siti 3, 4 e 6, caratterizzata da un'elevata diversità sonora, con un andamento relativamente stabile durante le ore diurne e una lieve flessione nelle ore notturne. Al contrario, i valori minimi si registrano nei siti 8 e 9, nei quali si osserva una ridotta entropia e una limitata variabilità nel corso della giornata (Fig. 4a). L'ADI segue un andamento analogo, con livelli più elevati nei siti interni e una riduzione nei siti della fascia C, dove si evidenzia una distribuzione meno uniforme dell'energia acustica nel tempo.

ZCR mostra valori massimi nei siti 1 e 6, con livelli altrettanto elevati nei siti 3 e 4, evidenziando segnali ad alte frequenze spettrali. I picchi più pronunciati si osservano nelle prime ore del mattino (8:00-9:00), seguiti da una progressiva diminuzione nelle ore centrali della giornata. Nei siti 8 e 9, i valori risultano sensibilmente inferiori segnalando la presenza di un rumore continuo, con una variazione giornaliera meno marcata (Fig. 4b). ACI presenta valori massimi nei siti 1, 2, 5 e 8, con variazioni significative tra il periodo diurno e quello notturno, evidenziando un'elevata diversità del paesaggio sonoro in queste aree. Il sito 1 registra un massimo relativo alle 8:00 e alle 18:00, mentre nel sito 8 il picco si manifesta tra le 13:00 e le 14:00, con un'intensità più pronunciata rispetto agli altri siti (Fig. 4c).

BI evidenzia valori più elevati nei siti 2, 5, 1 e 6, con due distinti momenti di massima intensità nelle prime ore del mattino (6:00) e in tarda serata (18:00), mostrando una forte componente biofonica nelle ore crepuscolari. Nelle ore centrali della giornata e durante la notte si osservano decrementi. Al contrario, i siti 7, 8, 9 presentano valori bassi, segnalando una scarsa presenza di attività biologica sonora (Fig. 4d). NDSI mostra valori negativi in tutti i siti, con livelli minimi registrati nel sito 7, indicando una predominanza della componente antropica (Fig. 4e). Nei siti 1, 3 e 4, si osservano valori sensibilmente più elevati, con massimi relativi nelle ore dell'alba e nelle ore centrali della mattinata (12:00 e 18:00). Infine, DSC presenta valori più elevati nel sito 5, mentre nei siti 7 e 8 si osserva una progressiva riduzione, associata a una minore variabilità spettrale. I minimi relativi si collocano nelle ore dell'alba e del tramonto (Fig. 4f).

Nel complesso i risultati delineano un quadro acustico strutturato, in cui la distribuzione spaziale degli indici ecoacustici risulta strettamente associata alla configurazione ambientale e alla distanza dalla principale fonte di disturbo. Gli indici associati alla complessità e alla diversità biofonica (H, ADI, ACI, BI) registrano valori significativamente più elevati nei siti interni alla Lanca, con picchi ricorrenti nelle ore crepuscolari e una marcata variabilità giornaliera. Al contrario, nei siti prossimi all'infrastruttura stradale tali indici risultano sensibilmente inferiori, con una ridotta variabilità giornaliera.

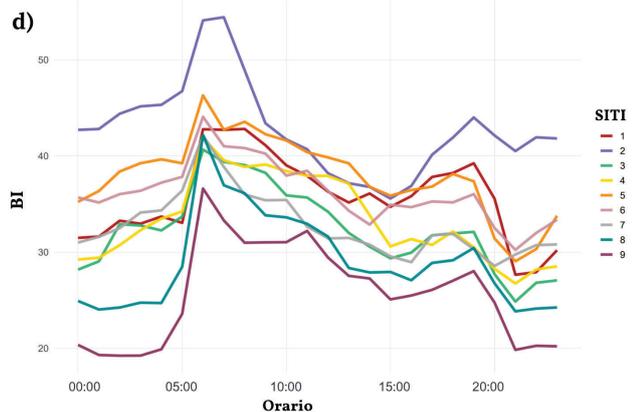
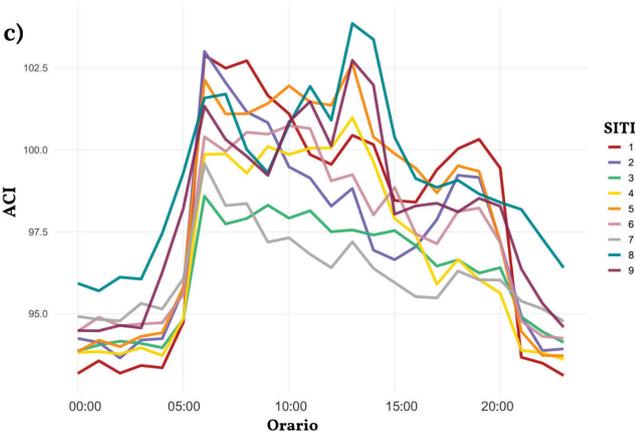
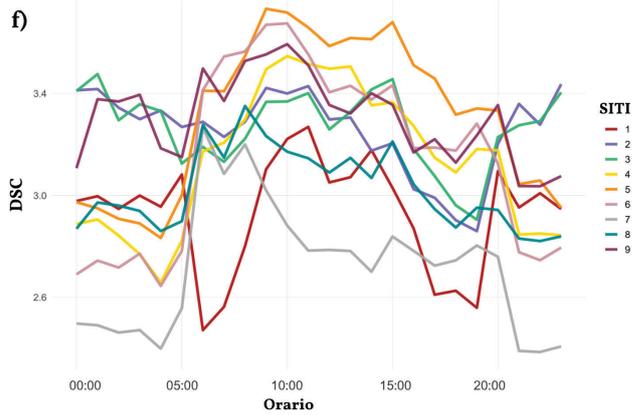
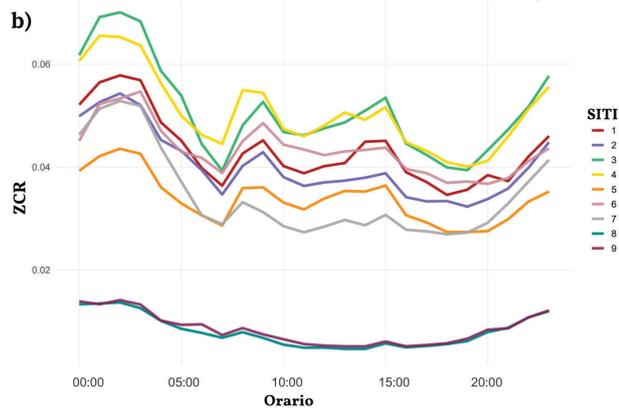
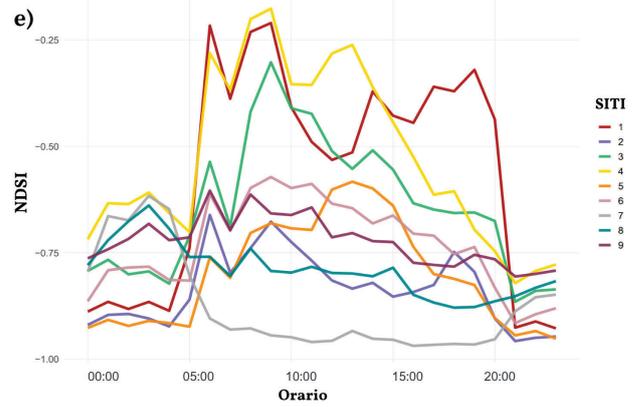
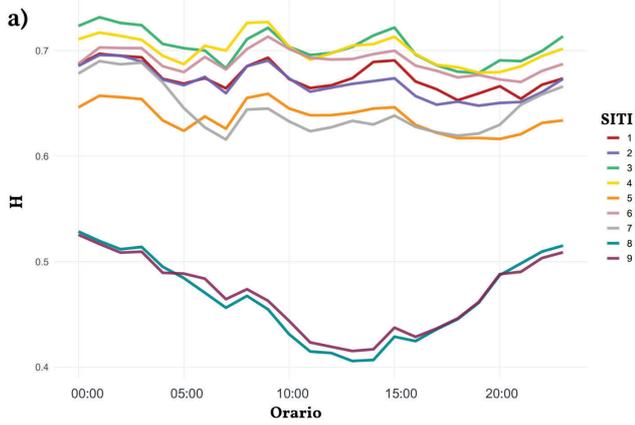


