



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

DIPARTIMENTO SCIENZE DELLA VITA E DELL'AMBIENTE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN

RISCHIO AMBIENTALE E PROTEZIONE CIVILE

**BIOMONITORAGGIO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA
NELLA
REPUBBLICA DI SAN MARINO**

**BIOMONITORING OF AIR QUALITY IN THE REPUBLIC
OF SAN MARINO**

Tesi di Laurea Magistrale di
ANDREA CONTI

Relatrice
Prof.ssa SILVIA ILLUMINATI

Correlatore
Prof. STEFANO ACCORONI

SESSIONE ESTIVA

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

Alla mia famiglia, per il sostegno ricevuto, e in particolare a mio padre Silvio, storico tecnico del Servizio Igiene Ambientale del Dipartimento Sanità e Sicurezza Sociale dell'ISS (oggi confluito nell'UPAV).

A lui devo l'avermi trasmesso la passione per la scienza e la tecnica, e insegnato l'importanza del rigore metodologico.

SOMMARIO

1	Introduzione	6
1.1	L'inquinamento atmosferico	6
1.2	Normativa e monitoraggio della qualità dell'aria.....	7
1.2.1	Principali inquinanti atmosferici	7
1.3	Il biomonitoraggio della qualità dell'aria	14
1.3.1	I licheni come organismo bioindicatore	16
1.3.2	Indice di biodiversità lichenica.....	22
1.3.3	Esplorazione delle tecniche digitali di acquisizione.....	29
1.4	La Repubblica di San Marino e il monitoraggio della qualità dell'aria.....	35
1.4.1	Contesto territoriale.....	36
1.4.2	Normativa locale in materia di qualità dell'aria	41
1.4.3	Sorgenti di inquinamento	41
1.4.4	Reti di monitoraggio della qualità dell'aria.....	42
2	Scopo del lavoro	45
3	Materiali e Metodi	46
3.1	Area di studio	46
3.2	Strumentazione.....	48
3.2.1	Reticolo di campionamento.....	48
3.2.2	Scheda di rilievo digitale.....	49
3.2.3	Strumentazione fotografica, di misura e di raccolta	51
3.2.4	Strumentazione di laboratorio.	53
3.3	Piano di campionamento	55
3.4	Raccolta dei campioni e identificazione delle specie	56
3.4.1	Rilievi sul campo.....	56
3.4.2	Identificazione delle specie	57
3.5	Elaborazione dati e analisi statistica.....	58
3.5.1	Scala di tolleranza delle specie licheniche	58
3.5.2	La scala di naturalità/alterazione	59
3.5.3	Analisi statistica	60
3.6	Dati meteo e di qualità dell'aria	61

4	Risultati e Discussione	63
4.1	Caratterizzazione ambientale	63
4.2	Comunità lichenica.....	68
4.3	Indice di biodiversità lichenica.....	70
4.4	Distribuzione tra macroaree	73
4.5	Indice di biodiversità lichenica e qualità dell'aria.....	74
4.6	Distribuzione su gradiente altitudinale.....	77
5	Conclusioni.....	79
6	Prospettive future	80
	Bibliografia	82
	Allegato A - Schede di rilievo	87
	Allegato B - Atlante fotografico delle specie.....	131
	Allegato C - Distribuzione delle specie.....	152

Riassunto

Il presente lavoro indaga la qualità dell'aria nella Repubblica di San Marino attraverso il biomonitoraggio con licheni epifiti, approccio complementare al monitoraggio strumentale che sfrutta la sensibilità di tali organismi simbiotici agli inquinanti atmosferici. Lo studio persegue un duplice obiettivo: valutare lo stato di qualità dell'aria del territorio e verificare l'applicabilità dell'Indice di Biodiversità Lichenica (I.B.L.) a una realtà di ridotte dimensioni, partendo dall'ipotesi che la biodiversità lichenica rifletta la pressione antropica attesa, con livelli di naturalità più elevati nelle aree a parco e più bassi in quelle urbane e industriali. L'indice elaborato a partire dal manuale (ANPA, 2001) e dalla norma (UNI EN 16413, 2014) è stato applicato adattando le metodiche alle ridotte dimensioni del territorio: sono state individuate undici unità di campionamento, ripartite tra aree urbane, industriali e a parco, su ciascuna delle quali sono stati esaminati tre esemplari di *Quercus pubescens*, per un totale di trentatré forofiti, riscontrando venti entità licheniche.

L'Indice di Biodiversità Lichenica medio calcolato per l'intero territorio è risultato pari a 55 ± 13 , con valori compresi tra 37 (Parco AUSA) e 68 (Acquaviva) e una variabilità medio-bassa (CV 24%). Nessun sito è ricaduto nelle classi di alterazione da media a molto elevata (classi 5-7) e circa il 73% delle aree si colloca nelle classi di naturalità media ed elevata (classi 2-3): il territorio sammarinese ricade complessivamente in classe 3 (naturalità media). Tale esito è coerente con quanto osservato, con il medesimo protocollo, nella contigua provincia di Rimini (I.B.L. medio 56), a indicare una qualità dell'aria equiparabile tra i due territori.

L'analisi statistica non ha evidenziato differenze significative tra le tre tipologie di area e non ha confermato il gradiente di pressione antropica ipotizzato, confutando di fatto l'assunto iniziale: è emersa invece una relazione significativa tra ricchezza specifica e quota, che suggerisce un ruolo rilevante delle condizioni microclimatiche locali. Sul piano metodologico, il protocollo si è rivelato applicabile e trasferibile alla scala locale, fornendo dati coerenti.

I risultati, di natura esplorativa, restituiscono una prima mappatura del territorio, utile a orientare futuri programmi di monitoraggio della Repubblica di San Marino.

1 Introduzione

1.1 L'inquinamento atmosferico

Prima di affrontare in maniera sistematica gli argomenti e le scelte adottate è opportuno illustrare brevemente i concetti che stanno alla base dell'inquinamento atmosferico, ovvero la sua definizione, le sue caratteristiche, le sostanze che interagiscono e la loro origine.

L'inquinamento atmosferico, ovvero l'alterazione chimico-fisica dell'aria dovuta all'introduzione di sostanze, come particolato, gas e agenti biologici, rappresenta, nonostante le importanti misure di prevenzione e controllo ad oggi messe in atto, uno dei fattori di rischio più importanti per la salute umana (Sun & Zhu, 2019).

L'aria secca, non alterata e priva di vapore acqueo, è costituita come percentuale in volume da: Azoto 78.08%; Ossigeno 20.95%; Argon 0.934%; Anidride Carbonica 0.031%; Neon 0.0018%; Elio 0.00052%; Metano 0.0002%; ed altri gas in concentrazioni minori (Melling et al., 1997).

L'aria, definita pocanzi come miscela di gas a composizione pressoché costante, in realtà non può mai essere definita “pura”, in quanto alterata da molteplici sorgenti di origine sia naturale che antropica. Infatti, i gas, come l'anidride solforosa SO_2 , l'idrogeno solforato H_2S , l'ozono O_3 e il monossido di carbonio CO , sono comunemente immessi in atmosfera da fenomeni naturali (incendi boschivi, eruzioni vulcaniche, fulmini, ossidazione atmosferica di idrocarburi emessi in natura, ecc.). A queste sostanze se ne affiancano molte altre, anch'esse di origine naturale, rilasciate a seguito dei più comuni processi biologici di decomposizione della materia organica.

L'inquinamento di origine antropica, ovvero quello prodotto dalle diverse attività umane, contribuisce in modo significativo ad arrecare aggravio alla qualità dell'aria.

Contrariamente a quanto si possa pensare, le prime responsabili dell'inquinamento di origine antropica, in area urbana, non sono le industrie, bensì il trasporto veicolare (Sicard et al., 2021).

Tale fenomeno diviene più evidente nei paesi in via di sviluppo, dove il rapido aumento della densità demografica, con conseguente crescita del numero di veicoli circolanti, non è accompagnato dall'adozione di normative che vadano a regolamentare in modo stringente le relative emissioni.

Grazie alla presenza di agenti ossidanti (OH , O_3 , NO_3) nella nostra troposfera, questa si rivela come un efficace ambiente ossidante di quasi tutte le sostanze inquinanti immesse in atmosfera, indipendentemente dalla loro origine (Lu et al., 2019).

Sebbene non ci siamo addentrati nei meccanismi fotochimici che portano alla formazione del radicale ossidrilico, diretto responsabile di molti processi di ossidazione, è chiaro quanto questi meccanismi di "pulizia naturale", a cui concorrono l'azione della pioggia, dei venti e della radiazione solare, siano fondamentali per la rimozione degli inquinanti e, in ultima analisi, per la nostra sopravvivenza.

1.2 Normativa e monitoraggio della qualità dell'aria

Il monitoraggio della qualità dell'aria riveste ad oggi un ruolo di fondamentale importanza per la tutela dell'ambiente e della salute pubblica. Tale attività è definita da un articolato quadro normativo che ne stabilisce gli obiettivi, sotto forma di valori limite da rispettare, e le modalità con cui il monitoraggio deve essere condotto. A livello europeo la materia è disciplinata dalla (Direttiva 2008/50/CE, 2008), relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa. La direttiva definisce per ciascun inquinante trattati valori limite, valori obiettivo, soglie di allarme e di informazione. La (Direttiva (UE) 2024/2881, 2024) aggiorna tale disciplina, fissando valori limite più restrittivi da conseguire entro il 1° gennaio 2030, più vicini agli orientamenti dell'Organizzazione Mondiale della Sanità. La normativa disciplina, inoltre, le modalità di valutazione per garantire dati attendibili, validi sul piano legale e confrontabili tra territori, su cui basare le misure di tutela. Il primo passaggio fondamentale è costituito dalla suddivisione del territorio in zone, ossia porzioni di territorio delimitate dallo Stato membro ai fini della valutazione e della gestione della qualità dell'aria. A ciascuna zona è associato un regime di valutazione, determinato dal confronto tra i livelli rilevati e una soglia di valutazione fissata per ciascun inquinante. Nelle zone classificate al di sopra di tale soglia diviene obbligatorio il monitoraggio della qualità dell'aria attraverso siti fissi; il numero minimo dei siti è in funzione della popolazione e del livello di inquinamento riscontrato.

Per assicurare omogeneità e conformità dei dati la norma prescrive metodi di riferimento per la misurazione di ciascun inquinante, gli obiettivi di qualità dei dati (incertezza massima e copertura temporale minima) e criteri di ubicazione dei siti fissi.

1.2.1 Principali inquinanti atmosferici

I principali inquinanti atmosferici sottoposti a monitoraggio sono individuati sulla base delle evidenze scientifiche relative ai loro effetti dannosi sulla salute e sull'ambiente. Tali evidenze, sintetizzate in particolare nelle più recenti raccomandazioni dell'Organizzazione Mondiale della

Sanità (*WHO global air quality guidelines*, 2021), orientano i valori limite fissati dalla normativa europea sulla qualità dell'aria ambiente (Direttiva 2004/107/CE, 2004; Direttiva 2008/50/CE, 2008; Direttiva (UE) 2024/2881, 2024)

In base all'origine gli inquinanti atmosferici si distinguono in primari, emessi direttamente in atmosfera da sorgenti naturali o antropiche, e secondari, che non vengono emessi come tali ma si formano in atmosfera attraverso reazioni chimiche (Seinfeld & Pandis, 2016). Sono prevalentemente primari il monossido di carbonio, il biossido di zolfo, gli ossidi di azoto, emessi in larga parte come monossido di azoto (NO), una frazione del particolato e i metalli; è invece secondario l'ozono troposferico, prodotto da reazioni fotochimiche tra composti organici e ossidi di azoto (Seinfeld & Pandis, 2016). La distinzione non è tuttavia netta, poiché numerosi inquinanti presentano entrambe le origini: il biossido di azoto (NO₂) deriva in larga parte dall'ossidazione del NO (Seinfeld & Pandis, 2016); il particolato comprende, oltre alla componente primaria, una frazione secondaria che si forma in atmosfera per conversione gas-particella dei precursori gassosi. Gli stessi composti organici volatili e gli idrocarburi policiclici aromatici, pur in prevalenza primari, possono trasformarsi in atmosfera dando origine a specie secondarie. I principali inquinanti considerati nel monitoraggio della qualità dell'aria sono:

- monossido di carbonio (CO);
- ossidi di azoto (NO_x);
- composti organici volatili (COV);
- ossidi di zolfo (SO_x);
- particolato (PM);
- idrocarburi policiclici aromatici (IPA);
- metalli pesanti (Pb, As, Cd, Ni);
- ozono (O₃).

Monossido di carbonio (CO). Il monossido di carbonio è un gas inodore, incolore e tossico. Si tratta di un sottoprodotto intermedio dei processi di combustione, generato dai motori a combustione interna e dagli impianti termici. Il suo rilascio avviene principalmente attraverso due meccanismi:

- combustione incompleta di composti contenenti carbonio, in condizioni di difetto stechiometrico di ossigeno o di insufficiente tempo di permanenza in camera di

combustione, o temperature troppo basse nella zona di reazione che impediscono il completamento dell'ossidazione del carbonio a CO₂;

- reazione di Boudouard ($\text{CO}_2 + \text{C} \rightleftharpoons 2\text{CO}$), un equilibrio endotermico in cui il carbonio solido riduce l'anidride carbonica a monossido di carbonio. Tale reazione diventa significativa solo ad elevate temperature ($>700\text{ }^\circ\text{C}$) (Siegmund et al., 2024).

La concentrazione di questo gas in aree urbane è di vari ordini di grandezza superiore rispetto al fondo naturale, infatti molteplici sono le fonti di origine antropica che immettono monossido di carbonio in atmosfera, l'apporto più significativo è dato dagli impianti di riscaldamento civile (53%) e dal settore dei trasporti e traffico veicolare (36%) (Arpae Area Est - Rimini - Servizio Sistemi Ambientali, 2024).

Vi sono inoltre altre fonti di origine naturale associate al suo rilascio in atmosfera, come gli incendi boschivi, l'attività biologica e di decomposizione della materia organica, le eruzioni vulcaniche e altri fenomeni naturali di minore rilevanza.

Nell'uomo la pericolosità del monossido di carbonio deriva dalla sua affinità con l'emoglobina, nettamente superiore a quella dell'ossigeno: il legame con quest'ultima determina la formazione di carbossiemoglobina, riducendo così il trasporto di ossigeno e inducendo una condizione di ipossia che può portare a sintomi come cefalea, vertigini, debolezza e nausea, fino alla perdita di coscienza, la conseguente carenza di ossigeno favorisce fenomeni di ischemia e l'aggravamento di patologie cardiovascolari. Sul piano ambientale, il monossido di carbonio agisce in modo indiretto sul clima, influenzando le concentrazioni dei gas serra connessi al riscaldamento globale (Manisalidis et al., 2020).

Ossidi di azoto (NO_x). Gli ossidi di azoto, raggruppati sotto il termine NO_x, sono una famiglia di composti che racchiude al suo interno due tra i principali responsabili dell'inquinamento dell'aria nelle città, ovvero il monossido di azoto (NO) e il biossido di azoto (NO₂).

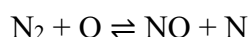
Il monossido di azoto, NO, costituisce la componente principale delle emissioni degli ossidi di azoto totali ed è un gas incolore e inodore. Questo con il tempo subisce un graduale processo di ossidazione dando origine al biossido di azoto NO₂, che si presenta come un gas dal colore bruno rossastro dall'odore pungente e soffocante.

Gli ossidi di azoto possono essere rilasciati in atmosfera in modo naturale, come già accennato, da incendi boschivi e dall'attività vulcanica. Più significative sono invece le emissioni di origine antropica derivanti dall'utilizzo dei combustibili fossili in ambito industriale e di produzione dell'energia, e di riscaldamento civile (18%). Rilevante è inoltre il

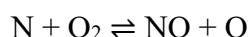
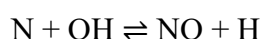
contributo dato dal traffico veicolare (63%), che riveste un ruolo predominante nelle aree urbane, dove ne rappresenta la sorgente più significativa (Arpae Area Est - Rimini - Servizio Sistemi Ambientali, 2024).

La formazione di ossidi di azoto può avvenire mediante molteplici meccanismi; di particolare interesse sono i processi di formazione che entrano in gioco quando una miscela di aria e carburante viene bruciata in presenza di fiamma. Tali meccanismi possono coinvolgere o la fissazione dell'azoto molecolare contenuto nell'aria, o l'ossidazione dell'azoto presente nel combustibile stesso (Glarborg et al., 2018). Per i combustibili gassosi con contenuto di azoto trascurabile (come il gas naturale) o per combustibili a basso contenuto di azoto (oli combustibili, biomassa legnosa), la formazione di NO deriva principalmente dalla fissazione dell'azoto atmosferico. Per i combustibili solidi con un significativo contenuto di azoto, è invece l'ossidazione di quest'ultimo a costituire la fonte dominante di ossidi di azoto (Glarborg et al., 2018).

Tra i meccanismi di fissazione dell'azoto atmosferico, il più rilevante alle alte temperature è quello noto come meccanismo termico o meccanismo di Zeldovich. In quest'ultimo meccanismo, l'azoto molecolare e l'ossigeno presenti in aria, a contatto con la fiamma, generano monossido di azoto (NO). La reazione iniziale consiste nell'attacco di un atomo di ossigeno sul triplo legame dell' N_2



Questa reazione ha un'elevata energia di attivazione (circa 75 kcal/mol) ed è il passaggio cineticamente limitante. Una volta formato, l'atomo di azoto viene rapidamente ossidato a NO per reazione con OH o O_2 (Glarborg et al., 2018):



Nell'uomo il biossido di azoto (NO_2) agisce come irritante dell'apparato respiratorio: penetrando in profondità nei polmoni, induce tosse, respiro sibilante, dispnea e broncospasmo, fino all'edema polmonare in caso di inalazione a concentrazioni elevate. Possono inoltre manifestarsi irritazione di occhi, naso e gola, mentre l'esposizione prolungata è associata a malattie polmonari croniche e ad una riduzione del senso dell'olfatto (Manisalidis et al., 2020).

Composti organici volatili (COV). I Composti organici volatili (COV) sono una vasta categoria di composti organici che alla temperatura di 293.15 K presentano una pressione di vapore pari o superiore a 0.01 kPa, oppure che possiedono una volatilità corrispondente nelle particolari

condizioni di uso (D.Lgs. 3 aprile 2006, n. 152, 2006). Sono, quindi, caratterizzati da un'elevata volatilità già a temperatura ambiente.

L'immissione di COV in atmosfera può avvenire sia da sorgenti naturali che antropiche. La vegetazione terrestre, infatti, ne apporta il contributo naturale di gran lunga più rilevante, attraverso l'emissione di composti biogenici quali isoprene e terpeni, per un flusso globale annuo stimato nell'ordine di 1000 Tg. L'attività antropica apporta anch'essa un contributo significativo attraverso l'industria (Guenther et al., 2012). Di particolare rilevanza sono i processi di raffinazione del petrolio e per la produzione di solventi, vernici, colle e adesivi ecc. Analogamente alle sostanze precedenti, il comparto veicolare gioca un ruolo cruciale, dove si registrano forti emissioni di COV derivanti dal carburante incombusto, che fuoriesce dai gas di scarico soprattutto nella fase di avviamento a freddo, prima che il convertitore catalitico abbia raggiunto la temperatura di esercizio. Un ulteriore contributo significativo proviene dalle emissioni evaporative (Reiter & Kockelman, 2016). La presenza di COV in atmosfera contribuisce alla formazione di smog fotochimico, attraverso reazioni fotochimiche con gli ossidi di azoto (NO_x) in presenza di radiazione solare, e alla formazione di aerosol organico secondario sotto forma di particolato, attraverso l'ossidazione atmosferica dei COV stessi. Gli effetti sulla salute umana dei composti organici volatili variano in funzione del composto considerato. Esposizioni brevi provocano tipicamente irritazione di occhi, naso, gola e delle mucose, mentre l'esposizione prolungata è associata a effetti tossici di diversa natura. Alcuni COV, come benzene, toluene, etilbenzene e xilene, risultano associati all'insorgenza di tumori nell'uomo (Manisalidis et al., 2020); in particolare il benzene è classificato come cancerogeno accertato per l'uomo (IARC, 2016).

Ossidi di zolfo (SO_x). L'inquinamento da ossidi di zolfo è riconducibile principalmente all'anidride solforosa (SO_2), che una volta in atmosfera può essere ossidata ad anidride solforica (SO_3). La produzione di SO_2 avviene mediante la combustione di materiali contenenti zolfo.

La fonte naturale principale degli ossidi di zolfo è rappresentata dalle eruzioni vulcaniche, le quali rilasciano grandi quantità di SO_2 nell'atmosfera (Fioletov et al., 2023). Lo zolfo, naturalmente presente come elemento disciolto nel magma vulcanico, viene liberato in fase gassosa. Le principali fonti di emissione di origine antropica derivano dalla combustione di carbone nelle centrali termoelettriche, la fusione di minerali metallici nelle fonderie e le attività legate all'industria petrolifera. La presenza di queste sostanze porta a diversi impatti negativi per l'ambiente, contribuendo alla formazione di piogge acide (Fioletov et al., 2023).

Nell'uomo il biossido di zolfo (SO_2) si comporta come un irritante dell'apparato respiratorio: una volta inalato penetra in profondità nelle vie aeree, dove viene convertito in bisolfito e, interagendo con i recettori sensoriali, induce broncocostrizione. I principali effetti associati all'esposizione comprendono irritazione delle vie respiratorie, bronchite, produzione di muco e broncospasmo, oltre all'irritazione oculare e all'aggravamento di patologie cardiovascolari preesistenti (Manisalidis et al., 2020).

Particolato atmosferico (PM). Il particolato atmosferico è una complessa miscela di particelle solide e liquide di dimensioni tali da rimanere sospesi in atmosfera per tempi più o meno lunghi.

Le frazioni di riferimento normativo sono il PM_{10} e il $\text{PM}_{2.5}$. La norma europea (Direttiva 2008/50/CE, 2008; Direttiva (UE) 2024/2881, 2024) definisce il PM_{10} come “il materiale particolato che penetra attraverso un ingresso dimensionale selettivo conforme al metodo di riferimento per il campionamento e la misurazione del PM_{10} , norma EN 12341, con un'efficienza di penetrazione del 50 % per materiale particolato di un diametro aerodinamico di $10\text{ }\mu\text{m}$ ”. Allo stesso modo si definisce il $\text{PM}_{2.5}$ come “il materiale particolato che penetra attraverso un ingresso dimensionale selettivo conforme al metodo di riferimento per il campionamento e la misurazione del $\text{PM}_{2.5}$ norma EN 14907 con un'efficienza di penetrazione del 50 % per materiale particolato di un diametro aerodinamico di $2.5\text{ }\mu\text{m}$ ”

Il $\text{PM}_{2.5}$ costituisce quindi la frazione fine del PM_{10} . Entrambe le frazioni comprendono particelle di origine naturale: polvere crostale, spray marino e materiale biogenico, sia particelle di origine antropica, legate alla combustione, al traffico veicolare e alle attività industriali (Seinfeld & Pandis, 2016). La frazione grossolana ($2.5\text{-}10\text{ }\mu\text{m}$) è dominata da particelle primarie di origine meccanica, mentre il $\text{PM}_{2.5}$ risulta apportato in particelle dalla combustione e dal particolato secondario. Queste ultime hanno una dimensione tale da potersi depositare in profondità nell'apparato respiratorio e indurre processi infiammatori che possono compromettere la funzione cardiovascolare e respiratoria.

Le sorgenti del particolato possono essere classificate in primarie, direttamente emesse (ad esempio polveri di sabbia o particolato da combustione), e secondarie, formate in atmosfera tramite reazioni chimiche tra gas precursori come SO_2 , NO_x e NH_3 , che danno origine a composti inorganici quali solfati e nitrati d'ammonio, e COV, la cui ossidazione contribuisce alla formazione di aerosol organico secondario (SOA) (Sasso et al., 2026). Oltre agli effetti sulla salute umana, il particolato atmosferico determina impatti negativi sull'ambiente. Le ridotte dimensioni delle particelle ne prolungano la permanenza in atmosfera, consentendone il

trasporto e la diffusione anche a grande distanza dalle sorgenti emissive, con conseguente esposizione di ecosistemi lontani. La deposizione del particolato altera l'equilibrio dei nutrienti negli ecosistemi acquatici, contribuisce all'acidificazione dei corpi idrici e danneggia foreste e colture, con ripercussioni sulle rese agricole (Manisalidis et al., 2020).

Idrocarburi policiclici aromatici (IPA). Gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) sono una classe di composti organici costituiti da due o più anelli aromatici (benzenici) fusi, composti esclusivamente da atomi di carbonio e idrogeno (Direttiva 2004/107/CE, 2004). Questi vengono suddivisi in funzione del numero di anelli aromatici in IPA leggeri e IPA pesanti.

Il più conosciuto e studiato è il Benzo(a)Pirene, accertato come cancerogeno per l'uomo (Gruppo 1) dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC, 2016).

Come per tutte le sostanze affrontate gli IPA hanno una duplice origine, naturale e antropica. Di particolare interesse è l'origine antropica e il suo contributo associato alla combustione incompleta dei composti organici nei processi industriali e trasformazione dei combustibili fossili, alla produzione dell'alluminio, acciaio e ai materiali bituminosi, allo smaltimento dei rifiuti attraverso l'incenerimento, alla produzione di energia termoelettrica, al traffico veicolare così come al riscaldamento domestico.

La presenza in atmosfera degli IPA sotto forma di particolato è generalmente associata a 3 meccanismi principali (Callén et al., 2008):

- adsorbimento superficiale sul particolato atmosferico;
- assorbimento all'interno della matrice organica per dissoluzione;
- condensazione durante il raffreddamento dei fumi di combustione.

Metalli pesanti (Pb, As, Cd, Ni). Con il termine "metalli pesanti" si indicano convenzionalmente elementi di transizione (blocco d della tavola periodica degli elementi) e gli elementi con caratteristiche tipiche dei metalli (e alcuni non metalli, che non presentano caratteristiche tipiche come ad es. As e Se) del blocco p.