Fig. 4 – Andamenti temporali degli indici ecoacustici mediati sulle ore di ogni giorno per ciascun sito: H (a), ZCR (b), ACI (c), BI (d), NDSI (e), DSC (f)

Temporal trends of ecoacoustic indices averaged over the hours of each day for each site: H (a), ZCR (b), ACI (c), BI (d), NDSI (e), DSC (f)

L'analisi di clustering condotta sulle componenti principali della PCA ha permesso, infatti, di individuare due gruppi distinti di siti sulla base della loro struttura ecoacustica. Attraverso la libreria ClValid, il metodo gerarchico è stato identificato come il più adeguato, restituendo la migliore configurazione per una suddivisione in due cluster, come evidenziato

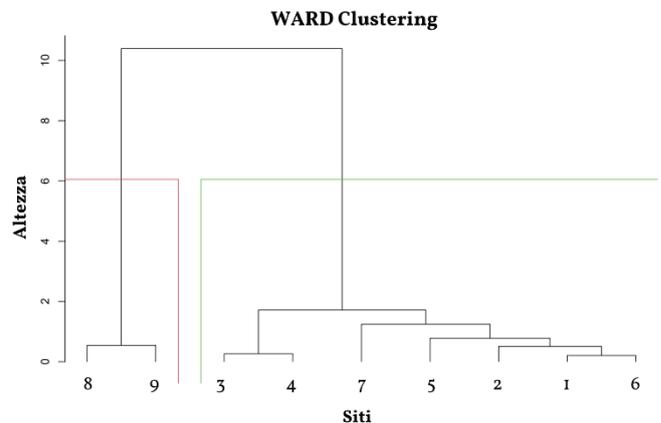


Fig. 5 – Cluster analysis attraverso il metodo Hierarchical: cluster 1 composto dai siti 1-7 cluster 2 composto dai siti 8 e 9
Cluster analysis using the Hierarchical method: cluster 1 composed of sites 1-7 cluster 2 composed of sites 8 and 9

dalle metriche di validazione. In particolare, l'indice di Connectivity ha ottenuto un valore pari a 2.92, l'indice di Dunn ha mostrato un valore di 0.81 e il coefficiente di Silhouette ha raggiunto 0.84, indicando una separazione netta tra i due gruppi. La suddetta analisi ha dunque indicato l'esistenza di due distinti assetti acustici all'interno dell'area di studio, riflettendo la dicotomia tra i siti caratterizzati da una maggiore biodiversità sonora e quelli dominati dal rumore di origine antropica (Fig. 5).

3.2 | La struttura forestale

L'analisi aggregata dei dati evidenzia una marcata predominanza di determinate specie arboree in termini di area basale e densità relativa. In particolare, nei plot P1 e P4, *Quercus robur* ha mostrato una presenza significativamente superiore rispetto ad altre specie, indicando la presenza di individui maturi di grandi dimensioni. Le specie dominanti, determinate dalla BA e dal DBH includono *Carpinus betulus*, *Quercus robur*, *Populus nigra* e *Ulmus minor*, con variazioni nella loro distribuzione tra i diversi plot. In particolare, *Quercus robur* ha registrato i valori di BA più elevati nei plot P2 e P5, rispettivamente con 814.90 cm² e 839.10 cm² (Tab. 1).

Tab. 1 – Indici forestali e di biodiversità: in ogni plot, i valori delle variabili sono stati sommati per ciascuna specie
Forest and biodiversity indices: in each plot, the values of the variables were summed for each species

Plot	SD [ha]	BA [alberi/ha]	SR	HS	Biomass [kg]
1	433.33	19.61	39	1.49	15621.25
2	244.44	8.67	22	1.18	6977.25
3	300	26.97	27	0.22	23791.90
4	288.88	44.06	26	2.15	57477.57
5	311.11	31.33	28	0.86	20170.96
6	233.33	20.83	21	0.96	56464.99
7	577.77	14.87	52	2.02	23968.28
8	611.11	1.64	55	1.12	4316.77
9	1666.66	43.05	150	1.25	45877.19

La SD ha mostrato variazioni sostanziali inter-sito, con un minimo di 233,3 alberi/ha in P6 e un massimo di 1666,6 alberi/ha in P9 (Tab. 2). Quest'ultimo, caratterizzato da un'elevata densità di specie latifoglie, contribuisce in modo significativo alla biomassa complessiva dell'area. L'area basale ha evidenziato variazioni altrettanto marcate, con il valore massimo in P9, pari a 43.1 m²/ha, e il minimo in P8 (1.6 m²/ha), confermando la presenza di alberi di grandi dimensioni nel plot P9.

L'indice relativo alla SR ha registrato il valore più elevato in P9 (150 specie) e il più basso in P6 (28 specie). Parallelamente, l'indice di Shannon ha mostrato forti variazioni, con un minimo di 0.23 in P3 e un massimo di 2.02 in P7, evidenziando differenze significative nella composizione e distribuzione delle specie. L'elevata diversità specifica in P7 indica

un habitat strutturalmente eterogeneo caratterizzato da un mosaico di latifoglie, mentre l'uniformità nella distribuzione delle specie è risultata inferiore nei plot P3 e P6, indicando la predominanza di poche specie.

La biomassa arborea è stata stimata mediante equazioni allometriche specifiche per ciascun individuo campionato. L'aggregazione dei valori per specie ha permesso di ottenere una stima complessiva della biomassa per ciascun plot. I risultati mostrano variazioni significative tra i siti, con valori che vanno da un minimo di 4316.78 kg in P8 a un massimo di 57477.57 kg in P4.

La struttura forestale è stata analizzata attraverso la distribuzione delle specie arboree nelle diverse classi diametriche. In particolare, è stato quantificato il numero di individui per ettaro per ciascuna specie e classe diametrica all'interno di ogni plot. Tale rappresentazione consente di distinguere le diverse configurazioni vegetazionali, offrendo un quadro chiaro della struttura e dello stadio di maturità della foresta nei

Tab. 2 – Sintesi delle principali caratteristiche della struttura forestale nei diversi plot, con indicazione delle specie dominanti e della loro abbondanza relativa (Ind [%])

Summary of the main characteristics of the forest structure in the different plots, with indication of the dominant species and their relative abundance (Ind [%])

Plot	Specie dominante	Ind [%]	Caratteristiche chiave
1	<i>Gleditsia triacanthos</i>	56.4	Struttura disetanea, caratterizzata dalla presenza di specie pioniere. <i>Quercus robur</i> ospita gli esemplari di maggiori dimensioni.
2	<i>Carpinus betulus</i>	43.3	Foresta giovane in fase di rinnovamento (<i>Carpinus betulus</i> e <i>Populus Nigra</i>) post deforestazione.
3	<i>Quercus robur</i>	85.7	Struttura equilibrata tra le differenti classi diametriche. <i>Ostrya carpinifolia</i> è in progressiva affermazione.
4	<i>Populus alba</i>	37	Foresta coetanea con elevata diversità di specie. <i>Gleditsia triacanthos</i> in fase di maturazione.
5	<i>Quercus robur</i>	75	Foresta disetanea. <i>Prunus avium</i> prevale in classe 5 con processi di rigenerazione attivi.
6	<i>Quercus robur</i>	54.2	Struttura disetanea con dinamiche di rinnovamento per <i>Ulmus minor</i> e <i>Populus canescens</i> .
7	<i>Carpinus betulus</i>	42	Foresta disetanea. <i>Quercus robur</i> in classe 55 presenta gli esemplari di maggiori dimensioni.
8	<i>Carpinus betulus</i>	49.5	Foresta in espansione, caratterizzata dalla prevalenza di alberi di piccole dimensioni, tra cui <i>Carpinus betulus</i> , <i>Ostrya carpinifolia</i> , <i>Robinia pseudoacacia</i> e <i>Ulmus minor</i> .
9	<i>Carpinus betulus</i>	41.9	Foresta disetanea. <i>Quercus robur</i> include gli esemplari di maggiori dimensioni (classe diametrica 85). Nuove presenze di <i>Ulmus minor</i> e <i>Populus alba</i> .

vari siti, come visibile negli esempi sotto riportati. I principali risultati emersi dall'analisi sono sintetizzati nella Tabella #, che riporta le specie dominanti, la loro abbondanza relativa e le principali osservazioni sulle caratteristiche strutturali della foresta nei diversi plot. Successivamente vengono riportati due esempi rappresentativi (Plot 3 e Plot 4), scelti per evidenziare differenti configurazioni strutturali.

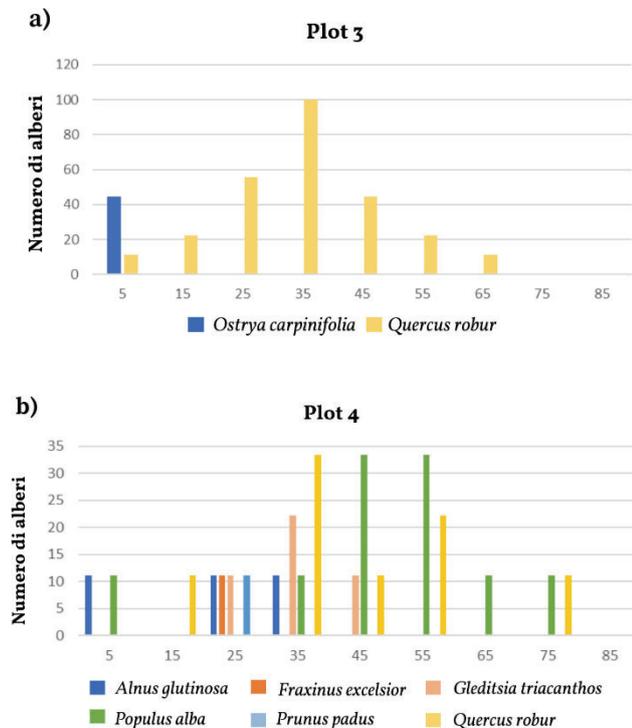


Fig. 6 – Numero di individui per ettaro per ciascuna specie in relazione alla classe diametrica nei plot 3 e 4, selezionati come esempi rappresentativi di differenti configurazioni strutturali
Number of individuals per hectare for each species in relation to the diameter class in plots 3 and 4, selected as representative examples of different structural configurations

La struttura forestale del plot 3 è caratterizzata dalla prevalenza di *Quercus robur*, che rappresenta l'85.7% degli individui rilevati, definendo in modo predominante la fisionomia del popolamento arboreo. La distribuzione diametrica segue un andamento gaussiano con un picco nella classe 35, evidenziando una composizione equilibrata tra individui giovani (classe 5) e maturi (fino alla classe 65). Tale configurazione indica una struttura ben consolidata, in cui la presenza di nuovi individui di *Ostrya carpinifolia* indica dinamiche di rinnovamento e un processo di progressiva diversificazione della componente arborea. Il plot 4, Fig. 6b, si distingue per una maggiore eterogeneità specifica. *Populus alba* risulta la specie dominante, con 111 individui su un totale di 300, e presenta una distribuzione diametrica gaussiana con un picco nella classe 35. La coesistenza di individui maturi di *Populus alba* e *Quercus robur* (classe 75) mostrando una struttura coetanea. La presenza di *Prunus padus* e *Fraxinus excelsior* (classe 25), unitamente all'insediamento di *Alnus glutinosa* (classe 5), evidenzia un'evoluzione della composizione forestale. *Gleditsia triacanthos*,

che rappresenta il 14.8% del totale, mostra una distribuzione tra le classi 25 e 45, segnalando un avanzamento nel processo di maturazione della popolazione arborea.