Nell'ambito della qualità dell'aria, i metalli e metalloidi di interesse prioritario, disciplinati dalla normativa sono: piombo (Pb), per il quale la (Direttiva 2008/50/CE, 2008) fissa un valore limite; cadmio (Cd), nichel (Ni) e arsenico (As), per i quali la (Direttiva 2004/107/CE, 2004) stabilisce valori obiettivo. La stessa direttiva prevede inoltre il monitoraggio del mercurio (Hg), senza fissarne un valore obiettivo.

Le sorgenti di emissione sono prevalentemente di natura antropica, come: fonderie, centrali termoelettriche a carbone o a olio combustibile, traffico veicolare (Arpae Area Est - Rimini - Servizio Sistemi Ambientali, 2024), incenerimento dei rifiuti, riscaldamento domestico. I metalli si associano al particolato attraverso vari meccanismi a seconda della sorgente e della temperatura del processo emissivo:

- per emissione diretta sotto forma di particelle: attraverso i processi di abrasione;
- per vaporizzazione e ricondensazione: nei processi ad alta temperatura.

A livello sanitario, questi metalli sono stati classificati come probabili e/o accertati cancerogeni (IARC, 2016).

Ozono (O_3). L'ozono è un gas fortemente instabile e reattivo, dall'odore pungente. È un gas scarsamente desiderabile, se presente a basse quote, ovvero all'interno della troposfera, in quanto dannoso per l'ambiente e per la salute umana (World Health Organization, 2000). Al contrario, la sua presenza a quote elevate all'interno della stratosfera va a costituire lo strato di ozono che ci protegge dai raggi ultravioletti del sole, agendo da filtro naturale.

La sua formazione a livello del suolo avviene per il verificarsi di innumerevoli reazioni fotochimiche (World Health Organization, 2000). Esistono inoltre altre sorgenti di origine naturale che danno origine all'Ozono, come le scariche elettriche prodotte dai fulmini che scindono l'ossigeno presente in aria in singoli atomi di O che ricombinandosi possono generare O_3 .

1.3 Il biomonitoraggio della qualità dell'aria

Un'ulteriore tecnica di indagine che può essere affiancata ad un più tradizionale approccio di analisi strumentale è il "biomonitoraggio".

Esso si basa sull'assunto che le sostanze che vogliamo monitorare siano biodisponibili, pertanto accumulabili nei tessuti di un organismo bioindicatore, e che tale accumulo sia misurabile in termini quantitativi, andando a misurarne la concentrazione tissutale, o in termini qualitativi, osservando un'alterazione morfologica o di popolazione.

Come è facilmente intuibile, non tutti gli organismi si prestano ad essere utilizzati come bioindicatori, questo perché essi devono possedere alcune caratteristiche ben specifiche quali:

- essere stazionari e reperibili;
- avere un lungo ciclo vitale e ampia distribuzione;

- possedere un'elevata tolleranza agli inquinanti;
- essere sensibili alle alterazioni ambientali;
- possedere livelli basali noti;
- essere incapaci di regolare le concentrazioni tessutali degli inquinanti assorbiti;
- accumulare le sostanze inquinanti in misura proporzionale alla loro concentrazione in ambiente.

Qualora nell'area indagata non siano presenti organismi autoctoni è possibile ricorrere ad organismi trapiantati.

Il biomonitoraggio permette di indagare l'effetto biologico che hanno una o più sostanze inquinanti sull'organismo scelto.

Mediante queste tecniche è possibile valutare gli effetti a diversi livelli di organizzazione biologica: a livello molecolare, biochimico, cellulare, di organismo, di popolazione o di comunità.

L'approccio più semplice ed immediato è quello di andare a valutare le alterazioni a livello di comunità e di popolazione. La maggiore presenza di inquinanti comporta un elevato stato di stress nell'organismo di riferimento, portando una riduzione della sua presenza in una determinata area. Questo fenomeno ci consente di valutare il cosiddetto stato di naturalità dell'area che ci fornisce un'indicazione su qual è il livello di alterazione presente, rispetto a un'area non inquinata.

È importante notare che gli effetti di uno o più contaminanti non sempre si riflettono ad alti livelli di organizzazione biologica, pertanto è utile valutare le alterazioni a livello molecolare, biochimico e cellulare. Questo può essere fatto andando ad indagare i cosiddetti biomarker che si suddividono in biomarker di esposizione e biomarker di effetto. La prima categoria ci permette di rilevare l'avvenuta esposizione a specifiche classi di contaminanti, senza che ciò implichi necessariamente un danno biologico, mentre la seconda, ovvero i biomarker di effetto, ci consentono di indagare le alterazioni biochimiche o fisiologiche dell'organismo, non necessariamente correlate ad uno specifico contaminante.

Indagini a bassi livelli di organizzazione biologica, come quello molecolare, biochimico e cellulare, consentono di ottenere informazioni estremamente utili, in quanto intrinsecamente predittive sulle future risposte a livelli di organizzazione biologica maggiore.

Sebbene un approccio così approfondito possa sembrare una soluzione ovvia ed auspicabile, andare ad indagare a bassi livelli di organizzazione biologica non risulta sempre una strada percorribile, in quanto misurare bassissime concentrazioni di contaminanti nei tessuti o

osservare alterazioni minime necessita di tecniche avanzate di laboratorio, le quali portano a far lievitare esponenzialmente i costi di un biomonitoraggio.

Infatti il vero punto di forza del biomonitoraggio ad alti livelli di organizzazione biologica è rappresentato dai bassissimi costi. Limitando il campo di indagine alle sole alterazioni di comunità, già presenti nel territorio interessato, un singolo operatore può svolgere in autonomia un elevato numero di rilievi durante l'anno, potendo disporre così di un significativo numero di “centraline biologiche” dislocate in modo capillare su tutto il territorio.

1.3.1 I licheni come organismo bioindicatore

Un ottimo organismo bioindicatore, utilizzato per il monitoraggio della qualità dell'aria, capace di rispondere sia a livello individuale che di comunità, è il “lichene”, esso presenta contemporaneamente la duplice capacità di reagire alla presenza di inquinanti e di accumularli all'interno dei propri tessuti (Nash, 2008). Innumerevoli furono i tentativi nel corso della storia di definire una giusta collocazione per i licheni all'interno dell'albero della vita.

Il primo ad utilizzare il termine “lichene” fu Teofrasto (*ca. 300 a.C.*), il quale collocò le specie oggi riconosciute come licheni in parte tra le alghe e in parte tra i muschi, senza riconoscerli come gruppo distinto. Successivamente il botanico francese Joseph Pitton de Tournefort nel 1700 riconobbe i licheni come appartenenti ad un gruppo tassonomico separato, detto (Lichen) il quale accomunava i licheni ai muschi (Per M. Jørgensen, 2017).

Un ulteriore contributo fu dato dal botanico italiano Pier Antonio Micheli il quale comprese che i licheni erano imparentati con i funghi.

Successivamente il padre della nomenclatura ancor oggi utilizzata, Carl von Linné (1707-1778), nella sua opera *Species Plantarum* (1753) riprese il genere Lichen, seguendo da vicino il sistema di Tournefort (Per M. Jørgensen, 2017).

Per poter osservare un crescente interesse nella lichenologia si dovette attendere l'ultimo studente di Linneo, Erik Acharius (1758-1819), formato in lichenologia dall'amico Olof Swartz (1760-1818) e considerato ad oggi il padre della lichenologia, i suoi lavori permisero di avere una prima nomenclatura che andava a suddividere in gruppi l'unico genere Lichen precedentemente esistente (Per M. Jørgensen, 2017).

Nel 1803 Erik Acharius progettò una nuova tassonomia basata sui corpi fruttiferi.

Un passo ulteriore si ebbe nel 1824 grazie al farmacista francese Antoine Fée (1789-1874), il quale riconobbe l'importanza di osservare le spore oltre ai corpi fruttiferi per identificare correttamente i licheni (Per M. Jørgensen, 2017).

Negli anni 60 dell'Ottocento, a partire dalle osservazioni di H. De Bary (1831-1888) che per primo caratterizzò come simbiotica l'associazione tra funghi e alghe nei licheni, lo svizzero Simon Schwendener sviluppò la teoria della cosiddetta doppia natura dei licheni, presentandola nel 1867 (Per M. Jørgensen, 2017).

La teoria di Schwendener fu respinta dalla maggior parte dei lichenologi dell'epoca. Il finlandese Edvard Vainio (1853-1929), nel suo lavoro sui licheni brasiliani del 1890, fu tra i primi ad accoglierne le conseguenze tassonomiche, costruendo una classificazione in cui i licheni erano considerati un taxon parallelo ai funghi (Per M. Jørgensen, 2017).

Un progresso importante si ebbe poi nel 1952, quando lo svedese Rolf Santesson inserì i licheni fillicoli nella classificazione degli Ascomiceti di Nannfeldt (1932). Con il passare del tempo, anche grazie a nuove tecniche di indagine come la microscopia elettronica a scansione, fu sempre più chiara la corretta collocazione dei licheni all'interno dei funghi (Per M. Jørgensen, 2017).

Ad oggi, i licheni sono considerati una forma simbiotica tra un fungo (principalmente Ascomiceti per il 98%) e un organismo fotosintetico (come un'alga verde o un cianobatterio) (Saini et al., 2019). Varie sono le specie di funghi lichenizzati conosciuti; ritroviamo tra questi i Deuteromiceti (1,6%) e i Basidiomiceti (0,4%) (Saini et al., 2019). Analogamente riscontriamo altrettanta varietà di specie nel partner fotosintetico, infatti ne esistono all'incirca 156 specie di fotobionti distribuite in 56 generi (Saini et al., 2019).

La maggior parte dei fotobionti appartiene alle alghe verdi (Chlorophyta 116 specie, 73,9% della diversità totale) o ai cianobatteri (Cyanoprokaryota 35 specie, 22,3%). I tre generi di fotobionti più comuni nei licheni sono Trebouxia, Trentepohlia e Nostoc (Saini et al., 2019).

La classificazione moderna utilizza strumenti molecolari per determinare le relazioni filogenetiche tra i licheni e i loro singoli partner algali e fungini.

Con l'evolversi della conoscenza si è evoluta anche la definizione stessa di cosa fosse un lichene. Ad oggi possiamo definire un lichene come un ecosistema autosufficiente formato dall'interazione di un fungo ospitante e da una disposizione extracellulare di uno o più partner fotosintetici e un numero indeterminato di altri organismi microscopici (Hawksworth & Grube, 2020).

I licheni sono presenti in tutto il mondo e sono in grado di crescere in quasi tutte le condizioni climatiche; dagli ambienti estremi delle regioni artiche e subartiche alle foreste subtropicali di pianura (Allen et al., 2019). Finora sono state descritte più di 20.000 specie differenti a livello globale (Allen et al., 2019).

Morfologia dei Licheni. La morfologia esterna dei licheni, pur risultando semplice, presenta un'elevata variabilità (Tab. 1), infatti attraverso l'osservazione del tallo, è possibile suddividere i licheni in base alla loro forma di accrescimento.

La prima distinzione viene fatta sulla base della dimensione in Macrolicheni e Microlicheni.

Tab. 1. Forme di accrescimento dei licheni: descrizione sintetica delle morfologie del tallo (rielaborazione da (Pier Luigi Nimis, 2011)).

Forma di accrescimento	Descrizione
Licheni fruticosi	Si sviluppano in 3 dimensioni, con forme variabili (filamentosi e pendenti, a forma di coppa, bastoncino, cespuglietto).
Licheni fogliosi	Si sviluppano in 2 dimensioni (come una foglia) e la faccia inferiore è attaccata al substrato tramite organi simili a radichette (rizine). I lobi sono sollevabili dal substrato almeno all'apice.
Licheni crostosi	Si sviluppano in 2 dimensioni come i licheni fogliosi, ma la faccia inferiore aderisce strettamente e completamente al substrato (si possono raccogliere solo assieme ad esso).
Licheni squamulosi	Il tallo è composto da piccole squamette, a volte embriciate (disposte come le tegole di un tetto).
Licheni leprosi	Il lichene è ridotto ad una soffice massa pulverulenta facilmente asportabile dal substrato.
Licheni gelatinosi	Questo gruppo include sia licheni fogliosi che licheni crostosi. Contengono cianobatteri ed hanno tallo indifferenziato (omeomero). Allo stato umido diventano fortemente gelatinosi, allo stato secco sono neri e duri.
Licheni composti	Alcuni licheni (soprattutto quelli del genere <i>Cladonia</i>) hanno tallo di due tipi: un tappeto basale squamuloso da cui origina un tallo fruticoso eretto (podezi) di forma variabile.

Di particolare interesse sono i licheni fogliosi e fruticosi. I primi sono caratterizzati da un tallo laminare con superfici superiore e inferiore differenziate, non completamente addossato al substrato ma ancorato ad esso in alcune sue parti; possono presentare aree lobate e lì si può ritrovare adesi alla superficie di rami; crescono inoltre su rocce e terreno.

Alcuni tipi particolari di licheni fogliosi presentano un unico punto di ancoraggio al substrato, collocato nell'area centrale del tallo lichenico, chiamato umbilicus. Questa tipologia particolare di licheni fogliosi viene denominata licheni umbilicati.

I licheni fruticosi, presentano un tallo dai lobi stretti e lineari fittamente ramificati, parzialmente adesi al substrato di crescita, si presentano come ciuffi con portamento pendulo, adesi a piante e rocce.

Oltre che per la propria forma di accrescimento i licheni possono essere suddivisi sulla base del loro adattamento al substrato di crescita, infatti il tallo lichenico può svilupparsi all'esterno o all'interno del substrato stesso.

Alcune delle forme precedentemente descritte, come i licheni fruticosi, fogliosi e crostosi, appartengono al gruppo dei licheni epilittici i quali sviluppano il proprio tallo all'esterno del substrato, e li si può ritrovare su rocce o sassi.

Esistono inoltre licheni che si sviluppano sulla corteccia degli alberi e che vengono definiti licheni epifiti, ed infine vi sono alcune tipologie di licheni che si sviluppano adesi alle foglie e vengono definiti epifilli.

Diversamente dalle precedenti, alcune specie licheniche non possiedono una morfologia ben definita e si sviluppano all'interno del substrato distinguendosi in licheni endolitici, ovvero che si sviluppano all'interno di rocce e licheni endofitici, che si sviluppano all'interno della corteccia delle piante. (Jahns, Hans Martin, 2012).

Struttura. I licheni, indipendentemente dalla forma di accrescimento, condividono una struttura pressoché simile nelle sue componenti.

Essi sono generalmente composti da un organismo fungino ospitante, il cui tallo lichenico è stratificato in cortex superiore, uno strato algale nel quale è ospitato il fotobionte, un midollo (medulla) costituito da ife fungine, e un cortex inferiore (Morillas et al., 2022).

Il corpo fungino risulta privo di organi differenziati e di tessuti vascolari (Morillas et al., 2022); ciò nonostante, attraverso una organizzata disposizione cellulare, è comunque possibile apprezzare distinte regioni anatomiche funzionali come per esempio gli organi di adesione al substrato (Rizine) collocate all'esterno del cortex inferiore nei licheni fogliosi e fruticosi. Queste strutture fungine multicellulari non presentano alcuna vascolarizzazione né funzione di assorbimento o trasporto di nutrienti, fungendo unicamente da supporto ed ancoraggio (Morillas et al., 2022).

Il tallo lichenico può presentare due tipologie di organizzazione interna (eteromero e omeomero) e ospitare due o tre simbionti (bipartito o tripartito) (Fig. 1). Nel tallo eteromero le componenti fungine e algali sono disposte in strati distinti, mentre nel tallo omeomero,

micobionte e fotobionte risultano distribuiti uniformemente senza una stratificazione apprezzabile (Morillas et al., 2022).

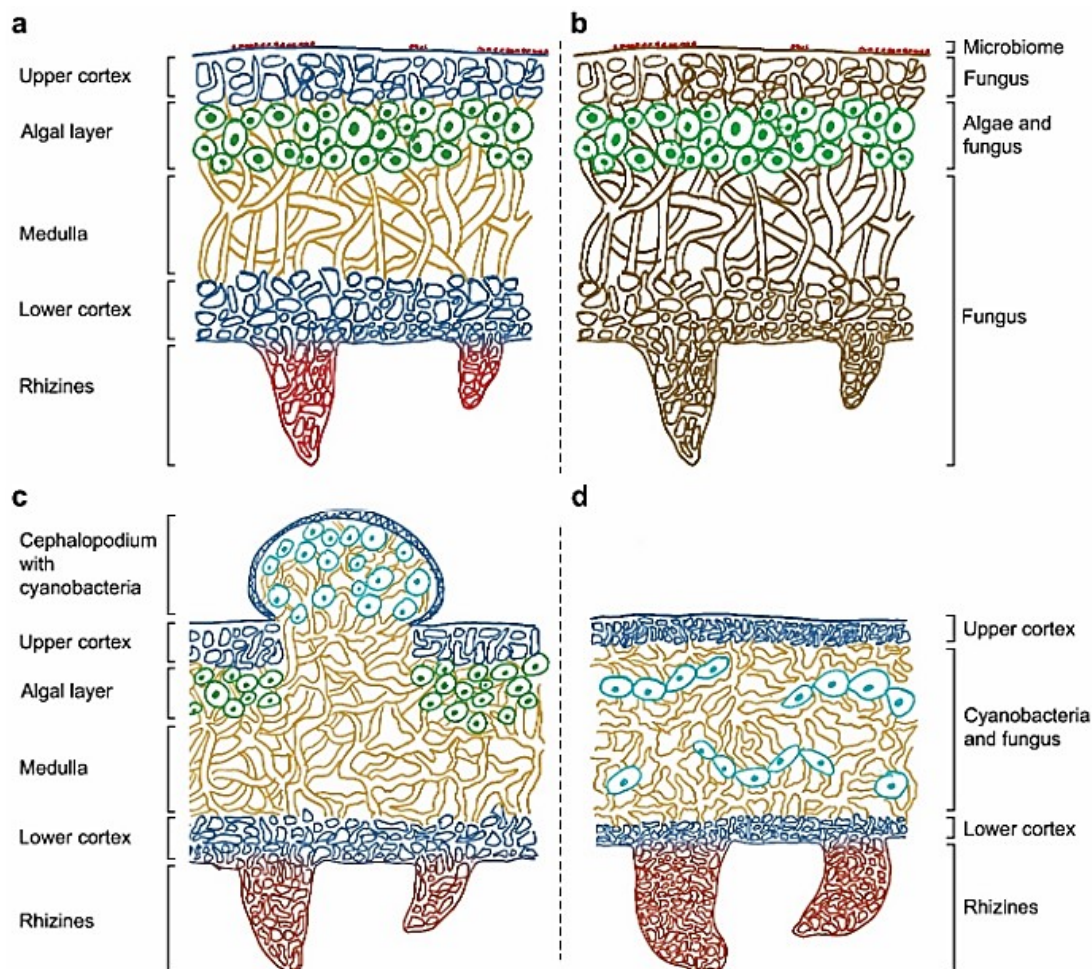


Fig. 1. (a) Corrispondenza tra la struttura del lichene e (b) le sue singole componenti in un tallo eteromero. Rappresentazione di un lichene tripartito (c) e di un lichene omeomero (d) (Morillas et al., 2022).

Fisiologia dei licheni. La fisiologia del lichene è regolata da un naturale fenomeno di (idratazione/disidratazione) passiva che ne regola l'attività metabolica.

Ad un elevato grado di idratazione corrisponde un aumento dell'attività metabolica, viceversa quando il lichene è in una condizione di disidratazione torna in uno stato di quiescenza.

Questa dinamica spiega sia la sua resistenza a stress fisici, come il freddo e il caldo, sia la dipendenza del danno da inquinanti, in relazione allo stato di idratazione, poiché l'attività

metabolica e gli scambi gassosi risultano intensificati, esponendo maggiormente il lichene all'azione delle sostanze nocive (ANPA, 2001).

Dal punto di vista riproduttivo il lichene combina vie sessuali con strutture fungine con apotecii e spore a vie vegetative o asessuali, con propaguli che includono entrambi i partner simbiotici.

Si osservano inoltre interessanti dinamiche ecologiche di ricolonizzazione e recupero, che si manifestano in tempi relativamente brevi a seguito del miglioramento della qualità dell'aria, come documentato in diverse aree urbane e industriali europee (ANPA, 2001).

Un aspetto particolare, che vale per tutti i licheni, è l'assenza di veri e propri organi di assorbimento, tipici delle piante vascolari.

L'ingresso di sostanze, anche nocive, avviene esclusivamente attraverso l'atmosfera e interessa l'intera superficie del tallo, con penetrazione facilitata dalla mancanza di una cuticola, portando a potenziali condizioni di stress e alla conseguente alterazione della comunità lichenica, rendendoli ideali come organismi bioindicatori (ANPA, 2001).

Esaminando più nel dettaglio il rapporto tra i licheni e le principali sostanze inquinanti presenti in atmosfera, già richiamate in precedenza osserviamo vari aspetti.

Il biossido di zolfo SO_2 , secondo la letteratura classica e le sintesi moderne, ha avuto un impatto storico molto forte sulle comunità licheniche. Il biossido di zolfo SO_2 si ossida in atmosfera, passando per lo ione solfito SO_3^{2-} , ad acido solforico e aerosol di solfato, contribuendo alla deposizione acida sia umida sia secca (Pescott et al., 2015).

A livello biologico si osserva depressione di fotosintesi/respirazione, con danni fisiologici al lichene (Pescott et al., 2015), su scala di comunità si ha una semplificazione della flora lichenica con perdita delle specie più sensibili.

Per quanto riguarda gli ossidi di azoto NO_x , un aspetto particolare è che l'azoto può agire sia da "nutriente" che da fonte di stress. L'eccesso comporta eutrofizzazione con conseguenti alterazioni competitive e turnover di comunità, con aumento di specie nitrofile e declino di specie oligotrofe (Pescott et al., 2015).

Per quanto concerne l'ozono troposferico O_3 , la risposta lichenica è spesso descritta come relativamente tollerante (Pellegrini et al., 2014).

Per quanto concerne i composti organici volatili COV - (VOC) e semivolatili SVOC (es. PAH - IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici)) e POP (Inquinanti Organici Persistenti), le review indicano che i licheni sono particolarmente sensibili ai composti organici semivolatili lipofili, con assorbimento spesso dominato da deposizione secca e affinità per superfici ricche

di metaboliti lipofili, ascrivendoli come ottimi biomonitor (Van der Wat & Forbes, 2014), (Organismo utilizzato come campionatore passivo).

Oltre alle sostanze citate, i licheni sono in grado di assorbire i vari metalli in traccia; il loro accumulo deriva da una combinazione di intrappolamento particellare, scambio ionico (spesso reversibile) e assorbimento intracellulare passivo e attivo (Van der Wat & Forbes, 2014).

La capacità di legare i metalli: Cd, Pb, Zn (e altri) può risultare elevata rispetto a molte piante e la variabilità dipende da specie, morfologia (rapporto superficie/massa), chimica dei depositi e condizioni microclimatiche (Van der Wat & Forbes, 2014).

1.3.2 Indice di biodiversità lichenica

La metodica di indagine adottata è basata sull'utilizzo dell'indice di biodiversità lichenica I.B.L. o LDV (*Lichen Diversity Value*), il quale costituisce un eccellente indicatore statistico dello stato di qualità dell'aria, basato sulla capacità dei licheni epifiti (che crescono sul tronco degli alberi) di rispondere in maniera rapida e quantificabile alla presenza o meno di sostanze fitotossiche (ANPA, 2001; P. Nimis, 1999).

In Italia, l'impiego dell'I.B.L. ha trovato larga diffusione a partire dagli anni Ottanta del secolo scorso anche grazie alla sua semplicità di applicazione (ANPA, 2001).

L'indice I.B.L. è basato sul rilievo della distribuzione e frequenza delle specie licheniche rinvenute all'interno di un reticolo, di dimensioni standard, posizionato sul tronco di alberi nei quattro punti cardinali (ANPA, 2001).

La semplicità di esecuzione dei rilievi rende questa metodica accessibile ad un ampio pubblico, purché adeguatamente formato nella discriminazione delle varie specie licheniche.

Alla luce delle sue caratteristiche l'indice di biodiversità lichenica oltre ad essere un eccellente strumento di indagine a basso costo e a basso livello di complessità, rappresenta un eccellente strumento di divulgazione e di coinvolgimento in ambito didattico/scolastico. È doveroso precisare che, nonostante la semplicità applicativa sopracitata, l'I.B.L. è a tutti gli effetti un indice statistico, pertanto le modalità adottate nell'esecuzione dei rilievi ne determinano in modo significativo l'accuratezza.

Affinché i rilievi svolti, possano garantire un sufficiente grado di attendibilità e ripetibilità è necessario adottare una metodica standardizzata.

I principali strumenti di standardizzazione ai quali è possibile fare riferimento nel contesto italiano sono il Manuale ANPA del 2001, intitolato "I.B.L. (Indice di Biodiversità Lichenica) (ANPA, 2001), e la norma europea (UNI EN 16413, 2014).

Il Manuale ANPA e il disegno di campionamento sistematico. Il Manuale ANPA (ANPA, 2001) definisce le procedure operative per l'esecuzione dei rilievi di biodiversità lichenica all'interno di una rete nazionale.

Il disegno di campionamento previsto dal manuale si basa sulla sovrapposizione di una griglia a maglie regolari, di dimensione 18x18 km (Fig. 2) al territorio nazionale italiano (ANPA, 2001). I punti di intersezioni delle maglie definiscono il centro delle Unità di Campionamento Primarie (UCP) (ANPA, 2001), ciascuna delle quali si può estendere da 1x1 km a 250x250 m attorno al proprio nodo. Ciascuna UCP viene suddivisa in quattro quadranti (Fig. 2), in ognuno di essi viene individuata un'Unità di Campionamento Secondaria (UCS). All'interno di ogni UCS devono essere selezionati i tre alberi più prossimi al centro che soddisfino i requisiti previsti dal manuale (ANPA, 2001). Qualora una UCS risulti non raggiungibile o priva di alberi idonei, è prevista una procedura di sostituzione che permette di individuare una nuova UCS alternativa.