3.3 | Correlazioni

3.3.1 | Variabili vegetazionali ed indici ecoacustici

L'analisi delle correlazioni ha evidenziato associazioni statisticamente significative tra gli indici ecoacustici e i parametri vegetazionali, delineando una relazione strutturata tra la composizione del soundscape e le caratteristiche forestali dei siti indagati. ADI mostra una correlazione negativa con la SR ($r = -0.75$; $p = 0.0255$), evidenziando valori decrescenti all'aumentare della ricchezza specifica vegetale. Una tendenza simile emerge per l'indice H ($r = -0.77$; $p = 0.0214$) e per ZCR ($r = -0.73$; $p = 0.0311$), rafforzando il legame tra eterogeneità della copertura vegetale e dinamiche acustiche.

La biomassa totale è positivamente correlata con il numero di specie aviarie ($r = 0.77$; $p = 0.0147$), suggerendo un incremento simultaneo di entrambi i parametri nei siti analizzati. Una relazione positiva emerge anche tra la ricchezza specifica aviaria e l'NDSI ($r = 0.77$; $p = 0.0143$).

Nel complesso, le correlazioni ottenute delineano una relazione quantitativa tra le variabili ecoacustiche e vegetazionali, evidenziando differenze nei valori degli indici acustici in funzione della diversità specifica e della struttura della copertura vegetale.

3.3.2 | Ricchezza in specie aviaria e la struttura vegetazionale

L'analisi della struttura vegetazionale ha rivelato che *Quercus robur* è l'unica specie arborea di grandi dimensioni presente in tutti i siti esaminati, ad eccezione del sito 8. Questa evidenza è stata confermata dallo studio della distribuzione percentuale degli individui nei diversi siti all'interno delle classi diametriche più elevate, comprese tra la classe 45, comune a tutti i plot, e la classe 85, riscontrata esclusivamente nei siti 1 e 9 (Fig. 7).

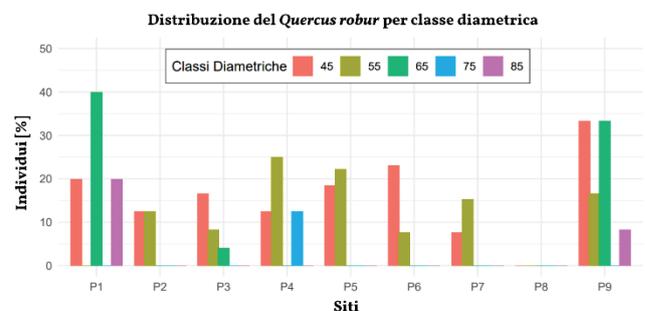


Fig. 7 – Distribuzione percentuale degli individui di Quercus robur nei diversi siti all'interno delle classi diametriche più elevate
Percentage distribution of the Quercus robur individuals at the different sites within the higher diametric classes

L'analisi bioacustica condotta tramite il software Raven ha permesso di identificare le specie aviarie presenti in ciascun sito. A seguito di un processo di validazione, è stata quantificata la ricchezza specifica per ogni plot. La rappresentazione della ricchezza aviarie per sito (Fig. 8) evidenzia un numero significativamente maggiore di specie nei siti 1, 4, 6 e 9. All'interno di tale rappresentazione, sono stati distintamente segnalati i siti caratterizzati dalla presenza di:

- cavity nester primari (CNp), indicati sopra le colonne dell'istogramma;
- cavity nester secondari (★);
- indicatori di diversità, quali *Poecile palustris* e *Certhia brachydactyla*, evidenziati in verde.

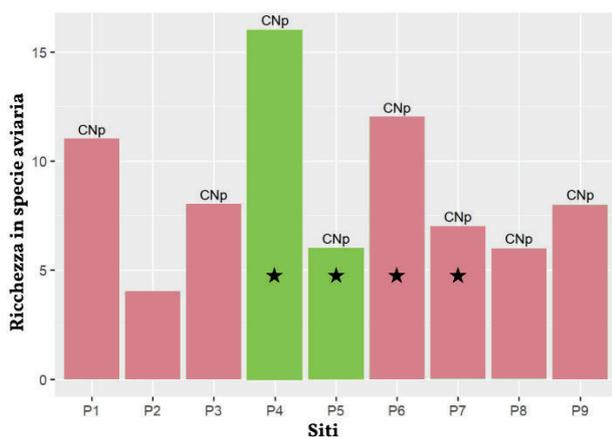


Fig. 8 – Ricchezza in specie aviarie per sito
Richness in avian species by site

L'analisi di correlazione tra la media ponderata delle percentuali degli individui arborei nelle diverse classi diametriche di *Quercus robur* e la ricchezza in specie aviarie ha restituito un coefficiente di correlazione di Spearman pari a $\rho = 0.71$ (p -value = 0.030). Il valore del coefficiente, prossimo a 1, indica una forte correlazione positiva tra le variabili considerate, mentre il p -value conferma la significatività statistica della relazione osservata (Fig. 9).

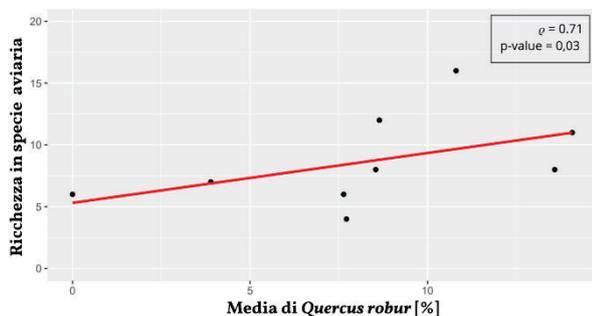


Fig. 9 – Correlazione tra la media ponderata delle percentuali degli individui arborei nelle diverse classi diametriche di *Quercus robur* e la ricchezza in specie aviarie
Correlation between weighted average percentages of tree individuals in different diametric classes of *Quercus robur* and avian species richness

Al fine di approfondire l'analisi statistica, la stessa metodologia è stata applicata a *Carpinus betulus*, la specie arborea più giovane e diffusa nell'area di studio. In questo caso, la correlazione tra la media ponderata delle percentuali degli individui arborei nelle diverse classi diametriche e la ricchezza in specie aviarie ha evidenziato l'assenza di una relazione significativa tra le variabili ($\rho = 0.26$, p -value = 0.6), indicando che la presenza di questa specie non influenza in modo determinante la diversità aviarie.