L'intento del manuale ANPA è quello di consentire una copertura omogenea di tutto il territorio italiano e garantire al contempo l'ottenimento di rilievi statisticamente robusti ed uniformi per la costruzione di un'unica rete di monitoraggio.

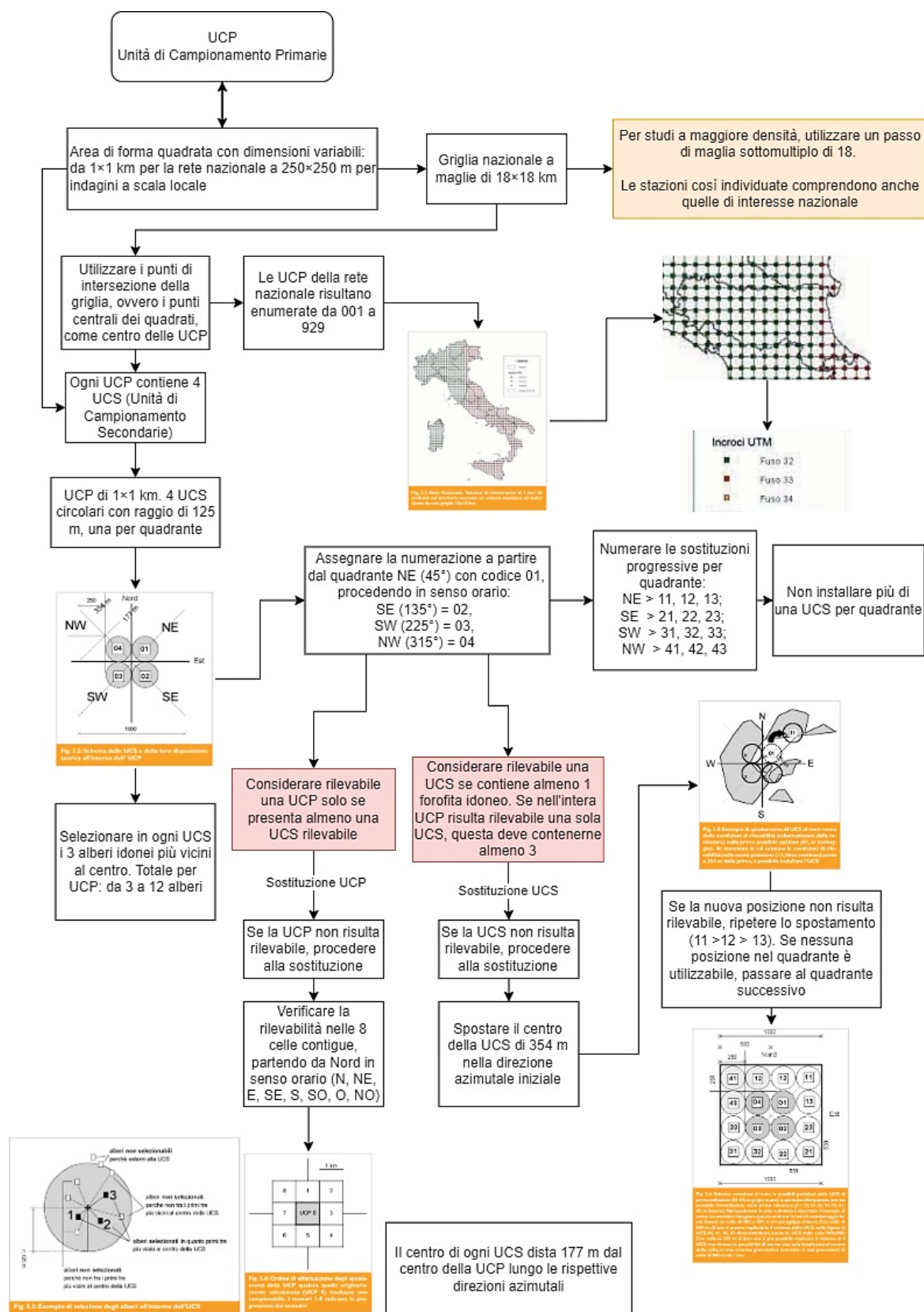


Fig. 2. Schema operativo del disegno di campionamento previsto dal manuale ANPA: definizione delle Unità di Campionamento Primarie e Secondarie, criteri di rilevabilità e procedura di sostituzione (rielaborazione da (ANPA, 2001)).

Il Manuale ANPA (ANPA, 2001) stabilisce le caratteristiche che gli alberi campionati devono possedere, al fine di avere uniformità delle condizioni di campionamento e rendere confrontabili i diversi siti sottoposti a monitoraggio.

Le specie arboree considerate idonee vengono classificate in due macro gruppi (Fig. 3), ovvero specie con scorza subneutra e specie con scorza acida.

Specie con scorza subneutra	Specie con scorza acida
<i>Acer pseudoplatanus</i>	<i>Prunus domestica</i>
<i>Acer platanoides</i>	<i>Olea europaea</i>
<i>Ceratonia siliqua</i>	<i>Quercus petraea</i>
<i>Ficus spp.</i>	<i>Alnus glutinosa</i>
<i>Fraxinus excelsior</i>	<i>Castanea sativa</i>
<i>Fraxinus ornus</i>	<i>Quercus</i>
<i>Juglans spp.</i>	<i>Quercus pubescens</i>
<i>Populus x canadensis</i>	<i>Quercus cerris</i>
<i>Sambucus nigra</i>	<i>Betula pendula</i>
<i>Ulmus spp.</i>	<i>Prunus avium</i>
	<i>Tilia spp.</i>

Fig. 3. Specie arboree idonee al rilievo I.B.L. classificate in due macro gruppi sulla base delle proprietà chimico-fisiche della scorza, ovvero specie con scorza subneutra e specie con scorza acida (ANPA, 2001).

Per ciascun sito di campionamento devono essere selezionati tre alberi, possibilmente della medesima specie, scelti tra quelli più prossimi al centro della UCS (ANPA, 2001); ciascun esemplare deve soddisfare vari requisiti dimensionali, strutturali e di contesto (Fig. 4).

Caratteristiche Forofiti
INCLINAZIONE DEL TRONCO ≤ 10°
CIRCONFERENZA ≥ 60 cm
SCORZA No scorza esfoliabile (es. Aesculus, Platanus). No scorza liscia scarsamente colonizzabile (es. Celtis, Populus alba). No specie con elevata capacità idrica della scorza (es. Sambucus, Robinia pseudacacia)
SPECIE Utilizzare preferibilmente una sola specie. Es.: Tilia spp., Quercus robur, Quercus pubescens
QUANTITÀ 3 alberi per UCS (i più vicini al centro)
DISTANZA ≥ 10 m tra tronchi adiacenti
ASSENZA DI Verniciature, gravi malattie o patologie, danni meccanici evidenti

Fig. 4. Caratteristiche dimensionali, strutturali e di contesto richieste ai forofiti per essere considerati idonei al rilievo (rielaborazione da (ANPA, 2001)).

Il reticolo utilizzato per il rilievo deve avere caratteristiche standard, ovvero composto da quattro subunità distinte per orientamento, ciascuna delle quali costituita da una serie lineare di cinque quadrati di dimensione 10 x 10 cm disposti verticalmente (ANPA, 2001). Le quattro subunità devono essere posizionate sul tronco di ciascun albero, in corrispondenza dei quattro punti cardinali, con il margine inferiore posto a 100 cm da terra. Qualora ci si trovi in aree particolarmente aride la metodica consente di campionare ad altezze minori (ANPA, 2001). All'interno di ciascun quadrato si procede al censimento di tutte le specie licheniche presenti, registrando, per ogni specie, la sua presenza nei cinque quadrati e considerando gli esemplari a cavallo tra due quadranti, come presenti in entrambi. I dati così ottenuti rappresentano la

“frequenza”, intesa come il numero di quadrati (da 0 a 5) nei quali una determinata specie risulta presente in una determinata esposizione (orientamento).

Nel posizionamento delle subunità è ammessa una rotazione massima di 20° in senso orario rispetto al centro del punto cardinale teorico di riferimento al fine di evitare parti del tronco danneggiate, decorticate, con evidenti nodosità, con fasce di scolo di acqua piovana o con copertura di briofite superiore al 25% (ANPA, 2001).

Una volta eseguiti i rilievi, i dati raccolti devono essere elaborati mediante somme e medie successive delle frequenze. Ottenendo così un valore, denominato Biodiversità Lichenica (BL).

La procedura di calcolo prevista dal manuale ANPA si articola in tre passaggi:

1. Somma delle frequenze per ciascun rilievo. Per ciascun albero campionato e per ciascuna delle quattro esposizioni cardinali (N, E, S, O), si sommano le frequenze di tutte le specie rilevate in quella specifica esposizione. Questa somma, rappresenta una misura simultanea della diversità e della copertura lichenica su quel settore del tronco; questa può variare da 0 (nessuna specie presente in alcun quadrato) fino a un massimo teorico, determinato dal prodotto tra il numero di specie presenti e il valore massimo di frequenza per ciascuna specie.
2. Media per punto cardinale. Si sommano le frequenze dei rilievi effettuati nello stesso punto cardinale su tutti gli alberi del sito e si divide per il loro numero, ottenendo così quattro valori medi per esposizione (BL_{jN} , BL_{jE} , BL_{jS} , BL_{jW}).
3. Somma delle quattro medie cardinali.

Si sommano le quattro medie cardinali ottenendo così un unico valore BL dell'UCP (Eq. 1).

$$BL_{UCP} = (BL_{jN} + BL_{jE} + BL_{jS} + BL_{jW}) \quad \text{Eq. (1)}$$

Il valore di Biodiversità Lichenica dell'unità di campionamento (BL della UCP, equivalente al valore LDV_j nella notazione internazionale (UNI EN 16413, 2014) viene ottenuto sommando le quattro medie cardinali (Eq. 2):

$$BL_{UCP} = \frac{BL_{1N} + BL_{2N} + \dots + BL_{nN}}{n} + \frac{BL_{1E} + BL_{2E} + \dots + BL_{nE}}{n} + \frac{BL_{1S} + BL_{2S} + \dots + BL_{nS}}{n} + \frac{BL_{1W} + BL_{2W} + \dots + BL_{nW}}{n} \quad \text{Eq. (2)}$$

La norma UNI EN 16413:2014 e le sue peculiarità. La norma UNI (UNI EN 16413, 2014), è il secondo strumento di standardizzazione che si affianca al Manuale ANPA (ANPA, 2001) e fornisce un quadro metodologico armonizzato a livello europeo per il biomonitoraggio mediante licheni epifiti.

La norma condivide con il protocollo ANPA l'impostazione generale del metodo di censimento delle specie licheniche, introducendo alcune differenze operative.

Essendo questa una norma di carattere sovranazionale, all'interno del disegno di campionamento non prescrive un metodo rigido, bensì consente l'adozione di diversi schemi probabilistici, lasciando al ricercatore la scelta dello schema più adatto agli obiettivi dell'indagine e alle caratteristiche del territorio, a condizione che sia sempre mantenuta la natura probabilistica del campionamento (UNI EN 16413, 2014).

Questa maggiore flessibilità, ovviamente dettata dall'esigenza di standardizzare un ampio panorama di metodiche, non scendendo nella singola applicazione, risulta particolarmente vantaggiosa per orientare studi condotti su scala locale o su territori di ridotte dimensioni, nei quali il reticolo nazionale ANPA a 18 km, nonostante l'uso di sottomultipli, può risultare meno adeguato ai fini dell'obiettivo dello studio condotto.

Per quanto riguarda la selezione dei forofiti, la norma europea classifica le specie arboree idonee in cinque gruppi (Allegato C) in base alle proprietà fisico-chimiche della corteccia.

I requisiti dimensionali degli alberi presentano alcune differenze rispetto al manuale ANPA; infatti, la norma UNI richiede una circonferenza del tronco compresa tra 50 e 250 cm misurata a 130 cm da terra e ammette un'inclinazione del tronco fino a 20° rispetto alla verticale misurata al centro di ogni griglia (contro i 10° della metodica ANPA).

Inoltre, la norma europea indica che la sommatoria dei disturbi (danni, decorticazione, ramificazioni, nodi, epifiti e piante rampicanti) all'interno di ciascuna delle quattro griglie deve essere inferiore al 20% (UNI EN 16413, 2014).

Un'altra differenza risiede nel fatto che la norma UNI considera come piante distinte i fusti che presentano una chiara separazione al di sotto di 100 cm dal suolo (UNI EN 16413, 2014).

La procedura di rilievo rimane sostanzialmente invariata rispetto a quella proposta dal manuale ANPA; l'unica differenza riguarda la rotazione ammessa in caso di parti non idonee del tronco. Dove il manuale ANPA prevede una rotazione massima di 20° in senso orario, la norma UNI consente di ruotare la griglia di rilievo dapprima di 20°, in senso orario e poi in senso antiorario, rispetto alla posizione di riferimento.

In questo caso l'Indice di Biodiversità Lichenica (LDV) viene calcolato nel seguente modo:

1. Per ciascun albero, somma delle quattro somme di frequenza per esposizione, LDV_t

$$LDV_t = SF_{Nt} + SF_{Et} + SF_{St} + SF_{Wt} \quad \text{Eq. (3)}$$

2. Media aritmetica degli LDV_t sugli n alberi dell'unità di campionamento, LDV_j

$$LDV_j = \frac{LDV_{1t} + LDV_{2t} + LDV_{3t} + \dots + LDV_{nt}}{n} \quad \text{Eq. (4)}$$

1.3.3 Esplorazione delle tecniche digitali di acquisizione

Un aspetto fondamentale in ogni campagna di monitoraggio, come nella presente, è quello legato all'acquisizione dei dati. Tale aspetto ha consentito di esplorare, parallelamente al monitoraggio tradizionale (rilievo visivo diretto), ulteriori modalità di raccolta delle informazioni, attraverso l'acquisizione e lo studio di immagini e modelli 3D, sperimentando allo scopo varie tecniche di acquisizione/elaborazione.

Tale esplorazione, seppur non strettamente necessaria ai fini del presente studio, è stata motivata sia dal personale interesse nel campo della modellazione, scansione e stampa 3D, sia dalla convinzione che strumenti di questo tipo potrebbero migliorare ulteriormente le tecniche di biomonitoraggio, arricchendo la documentazione tecnica in materia.

L'esplorazione delle suddette tecniche, volta anche a raccogliere materiale per una futura attività divulgativa ha portato ad una inevitabile dilatazione dei normali tempi di rilievo classici.

È importante sottolineare come l'obiettivo non fosse quello di sostituire il rilievo manuale, la cui semplicità e accessibilità costituiscono un pregio fondamentale della metodica, bensì quello di indagare le potenzialità e i limiti delle tecnologie attualmente disponibili.

Prima di riprendere l'argomento principale del presente elaborato ritengo utile riassumere brevemente quanto acquisito da questa fase di sperimentazione.

Imaging a profondità di campo estesa (EDOF, extended depth of field (Forster et al., 2004)), spesso realizzato mediante focus stacking, una tecnica utile per ottenere immagini nitide di campioni osservati in stereomicroscopia quando la loro variazione di quota supera la profondità di campo del sistema ottico; essa è basata sulla fusione digitale di immagini multiple acquisite a diversi piani focali lungo l'asse verticale (Fig. 5).

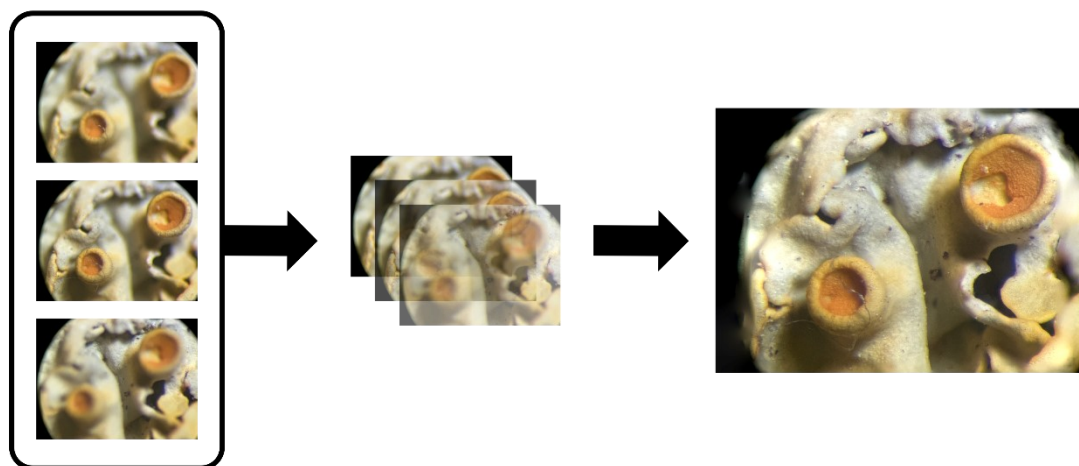


Fig. 5. Imaging a profondità di campo estesa (EDOF, focus stacking): esempio di immagine ottenuta dalla miscelazione di scatti multipli a piani focali differenti per estendere la profondità di campo in stereomicroscopia.

Fotogrammetria Structure from Motion (SfM) (Westoby et al., 2012), una tecnica di telerilevamento passivo che consente la ricostruzione tridimensionale di una scena (Fig. 6) a partire da una serie di fotografie bidimensionali acquisite da viste differenti parzialmente sovrapposte, utile per l'acquisizione di interi siti di campionamento ivi compresi i singoli alberi al fine di ottenere materiale dimostrativo per simulare digitalmente un rilievo a scopo educativo.

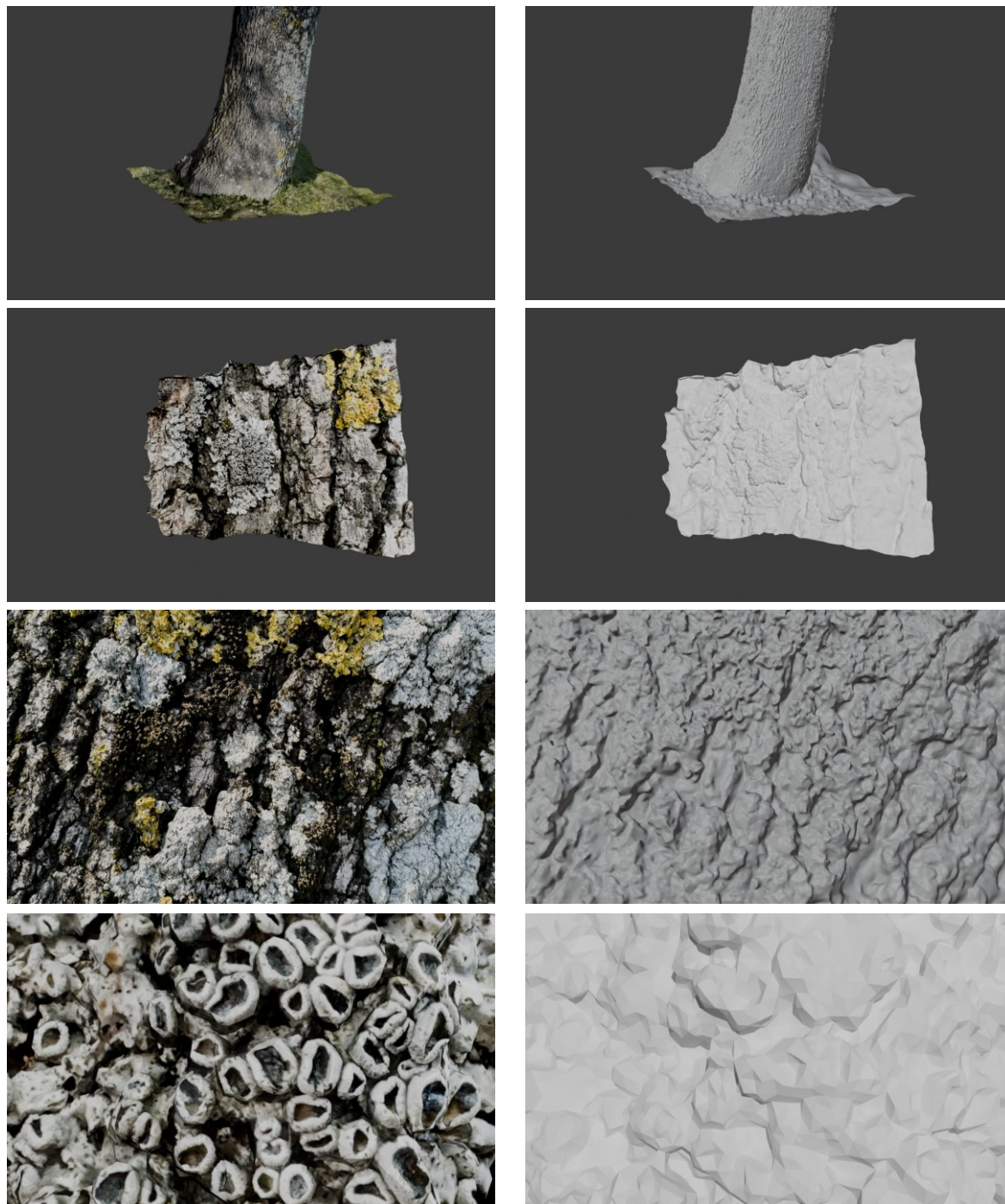


Fig. 6. Fotogrammetria Structure from Motion (SfM): sequenza di acquisizioni di un sito di campionamento e modello tridimensionale ricostruito a partire dalle viste bidimensionali parzialmente sovrapposte (mesh texturizzata).

Scansione LiDAR (Light Detection and Ranging)(Wehr & Lohr, 1999), una tecnica di telerilevamento attivo che, a differenza della fotogrammetria, la quale ricava informazioni tridimensionali per via geometrica, a partire da immagini acquisite passivamente, questa emette impulsi laser, generalmente nel vicino infrarosso, e misura il tempo di volo (ToF) del segnale riflesso per determinare la distanza degli oggetti, generando una nuvola di punti tridimensionale e successivamente una mesh (Fig. 7).

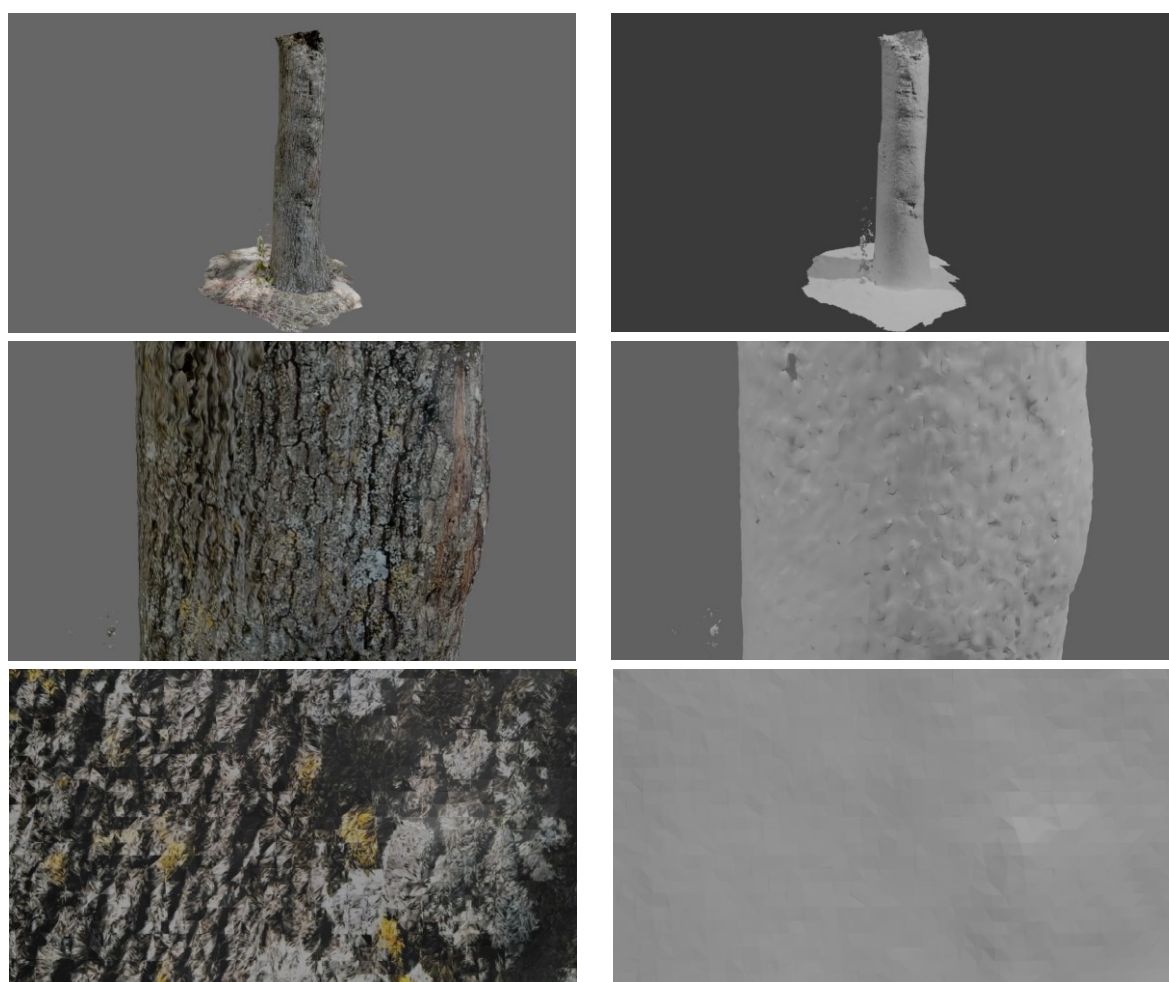


Fig. 7. Scansione LiDAR mediante sensore posteriore di iPhone 14 Pro Max: ricostruzione tridimensionale ad alta risoluzione di porzioni ravvicinate del tronco (mesh texturizzata).