4 | Discussione

I risultati ottenuti evidenziano una correlazione robusta tra la struttura del paesaggio sonoro nell'area oggetto di studio e la configurazione ambientale, confermando l'importanza delle variabili vegetazionali e della distanza dalle fonti di disturbo antropico nel modellare la composizione del soundscape. L'analisi delle componenti principali (PCA) ha consentito di individuare tre assi informativi principali, i quali riflettono differenti aspetti della complessità acustica. In particolare, la prima componente (PC1) si è rivelata strettamente legata alla diversità e alla distribuzione energetica del segnale, mentre la seconda componente (PC2) ha evidenziato la variabilità strutturale del paesaggio sonoro, nonché la relazione tra le componenti biofoniche e antropofoniche. Infine, la terza componente (PC3) ha messo in risalto il contributo della ricchezza biofonica, suggerendo che gli indici ecoacustici possano costituire uno strumento utile per distinguere habitat caratterizzati da diversi livelli di biodiversità sonora [41] e che l'utilizzo di molteplici indici è necessario per rappresentare l'ambiente sonoro nella sua totalità [42].

L'analisi spaziale ha rivelato la presenza di un gradiente ecoacustico ben definito, con indici di diversità (H, ADI, BI) significativamente più elevati nelle aree interne della Lanca rispetto ai siti situati nelle vicinanze dell'infrastruttura stradale. I suddetti sono in perfetta consonanza con studi precedenti che hanno documentato un decremento della complessità bioacustica in ambienti sottoposti a intensi disturbi antropici [3]. In particolare, indagini condotte in un'area urbana settentrionale della città di Milano, presso il Parco Nord, confermano l'esistenza di una relazione inversa tra i valori di ADI e H e la distanza dalla sede autostradale della A4 [43, 44]. Analogamente, lo studio condotto da M.G. Khanaposhtani et al. [45] in una foresta di pianura alluvionale del Wisconsin (USA) – ecosistema assimilabile a quello della Lanca del Moriano – sottoposta all'impatto di due arterie autostradali, ha evidenziato una correlazione significativa tra ADI, NDSI e AOI (Acoustic Occupancy Index) e la distanza dall'infrastruttura viaria. In tale studio, ADI è stato calcolato escludendo le frequenze inferiori ai 2 kHz per minimizzare l'influenza del rumore veicolare, mostrando un incremento dell'indice con l'aumentare della distanza dalle autostrade. Per quanto concerne NDSI, invece, lo studio ha evidenziato un potenziale bias nell'applicazione di tale indice in contesti caratterizzati da attenuazione del rumore per divergenza geometrica [45],

un fenomeno già documentato da R. B. Machado et al. presso una area protetta di categoria V definita dall'Unione Internazionale per la Conservazione della Natura [46], e riscontrato da R. Benocci et al. presso una struttura semi-naturale, con strati erbacei di flora nemorale e strati arbustivi caratteristica del Parco Nord di Milano [43]. Tuttavia, l'accuratezza dell'NDSI è stata incrementata mediante un'ottimizzazione metodologica dei parametri di input per il calcolo degli indici ecoacustici [26], come proposto nel presente studio. In modo analogo, l'analisi di cluster ha corroborato l'esistenza di due distinti tipi di configurazioni acustiche, suggerendo una netta divisione tra siti dominati da un soundscape ricco di segnali biofonici e siti caratterizzati da rumore antropico [47].

Le correlazioni tra indici ecoacustici e parametri vegetazionali confermano ulteriormente il legame intrinseco tra la struttura della copertura vegetale e la composizione del paesaggio sonoro [48]. Le correlazioni tra gli indici ecoacustici e i parametri vegetazionali rafforzano ulteriormente il legame intrinseco tra la struttura della copertura vegetale e la composizione del paesaggio sonoro [48]. Studi precedenti hanno documentato tale relazione: B. K. Pekin et al. hanno evidenziato come l'altezza degli alberi e la copertura della chioma siano correlati con l'Indice di Diversità Acustica in una foresta neotropica, mentre L. Rankin et al. hanno osservato che, in una struttura forestale secca tropicale del Madagascar meridionale, la copertura della chioma correla con BI [50]. In particolare, la correlazione negativa tra ADI e la ricchezza specifica vegetale suggerisce che una maggiore eterogeneità vegetazionale possa essere associata a una distribuzione più frammentata delle fonti sonore [51]. Inoltre, elevati valori di biomassa arborea epigea osservati nei siti con maggiore ricchezza in specie aviaria sottolineano come la struttura vegetazionale influenzi direttamente la composizione della comunità acustica, offrendo habitat idonei per specie con specifiche esigenze ecologiche [52].

Un aspetto particolarmente rilevante riguarda la correlazione negativa di H e ZCR con SR. In particolare, nei siti 8 e 9 situati nella fascia C, si osservano valori inferiori di tali indici, nonostante l'elevata ricchezza di specie vegetali. Poiché ZCR quantifica il tasso di variazione del segnale nel dominio temporale, i valori osservati suggeriscono un soundscape dominato da componenti più uniformi e meno irregolari [53]. Ciò indica che, in assenza di foreste mature e con una predominanza di specie vegetali giovani, l'eterogeneità della struttura forestale possa determinare una distribuzione più discontinua delle fonti sonore, con conseguente riduzione dell'entropia acustica e della variabilità strutturale del segnale [54].

Nei siti caratterizzati da una maggiore biomassa sono stati rilevati valori più elevati di NDSI, suggerendo che la struttura vegetazionale eserciti un'influenza determinante sulla diversità acustica. In questa prospettiva, si ipotizza che siano la complessità e la densità della copertura vegetale – e non viceversa – a configurare condizioni ambientali idonee a sostenere la presenza e l'attività vocale della fauna selvatica. Tale interpretazione trova fondamento nell'assunto ecologico secondo cui una struttura vegetazionale più articolata incre-

menta la disponibilità di microhabitat e di nicchie acustiche, favorendo l'insediamento di comunità bioacustiche più ricche e stratificate. Questo risultato supporta l'idea che ambienti più ricchi in biomassa, con una vegetazione più sviluppata, possano sostenere una maggiore varietà di suoni biofonici [55, 56]. In parallelo, la correlazione positiva tra biomassa e la ricchezza di specie aviarie evidenzia come la disponibilità di risorse ecologiche, legate alla struttura e alla produttività vegetazionale, favorisca la presenza di un numero maggiore di specie aviarie. La presenza di valori elevati di biomassa, infatti, fornisce risorse alimentari e habitat adeguati alle specie insettivore e altre specie legate alla vegetazione forestale, supportando così una ricca comunità aviaria. I suddetti risultati sono in linea con l'analisi della struttura forestale, che pone in evidenza il ruolo cruciale degli alberi di grandi dimensioni, come *Quercus robur*, nella determinazione della biodiversità aviaria [57]. Gli alberi maturi, con la loro complessità strutturale, favoriscono la presenza di specie aviarie che dipendono da habitat forestali consolidati, aumentando così la ricchezza ornitica e la diversità acustica dell'area [58, 59].