Scansione a luce strutturata (Structured Light) (Salvi et al., 2004), una tecnica di acquisizione 3D attiva che, a differenza del LiDAR, il quale determina la distanza mediante la misura del tempo di volo, proietta un pattern luminoso codificato, tipicamente frange o griglie di punti, sulla superficie dell'oggetto e ne analizza la deformazione geometrica tramite triangolazione attiva tra proiettore e camera, determinando la profondità di ciascun punto e restituendo una nuvola di punti tridimensionale ad alta risoluzione e successivamente una mesh (Fig.8)(Fig. 9).

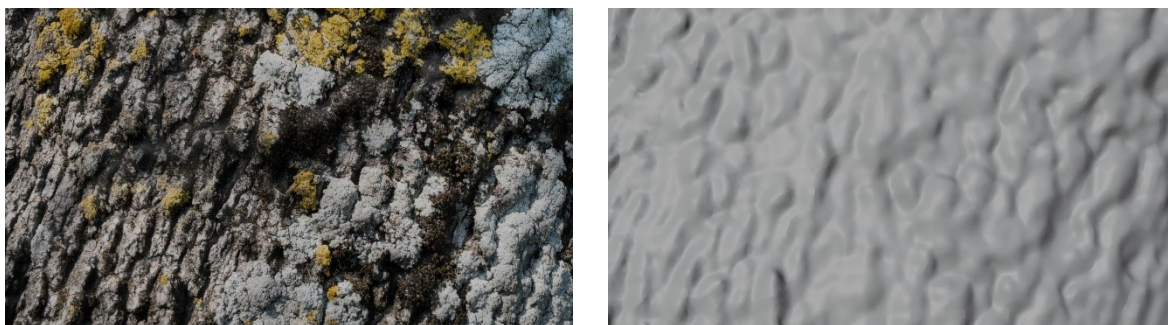


Fig. 8. Scansione a luce strutturata mediante sensore anteriore (TrueDepth) di iPhone 14 Pro Max: ricostruzione tridimensionale ad alta risoluzione di porzioni ravvicinate del tronco (mesh texturizzata)

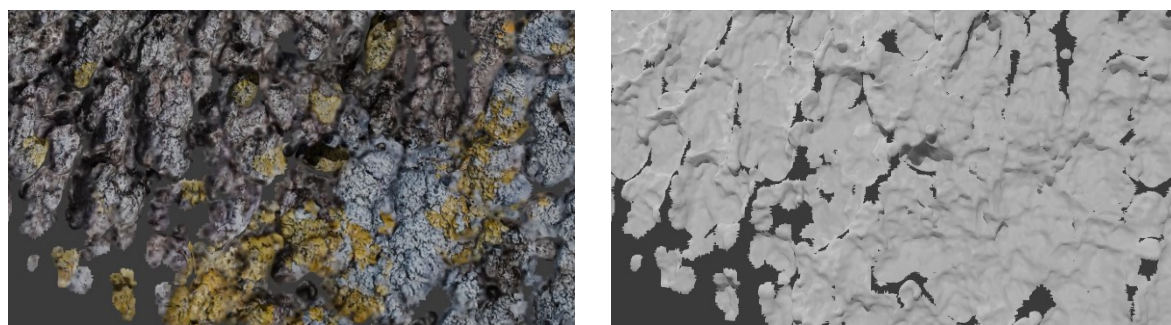


Fig. 9. Scansione a luce strutturata mediante sensore Revopoint POP 2: modello tridimensionale ricostruito per triangolazione stereoscopica (mesh texturizzata).

Prospettive future: NeRF, 3D Gaussian Splatting e il progetto scAnt. Nel panorama delle tecniche innovative di ricostruzione tridimensionale, meritano un cenno il Neural Radiance Fields (NeRF), una tecnica di deep learning che rappresenta una scena mediante un campo di radianza volumetrico appreso da una rete neurale, e il 3D Gaussian Splatting, una tecnica di rasterizzazione che consente il rendering in tempo reale di campi di radianza a partire da una nuvola di punti sparsa ottenuta dalla calibrazione delle immagini.

Un interessante progetto degno di nota, a conclusione di questa breve analisi esplorativa, riguarda il progetto scAnt (Plum & Labonte, 2021) (Fig. 10), una piattaforma open-source a basso costo per la creazione di modelli tridimensionali di artropodi e altri piccoli oggetti, il cui approccio modulare e la filosofia open-source rappresentano un riferimento interessante per lo sviluppo futuro di sistemi dedicati alla documentazione digitale dei licheni.

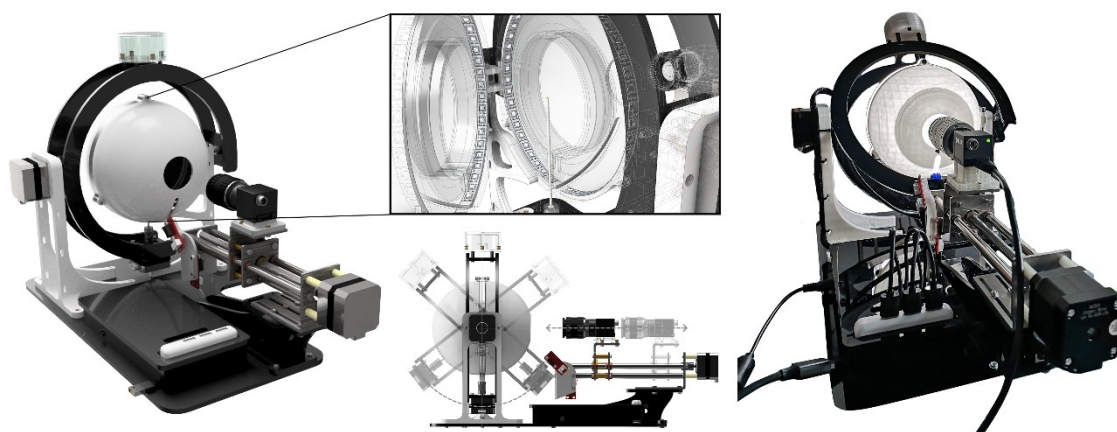


Fig. 10. Piattaforma scAnt per la creazione di modelli tridimensionali di artropodi e di piccoli oggetti, citata come spunto per l'evoluzione delle tecniche di documentazione lichenica (immagine tratta dal repository <https://github.com/evo-biomech/scAnt?tab=readme-ov-file> (evo-biomech, 2020/2026)).

1.4 La Repubblica di San Marino e il monitoraggio della qualità dell'aria



Fig. 11. Inquadramento territoriale della Repubblica di San Marino con suddivisione nei nove Castelli (fonte: territorio.sm/pub1/TerritorioSM/Mappe-online.html).

1.4.1 Contesto territoriale.

San Marino (Fig. 11), la più antica repubblica ad oggi esistente, è un piccolo Stato sovrano ed indipendente fondato il 3 settembre del 301 d.C., situato nel centro Nord della penisola italiana, con un'estensione territoriale di circa 61 km² ed una popolazione residente di 33.925 unità (*UFFICIO INFORMATICA, TECNOLOGIA, DATI E STATISTICA Dipartimento Funzione Pubblica*, 2024).

La Repubblica di San Marino è situata a pochi chilometri dalle coste del Mare Adriatico, non possiede sbocchi sul mare ed è caratterizzata da un territorio a prevalenza collinare, confinante con le regioni Marche ed Emilia-Romagna.

A livello politico il territorio è suddiviso in nove amministrazioni locali chiamate castelli: Città di San Marino, che è la capitale del paese, Acquaviva, Borgo Maggiore, Chiesanuova, Domagnano, Faetano, Fiorentino, Montegiardino e Serravalle.

Circa il 18% del territorio è occupato da aree urbanizzate, il 38% da terreni coltivati, il 15% da boschi e zone arbustive, un ulteriore 18% è caratterizzato da zone con formazioni calanchive, mentre poco più dell'1% da corsi d'acqua, la restante parte è occupata da terreni incolti (Fig. 12), (Mularoni, 2021).

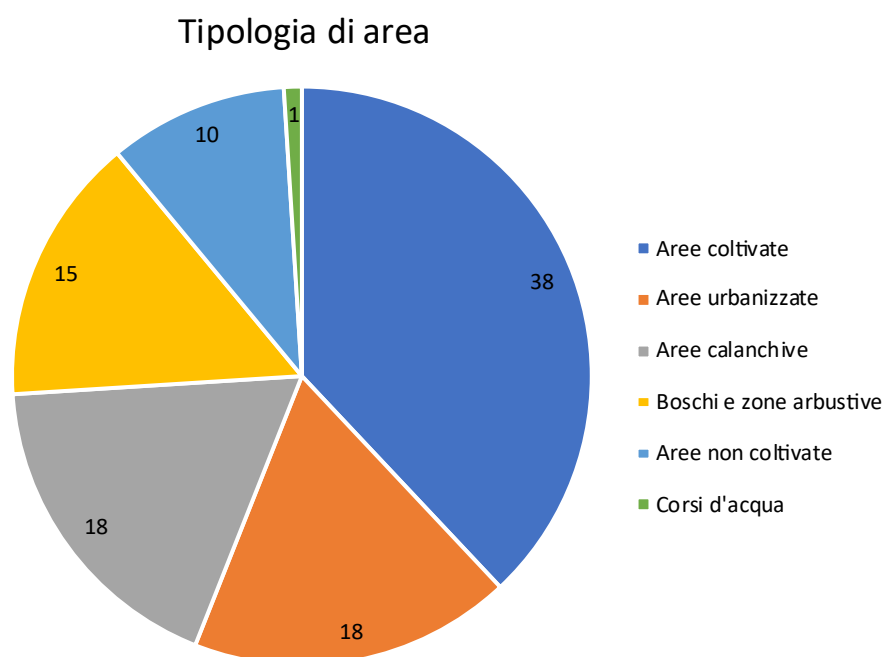


Fig. 12. Composizione percentuale del territorio della Repubblica di San Marino per tipologia di utilizzo del suolo.

Il 39% del territorio della Repubblica di San Marino è costituito da aree naturalistiche tutelate, come perimetrare dalla legge 29 gennaio 1992 n.7 “Piano Regolatore Generale (PRG) e relative norme di attuazione”, esse sono suddivise ulteriormente in sei Sub-aree (*Aree Naturalistiche Tutelate della Repubblica di San Marino*,).

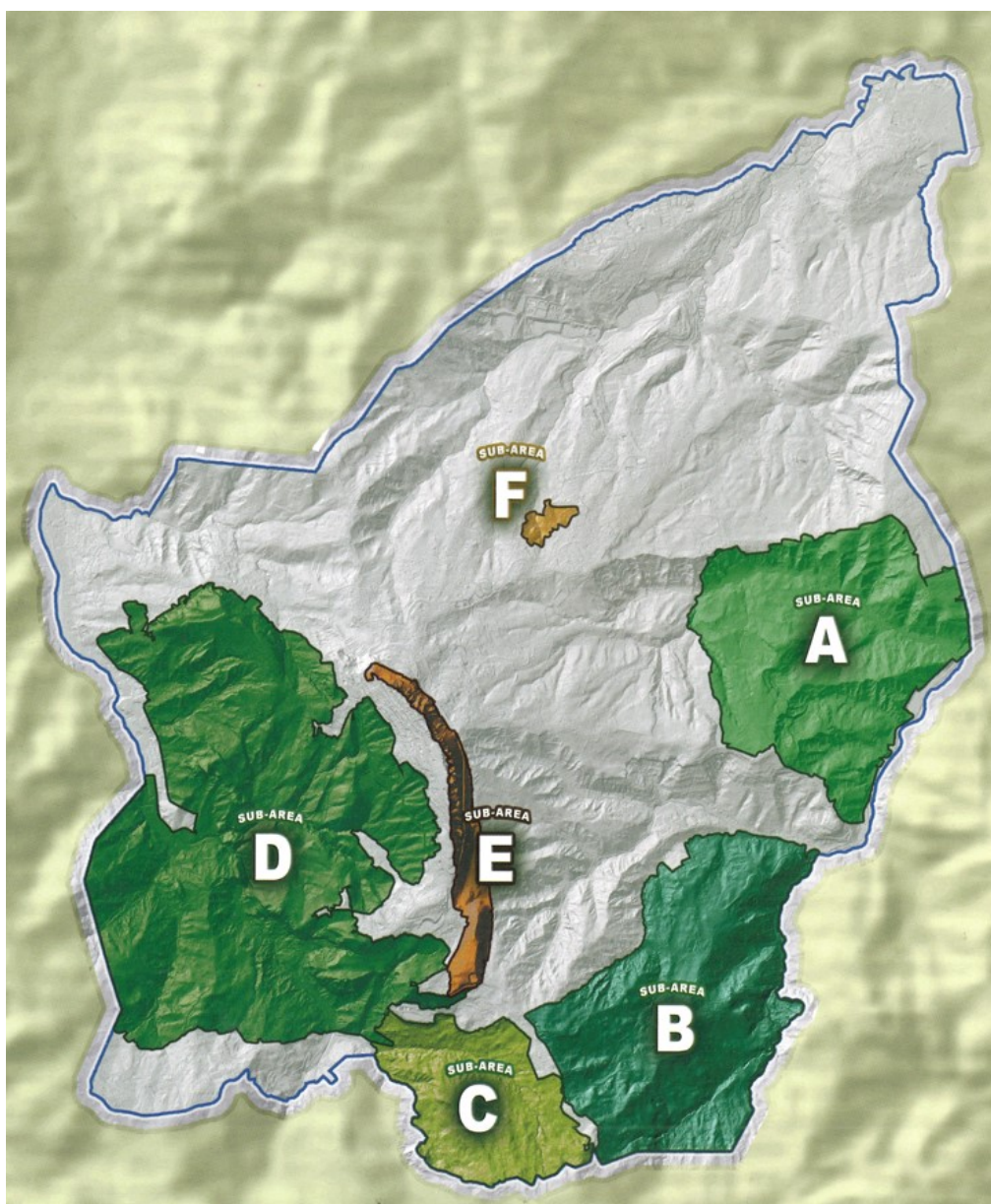


Fig. 13. Aree naturalistiche tutelate della Repubblica di San Marino, perimetrare ai sensi della legge 29 gennaio 1992 n. 7, suddivise in sei sub-aree per un totale di circa 6.120 ettari (Aree Naturalistiche Tutelate della Repubblica di San Marino,).

Flora boschiva. Nel territorio sono presenti sia aree boschive che forestali. Nelle aree con prevalenza di querce caducifoglie, è possibile ritrovare, come specie caratteristiche: *Quercus pubescens* (Fig. 15), *Fraxinus ornus*, *Quercus cerris*, *Ostrya carpinifolia*, *Carpinus betulus*, *Acer obtusatum*, *Quercus ilex*, *Asparagus acutifolius*, *Spartium junceum*, *Crataegus monogyna*, *Rosa spp.*, *Prunus spinosa*, *Cornus sanguinea* e *Rubia peregrina* (Aree Naturalistiche Tutelate della Repubblica di San Marino,).

La specie più ricorrente all'interno di tutte le subaree è rappresentata dal *Quercus pubescens*, (Fig. 14) una quercia decidua capace di adattarsi a diverse condizioni ambientali.

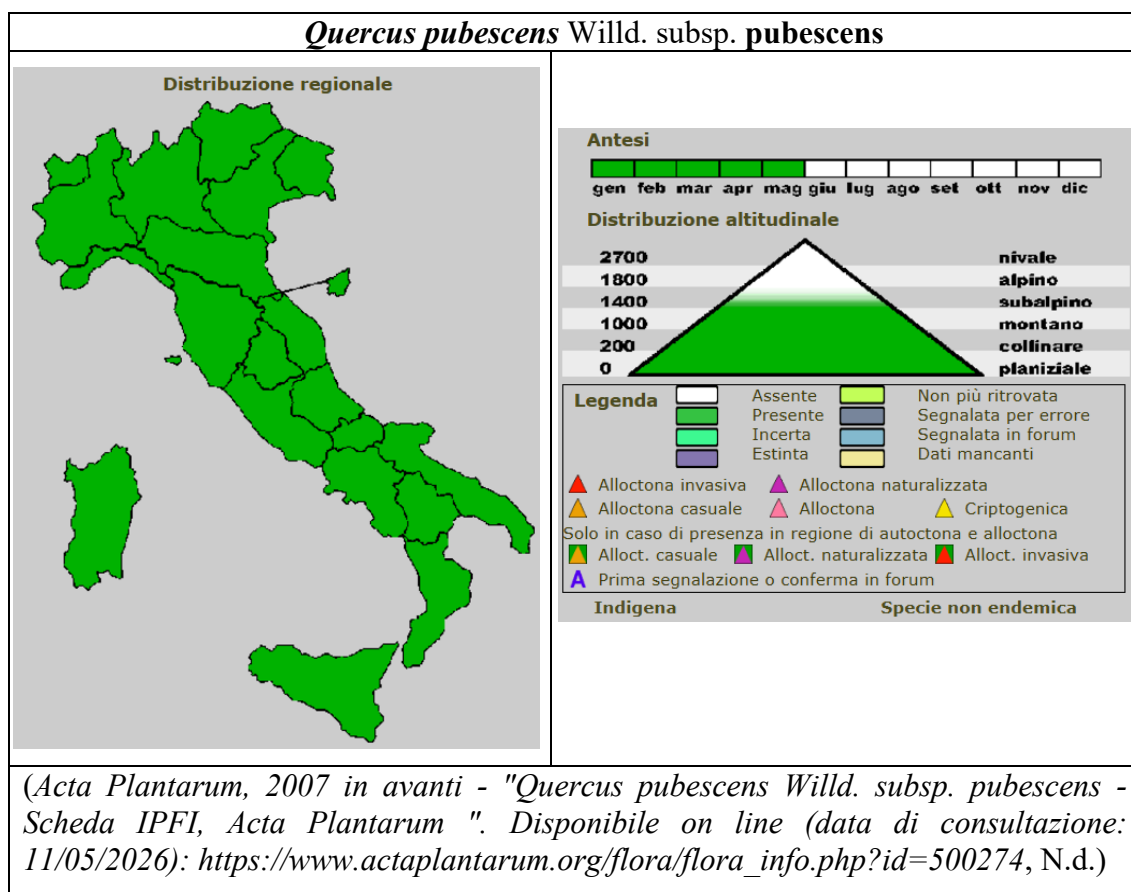


Fig. 14. Scheda della specie *Quercus pubescens* Willd. subsp. *pubescens*: distribuzione regionale, antesi e distribuzione altitudinale (Acta Plantarum, 2007).



Fig. 15. Documentazione fotografica in situ della *Quercus pubescens*, specie selezionata per i rilievi: portamento dei tronchi e morfologia fogliare.

Caratteristiche climatiche. Dal punto di vista climatico San Marino presenta un clima temperato con assenza di una stagione asciutta molto calda. Durante il periodo estivo si rileva una subaridità di circa due mesi (luglio agosto), tipica dei climi submediterranei.

Le temperature medie estive sono comprese tra i 24 °C e 26 °C, con picchi superiori a 40 °C, mentre nel periodo invernale si rileva una temperatura media di circa 7.6 °C, con picchi negativi fino a -3.7 °C (Dati U.P.A.V., 2020 - 2024).

1.4.2 Normativa locale in materia di qualità dell'aria

La normativa locale, volta alla tutela dell'ambiente e della qualità dell'aria, è il Codice Ambientale di San Marino, introdotto con il Decreto Delegato 27 aprile 2012 n.44 e ss.mm.ii.

Il Codice Ambientale stabilisce i valori limite di emissione e le prescrizioni da applicare alle emissioni convogliate derivanti degli impianti e delle attività produttive.

Detta inoltre, mediante l'Art. 119 e 120, le caratteristiche per una rete di monitoraggio e i metodi di valutazione della qualità dell'aria ambientale, adottando, di fatto, quanto previsto dalla Direttiva Europea 2008/50/CE.

Viene inoltre adottata la Direttiva Europea 2004/107/CE, per quanto concerne i valori massimi di concentrazione in aria per l'arsenico, il cadmio, il nickel e gli IPA.

1.4.3 Sorgenti di inquinamento

A causa delle sue ridotte dimensioni territoriali, la Repubblica di San Marino risulta fortemente influenzata dalla qualità dell'aria presente nei territori italiani limitrofi, risentendo pertanto, in modo significativo, dell'inquinamento transfrontaliero.

Dal punto di vista urbanistico, non essendo prevista un'adeguata separazione fra le aree artigianali-industriali e le zone abitative, vi è di fatto la presenza di un comparto immobiliare misto con presenza di nuclei abitativi a ridosso di realtà produttive e talvolta insistenti sul medesimo immobile.

Le sorgenti di potenziale inquinamento atmosferico nel territorio, possono essere suddivise in due macrocategorie: sorgenti fisse e sorgenti mobili. Le prime sono riconducibili alle emissioni derivanti dal comparto produttivo e abitativo, mentre le seconde sono riconducibili al traffico veicolare.

A causa della ridotta estensione del territorio, dell'urbanizzazione mista e dell'influenza di sorgenti transfrontaliere, risulta assai difficile, inquadrare in modo univoco lo stato di contaminazione ambientale per quanto concerne la matrice aria. Infatti, pur disponendo di dati “stimati” relativi alle emissioni derivanti dal comparto produttivo e dal traffico veicolare, non è possibile ottenere dati certi, se non attraverso misurazioni e campagne di indagine mirate.

1.4.4 Reti di monitoraggio della qualità dell'aria.

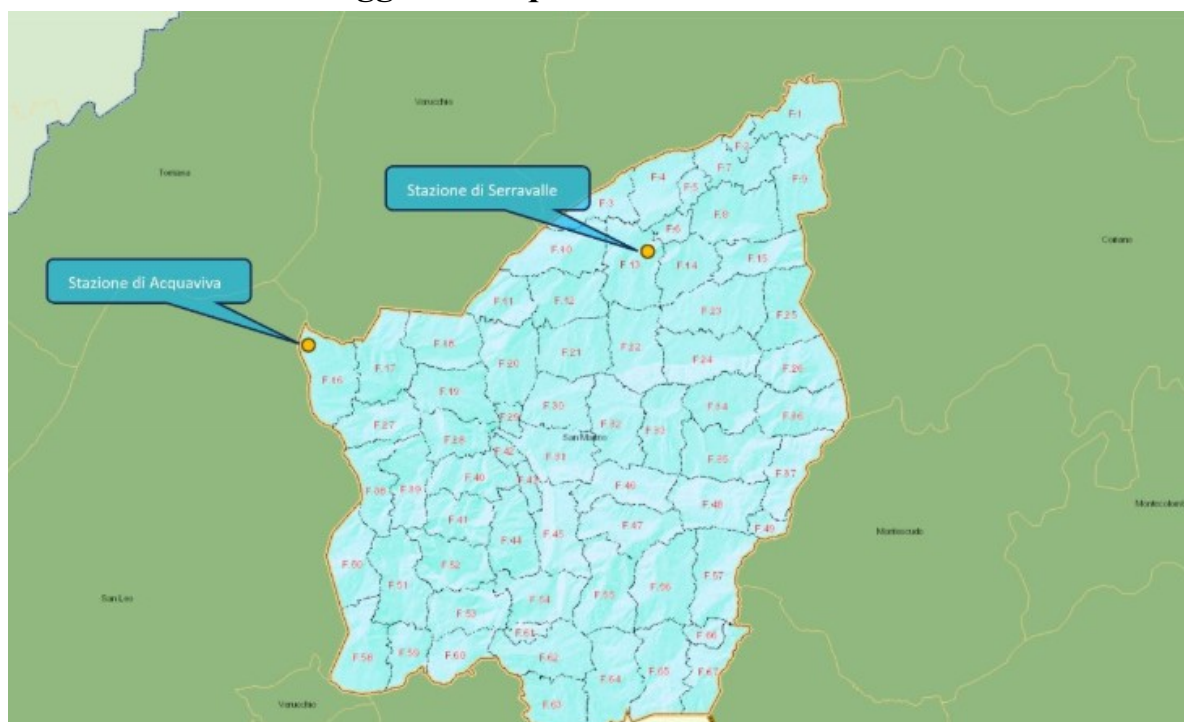


Fig. 16. Localizzazione delle due stazioni di rilevamento automatico della qualità dell'aria gestite dall'UPAV: stazione di Acquaviva e stazione di Serravalle (Dati-Aria, 2026).

La Repubblica di San Marino dispone di una rete di monitoraggio della qualità dell'aria composta da due stazioni di rilevamento automatiche (Fig. 16). Una di esse, definita stazione di “fondo”, collocata in area a parco (stazione di Serravalle) ed un'altra definita di “controllo urbano” collocata in centro abitato (stazione di Acquaviva).

La stazione di Serravalle, installata recentemente (dicembre 2024), permette di rilevare la qualità dell'aria in una zona di fondo, secondo la denominazione qui adottata, ove l'impatto seppur presente è considerato minore.

Contrariamente a quanto si possa presumere dalla sua denominazione qui adottata (Stazione di fondo), questa non può essere inquadrata come tale, ai sensi della Direttiva 2008/50/CE, ossia come una stazione dove:

- si possano misurare i livelli di fondo, rappresentativi di una determinata area e non influenzati da fonti di emissione locali;
- questa sia collocata in un'area a bassa densità di popolazione, ad una distanza di almeno 20 km da aree urbane ed industriali;
- questa aderisca pienamente ai criteri di ubicazione e definizione di "Fondo rurale".

In effetti essa, alla luce della suddetta direttiva, potrebbe essere più correttamente definita come stazione di campionamento "Urbana". Ciò nonostante, a prescindere dai criteri normativi, risulta conveniente mantenere la denominazione di stazione di "fondo", in quanto il territorio della Repubblica di San Marino è così scarsamente esteso che difficilmente presenterà aree a contaminazione significativamente minore.

La stazione di Acquaviva, collocata nell'omonimo Castello, pur essendo una stazione di rilevamento fissa, viene usata anche come stazione di controllo e ricollocata periodicamente in aree oggetto di particolare interesse o in aree di studio negli altri Castelli della Repubblica. Pur essendo simili, le due stazioni di rilevamento dispongono di strumentazione parzialmente differente e conseguentemente forniscono differenti report analitici (Tab. 2).

Tab. 2. Parametri rilevati dalla strumentazione installata presso le stazioni di Serravalle e di Acquaviva.

Stazione di Serravalle	Stazione di Acquaviva
NO ₂	NO ₂
PM ₁₀	PM ₁₀
PM _{2.5}	---
O ₃	---
---	CO
---	Benzene

Oltre a tali dati, viene effettuata presso laboratori esterni anche la ricerca dei metalli e degli IPA.

Le due stazioni di rilevamento sono affidate alla gestione dell'UPAV - Ufficio Prevenzione Ambiente e Vigilanza del Territorio, il quale si occupa della loro gestione, dell'elaborazione e valutazione dei dati raccolti.



Stazione di campionamento dell'aria di Serravalle



Fig. 17. Schermata di pubblicazione dei dati ambientali della stazione di Serravalle resi disponibili dall'UPAV (Stazione-di-Serravalle, 2026).

2 Scopo del lavoro

La Repubblica di San Marino ad oggi non dispone di una caratterizzazione della qualità dell'aria basata su organismi bioindicatori, e la rete di monitoraggio strumentale presente sul territorio si compone di un numero limitato di stazioni fisse (n°2). In tale contesto, il biomonitoraggio mediante licheni epifiti costituisce un approccio complementare al monitoraggio strumentale, in grado di fornire informazioni a copertura spaziale estesa e a costi contenuti.

Basandosi su questa premessa, il presente lavoro persegue un duplice obiettivo. Sul piano ambientale, valutare lo stato della qualità dell'aria del territorio sammarinese attraverso la stima della biodiversità lichenica epifita. Sul piano metodologico, verificare l'applicabilità del protocollo di stima dell'Indice di Biodiversità Lichenica (I.B.L.) definito dal manuale ANPA (2001) e dalla norma UNI EN 16413:2014 a un territorio di ridotte dimensioni, mediante l'adattamento dei suddetti strumenti di standardizzazione. L'indagine avanza due ipotesi di lavoro:

- la biodiversità lichenica varia in funzione della pressione antropica attesa, presentando valori di naturalità più elevati nelle aree a parco e valori inferiori nelle aree urbane di fondovalle e nelle aree industriali;
- il protocollo I.B.L., risulta applicabile alla scala locale e fornisce dati coerenti, interpretabili secondo la scala di naturalità/alterazione di (Castello & Skert, 2005).

Per la verifica di tali ipotesi sono stati definiti i seguenti obiettivi:

1. caratterizzare la ricchezza specifica, la frequenza e la distribuzione delle entità licheniche rilevate;
2. calcolare i valori di diversità lichenica per forofita (LDV_t) e per unità di campionamento (LDV_j) e classificare le undici unità di campionamento secondo la scala di naturalità/alterazione adottata;
3. valutare la variabilità spaziale della biodiversità lichenica;
4. descrivere la variabilità della biodiversità lichenica all'interno di ciascuna unità di campionamento (variabilità intra-sito);
5. confrontare i risultati ottenuti tra le diverse tipologie di area a parco, urbana e industriale per valutare la relazione tra biodiversità lichenica e grado di pressione antropica attesa.

3 Materiali e Metodi

3.1 Area di studio

La Repubblica di San Marino, dal punto di vista delle sorgenti di inquinamento, presenta un contesto urbanistico di non facile classificazione, caratterizzato dalla presenza di aree produttive e industriali a stretto contatto con aree abitative.

Al fine di ottenere una copertura quanto più possibile rappresentativa delle condizioni ambientali presenti sul territorio, si è scelto di individuare undici unità di campionamento (UC), distribuite all'interno di tre tipologie di area, ciascuna delle quali caratterizzata da un diverso grado di pressione antropica attesa (Fig. 18):

1. Aree a parco: UC collocate all'interno di parchi pubblici o aree naturalistiche tutelate, nelle quali si presume vi sia una qualità dell'aria relativamente migliore grazie alla maggiore distanza dalle principali sorgenti di inquinamento e alla presenza di copertura vegetale. Le UC scelte sono state:
 - Parco AUSA (P1)
 - Parco Laiala (P2)
 - Parco Montecerreto (P3)
2. Aree industriali: UC posizionate in prossimità di insediamenti artigianali e industriali, ove si attende un impatto sulla qualità dell'aria derivante dalle emissioni del comparto produttivo. Le UC scelte sono state:
 - Acquaviva (I1)
 - Faetano (I2)
3. Aree urbane: UC inserite nel tessuto urbano residenziale dei diversi Castelli, rappresentative delle condizioni di esposizione tipiche delle aree abitate. Le UC scelte sono state:
 - Canepa (U1)
 - Città di San Marino (U2)
 - Fiorentino (U3)
 - Montegiardino (U4)
 - Falciano (U5)
 - Chiesanuova (U6)

La distribuzione spaziale delle UC è stata concepita in modo da coprire l'intero territorio della Repubblica di San Marino, con circa un'unità di campionamento per ciascun Castello o

area di interesse, evitando aree con caratteristiche di pressione antropica sovrapponibili, ove la disponibilità di forofiti idonei lo consentisse.

La localizzazione puntuale di ciascuna unità di campionamento e dei tre alberi campionati al suo interno è stata annotata all'interno di apposite schede di rilievo, predisposte allo scopo. Le schede di rilievo relative sono consultabili in Appendice A.

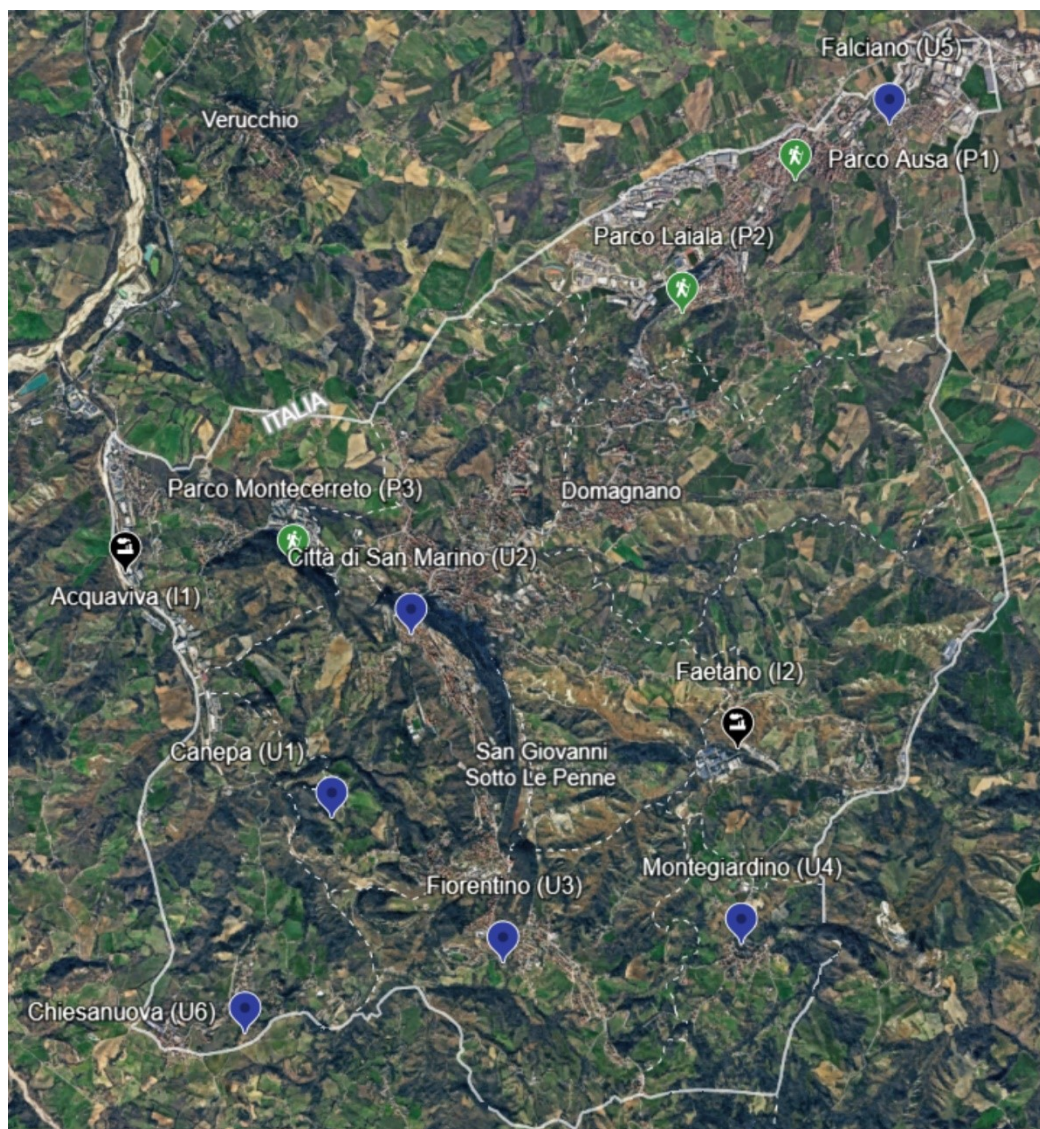


Fig. 18. Mappa del territorio della Repubblica di San Marino con evidenziate le 11 unità di campionamento, divise per aree di interesse a diverso impatto antropico.

3.2 Strumentazione

L'attrezzatura impiegata per l'esecuzione dei rilievi è stata in parte acquisita e in parte realizzata artigianalmente, secondo le indicazioni dettate dal protocollo e dalle esigenze riscontrate.

3.2.1 Reticolo di campionamento

Il manuale ANPA prevede che il reticolo di campionamento sia composto da quattro subunità distinte, ciascuna delle quali costituita da una serie lineare di cinque quadrati contigui di 10 x 10 cm, disposti verticalmente, per un'altezza complessiva di 50 cm e una larghezza di 10 cm.

Per la presente indagine, il reticolo di campionamento è stato realizzato artigianalmente, con materiali reperibili in una comune ferramenta, conformemente alle dimensioni prescritte. Il reticolo realizzato presenta particolarità costruttive volte a garantirne una maggior flessibilità di posizionamento, dotandolo di due cerniere metalliche collocate al centro dei listelli orizzontali, superiore e inferiore. Questo accorgimento, non previsto dal protocollo standard, consente alla struttura di angolarsi e di conformarsi meglio alla curvatura del tronco, garantendo una migliore aderenza alla superficie anche su tronchi di diametro ridotto, condizione essenziale per facilitare un migliore conteggio delle frequenze (Fig. 19).

Il fissaggio al tronco è assicurato mediante una corda elastica regolabile, al termine della quale è collocato un occhiello metallico che si aggancia all'estremità opposta del reticolo. Tale sistema consente di adattare il dispositivo a tronchi di circonferenze differenti mantenendo il reticolo saldamente aderente durante l'intera operazione di rilievo, consentendo all'operatore di avere entrambe le mani libere per l'osservazione e la registrazione dei dati.



Fig. 19. Reticolo di campionamento realizzato artigianalmente in conformità alle dimensioni prescritte dal manuale ANPA (10 x 50 cm, suddiviso in cinque quadrati 10 x 10 cm), dotato di cerniere centrali per l'adattamento alla curvatura del tronco e di corda elastica con occhiello metallico per il fissaggio.

3.2.2 Scheda di rilievo digitale

Per la registrazione dei dati sul campo è stata realizzata una scheda di rilievo, sotto forma di modulo PDF compilabile, destinata alla compilazione diretta su dispositivo mobile (smartphone).

La scheda prevede tutti i campi per l'identificazione del sito di campionamento, nonché una matrice per la registrazione delle frequenze di ciascuna specie nelle cinque subunità di campionamento per ciascuno dei quattro orientamenti cardinali (Nord, Est, Sud, Ovest).

Il modulo PDF compilabile è stato elaborato con il chiaro intento di automatizzarne sia la raccolta che l'esecuzione dei calcoli necessari (Fig. 20).

3.2.3 Strumentazione fotografica, di misura e di raccolta

La strumentazione fotografica e di misura impiegata durante i rilievi comprendeva uno smartphone e un metro a nastro.

Lo smartphone è stato utilizzato per molteplici funzioni: (i) come dispositivo fotografico per la documentazione delle aree di studio, dei tronchi selezionati, del posizionamento del reticolo e dei campioni raccolti; (ii) come bussola per l'orientamento del reticolo secondo i quattro punti cardinali e (iii) come livella per la verifica della verticalità del tronco; (iv) come piattaforma per la compilazione delle schede di rilievo PDF.

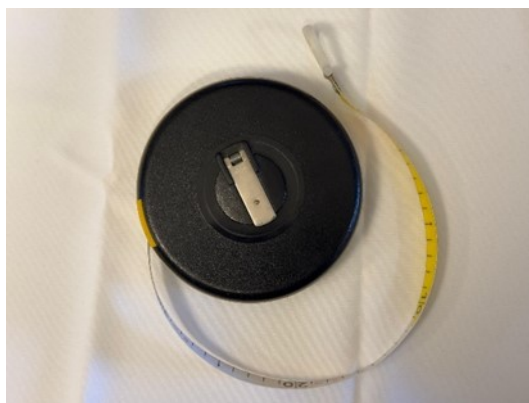


Fig. 21. Strumentazione di misura impiegata in campo: metro a nastro per la misurazione della circonferenza del tronco e dell'altezza di posizionamento del reticolo.

Il metro a nastro è stato impiegato per la misurazione della circonferenza del tronco a 130 cm dal suolo e per la determinazione dell'altezza di 100 cm dal suolo alla quale collocare il margine inferiore del reticolo di campionamento (Fig. 21).



Fig. 22. Strumentazione ottica e di raccolta utilizzata in campo: (a) lente di ingrandimento multipla (30x - 60x - 90x) con illuminatore, (b) coltello a lama sottile e (c) contenitori per il prelievo di porzioni di corteccia colonizzata

Una lente di ingrandimento multipla (30x - 60x - 90x) da campo con illuminatore è stata utilizzata per l'osservazione dei caratteri morfologici dei talli lichenici adesi al tronco (Fig. 22 a).

Un coltello a lama sottile (Fig. 22 b) è stato utilizzato per il prelievo di porzioni di corteccia colonizzata da licheni da destinarsi ad una successiva verifica tassonomica, mentre contenitori in polietilene (Fig. 22 c) sono stati utilizzati per la raccolta e conservazione di campioni da trasferire al laboratorio.

3.2.4 Strumentazione di laboratorio.

Uno stereomicroscopio per l'osservazione dei dettagli morfologici dei campioni raccolti è stato utilizzato durante la fase di identificazione tassonomica, attraverso l'esame dei caratteri anatomici del tallo non sempre apprezzabili ad occhio nudo.

Al fine di documentare fotograficamente le specie licheniche osservate allo stereomicroscopio, è stato progettato e realizzato un adattatore (Fig. 24) per consentire il posizionamento di uno smartphone sull'oculare dello stereomicroscopio (Fig. 25).

L'adattatore è stato realizzato in PLA (Acido Polilattico) mediante stampa 3D (Fig. 23) con tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling).



Fig. 23. Stampante 3D FDM

Il fissaggio dell'adattatore allo stereomicroscopio avviene, per semplice inserimento senza necessità di ulteriori meccanismi di bloccaggio (Fig. 25).

Le immagini acquisite hanno consentito di ottenere fotografie a elevato ingrandimento dei talli lichenici (Allegato B).



Fig. 24. Rendering dell'Adattatore progettato e realizzato mediante stampa 3D con tecnologia FDM, destinato all'accoppiamento di uno smartphone al tubo fotografico (uscita trinoculare) dello stereomicroscopio per la documentazione fotografica dei talli lichenici.

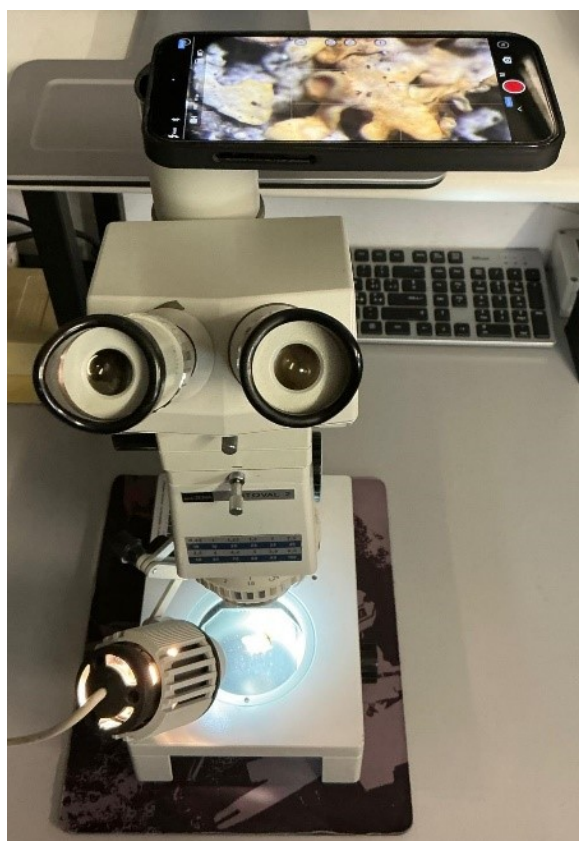


Fig. 25. Posizionamento dell'adattatore stampato in 3D sul tubo fotografico (uscita trinoculare) dello stereomicroscopio durante l'acquisizione di immagini ad alto ingrandimento.

3.3 Piano di campionamento

L' applicazione delle tecniche di biomonitoraggio della qualità dell'aria al territorio della Repubblica di San Marino, ha richiesto una ricalibrazione dell'indagine, adattando le metodiche proposte dal manuale ANPA e dalla norma UNI alle caratteristiche locali.

Tale aspetto ha richiesto un'attenta riflessione per la costruzione del disegno di campionamento, portando a privilegiare un approccio ragionato rispetto alla rigida applicazione della griglia, prevista dal protocollo ANPA.

Nel presente lavoro, il disegno di campionamento e l'impostazione metodologica sono stati sviluppati attraverso molteplici fasi: da una prima progettazione calibrata sulle esigenze di copertura territoriale, dall'individuazione e scelta delle aree di interesse idonee da sottoporre al monitoraggio, alla progettazione della strumentazione e degli ausili necessari per eseguire i rilievi in campo, alla metodica di raccolta dei dati e dei campioni per eventuali approfondimenti futuri, alla definizione dei metodi di identificazione delle specie licheniche rinvenute e alla scelta delle metodiche per la successiva elaborazione e interpretazione dei risultati ottenuti.

La scelta del disegno di campionamento ha rappresentato uno degli aspetti che hanno richiesto più attenzione, dal momento che il protocollo nazionale, elaborato dall'ANPA (2001), prevedeva un approccio più sistematico rispetto a quello scelto.

Sebbene la solidità metodologica dell'approccio ANPA sia innegabile, la sua applicazione integrale al contesto territoriale della Repubblica di San Marino avrebbe presentato vari limiti. La griglia di campionamento prevista dal protocollo nazionale, concepita per territori di estensione ben maggiore, avrebbe restituito un dato inadeguato a discriminare le differenze di qualità dell'aria tra i diversi Castelli o tra zone a diversa pressione antropica.

L'adozione di una griglia con passo ridotto, ottenuta come sottomultiplo di quella proposta dal manuale ANPA, pur consentendo di raggiungere la risoluzione spaziale necessaria, avrebbe generato, a seguito di un suo utilizzo rigoroso un numero di unità di campionamento eccessivamente elevato in rapporto alle risorse disponibili e agli obiettivi dell'indagine, che non miravano a una caratterizzazione uniforme dell'intero territorio, bensì all'analisi di aree specifiche.

Si è pertanto scelto di adottare un approccio di tipo ragionato, nel quale la localizzazione delle unità di campionamento è stata definita sulla base di criteri ecologici e urbanistici piuttosto che su una base geometrica rigida.

Questa impostazione è comunque coerente con la norma UNI EN 16413:2014, la quale non prescrive un unico disegno di campionamento applicabile; al contrario, fermo restando il

mantenimento della natura probabilistica, consente l'adozione di diversi schemi di campionamento, lasciando al ricercatore la scelta dello schema più adatto alle caratteristiche del territorio in relazione agli obiettivi specifici dell'indagine.

È tuttavia doveroso sottolineare come la natura esplorativa del presente studio e la scelta di un campionamento ragionato comportino alcune limitazioni: i risultati ottenuti non possono essere estesi in maniera automatica all'intero territorio della Repubblica, né possono essere sottoposti a test statistici che presuppongano un campionamento probabilistico rigoroso. Ne consegue che le conclusioni a cui giunge lo studio devono essere interpretate come indicazioni di tendenza piuttosto che come stime certe della qualità dell'aria.

3.4 Raccolta dei campioni e identificazione delle specie

3.4.1 Rilievi sul campo

I rilievi sono stati condotti nel periodo compreso tra la primavera e l'estate del 2024, operando in condizioni meteorologiche favorevoli, ovvero in giornate asciutte e soleggiate, al fine di evitare condizioni di eccessiva umidità atmosferica, che tenderebbe a modificare sensibilmente l'aspetto cromatico dei talli lichenici. Tale accortezza è dovuta al fatto che molte specie fogliose e crostose assumono una colorazione più scura e un aspetto gelatinoso che può rendere estremamente complesso, se non impossibile, il riconoscimento in campo.

Per ciascun sito, la procedura di rilievo si è articolata secondo le seguenti fasi.

- a. Realizzazione della documentazione fotografica del sito e degli alberi selezionati, registrando le coordinate GPS di ciascun esemplare.
- b. Per ognuno dei tre alberi del sito, il reticolo di campionamento è stato posizionato in corrispondenza dei quattro punti cardinali (Nord, Est, Sud, Ovest), con il margine inferiore posto a 100 cm da terra, così da delimitare l'area di rilievo compresa tra 100 e 150 cm di altezza dal suolo, conformemente a quanto previsto dal protocollo ANPA. Nei casi in cui la presenza di nodi, ferite cicatriziali, rami inseriti a bassa quota o altre irregolarità della superficie corticale impediva il corretto posizionamento del reticolo nell'esposizione cardinale prevista, si è proceduto applicando la rotazione ammessa, annotando nella scheda di rilievo l'entità della deviazione in gradi.

- c. All'interno di ciascun quadrato del reticolo si è proceduto poi al censimento di tutte le specie licheniche presenti, registrando, per ogni specie, la sua presenza in ognuno dei cinque quadrati di ciascuna esposizione cardinale.

Durante il rilievo si è provveduto a prelevare un campione per ogni forma morfologica rinvenuta anche allo scopo di realizzare l'atlante fotografico posto a corredo del presente elaborato, Allegato B.

3.4.2 Identificazione delle specie

L'identificazione delle specie licheniche rinvenute nel corso dei rilievi ha rappresentato una delle fasi più complesse e al contempo più delicate dell'intero lavoro, in ragione della complessità tassonomica che caratterizza molti generi di licheni epifiti e vista la molteplicità di fattori ambientali che possono influenzarne l'aspetto morfologico.

Le risorse tassonomiche impiegate per il riconoscimento delle specie sono state le chiavi dicotomiche contenute nel Manuale ANPA (2001), specificamente concepite per l'identificazione delle specie licheniche epifite nell'ambito del metodo I.B.L., il manuale "Felci, muschi e licheni d'Europa" (Jahns, Hans Martin, 2012), il database iconografico ITALIC 8.0 Image of Lichens (Martellos et al., 2023).

È opportuno precisare che l'identificazione è stata condotta esclusivamente su base morfologica, senza il ricorso a saggi chimici di colorazione (C, K, KC, P), ovvero test spot comunemente impiegati in lichenologia.

In conseguenza al mancato utilizzo dei suddetti reagenti, per diverse entità licheniche ci si è dovuti limitare a un'attribuzione "presunta", indicando per quelle specie un'ipotesi identificativa non verificata, oppure, nei casi in cui neppure questa fosse determinabile con sufficiente sicurezza, indicando unicamente la sigla "Non identificato" e trattandola come morfotipo distinto ai fini del calcolo dell'I.B.L.

3.5 Elaborazione dati e analisi statistica

I valori di biodiversità lichenica sono stati calcolati applicando le equazioni (3) e (4) che formalizzano il metodo di calcolo dell'LDV previsto della norma UNI EN 16413:2014.

Per ognuno dei tre forofiti di ogni unità di campionamento è stato dapprima determinato, per le quattro esposizioni cardinali, il valore di somma di frequenza, ottenuto sommando le frequenze di tutte le specie licheniche rilevate per esposizione. La somma delle quattro somme di frequenza ha fornito il valore di biodiversità lichenica del singolo albero, LDV_t (Eq. 3). Il valore di biodiversità lichenica dell'unità di campionamento, LDV_j , è stato quindi ricavato come media aritmetica dei tre valori LDV_t del sito (Eq. 4 con $n=3$).

3.5.1 Scala di tolleranza delle specie licheniche

Per la caratterizzazione ecologica delle entità licheniche rinvenute è stato considerato il valore di poleotolleranza (poleotolerance, PT), indicatore che esprime la tendenza di una specie a presentarsi in aree caratterizzate da diversi gradi di pressione antropica (P. Nimis, 2016).

L'indicatore è strutturato su una scala progressiva a quattro classi (Tab. 3), qui riportata secondo la formulazione adottata dal sistema informativo ITALIC 8.0, impiegato nel presente studio per l'identificazione delle specie e per l'attribuzione dei relativi indicatori ecologici.

La classe (0) a differenza delle altre classi viene attribuita alle sole specie epifite, in quanto utile a individuare gli indicatori di lunga continuità ecologica dei sistemi forestali (P. Nimis, 2016).

Tab. 3. Scala di poleotolleranza in quattro classi, secondo ITALIC 8.

Classe	Descrizione
0	Specie esclusive di alberi vetusti in foreste antiche e indisturbate
1	Specie di habitat naturali o semi-naturali
2	Specie di aree moderatamente disturbate (aree agricole, piccoli insediamenti, ecc.)
3	Specie di aree fortemente disturbate, incluse le grandi città

Nel sistema ITALIC, il valore di poleotolleranza attribuito alla singola specie può corrispondere a una singola classe oppure estendersi su più classi contigue (ad es. 1-2 o 1-3): alla specie *Xanthoria parietina*, ad esempio, viene attribuito l'intervallo 1-3.