Al contrario, l'analisi ha mostrato che la specie più giovane, il *Carpinus betulus*, pur essendo una specie arborea presente in alcuni siti, non ha avuto una correlazione significativa con la ricchezza di specie aviarie. Questo risultato potrebbe essere dovuto alla minore capacità di questa specie di offrire risorse ecologiche comparabili a quelle di *Quercus robur*, in particolare per quanto riguarda le cavità per la nidificazione e l'abbondanza di risorse trofiche [60]. Il *Carpinus betulus* potrebbe infatti non fornire lo stesso livello di habitat favorevole per le specie specializzate in ambienti forestali maturi, che invece preferiscono la presenza di alberi di grandi dimensioni come *Quercus robur*.

5 | Conclusioni

Il presente studio ha confermato l'efficacia dell'ecoacustica quale strumento avanzato per la caratterizzazione degli ecosistemi forestali, evidenziando il valore di un approccio integrato basato sulla sinergia tra indicatori acustici, strutturali e di biodiversità. L'analisi del paesaggio sonoro ha evidenziato la presenza di due distinti regimi acustici: da un lato, ambienti caratterizzati da una vegetazione strutturalmente complessa presentano una più elevata diversità biofonica; dall'altro, i siti prossimi all'infrastruttura stradale mostrano una semplificazione del soundscape, con ridotta variabilità spettrale e prevalenza della componente antropofonica. Tale approccio ha permesso di approfondire la comprensione della complessità ecologica degli ambienti periurbani, portando in luce aspetti sistemici e relazionali finora marginalizzate nelle analisi convenzionali.

L'affidabilità delle osservazioni è stata assicurata mediante un processo di equalizzazione delle registrazioni, che ha ridotto le distorsioni strumentali e incrementato la comparabilità dei dati. Contestualmente, l'ottimizzazione dei parametri di input di calcolo ha migliorato la capacità discriminante degli

indici ecoacustici, affinando l'analisi delle dinamiche sonore e consolidando la robustezza interpretativa dei risultati.

L'analisi della struttura forestale ha evidenziato una significativa eterogeneità spaziale nella composizione floristica. In particolare, la biomassa arborea e la presenza di individui di grandi dimensioni di *Quercus robur* sono emerse come variabili chiave nella definizione della complessità ecosistemica, esercitando un'influenza diretta sulla qualità acustica dell'ambiente e sulla diversità specifica aviaria. Le correlazioni tra il soundscape e i parametri vegetazionali confermano il ruolo determinante della struttura forestale nella modulazione della biodiversità acustica. L'eterogeneità della copertura arborea e la presenza di alberi di grandi dimensioni si configurano come fattori cruciali per il mantenimento di una elevata ricchezza in specie ornitica mentre la pressione antropica risulta associata a una contrazione della qualità del paesaggio acustico, con possibili implicazioni sulle dinamiche ecologiche e sulle reti trofiche.

I risultati evidenziano l'importanza di adottare approcci integrati e multidisciplinari per l'analisi del paesaggio sonoro e della struttura ecosistemica, al fine di cogliere con maggiore precisione la complessità delle interazioni tra componenti biotiche e abiotiche. L'integrazione di metodologie ecoacustiche con dati strutturali e ambientali consente di affinare la comprensione dei processi ecologici e di fornire strumenti analitici più robusti per la gestione e la conservazione degli ecosistemi forestali.

Conclusions

This study confirmed the effectiveness of ecoacoustics as an advanced tool for the characterisation of forest ecosystems, highlighting the value of an integrated approach based on the synergy between acoustic, structural and biodiversity indicators. The analysis of the soundscape revealed the presence of two distinct acoustic regimes: on the one hand, environments characterised by structurally complex vegetation show a higher biophonic diversity; on the other hand, sites close to road infrastructure show a simplification of the soundscape, with reduced spectral variability and prevalence of the anthropophonic component. This approach allowed a deeper understanding of the ecological complexity of peri-urban environments, bringing to light systemic and relational aspects previously marginalised in conventional analyses. The reliability of the observations was ensured by an equalization process of the recordings, which reduced instrumental biases and increased the comparability of the data. At the same time, the optimisation of the input parameters improved the discriminatory capacity of the ecoacoustic indices, refining the analysis of the sound dynamics and consolidating the interpretative robustness of the results.

The analysis of the forest structure revealed a significant spatial heterogeneity in the floristic composition. In particular, tree biomass and the presence of large individuals of *Quercus robur* emerged as key variables in the definition of ecosystem complexity, with a direct influence on the acoustic quality of the environment and the specific bird diversity. The correlations between soundscape and vegetation parameters confirm the crucial role of forest structure in modulating acoustic biodiversity. The heterogeneity of the tree cover and the

presence of large trees are crucial factors for maintaining high bird species richness, while human pressure is associated with a decrease in the quality of the acoustic landscape, with possible implications for ecological dynamics and food networks. The results highlight the importance of integrated and multidisciplinary approaches to the analysis of the soundscape and ecosystem structure in order to better capture the complexity of interactions between biotic and abiotic components. The integration of ecoacoustic methods with structural and environmental data allows for a better understanding of ecological processes and provides more robust analytical tools for the management and conservation of forest ecosystems.

Bibliografia

- [1] B.C. Pijanowski, L.J. Villanueva-Rivera, S.L. Dumyahn, A. Farina, B. L. Krause, B. M. Napoletano, S. H. Gage, N. Pieretti, Soundscape ecology: the science of sound in the landscape, *BioSci.* 61 (2011) 203-216. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.6>.
- [2] A. Farina, *Ecoacoustics: A quantitative approach to investigate the ecological role of environmental sounds*, Mathematics, 2018.
- [3] B.C. Pijanowski, A. Farina, S.H. Gage, S. L. Dumyahn, B.L. Krause, What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landsc. Ecol.* 26 (2011) 1213-1232. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9600-8>.
- [4] A. Farina, *Soundscape Ecology: Principles, Patterns, Methods and Applications*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [5] J.W. Doser, A.O. Finley, E.P. Kasten, S.H. Gage, Assessing soundscape disturbance through hierarchical models and acoustic indices: A case study on a shelterwood logged northern Michigan forest, *Ecol. Indic.* 113 (2020) 106244. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106244>. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(81\)80020-X](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(81)80020-X).
- [6] H.P. Kunc, R. Schmidt, The effects of anthropogenic noise on animals: a meta-analysis, *Biol. Lett.* 15 (2019) 20190649. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2019.0649>.
- [7] A. Farina, S.H. Gage (Eds.), *Ecoacoustics: The Ecological Role of Sounds*, John Wiley & Sons, 2017.
- [8] M. Depaetere, S. Pavoine, F. Jiguet, A. Gasc, S. Duvail, J. Sueur, Monitoring animal diversity using acoustic indices: Implementation in a temperate woodland, *Ecol. Indic.* 13 (2012) 46-54. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.05.006>.
- [9] R. Benocci, G. Brambilla, A. Bisceglie, G. Zambon, Sound ecology indicators applied to urban parks: A preliminary study, *Asia-Pac. J. Sci. Technol.* 25 (2020) 1-10.
- [10] J. Sueur, S. Pavoine, O. Hamerlynck, S. Duvail, Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal, *PloS one.* 3 (2008) e4065. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004065>.
- [11] M. Depaetere, S. Pavoine, F. Jiguet, A. Gasc, S. Duvail, J. Sueur, Monitoring animal diversity using acoustic indices: Implementation in a temperate woodland, *Ecol. Indic.* 13 (2012) 46-54. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.05.006>.
- [12] N. Pieretti, A. Farina, D. Morri, A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI), *Ecol. Indic.* 11 (2011) 868-873. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.11.005>.
- [13] A. Benítez-López, R. Alkemade, P. A. Verweij, The impacts of roads and other infrastructure on mammal and bird populations: A meta-analysis, *Biological Conservation.* 143 (2010) 1307-1316. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.02.009>.

- [14] R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2018; Available online: www.R-project.org/ (accessed on 18 February 2025).
- [15] Seewave: Sound Analysis and Synthesis. <https://cran.r-project.org/web/packages/seewave/index.html> (accessed on 19 February 2025).
- [16] Soundecology: Soundscape Ecology. <https://cran.r-project.org/web/packages/soundecology/index.html> (accessed on 19 February 2025).
- [17] J. Sueur, A. Farina, A. Gasc, N. Pieretti, S. Pavoine, Acoustic indices for biodiversity assessment and landscape investigation, *Acta Acustica united with Acustica*. 100 (2014) 772-781. <https://doi.org/10.3813/AAA.918757>.
- [18] N. Pieretti, A. Farina, D. Morri, A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI), *Ecological indicators*. 11 (2011) 868-873. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.11.005>.
- [19] W. Yang, J. Kang, Soundscape and sound preference in urban squares: A case study in Sheffield, *Journal of urban design*. 10 (2005) 61-80. <https://doi.org/10.1080/13574800500062395>.
- [20] N.T. Boelman, G.P. Asner, P.J. Hart, R.E. Martin, Multi-trophic invasion resistance in Hawaii: bioacoustics, field surveys, and airborne remote sensing, *Ecological Applications*. 17 (2007) 2137-2144. <https://doi.org/10.1890/07-0004.1>.
- [21] J. M. Grey, J.W. Gordon, Perceptual effects of spectral modifications on musical timbres, *The Journal of the Acoustical Society of America*. 63(1978) 1493-1500. <https://doi.org/10.1121/1.381843>.
- [22] J. Sueur, S. Pavoine, O. Hamerlynck, S. Duvail, Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal, *PloS one*. 3 (2008) e4065. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004065>.
- [23] V.S. Ramaiah, R.R. Rao, Multi-speaker activity detection using zero crossing rate. In 2016 International Conference on Communication and Signal Processing. <http://dx.doi.org/10.1109/ICCSP.2016.7754232>.
- [24] A. Potenza, V. Zaffaroni-Caorsi, R. Benocci, G. Guagliumi, J. M. Fouani, A. Bisceglie, G. Zambon, Biases in Ecoacoustics Analysis: A Protocol to Equalize Audio Recorders, *Sensors (Basel, Switzerland)*. 24 (2024), 4642. <https://doi.org/10.3390/s24144642>.
- [25] MathWorks: MATLAB. www.mathworks.com/products/matlab.html. (accessed on 12 February 2025).
- [26] G. Guagliumi, R. Benocci, F. Angelini, V. Zaffaroni-Caorsi, A. Potenza, G. Zambon, Ottimizzazione dei parametri di calcolo degli indici eco-acustici: applicazione al Parco Regionale della Valle del Ticino, *Rivista italiana di acustica*. 2 (2024) 19-31. <https://doi.org/10.3280/ria2-2024oa17780>.
- [27] I.T. Jolliffe, *Principal Component Analysis*, Springer, 2002.
- [28] I.T. Jolliffe, B.J. Morgan, Principal component analysis and exploratory factor analysis, *Statistical methods in medical research*. 1 (1992) 69-95. <https://doi.org/10.1177/096228029200100105>.
- [29] Package 'clValid'. <https://cran.r-project.org/web/packages/clValid/clValid.pdf> (accessed on 12 February 2025).
- [30] G. Brock, V. Pihur, S. Datta, S. Datta, clValid: An R Package for Cluster Validation, *Journal of Statistical Software*. 25 (2008) 1-22. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i04>.
- [31] J. Handl, J. Knowles, D.B. Kell, Computational cluster validation in post-genomic data analysis, *Bioinformatics*. 21 (2005) 3201-3212. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bti517>.
- [32] R. Benocci, H.E. Roman, A. Bisceglie, F. Angelini, G. Brambilla, G. Zambon, Eco-Acoustic Assessment of an Urban Park by Statistical Analysis, *Sustainability*. 13 (2005), 7857. <https://doi.org/10.3390/su13147857>.
- [33] GlobAllomeTree. Assessing volume, biomass and carbon stocks of trees and forests. www.globallometree.org/accounts/login/. (accessed on 18 February 2025).
- [34] M.A. Lefsky, W.B. Cohen, G.G. Parker, D.J. Harding, Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies: Lidar, an emerging remote sensing technology that directly measures the three-dimensional distribution of plant canopies, can accurately estimate vegetation structural attributes and should be of particular interest to forest, landscape, and global ecologists, *BioScience*. 52 (2002) 19-30. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0019:LRSFES\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0019:LRSFES]2.0.CO;2).
- [35] CAN-EYE web site - INRAE. <https://can-eye.paca.hub.inrae.fr/>. (accessed on 3 February 2025).
- [36] J.M. Chen, T.A. Black, Defining leaf area index for non-flat leaves, *Plant, Cell & Environment*. 15 (1992) 421-429. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1992.tb00992.x>.
- [37] QGIS 3.28 Firenze. <https://blog.qgis.org/2022/10/25/qgis-3-28-firenze-is-released/>. (accessed on 12 February 2025).
- [38] A. Ali, M. Lohbeck, E.R. Yan, Forest strata-dependent functional evenness explains whole-community aboveground biomass through opposing mechanisms, *Forest ecology and management*. 424 (2018) 439-447. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.05.015>.
- [39] C. Brush, Cavity use by secondary cavity-nesting birds and response to manipulations, *The Condor*. 85 (1983) 461-466. <https://doi.org/10.2307/1367987>.
- [40] Raven Pro – Cornell Lab of Ornithology. www.ravensoundsoftware.com/software/raven-pro/ (accessed on 12 February 2025).
- [41] J. Sueur, T. Aubin, C. Simonis, Seewave, a free modular tool for sound analysis and synthesis, *Bioacoustics*. 18 (2008) 213-226. <https://doi.org/10.1080/09524622.2008.9753600>.
- [42] S. Dröge, T.R. Fulgence, K. Osen, A.A.N.A. Rakotomalala, E. Raveloaritiana, D. Schwab, D.A. Martin, Understanding acoustic indices as multi-taxa biodiversity and habitat quality indicators. *Ecological Indicators* 169 (2024) 112909. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112909>.
- [43] R. Benocci, A. Potenza, A. Bisceglie, H.E. Roman, G. Zambon, Mapping of the acoustic environment at an Urban Park in the City Area of Milan, Italy, using very low-cost sensors, *Sensors*. 22 (2022) 3528. <https://doi.org/10.3390/s22093528>.
- [44] R. Benocci, G. Guagliumi, A. Potenza, V. Zaffaroni-Caorsi, H.E. Roman, G. Zambon, Application of Transfer Entropy Measure to Characterize Environmental Sounds in Urban and Wild Parks, *Sensors*. 25 (2025) 1046. <https://doi.org/10.3390/s25041046>.
- [45] M.G. Khanaposhntani, A. Gasc, D. Francomano, L.J. Villanueva-Rivera, J.Jung, M.J. Mossman, B.C. Pijanowski, Effects of highways on bird distribution and soundscape diversity around Aldo Leopold's shack in Baraboo, Wisconsin, USA, *Landscape and Urban Planning*. 192 (2019) 103666. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103666>.
- [46] R.B. Machado, L. Aguiar, G. Jones, Do acoustic indices reflect the characteristics of bird communities in the savannas of Central Brazil?, *Landscape and Urban Planning* 162 (2017) 36-43. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.01.014>.
- [47] J. Sueur, A. Farina, A. Gasc, N. Pieretti, S. Pavoine, Acoustic indices for biodiversity assessment and landscape investigation, *Acta*