3.5.2 La scala di naturalità/alterazione

I valori ottenuti di Biodiversità Lichenica (LDV_j) delle singole unità di campionamento, per essere correttamente interpretati, devono essere confrontati con una scala di naturalità/alterazione, ovvero con un sistema di soglie che traduce il dato numerico in un giudizio qualitativo sullo stato complessivo della qualità dell'aria.

Nel presente studio, vista la scarsità di rilevati (< 100) non è stato possibile realizzare una scala di naturalità dedicata per la Repubblica di San Marino, così come descritto da (Loppi et al., 2002). Si è scelto di adottare pertanto, per i motivi che verranno descritti in seguito, una scala in sette classi, proposta da (Castello & Skert, 2005) e calibrata per l'area biogeografica submediterranea del versante adriatico settentrionale (Castello & Skert, 2005); fascia nella quale ricade anche il territorio della Repubblica di San Marino.

La scelta di adottare la suddetta scala è stata motivata anche da un confronto fra le principali scale interpretative disponibili in letteratura.

In particolare è stata valutata inizialmente la scala di (P. Nimis, 1999), storicamente impiegata in Italia, calibrata sui valori BL del vecchio reticolo di 30 x 50 cm, e pertanto non adatta al reticolo adottato nel presente studio (ANPA reticolo di 10 x 50 cm).

Un'altra scala presa in considerazione è quella di Giordani (Giordani et al., 2002), elaborata per il versante ligure, nella fascia bioclimatica tirrenica, e pertanto non direttamente applicabile al nostro contesto geografico.

In base a quanto descritto si è infine ritenuto di adottare la scala di (Castello & Skert, 2005), in quanto meglio si adatta sotto molteplici punti di vista, alle peculiarità del territorio della Repubblica di San Marino, oggetto del presente studio.

La scala è stata calibrata specificamente sui valori LDV ottenuti con il protocollo di campionamento proposto da (Asta et al., 2002), recepito in Italia dalle linee guida ANPA (ANPA, 2001).

L'area di calibrazione della scala condivide con il territorio sammarinese sia l'inquadramento biogeografico, ovvero la fascia submediterranea del versante adriatico, sia la tipologia di vegetazione potenziale, costituita da querceti caducifogli a scorza acida (*Quercus petraea* nell'area di studio di (Castello & Skert, 2005), *Quercus pubescens* nel territorio sammarinese), specie collocate dal manuale ANPA nel medesimo gruppo di forofiti (ANPA, 2001) e pertanto direttamente comparabili ai fini delle indagini di biodiversità lichenica.

La scala in questione risulta adottata, in modo consolidato, dalle Agenzie Regionali per la Protezione Ambientale del versante adriatico (Mozzo, 2009; Skert & Grahonja, 2013), circostanza che ne avvalorata la rappresentatività per l'area in esame.

Tab. 4. Scala di naturalità/alterazione a sette classi adottata per l'interpretazione dei valori LDV_j , calibrata per l'area submediterranea del versante adriatico settentrionale (Castello & Skert, 2005).

Classe	Intervallo LDV	Giudizio
1	> 75	Naturalità molto elevata
2	61 - 75	Naturalità elevata
3	46 - 60	Naturalità media
4	31 - 45	Naturalità bassa / Alterazione bassa
5	16 - 30	Alterazione media
6	1 - 15	Alterazione elevata
7	0	Alterazione molto elevata (deserto lichenico)

3.5.3 Analisi statistica

Una statistica descrittiva di base è stata applicata all'intero dataset. Il test di Shapiro-Wilk è stato utilizzato per verificare la normalità della distribuzione di frequenza del set di dati. Sebbene la normalità sia stata verificata, si è deciso di applicare test non parametrici (es. Kruskal-Wallis) per l'analisi della varianza, data la ridotta dimensione del dataset. Tutte le elaborazioni sono state effettuate mediante software OriginLab (v. 2025).

La mappatura continua è stata ottenuta per interpolazione spaziale dei valori LDV_j con il software QGIS (Fig. 30).

3.6 Dati meteo e di qualità dell'aria

La caratterizzazione ambientale è stata effettuata per l'intera area di studio valutando l'evoluzione annuale dei parametri meteorologici e di qualità dell'aria (PM_{10} , NO_2 , O_3) registrati nel decennio (2014 - 2024) antecedente il campionamento dei licheni, mediante l'utilizzo dei dati registrati dalla stazione di monitoraggio della qualità dell'aria di Falciano (107 m s.l.m.) (43.984713, 12.505540), dotata di stazione meteorologica (Fig. 26). Nel decennio considerato la stazione è stata ricollocata in tre postazioni successive (Gualdicciolo, Serravalle e Falciano; (Tab. 5). I dati di qualità dell'aria sono espressi come valori medi giornalieri per i parametri PM_{10} ed NO_2 e come massimo giornaliero delle medie mobili su 8 ore per l' O_3 . I parametri meteorologici considerati sono la temperatura media, massima e minima ($^{\circ}C$), le precipitazioni (mm), la pressione atmosferica (mbar) e la direzione e velocità del vento, media e massima (km/h).



Fig. 26. Stazione di monitoraggio della qualità dell'aria di Falciano, equipaggiata con stazione meteorologica.

Tab. 5. Localizzazione della stazione di monitoraggio della qualità dell'aria dell'UPAV nel decennio 2014-2024.

Anno	Sito	Località	Periodo
2014	Gualdicciolo	Centro Gualdo (43.952373, 12.404539)	intero anno
2015	Gualdicciolo	Centro Gualdo (43.952373, 12.404539)	intero anno
2016	Serravalle	Piazza Bertoldi (43.969639, 12.480168)	da marzo
2017	Serravalle	Piazza Bertoldi (43.969639, 12.480168)	intero anno
2018	Serravalle	Piazza Bertoldi (43.969639, 12.480168)	intero anno
2019	Serravalle	Piazza Bertoldi (43.969639, 12.480168)	intero anno
2020	Serravalle	Piazza Bertoldi (43.969639, 12.480168)	intero anno
2021	Serravalle	Piazza Bertoldi (43.969639, 12.480168)	gennaio-settembre
2022	Falciano	Via dell'Estimatore (43.984713, 12.505540)	da giugno
2023	Falciano	Via dell'Estimatore (43.984713, 12.505540)	intero anno
2024	Falciano	Via dell'Estimatore (43.984713, 12.505540)	intero anno

4 Risultati e Discussione

La campagna di biomonitoraggio ha interessato undici unità di campionamento, distribuite in modo da rappresentare le principali tipologie di uso del suolo presenti sul territorio della Repubblica di San Marino: aree urbane, aree industriali e aree a parco (Fig. 18).

In ciascun sito sono stati esaminati tre esemplari di *Quercus pubescens*, per un totale di trentatré unità.

A valle della revisione tassonomica, quattro entità, precedentemente presenti nell'atlante fotografico allegato al presente elaborato (numerate come specie 5, 6, 20 e 22), sono state escluse in quanto attribuite a funghi o a comunità miste non riconducibili ai licheni o non rinvenute in alcun rilievo.

L'enumerazione progressiva delle specie è stata comunque mantenuta per continuità con le schede di rilievo, con quattro posizioni non assegnate in corrispondenza dei numeri 5, 6, 20 e 22.

L'indagine ha consentito di riscontrare un totale di venti entità licheniche, effettivamente presenti sugli alberi campionati censite nell'Allegato B.

Tra le venti entità riscontrate, diciassette sono state identificate a livello specifico o ricondotte a un genere, mentre le restanti tre sono indicate con la sola numerazione progressiva.

4.1 Caratterizzazione ambientale

La caratterizzazione ambientale dell'area di studio si basa sui dati di monitoraggio della qualità dell'aria e dei parametri meteorologici disponibili per l'ultimo decennio. I dati di qualità dell'aria coprono il periodo 2014-2024 (Fig. 29), quelli meteorologici il periodo 2020-2024 (Fig. 28). Sul piano meteorologico, nel periodo 2020-2024 la temperatura media annua è risultata compresa tra 15 e 16.7 °C, con un lieve incremento negli ultimi due anni (Fig. 28 a); gli estremi registrati nel periodo vanno da -3.7 °C (2021) a +40.1 °C (2024). Gli apporti pluviometrici annui sono oscillati tra 220 mm (2024) e 458 mm (2020) (Fig. 28 d), mentre la pressione atmosferica media si è mantenuta intorno a 1011-1036 mBar (Fig. 28 b).

I dati sul vento vanno interpretati tenendo conto del cambio di postazione: presso la stazione di Serravalle (2020-2021) la velocità media giornaliera del vento è risultata dell'ordine di 9-10 km/h, mentre presso quella di Falciano (2022-2024) è scesa a 1-2 km/h (Fig. 28 c). Anche la direzione di provenienza prevalente è cambiata, passando dai settori sud-occidentali nella zona

di Serravalle a quelli nord-occidentali nella zona di Falciano. La rosa dei venti costruita sui dati disponibili dell'intero periodo 2020-2024 (Fig. 27) evidenzia una prevalenza dei venti dai settori nord-occidentali (NO) e sud-occidentali (SO, OSO), con un contributo significativo anche da Sud-Sud-Est; le intensità maggiori si associano ai settori sud-occidentali (in particolare SO) e meridionali (S, SSE), mentre i venti da NO, pur essendo i più frequenti, risultano generalmente deboli.

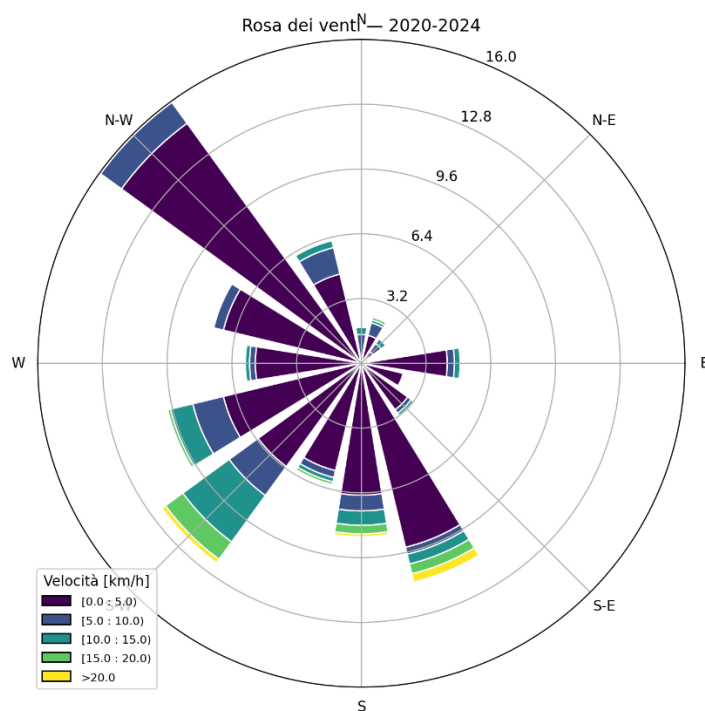


Fig. 27. Rosa dei venti del periodo 2020-2024

Il PM₁₀ ha mostrato una concentrazione media per l'intero periodo considerato (2014-2024) di $20 \pm 13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con valori annuali che oscillano tra 17 e $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La centralina ha registrato una media di 10 superamenti del limite di legge giornaliero di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Direttiva 2008/50/CE, 2008) nel decennio considerato, con valori annuali che rimangono ben al di sotto del limite di 35 stabilito dalla Direttiva (Fig. 29 a). Le concentrazioni medie annuali di PM₁₀ risultano sempre al di sotto del limite annuale di $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Direttiva 2008/50/CE, 2008)

Il biossido di azoto ha presentato una media generale calcolata per l'intero periodo di $24 \pm 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con valori annuali che oscillano tra 10 e $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Fig. 29 b). I risultati sono abbastanza simili tra gli anni del decennio considerato, fatta eccezione per il biennio 2017-2018 dove si sono registrati valori ben al di sopra del limite di legge annuale ($54 \pm 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $53 \pm 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, rispettivamente). Il dato del 2018 si basa però su una copertura ridotta (244 giorni) e potrebbe risultare sovrastimato.

Per l'ozono la Direttiva europea 2008/50/CE recepita dal decreto delegato del 27 aprile 2012 n.44 non fissa limiti di legge, ma prevede dei valori obiettivo di $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ calcolato come massima media giornaliera sulle 8 ore, da non superare per più di 25 giorni per anno civile, come media su 3 anni. Nel caso del decennio 2014-2024, l'ozono mostra una media generale di $69 \pm 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. I superamenti del valore obiettivo per l'ozono si sono concentrati nei primi anni della serie, mentre sono risultati sporadici negli anni più recenti (Fig. 29 c).

Nel complesso, pur non considerando i criteri di raccolta minima dei dati previsti dalla (Direttiva 2008/50/CE, 2008), i parametri rispettano i limiti attualmente vigenti, con l'eccezione del biossido di azoto presso la stazione di Serravalle nel biennio 2017-2018 e dell'ozono nei primi anni del periodo (Fig. 29).

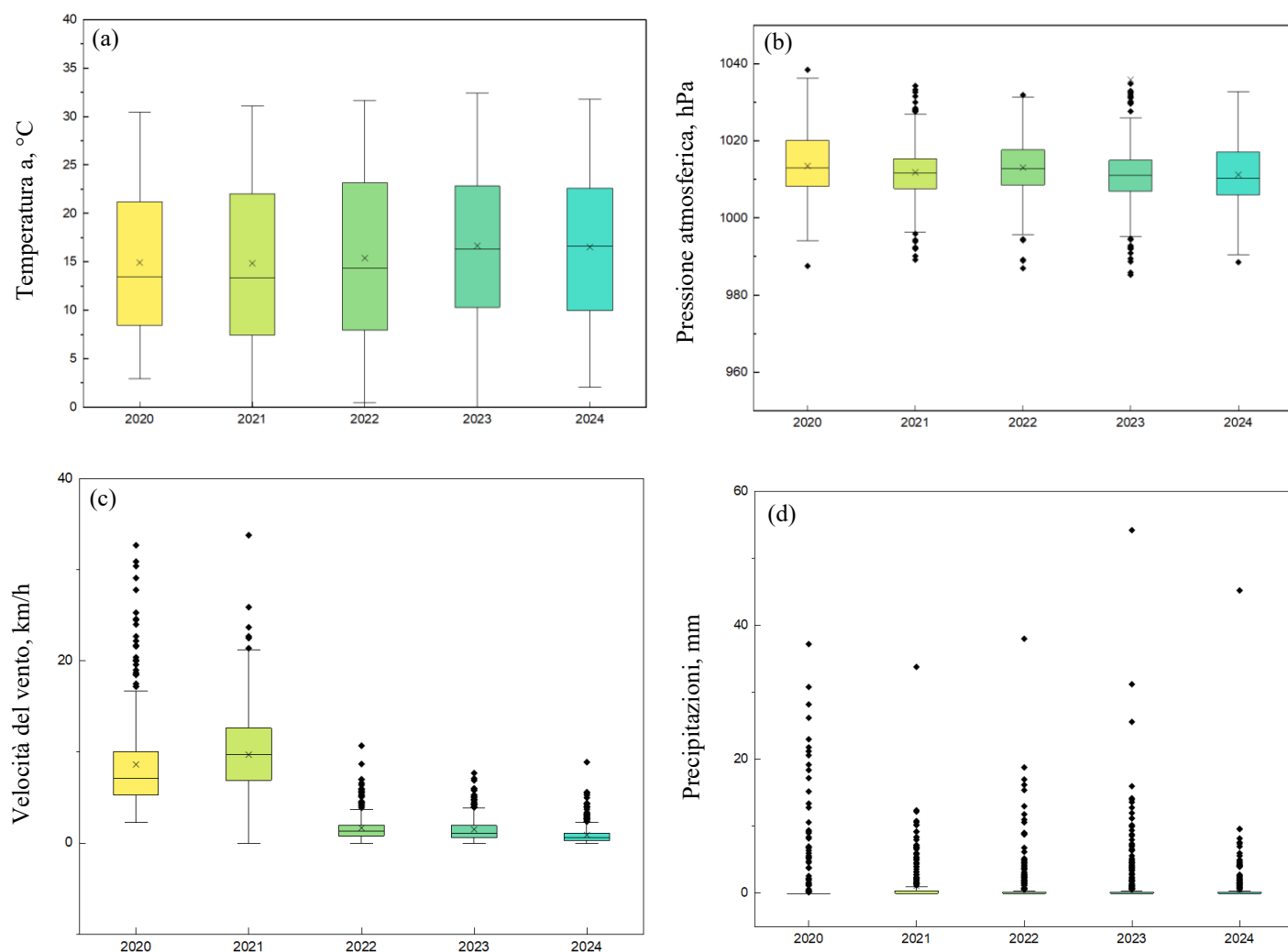


Fig. 28. Andamento annuale dei principali parametri meteorologici, come temperatura (a), pressione atmosferica (b), velocità del vento (c) e precipitazioni (d) nei dieci anni precedenti allo studio di biomonitoraggio nella Repubblica di San Marino.

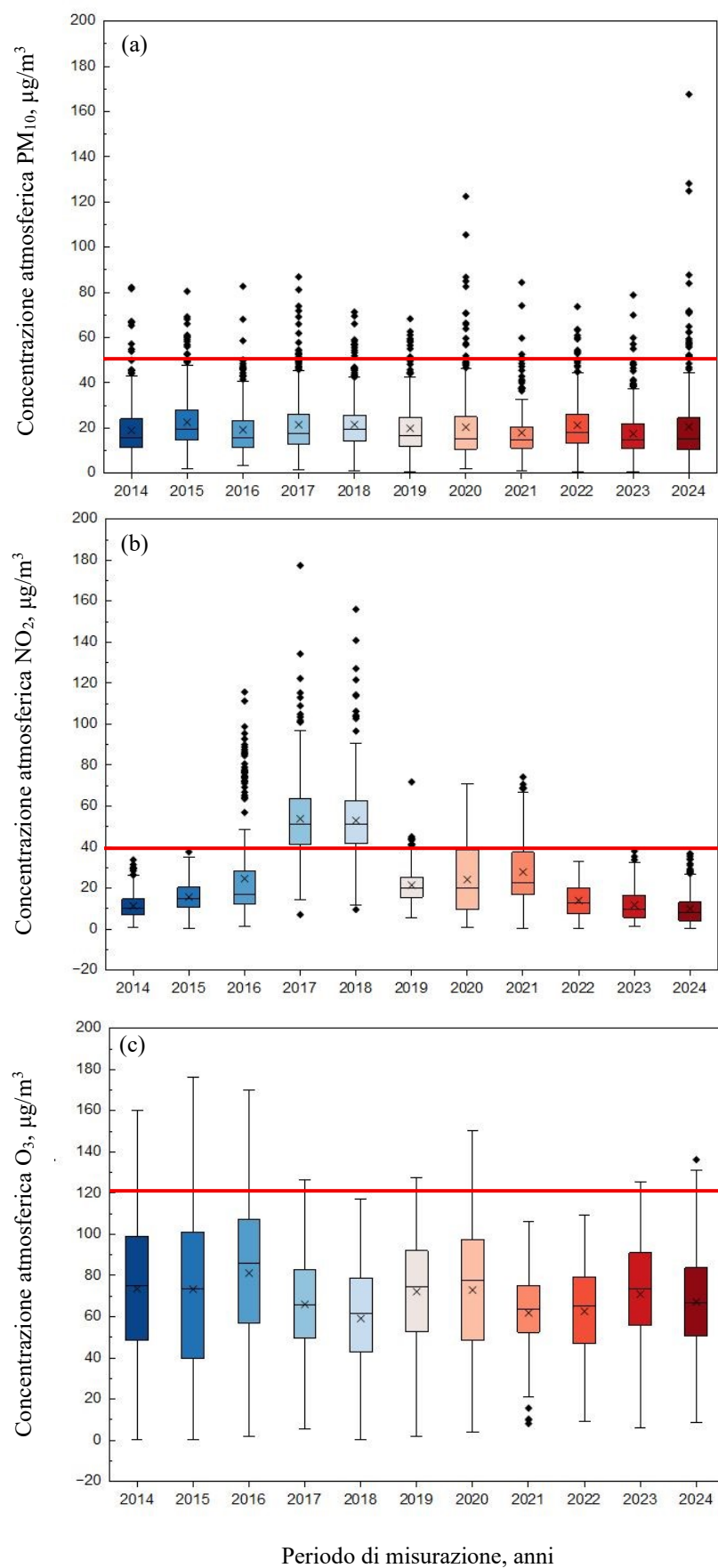


Fig. 29. Andamento annuale delle concentrazioni atmosferiche di (a) PM₁₀, (b) NO₂, (c) O₃ nei dieci anni precedenti allo studio di biomonitoraggio nella Repubblica di San Marino. Le linee rosse indicano i limiti di legge della Direttiva Europea (2008/50/CE) relativi agli inquinanti studiati.

4.2 Comunità lichenica

Nel presente lavoro di tesi sono stati effettuati rilievi in 11 siti di campionamento. In ciascun sito di campionamento sono stati campionati 3 esemplari di *Quercus pubescens*, per un totale di 33 forofiti. Questo ha permesso di identificare un numero complessivo di 20 specie diverse di licheni. Il numero di entità riscontrate in ciascun sito varia da un minimo di 2 (Parco Ausa) a un massimo di 12 (Parco Montecerreto, Fiorentino, Canepa e Chiesanuova). Nei singoli alberi sono stati rilevati da un minimo di 2 taxa (Parco Ausa) a un massimo di 10 (Fiorentino) con una media di 5.12 per albero.

La (Tab. 6) riporta le specie licheniche effettivamente riscontrate, con allegate le principali caratteristiche biologiche e ecologiche.

Tab. 6. Caratteristiche delle comunità licheniche osservate nei vari siti di campionamento.

ID	Specie	Forma di crescita	Frequenza % di apparizione nelle diverse tipologie di aree			Frequenza % di apparizione su tutti i siti di campionamento	Tolleranza (Poleotollerance)
			Area parco	Area industriale	Area urbana		
1	<i>Xanthoria parietina</i>	Foglioso a lobi larghi	100	100	100	100	1 - 3
2	<i>Candelaria concolor</i>	Foglioso a lobi stretti	33	50	67	55	1 - 3
3	<i>Athallia cerinella</i>	Crostoso	0	0	50	27	1 - 2
4	<i>Lecanora chlorotera</i>	Crostoso	33	100	67	64	1 - 3
7	<i>Flavoparmelia caperata</i>	Foglioso a lobi larghi	67	50	17	36	1 - 2
8	<i>Phaeophyscia orbicularis</i>	Foglioso a lobi stretti	33	0	33	27	1 - 3
9	<i>Pleurosticta acetabulum</i>	Foglioso a lobi larghi	33	0	33	27	1 - 2
10	<i>Lepraria cf. incana</i>	Leproso	33	0	0	9	1
11	<i>Physcia adscendens</i>	Foglioso a lobi stretti	100	100	100	100	1 - 3
12	<i>Physcia aipolia</i>	Foglioso a lobi stretti	67	50	67	64	1 - 3
13	<i>Phlyctis argena</i>	Crostoso	0	50	17	18	1 - 2
14	<i>Collema furfuraceum</i>	Foglioso a lobi larghi	0	0	17	9	1
15	<i>Non identificato</i>	Crostoso	33	0	67	45	n.d.
16	<i>Physcia stellaris</i>	Foglioso a lobi stretti	33	0	33	27	1 - 2
17	<i>Lecidella elaeochroma</i>	Crostoso	67	50	67	64	1 - 3
18	<i>Amandinea punctata</i>	Crostoso	0	50	100	64	1 - 3
19	<i>Non identificato</i>	Crostoso	33	0	50	36	n.d.
21	<i>Non identificato</i>	Crostoso	0	0	67	36	n.d.
23	<i>Parmelina tiliacea</i>	Foglioso a lobi larghi	0	0	33	18	1 - 3
24	<i>Physconia grisea</i>	Foglioso a lobi stretti	0	0	33	18	1 - 3

La comunità osservata è composta in prevalenza da specie fogliose (55%), con dominanza di *Physcia* (a lobi stretti, 21 ritrovamenti complessivi) e di *Xanthoria parietina* (a lobi larghi,

11), affiancate da una componente crostosa quasi altrettanto ricca (40%); risultano del tutto assenti le forme fruticose ed è marginale la presenza di forme leprose (1 sola specie, *Lepraria* cf. *incana*).

Physcia adscendens (Sp. 11) e *Xanthoria parietina* (Sp. 1) sono presenti in tutte le undici unità di campionamento, ciò risulta coerente con la nota tolleranza di queste specie nitrofile nei confronti dell'inquinamento (Loppi & Nascimbene, 2010). All'estremo opposto ritroviamo, *Collema furfuraceum* (Sp. 14, esclusivamente presente nel sito di Fiorentino) e *Lepraria* cf. *incana* (Sp. 10, esclusivamente presente nel sito di Parco Montecerreto).

A ciascuna entità lichenica riscontrata è stato attribuito un valore di “poleotolerance”, ovvero la tendenza a tollerare il disturbo antropico secondo gli indicatori ecologici di ITALIC 8.0, espresso su quattro classi (da 0, specie esclusive di ambienti forestali indisturbati, a 3, specie diffuse anche in aree fortemente antropizzate) (P. Nimis, 2016). La presenza della *Lepraria* cf. *incana*, (con indice di tolleranza pari a 1) nel sito con uno dei valori più elevati di LDV_j (68 registrato a Parco Montecerreto) e con una ricchezza specifica pari al massimo riscontrato (12 taxa), appare coerente con il giudizio di naturalità elevata attribuito.