- Acustica united with Acustica. 100 (2014) 772-781. <https://doi.org/10.3813/AAA.918757>.
- [48] X. He, Y. Deng, A. Dong, L. Lin, The relationship between acoustic indices, vegetation, and topographic characteristics is spatially dependent in a tropical forest in southwestern China, *Ecological Indicators*. 142 (2022) 109229. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109229>.
- [49] B.K. Pekin, J. Jung, L.J. Villanueva-Rivera, B.C. Pijanowski, J.A. Ahumada, Modeling acoustic diversity using soundscape recordings and LIDAR-derived metrics of vertical forest structure in a neotropical rainforest, *Landscape ecology*. 27 (2012) 1513-1522. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9806-4>.
- [50] L. Rankin, A.C. Axel, Biodiversity assessment in tropical biomes using ecoacoustics: Linking soundscape to forest structure in a human dominated tropical dry forest in southern Madagascar, *Ecoacoustics: The Ecological Role of Sounds*. (2017) 129-145. <https://doi.org/10.1002/9781119230724.ch8>.
- [51] T. Shaw, M. Scherer-Lorenzen, S. Müller, Forest structural heterogeneity positively affects bird richness and acoustic diversity in a temperate, central European forest, *Frontiers in Ecology and Evolution*. 12 (2024) 1387879. <https://doi.org/10.3389/fevo.2024.1387879>.
- [52] J.R. Karr, R.R. Roth, Vegetation Structure and Avian Diversity in Several New World Areas, *The American Naturalist*. 105 (1971) 423-435. <https://doi.org/10.1086/282735>.
- [53] C.A. Quinn, P. Burns, C.R. Hakkenberg, L. Salas, B. Pasch, S.J. GoetzScott, M.L. Clark, Soundscape components inform acoustic index patterns and refine estimates of bird species richness, *Front. Remote Sens.* 4 (2023) 1156837. <https://doi.org/10.3389/frsen.2023.1156837>.
- [54] L. Barbaro, A. Sourdril, J.S. Froidevaux, M. Cauchoix, F. Calatayud, M. Deconchat, A. Gasc, Linking acoustic diversity to compositional and configurational heterogeneity in mosaic landscapes, *Landscape Ecology*. 37 (2022) 1125-1143. <https://doi.org/10.1007/s10980-021-01391-8>.
- [55] M. Budka, G. Gazda-Szypulski, A. Muszyńska, E. Sokołowska, A. Staniewicz, P. Bogawski, Acoustic indices enable the discrimination of temperate forest types and better predict differences in bird species composition than in bird species richness, *Environmental and Sustainability Indicators*. 24 (2024)100529. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100529>.
- [56] Z. Hao, C. Wang, Z. Sun, Z., C.K. Bosch, D. Zhao, B. Sun, N. Pei, Soundscape mapping for spatial-temporal estimate on bird activities in urban forests, *Urban forestry & urban greening*. 57 (2021) 126822. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126822>.
- [57] R.H. MacArthur, J.W. MacArthur, On bird species diversity, *Ecology*. 42 (1961), 594-598. <http://dx.doi.org/10.2307/1932254>.
- [58] M.W. Wilson, J. Pithon, T. Gittings, T.C. Kelly, P.S. Giller, J. O'Halloran, Effects of growth stage and tree species composition on breeding bird assemblages of plantation forests, *Bird Study*. 53 (2006) 225-236. <https://doi.org/10.1080/00063650609461437>.
- [59] B.O. Poulsen, Avian richness and abundance in temperate Danish forests: tree variables important to birds and their conservation, *Biodiversity & Conservation*. 11 (2002) 1551-1566. <https://doi.org/10.1023/A:1016839518172>.
- [60] J. Schieck, M. Nietfeid, J.B. Stelfox, J.B. Differences in bird species richness and abundance among three successional stages of aspen-dominated boreal forests, *Canadian Journal of Zoology*. 73 (1995) 1417-1431. <https://doi.org/10.1139/z95-167>.