L'esame della distribuzione (Allegato C) delle entità licheniche tra le unità di campionamento conferma la presenza di specie esclusive (Tab. 6). Due specie sono presenti in modo esclusivo, *Lepraria* cf. *incana* (Sp. 10) (Parco Montecerreto) e *Collema furfuraceum* (Sp. 14) (Fiorentino), ad entrambe le specie è attribuita la poleotolleranza più bassa riscontrata (classe 1), specie legate ad ambienti naturali o semi-naturali; tali ritrovamenti risultano coerenti con i livelli di naturalità rispettivamente elevata (Parco Montecerreto P3) e media (Fiorentino U3) (Tab. 6). In contrapposizione in modo ubiquitario ritroviamo, *Physcia adscendens* e *Xanthoria parietina* (poleotolleranza 1 - 3) (P. Nimis, 2016).

La distribuzione delle specie con poleotolleranza (1-2) come *Flavoparmelia caperata* arrivano a toccare una frequenza di apparizione sul campione pari al 36% delle stazioni (Tab. 6).

4.3 Indice di biodiversità lichenica

La (Tab. 7) riporta i valori (in termini di media $\pm$ deviazione standard) dell'Indice di Biodiversità Lichenica, calcolato per ogni unità di campionamento. La tabella riporta anche la classificazione dei siti sulla base della scala di naturalità/alterazione di Castello e Skert (2005).

Tab. 7. Valori di LDV_j, classe di naturalità/alterazione e giudizio per le undici unità di campionamento (scala Castello e Skert, 2005,).

Siti	Macroarea	Quota, m	LDV _j	Classe	Giudizio
P1	Area a parco	66	37 $\pm$ 4	4	Naturalità bassa / Alterazione bassa
P2	Area a parco	128	58 $\pm$ 12	3	Naturalità media
P3	Area a parco	445	68 $\pm$ 18	2	Naturalità elevata
I1	Area industriale	160	68 $\pm$ 2	2	Naturalità elevata
I2	Area industriale	178	44 $\pm$ 5	4	Naturalità bassa / Alterazione bassa
U1	Area urbana	370	60 $\pm$ 9	3	Naturalità media
U2	Area urbana	555	58 $\pm$ 17	3	Naturalità media
U3	Area urbana	418	49 $\pm$ 12	3	Naturalità media
U4	Area urbana	360	52 $\pm$ 13	3	Naturalità media
U5	Area urbana	120	45 $\pm$ 4	4	Naturalità bassa / Alterazione bassa
U6	Area urbana	500	61 $\pm$ 6	2	Naturalità elevata

I risultati evidenziano un LDV medio calcolato per l'intero territorio della Repubblica di San Marino di 55 ± 13 con valori che variano tra 37 (Parco AUSA) e 68 (Acquaviva).

Il coefficiente di variazione generale (24 %) segnala una variabilità medio-bassa, coerente con un territorio che, pur di dimensioni assai ridotte (circa 61 km²), comprende tipologie ambientali differenziate. Le unità di campionamento con la concordanza più elevata sono Acquaviva (CV = 3%) e Falciano (9%), mentre Città di San Marino (30%) e Parco Montecerreto (26%) mostrano la dispersione maggiore, verosimilmente riconducibile a microhabitat caratterizzati da fattori di esposizione ed illuminazione particolari.

Nessun sito ricade nella classe 1 (naturalità molto elevata), tre siti ricadono nella classe 2, cinque nella classe 3 e tre nella classe 4. Nessun sito è ricaduto nelle classi 5, 6 o 7, che corrispondono a un'alterazione da media a molto elevata della comunità lichenica.

Il dato maggiormente rilevante è la prevalenza delle classi intermedie, con otto unità di campionamento su undici comprese fra la classe 2 e la classe 3, pari a circa il 73% del totale.

Le tre unità di campionamento di classe 2 si distribuiscono eterogeneamente fra una località industriale (Acquaviva), un parco (Parco Montecerreto) e un centro urbano (Chiesanuova),

suggerendo che il territorio presenta condizioni di qualità dell'aria generalmente discrete, con tre contesti che mostrano segnali iniziali di alterazione (Faetano, Falciano, Parco Ausa).

Complessivamente il territorio sammarinese ricade in classe 3 della scala di naturalità/alterazione.

Nella contigua provincia di Rimini, indagata con il medesimo protocollo (ANPA, 2001), l'I.B.L. medio delle 15 stazioni è pari a 56 (range 36-92 (ARPA, 2003)), valore simile a quello riscontrato nel territorio sammarinese (55). Pur utilizzando due scale di naturalità/alterazione differenti, (Frati et al., 2003, citato in (ARPA, 2003)) per il territorio riminese e (Castello & Skert, 2005) per il territorio sammarinese, in entrambi i territori circa il 73% delle stazioni ricade nelle classi di qualità media o elevata (le classi 2 - 3 a San Marino, la classe di semi-alterazione a Rimini). I due studi sono direttamente confrontabili poiché basati sullo stesso metodo (ANPA, 2001) adottano (forofiti con scorza acida) e appartengono alla medesima regione bioclimatica. La similarità dei valori medi (55 - 56) indica per San Marino una qualità dell'aria equiparabile a quella del territorio riminese. Il confronto sui valori assoluti dell'indice senza essere interpretati con differenti scale di naturalità/alterazione resta però valido solo per aree contigue e limitate nello spazio. Come si può osservare confrontando i dati con il biomonitoraggio lichenico dell'area di Ravenna (*Relazione Biomonitoraggio Ravenna*, 2016) condotto con il medesimo metodo (ANPA, 2001), ma in un contesto di pianura a forte impronta agricola, i valori di I.B.L., molto più elevati (da 61 a 151), non risultano direttamente confrontabili con quelli sammarinesi, perché influenzati dall'abbondanza di specie nitrofile e interpretati con una scala di naturalità/alterazione propria.

Ricchezza specifica e LDV_j non risultano necessariamente concordanti. Il caso più evidente è il sito di Acquaviva, che raggiunge il massimo LDV_j (68, classe 2) pur ospitando soltanto cinque specie, l'elevato indice è determinato dall'elevata frequenza con cui le poche specie presenti colonizzano le superfici campionate. Al contrario, Fiorentino e Canepa presentano dodici entità ciascuna, ma con LDV_j inferiori (Tab. 7), in quanto molte specie sono presenti con basse frequenze.

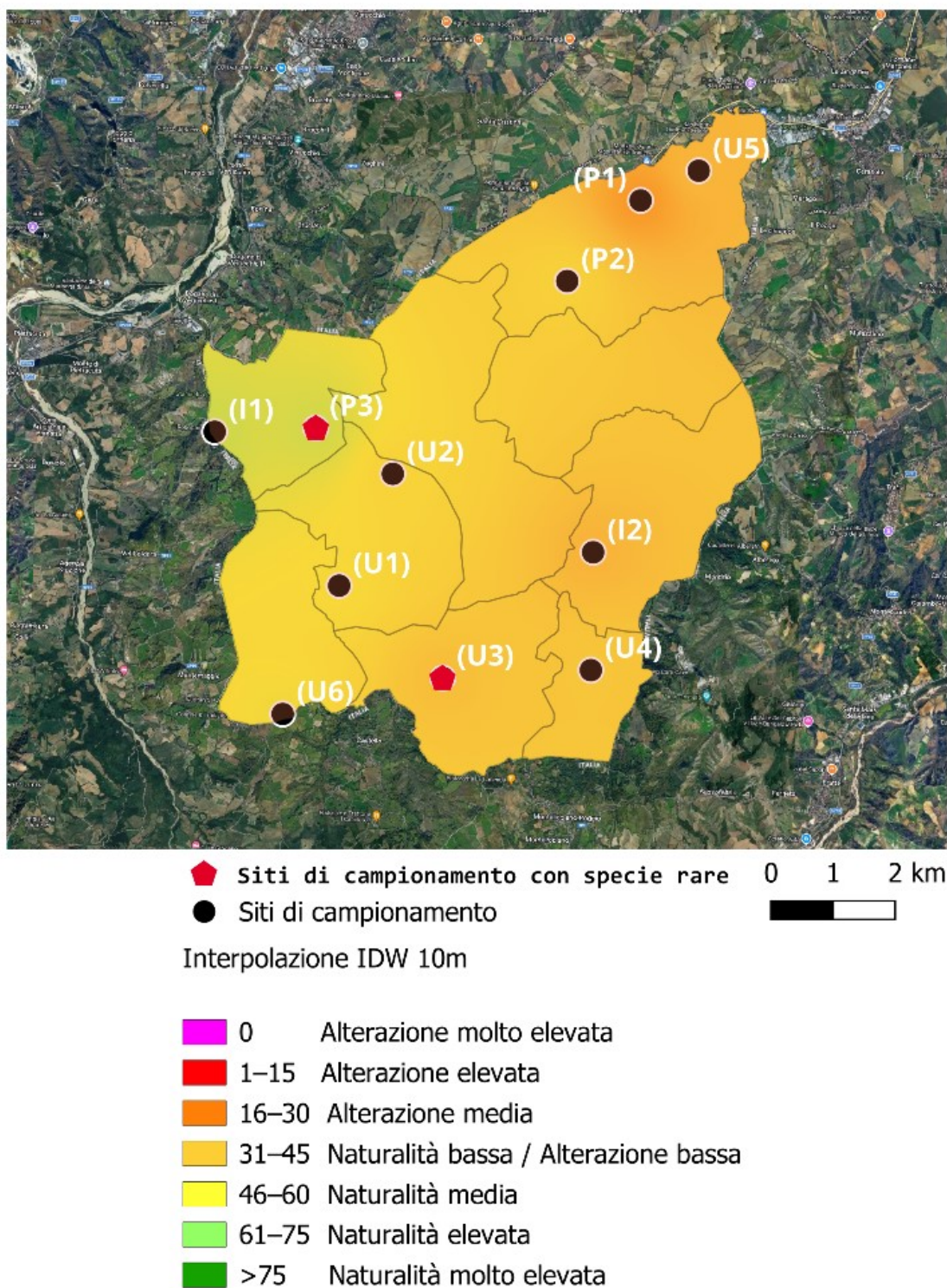


Fig. 30. Mappa interpolata della qualità dell'aria della Repubblica di San Marino mediante Indice di Biodiversità Lichenica a partire dai siti di campionamento. P = Aree a parco, I = aree industriali, U = aree urbane. Sono evidenziate anche i siti con le 2 specie più rare (*Collema furfuraceum*, *Lepraria* cf. *incana*)

4.4 Distribuzione tra macroaree

La (Fig. 31) mostra i grafici box-and-whisker realizzati sulla base dei risultati di LDVj suddivisi per le tre macroaree previste dal piano di campionamento (Area parco, Area industriale e Area urbana).

I valori medi di I.B.L. risultano pari a 54 ± 17 nell'area parco, 54 ± 11 nell'area urbana e 56 ± 14 nell'area industriale. Le tre unità di campionamento a parco presentano valori assai eterogenei: Parco Montecerreto raggiunge 68 ± 18 (classe 2), Parco Laiala 58 ± 12 (classe 3) e Parco Ausa, posto a fondovalle, in una delle aree più densamente urbanizzate presenta il valore più basso dell'intero campione (37 ± 4 , classe 4). Le sei unità di campionamento urbane si distribuiscono fra 45 ± 4 (Falciano) e 61 ± 6 (Chiesanuova), con un sito in classe 2, quattro in classe 3 e una in classe 4, indicando che le aree urbane sammarinesi non presentano livelli di alterazione particolarmente marcati, probabilmente in ragione delle ridotte dimensioni dei centri abitati e della vicinanza ad aree rurali e boschive. Infine, le due unità di campionamento industriali presentano valori contrastanti, infatti il sito di Acquaviva raggiunge il valore massimo dell'intero campione (68 ± 2 classe 2), mentre Faetano si attesta su (44 ± 5 classe 4). Tale discrepanza potrebbe essere correlata a differenze nella tipologia delle attività produttive presenti e al differente grado di antropizzazione nel sito di Acquaviva.

Data la ridotta dimensionalità del dataset, è stato applicato il test non parametrico di Kruskal-Wallis per valutare la varianza. Il test di Kruskal-Wallis, con successiva analisi mediante test di Dunn non ha evidenziato differenze statisticamente significative tra le tre macroaree, indicando che la classificazione territoriale adottata a priori non spiega in modo netto la variabilità dell'I.B.L.

Il gradiente atteso di biodiversità lichenica, con valori progressivamente decrescenti dall'area parco verso le aree urbane e industriali, non è risultato evidente. I valori di I.B.L. mostrano infatti una distribuzione parzialmente sovrapposta tra le tre macroaree, con alcuni siti urbani o industriali caratterizzati da valori comparabili a quelli dei siti del parco.

La classificazione di parco è pertanto insufficiente a predire la qualità dell'aria.

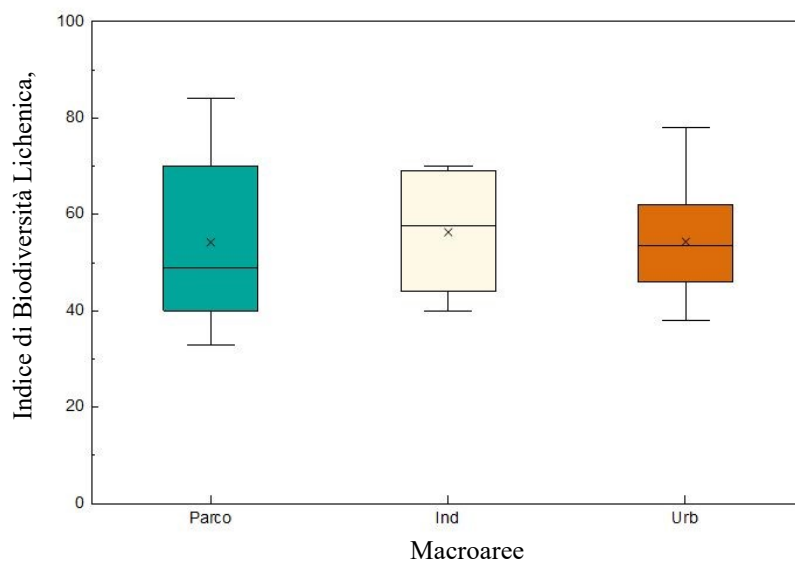


Fig. 31. Gafici Box-and-Whisker applicati ai risultati di LDV_j, suddivisi per macroarea.

4.5 Indice di biodiversità lichenica e qualità dell'aria

La campagna di biomonitoraggio lichenico è stata condotta nel periodo aprile-luglio 2024, durante il quale la centralina ha registrato una concentrazione media di PM₁₀ pari a $14.2 \pm 7.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ riscontrando un solo superamento [Limite media 24h] - [$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$] (Direttiva 2008/50/CE, 2008) pari a $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ avvenuto il 21/06/2024.

Sono state registrate inoltre nel medesimo periodo di campionamento la concentrazione media dell'NO₂ sulle 24h, pari a $3.7 \pm 1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e la massima media oraria dell'O₃ pari a $102.9 \pm 16.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

All'interno del periodo di campionamento parte dei valori non sono stati registrati a causa di malfunzionamenti, con una perdita di dati per il PM₁₀, NO₂ e O₃ rispettivamente del 5.7%, 45.7%, 8.6%.

Da notare che questi valori derivano da una sola centralina (Fig. 26), per cui non possono essere usati come marker per identificare le eventuali sorgenti di inquinanti che possono influire sulle comunità licheniche dei vari siti di campionamento e delle tre macroaree. Tali valori sono, però utili per descrivere il contesto atmosferico e di qualità dell'aria generale nel periodo di campionamento.

Per rappresentare la variabilità spaziale della pressione antropica sono stati quindi utilizzati proxy spaziali locali, calcolati in ambiente GIS, quali la distanza dalla viabilità principale, la distanza dall'area industriale la quota sul livello del mare. Tali variabili sono state impiegate come predittori della biodiversità lichenica. La distanza dalla strada principale viene utilizzata come proxy per stimare la pressione da traffico, mentre la distanza dall'area industriale come proxy per valutare l'eventuale pressione delle attività produttive, infine la variabile quota come proxy delle condizioni microclimatiche locali. Il diametro del tronco del forofita è stato incluso come covariata di controllo, in quanto può influenzare la colonizzazione lichenica attraverso la disponibilità di superficie, la rugosità della corteccia e l'età presumibile dell'albero.

I valori dei proxy spaziali e le variabili risposta (ricchezza specifica e LDV_j) sono stati elaborati mediante matrice di correlazione utilizzando l'indice non parametrico di Spearman per verificare la relazione (Fig. 32). Le differenze sono considerate statisticamente significative per $p < 0.05$.

La matrice di correlazione, riportata in (Fig. 32), mostra che la ricchezza specifica è significativamente e positivamente correlata con l'altitudine, mentre non presenta alcuna correlazione con i proxy di pressione antropica locale. Questa relazione suggerisce che i siti a quota più elevata potrebbero presentare condizioni microclimatiche più favorevoli, minore pressione antropica diretta o maggiore disponibilità di habitat idonei alla colonizzazione lichenica.

Al contrario, l'indice di biodiversità lichenica non ha mostrato correlazioni significative con i proxy spaziali considerati. L'assenza di correlazioni significative tra I.B.L. e proxy spaziali deve essere interpretata con cautela, considerando la numerosità campionaria ridotta e il carattere indiretto dei proxy utilizzati rispetto alle reali concentrazioni locali degli inquinanti.

L'I.B.L., invece, non mostra relazioni significative con distanza dalla strada, distanza dall'area industriale o quota. Questo può indicare che l'indice sintetico di biodiversità lichenica risponde a fattori più complessi rispetto alla sola posizione spaziale dei siti, oppure che i proxy disponibili non descrivono con sufficiente precisione l'effettiva esposizione locale agli inquinanti. È da notare che il ridotto numero di siti di campionamento non consente di effettuare un'interpretazione accurata dei risultati ottenuti.



Fig. 32. Matrice di correlazione di Spearman, dove Tronco = diametro del forofita (cm); specie = ricchezza specifica; Strada = distanza della UC dalle strade principali; Ind = distanza dalle aree industriali; Quota = altezza sul livello del mare; * = indica la significatività per $p < 0.05$

4.6 Distribuzione su gradiente altitudinale

Sulla base dei risultati ottenuti dall'analisi statistica si è provveduto a suddividere i siti di campionamento secondo un gradiente altitudinale invece di utilizzare un gradiente di pressione antropica. Le macroaree individuate sono state le seguenti:

- MACROAREA 1, costituito da siti a bassa quota (da 0 a 150 m sul livello del mare) che includono Parco Ausa, Parco Laiala e Falciano;
- MACROAREA 2, costituita da siti a quota intermedia (da 151 m a 400 m sul livello del mare), includendo Acquaviva, Faetano, Canepa e Montegiardino;
- MACROAREA 3, costituita da siti a alta quota (oltre i 400 m sul livello del mare), comprendenti Parco Montecerreto, Città di San Marino, Fiorentino e Chiesanuova.

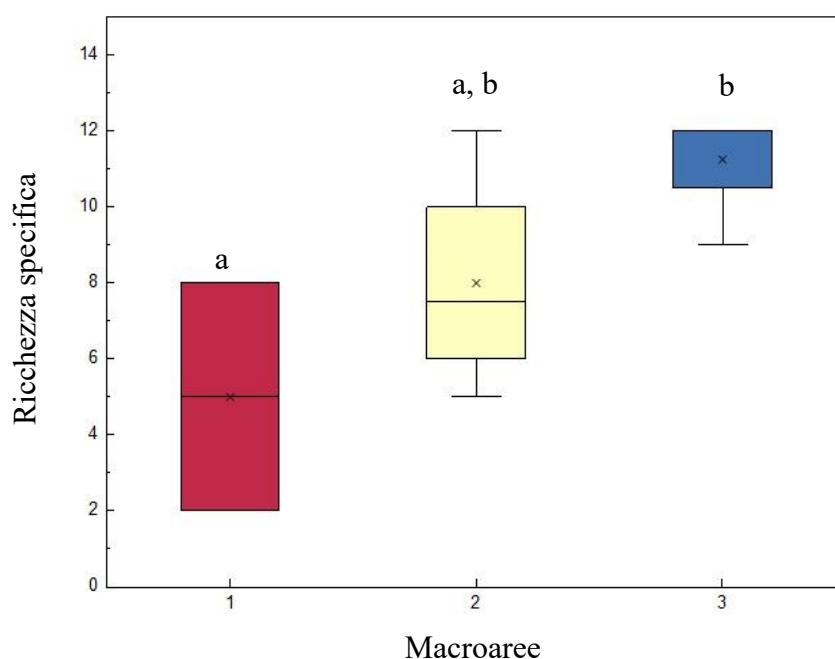


Fig. 33. Grafici Box-and-Wisker della ricchezza specifica della comunità lichenica in funzione delle macroaree altitudinali. Le differenze sono statisticamente significative per $p < 0.05$

I box plot della ricchezza specifica (Fig. 33) evidenziano una differenza statisticamente significativa tra la comunità lichenica dei siti a bassa quota (Macroarea 1) e quella dei siti ad alta quota (Macroarea 3), indicando un effetto del microclima locale sulla distribuzione delle specie licheniche.

Al contrario i box plot dell'indice di biodiversità lichenica (Fig. 34) in funzione del gradiente altitudinale non evidenzia anche in questo caso delle differenze statisticamente significative, sebbene si possa osservare un aumento passando dai siti a bassa quota e a quelli a quote più elevate.

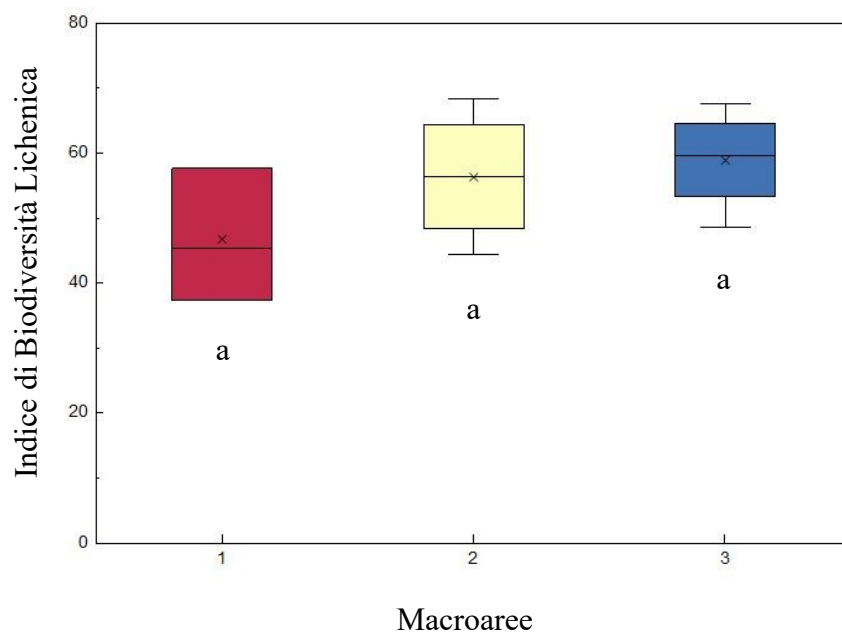


Fig. 34. Grafici Box-and-Wisker dell'Indice di Biodiversità Lichenica in funzione delle macroree altitudinali. Le differenze sono statisticamente significative per $p < 0.05$

5 Conclusioni

Il presente lavoro ha permesso di realizzare una prima caratterizzazione della qualità dell'aria nella Repubblica di San Marino basata su organismi bioindicatori, affiancandosi al monitoraggio strumentale. I risultati delineano un quadro complesso. La prima ipotesi, che prevedeva una biodiversità lichenica correlata al gradiente di pressione antropica attesa, non ha trovato conferma. L'analisi statistica non ha, infatti, evidenziato differenze statisticamente significative tra le tre macroaree, i cui valori medi di I.B.L. risultano di fatto sovrapponibili. La classificazione territoriale definita a priori si è pertanto rivelata insufficiente a predire in maniera efficace la qualità dell'aria, come evidenziato dal valore minimo dell'intero campione registrato in un'area a parco di fondovalle (Parco Ausa) e il valore massimo rilevato in un'area industriale (Acquaviva).

L'analisi ha invece fatto emergere la quota come fattore rilevante nella distribuzione della comunità lichenica: la ricchezza specifica è risultata significativamente e positivamente correlata con l'altitudine, e significativamente maggiore nei siti d'alta quota rispetto a quelli di fondovalle, potenzialmente in ragione di condizioni microclimatiche più favorevoli. L'I.B.L. ha mostrato, lungo il medesimo gradiente altitudinale, un incremento non statisticamente significativo.

La seconda ipotesi, relativa all'applicabilità del protocollo I.B.L. su scala locale, risulta invece confermata. L'adattamento del disegno di campionamento, orientato verso un approccio ragionato in sostituzione alla griglia ANPA (scelta coerente con la flessibilità ammessa dalla norma (UNI EN 16413, 2014)), ha consentito di ottenere valori coerenti e interpretabili mediante la scala di naturalità/alterazione di (Castello & Skert, 2005); la confrontabilità dei risultati con i territori limitrofi ne avvalorava la robustezza.

I risultati ottenuti vanno interpretati alla luce di alcuni limiti riconosciuti. La natura esplorativa dell'indagine e l'adozione di un campionamento ragionato, non puramente probabilistico, non consentono di estendere automaticamente gli esiti all'intero territorio, se non a scopo rappresentativo. I valori ottenuti costituiscono pertanto una prima mappatura orientativa, utile a indirizzare futuri programmi di monitoraggio, più che una stima definitiva della qualità dell'aria. La ridotta estensione del campione impone inoltre cautela nell'interpretazione delle relazioni tra I.B.L. e variabili ambientali.

Un secondo limite riguarda l'identificazione tassonomica, condotta esclusivamente su base morfologica, senza il ricorso ai saggi chimici di colorazione (C, K, KC, P), per la mancata

disponibilità dei reagenti al momento dei rilievi; per alcune entità ciò ha comportato attribuzioni presunte o la classificazione come morfotipi distinti non identificati.

Infine, i dati strumentali di qualità dell'aria provengono da un'unica stazione di monitoraggio, ricollocata in tre postazioni successive nel corso del decennio: essi descrivono adeguatamente il contesto atmosferico generale, ma non permettono di attribuire ai singoli siti l'esposizione locale agli inquinanti. Per rappresentare la variabilità spaziale della pressione antropica si è pertanto fatto ricorso a proxy geografici (distanza dalla viabilità principale e dalle aree industriali, quota), il cui carattere indiretto rispetto alle reali concentrazioni costituisce un ulteriore elemento di prudenza interpretativa.

6 Prospettive future

Il monitoraggio della qualità dell'aria si fonda principalmente su reti di stazioni fisse di rilevamento automatico, capaci di fornire in tempo reale dati affidabili e indispensabili per l'adozione tempestiva di misure di riduzione delle emissioni in caso di superamento dei valori limite (Direttiva 2008/50/CE, 2008). Tale approccio, per quanto affidabile ed efficace, presenta alcune limitazioni intrinseche: la rappresentatività spaziale è vincolata al numero di punti di misura; la continuità temporale del dato è soggetta a interruzioni per calibrazioni, manutenzioni e guasti; il numero di parametri misurati è spesso limitato alle sole sostanze normate; l'informazione restituita è la concentrazione dei singoli inquinanti in un punto e in un istante, non l'effetto biologico diretto sugli organismi esposti, con esclusione in particolare degli effetti sinergici dell'esposizione simultanea a più inquinanti; i costi di installazione e gestione sono elevati e non comprimibili a piacere. Pertanto il biomonitoraggio lichenico si propone come strumento complementare e non sostitutivo, capace di integrare la rete strumentale con un'informazione a copertura spaziale estesa, a basso costo e direttamente correlata alla risposta biologica degli organismi.

Il presente studio delinea alcune direzioni potenziali di sviluppo. Sul piano metodologico, l'ampliamento del numero di rilievi consentirebbe di superare la soglia (indicativamente cento) necessaria alla costruzione di una scala di naturalità/alterazione calibrata specificamente sul territorio sammarinese. Sul piano operativo, la strumentazione a basso costo realizzata (il reticolo di campionamento, la scheda di rilievo in formato PDF, l'adattatore per la documentazione fotografica allo stereomicroscopio stampato in 3D), unitamente alla scelta di

un'identificazione su base morfologica, rende la metodica accessibile anche a soggetti non specializzati. Ciò apre alla possibilità di un coinvolgimento delle scuole e della cittadinanza in programmi partecipativi di monitoraggio della qualità dell'aria. L'ulteriore esplorazione delle tecniche digitali di acquisizione e la ripetizione dei rilievi nel tempo permetterebbero infine di seguirne l'evoluzione, consolidando il biomonitoraggio lichenico come componente stabile e integrata della strategia di monitoraggio della qualità dell'aria della Repubblica di San Marino.

Bibliografia

Acta Plantarum, 2007 in avanti—"Quercus pubescens Willd. Subsp. *Pubescens* – Scheda IPFI, Acta Plantarum ". Disponibile on line (data di consultazione: 11/05/2026): https://www.actaplantarum.org/flora/flora_info.php?id=500274. (N.d.).

Allen, J., McMullin, R., Tripp, E., & Lendemer, J. (2019). Lichen conservation in North America: A review of current practices and research in Canada and the United States. *Biodiversity and Conservation*, 28. <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01827-3>

ANPA. (2001). IBL Indice di biodiversità lichenica: Manuale ANPA. ANPA. Dipartimento Stato dell'ambiente, prevenzione, risanamento e sistemi informativi. WorldCat.

Aree Naturalistiche Tutelate della Repubblica di San Marino. (N.d.). Segreteria Di Stato per il Territorio e L'ambiente, L'agricoltura E i Rapporti con L'A.A.S.P.

ARPA. (2003). ARPA Biomonitoraggio.

Arpae Area Est - Rimini - Servizio Sistemi Ambientali. (2024). Rapporto sulla qualità dell'aria della Provincia di Rimini. <https://www.arpae.it/it/notizie/qualita-dellaria-in-provincia-di-rimini-nellanno-2024>

Asta, J., Erhard, W., Ferretti, M., Fornasier, M. F., Kirschbaum, U., Nimis, P., Purvis, O., Pirintsos, S., Scheidegger, C., Van Haluwyn, C., & Wirth, V. (2002). Mapping Lichen Diversity as an Indicator of Environmental Quality. In *Monitoring with Lichens-Monitoring Lichens* (p. 279). https://doi.org/10.1007/978-94-010-0423-7_19

Callén, M. S., de la Cruz, M. T., López, J. M., Murillo, R., Navarro, M. V., & Mastral, A. M. (2008). Some inferences on the mechanism of atmospheric gas/particle partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) at Zaragoza (Spain). *Chemosphere*, 73(8), 1357–1365. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.06.063>

Castello, M., & Skert, N. (2005). Evaluation of lichen diversity as an indicator of environmental quality in the North Adriatic submediterranean region. *The Science of the Total Environment*, 336(1–3), 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.06.007>

Dati-Aria. (2026). <https://www.gov.sm/publ/upav/Ambiente/Dati-Ambientali/Dati-Aria.html>

Dati U.P.A.V. (2020).

Direttiva 2004/107/CE (2004).

Direttiva 2008/50/CE (2008).

Direttiva (UE) 2024/2881 (2024).

D.Lgs. 3 aprile 2006, n. 152 (2006).

Fioletov, V. E., McLinden, C. A., Griffin, D., Abboud, I., Krotkov, N. A., Leonard, P. J. T., Li, C., Joiner, J., Theys, N., & Carn, S. A. (2023). Version 2 of the global catalogue of large anthropogenic and volcanic SO₂ sources and emissions derived from satellite measurements. *Earth System Science Data*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:253185244>

Forster, B., Van De Ville, D., Berent, J., Sage, D., & Unser, M. (2004). Complex wavelets for extended depth-of-field: A new method for the fusion of multichannel microscopy images. *Microscopy Research and Technique*, 65(1–2), 33–42. <https://doi.org/10.1002/jemt.20092>

Giordani, P., Brunialti, G., & Alleleo, D. (2002). Effects of atmospheric pollution on lichen biodiversity (LB) in a Mediterranean region (Liguria, northwest Italy). *Environmental Pollution* (Barking, Essex : 1987), 118(1), 53–64. [https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(01\)00275-5](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(01)00275-5)

Glarborg, P., Miller, J. A., Ruscic, B., & Klippenstein, S. J. (2018). Modeling nitrogen chemistry in combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 67, 31–68. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.01.002>

Guenther, A., Jiang, X., Heald, C., Sakulyanontvittaya, T., Duhl, T., Emmons, L., & Wang, X. (2012). The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2.1): An extended and updated framework for modeling biogenic emissions. *Geoscientific Model Development Discussions*, 5. <https://doi.org/10.5194/gmdd-5-1503-2012>

Hawksworth, D. L., & Grube, M. (2020). Lichens redefined as complex ecosystems. *New Phytologist*, 227(5), 1281–1283. <https://doi.org/10.1111/nph.16630>

IARC. (2016). Outdoor Air Pollution IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 109. <https://publications.iarc.who.int/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Outdoor-Air-Pollution-2015>

Jahns, Hans Martin. (2012). Felci, muschi, licheni d'Europa.

Loppi, S., Giordani, P., Brunialti, G., Isocrono, D., & Piervittori, R. (2002). Identifying Deviations from Naturality of Lichen Diversity for Bioindication Purposes. In P. L. Nimis, C. Scheidegger, & P. A. Wolseley (A c. Di), *Monitoring with Lichens—Monitoring Lichens* (pp. 281–284). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-010-0423-7_20

Loppi, S., & Nascimbene, J. (2010). Monitoring H₂S air pollution caused by the industrial exploitation of geothermal energy: The pitfall of using lichens as bioindicators. *Environmental Pollution*, 158(8), 2635–2639. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.05.002>

- Lu, K., Guo, S., Tan, Z., Wang, H., Shang, D., Liu, Y., Li, X., Wu, Z., Hu, M., & Zhang, Y. (2019). Exploring atmospheric free-radical chemistry in China: The self-cleansing capacity and the formation of secondary air pollution. *National Science Review*, 6(3), 579–594. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwy073>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in Public Health*, 8, 14. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Martellos, S., Conti, M., & Nimis, P. (2023). aggregation of Italian Lichen Data in ITALIC 7.0. *Journal of Fungi*. *Journal of Fungi*, 9(5), 556. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/jof9050556>
- Melling, A., Noppenberger, S., Still, M., & Venzke, H. (1997). Interpolation Correlations for Fluid Properties of Humid Air in the Temperature Range 100 °C to 200 °C. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 26(4), 1111–1123. <https://doi.org/10.1063/1.555998>
- Morillas, L., Roales, J., Cruz, C., & Munzi, S. (2022). Lichen as Multipartner Symbiotic Relationships. *Encyclopedia*, 2, 1421–1431. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2030096>
- Mozzo, D. P. (2009). Dipartimento Regionale Laboratori Servizio Laboratorio Provinciale di Treviso.
- Mularoni, C. (2021). Atlante delle formazioni geologiche della Repubblica di San Marino: Pillole di geologia sammarinese. Società unione mutuo soccorso.
- Nash, I., Thomas H. (A c. Di). (2008). *Lichen Biology* (2^a ed.). Cambridge University Press. Cambridge Core. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511790478>
- Nimis, P. (1999). Linee guida per la bioindicazione degli effetti dell'inquinamento tramite la biodiversità dei licheni epifiti.
- Nimis, P. L. (2011). Licheni in breve. Un ripasso dei caratteri principali per il primo laboratorio di lichenologia. Dipartimento di Scienze della Vita, Università degli Studi di Trieste / KeyToNature.
- Nimis, P. L. (2011). Licheni in breve. Un ripasso dei caratteri principali per il primo laboratorio di lichenologia. Dipartimento di Scienze della Vita, Università degli Studi di Trieste / KeyToNature.
- Nimis, P. (2016). *The Lichens of Italy. A Second Annotated Catalogue*.
- Pellegrini, E., Bertuzzi, S., Candotto Carniel, F., Lorenzini, G., Nali, C., & Tretiach, M. (2014). Ozone tolerance in lichens: A possible explanation from biochemical to physiological

level using *Flavoparmelia caperata* as test organism. *Journal of Plant Physiology*, 171(16), 1514–1523. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.06.017>

Per M. Jørgensen. (2017). The development of lichenology in the history of botany. *The Bryologist*, 120(1), 37–44. <https://doi.org/10.1639/0007-2745-120.1.037>

Pescott, O., Simkin, J., August, T., Randle, Z., Dore, A., & Botham, M. (2015). Air pollution and its effects on lichens, bryophytes, and lichen-feeding Lepidoptera: Review and evidence from biological records. *Biological Journal of the Linnean Society*, 115, 611–635. <https://doi.org/10.1111/bij.12541>

Plum, F., & Labonte, D. (2021). scAnt—An open-source platform for the creation of 3D models of arthropods (and other small objects). *PeerJ*, 9, e11155. <https://doi.org/10.7717/peerj.11155>

Reiter, M. S., & Kockelman, K. M. (2016). The problem of cold starts: A closer look at mobile source emissions levels. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 43, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.12.012>

Relazione Biomonitoraggio Ravenna. (2016).

Saini, K., Nayaka, S., & Bast, F. (2019). Diversity of Lichen Photobionts: Their Coevolution and Bioprospecting Potential (pp. 307–323). https://doi.org/10.1007/978-981-13-8487-5_13

Salvi, J., Pagès, J., & Batlle, J. (2004). Pattern codification strategies in structured light systems. *Agent Based Computer Vision*, 37(4), 827–849. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2003.10.002>

Sasso, F., Picca, F., Fittavolini, C., Florio, S., & D’Anna, A. (2026). The impact of vehicle emissions on secondary aerosol formation: A laboratory study using an oxidation flow reactor. *Fuel*, 407, 137404. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.137404>

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* (Third edition). John Wiley & Sons.

Sicard, P., Agathokleous, E., De Marco, A., Paoletti, E., & Calatayud, V. (2021). Urban population exposure to air pollution in Europe over the last decades. *Environmental Sciences Europe*, 33(1), 28. <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00450-2>

Siegmund, T., Gollmer, C., Scherzinger, M., & Kaltschmitt, M. (2024). A review of CO emissions during solid biofuel combustion – Formation mechanisms and fuel-related reduction measures. *Journal of the Energy Institute*, 116, 101762. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2024.101762>

Skert, N., & Grahonja, R. (2013). Biomonitoraggio dell'inquinamento da gas fitotossici nella Regione Friuli Venezia Giulia tramite licheni come bioindicatori—ARPA FVG. <https://arpa.fvg.it/temi/temi/suoli-siti-contaminati-e-biodiversit/pubblicazioni/biomonitoraggio-dellinquinamento-da-gas-fitotossici-nella-regione-friuli-venezias-giulia-tramite-licheni-come-bioindicatori/>

Stazione-di-Serravalle. (2026). <https://www.gov.sm/publ/upav/Ambiente/Dati-Ambientali/Dati-Aria/Stazione-di-Serravalle.html>

Sun, Z., & Zhu, D. (2019). Exposure to outdoor air pollution and its human health outcomes: A scoping review. *PloS One*, 14(5), e0216550. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216550>

UFFICIO INFORMATICA, TECNOLOGIA, DATI E STATISTICA Dipartimento Funzione Pubblica. (2024, maggio 8).

UNI EN 16413 (2014).

Van der Wat, L., & Forbes, P. (2014). Lichens as biomonitors for organic air pollutants. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2014.09.006>

Wehr, A., & Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning—An introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2), 68–82. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00011-8)

Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

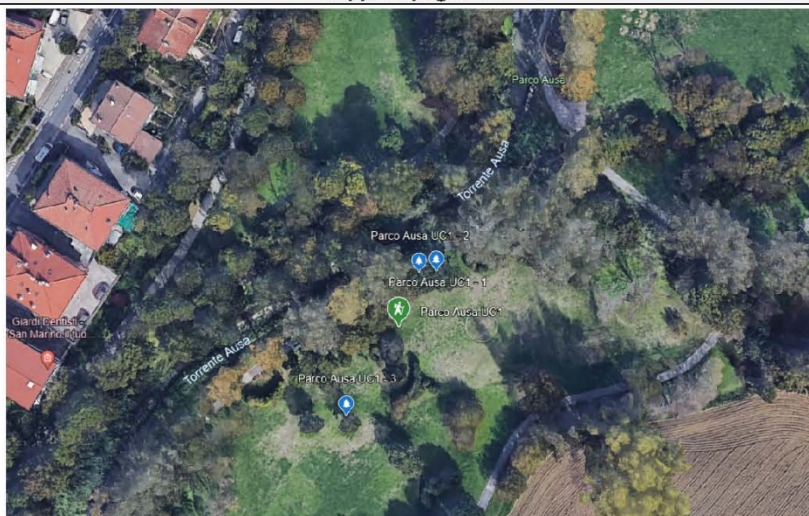
WHO global air quality guidelines. (2021). <https://iris.who.int/items/5b0ca7ab-830a-44b8-b99f-4ee743b4d7b2>

World Health Organization (A c. Di). (2000). Air quality guidelines for Europe (2nd ed). World Health Organization, Regional Office for Europe.

Allegato A - Schede di rilievo

Scheda di rilievo			
Unità di campionamento: Parco Ausa (P1)			
Località: Parco Ausa	Foglio: 7	Mappa: 1237	Coordinate[WGS84]: 43°58'41" N 12°29'25" E
Altitudine[s.l.m.]: 66 m	Tipologia di area: Area a parco		
Descrizione area e avvicinamento: Zona SUD del parco Ausa, nei pressi del ponte di attraversamento in legno.			
Operatore: Andrea Conti			

Mappa topografica



Codice pianta {1}: 43°58'41" N 12°29'25" E	Codice pianta {2}: 43°58'41" N 12°29'25" E	Codice pianta {3}: 43°58'40" N 12°29'24" E
Albero		
Foglia		

Codice pianta	Specie	Circonferenza a 130 cm da terra	Inclinazione tronco[°]
43°58'41" N 12°29'25" E	Quercus pubescens	110	1
Orientamento			
N	E	S	O
Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0
Vista			
			

Rilievo pianta {2}					
Conta del numero di quadranti in cui ogni specie è presente, da 1 a 5.					
Specie lichene	N	E	S	O	Abbondanza per specie
1	5	5	5	5	
11	5	5	5	5	
SF (Sum of Frequencies)					LDV_t (Lichen Diversity Value_{tree})
<i>Somma delle frequenze per orientamento</i>	1 0	1 0	1 0	1 0	<i>Somma delle frequenze per orientamento</i>
					0

Codice pianta	Specie	Circonferenza a 130 cm da terra	Inclinazione tronco[°]
43°58'41" N 12°29'25" E	Quercus pubescens	98,5	2
Orientamento			
N	E	S	O
Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0
Vista			
			

Rilievo pianta {1}					
Conta del numero di quadranti in cui ogni specie è presente, da 1 a 5.					
Specie lichene	N	E	S	O	Abbondanza per specie
1	5	5	4	5	
11	5	5	5	5	
SF (Sum of Frequencies)	10	10	9	10	LDV _i (Lichen Diversity Value _{tree})
Somma delle frequenze per orientamento					Somma delle frequenze per orientamento
					0

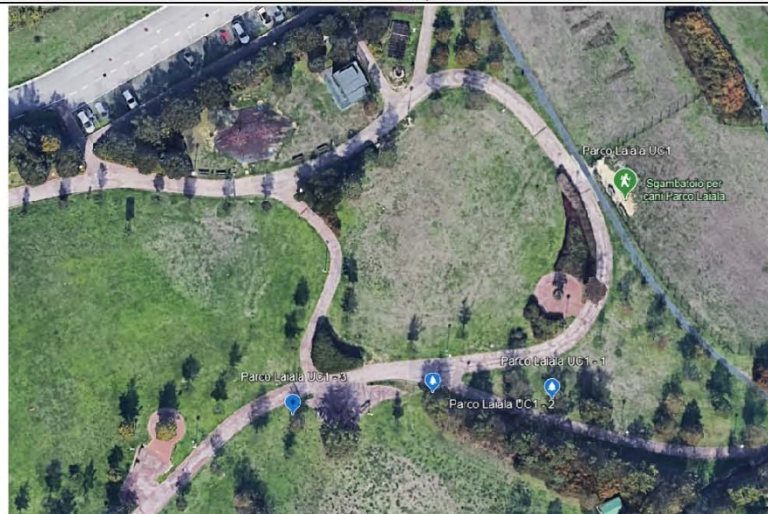
Codice pianta	Specie	Circonferenza a 130 cm da terra	Inclinazione tronco[°]
43°58'40" N 12°29'24" E	Quercus pubescens	88	6
Orientamento			
N	E	S	O
Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0
Vista			
			

Rilevamento pianta {3}					
Conta del numero di quadranti in cui ogni specie è presente, da 1 a 5.					
Specie lichene	N	E	S	O	Abbondanza per specie
1	5	3	3	5	
11	5	5	2	5	
SF (Sum of Frequencies)	10	8	5	10	LDV _i (Lichen Diversity Value tree)
Somma delle frequenze per orientamento					Somma delle frequenze per orientamento
					0

LDV _j (Lichen Diversity Value of Sampling Unit)	37,33
Media aritmetica delle LDV _i dell'Unità di campionamento	

Scheda di rilievo			
Unità di campionamento: Parco Laiala (P2)			
Località: Parco Laiala	Foglio: 13	Mappa: 1027-1003	Coordinate[WGS84]: 43°57'56" N 12°28'33" E
Altitudine[s.l.m.]: 128 m	Tipologia di area: Area a parco		
Descrizione area e avvicinamento: Area opposta all'ingresso del parcheggio.			
Operatore: Andrea Conti			

Mappa topografica



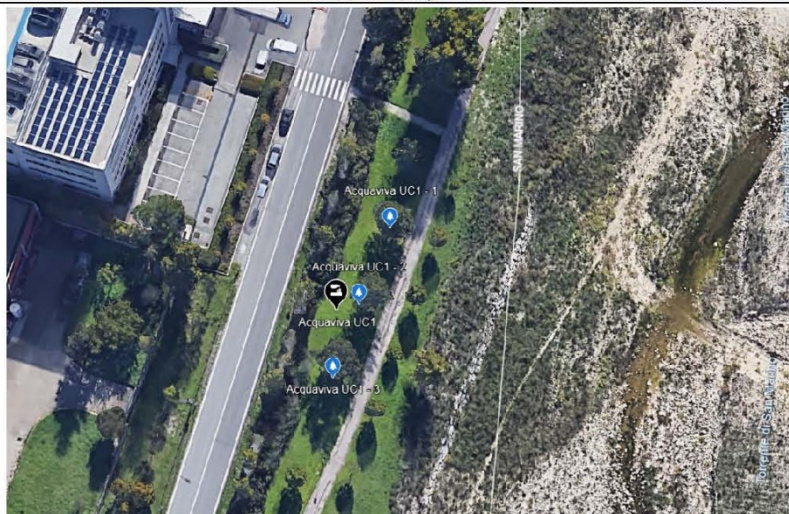
Codice pianta {1}: 43°57'56" N 12°28'33" E	Codice pianta {2}: 43°57'56" N 12°28'32" E	Codice pianta {3}: 43°57'55" N 12°28'31" E
Albero		
		
Foglia		
		

Codice pianta	Specie	Circonferenza a 130 cm da terra	Inclinazione tronco[°]
43°57' 56" N 12°28' 33" E	Quercus pubescens	65	0
Orientamento			
N	E	S	O
Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:12	Spostamento[°]:0
Vista			
			

Rilievo pianta {1}					
Conta del numero di quadranti in cui ogni specie è presente, da 1 a 5.					
Specie lichene	N	E	S	O	Abbondanza per specie
17	4	3	1	4	
1	5	5	5	5	
11	5	5	5	5	
7	0	0	1	0	
SF (Sum of Frequencies)					LDV_t (Lichen Diversity Value_{tree})
<i>Somma delle frequenze per orientamento</i>	1 4	1 3	1 2	1 4	<i>Somma delle frequenze per orientamento</i>
					0

Scheda di rilievo			
Unità di campionamento: Acquaviva (I1)			
Località: Acquaviva	Foglio: 16	Mappa: 9003	Coordinate[WGS84]: 43°56'32" N 12°24'23" E
Altitudine[s.l.m.]: 160 m	Tipologia di area: Area Industriale		
Descrizione area e avvicinamento: All'altezza del civico 81 (Robopac S.p.a.) nel camminamento lato fiume.			
Operatore: Andrea Conti			

Mappa topografica



Codice pianta {1}: 43°56'32" N 12°24'23" E	Codice pianta {2}: 43°56'32" N 12°24'22" E	Codice pianta {3}: 43°56'33" N 12°24'22" E
Albero		
		
Foglia		
		

Codice pianta	Specie	Circonferenza a 130 cm da terra	Inclinazione tronco[°]
43°56' 32" N 12°24' 23" E	Pubescente	107	2
Orientamento			
N	E	S	O
<i>Spostamento[°]:0</i>	<i>Spostamento[°]:0</i>	<i>Spostamento[°]:0</i>	<i>Spostamento[°]:0</i>
Vista			
			

Rilievo pianta {1}					
Conta del numero di quadranti in cui ogni specie è presente, da 1 a 5.					
Specie lichene	N	E	S	O	Abbondanza per specie
17	5	4	5	4	
2	5	5	5	5	
11	4	5	5	4	
4	2	4	2	5	
SF (Sum of Frequencies)					LDV_t (Lichen Diversity Value_{tree})
<i>Somma delle frequenze per orientamento</i>	16	19	17	19	<i>Somma delle frequenze per orientamento</i>
					0

Codice pianta	Specie	Circonferenza a 130 cm da terra	Inclinazione tronco[°]
43°56'32"N 12°24'22"E	Quercus pubescens	103	1
Orientamento			
N	E	S	O
Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0
Vista			
			

Rilevamento pianta {2}					
Conta del numero di quadranti in cui ogni specie è presente, da 1 a 5.					
Specie lichene	N	E	S	O	Abbondanza per specie
17	4	5	1	5	
2	2	3	4	5	
1	5	3	4	5	
11	5	4	5	5	
4	0	0	0	1	
SF (Sum of Frequencies)					LDV_t (Lichen Diversity Value_{tree})
<i>Somma delle frequenze per orientamento</i>	16	15	14	21	<i>Somma delle frequenze per orientamento</i>
					0

Codice pianta	Specie	Circonferenza a 130 cm da terra	Inclinazione tronco[°]
43°56'33"N 12°24'22"E	Quercus pubescens	105	6
Orientamento			
N	E	S	O
Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:11
Vista			
			

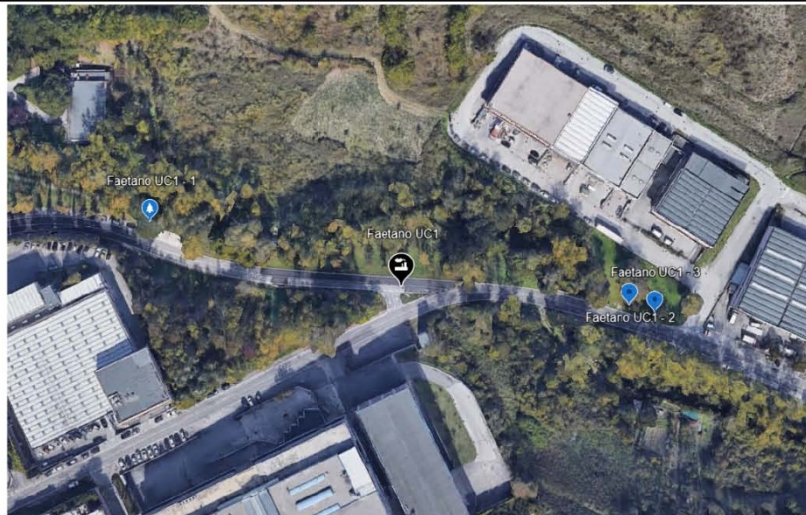
Rilevo pianta {3}					
Conta del numero di quadranti in cui ogni specie è presente, da 1 a 5.					
Specie lichene	N	E	S	O	Abbondanza per specie
17	5	5	5	2	
2	4	5	5	5	
1	3	0	2	5	
11	5	5	5	5	
4	3	1	0	0	
SF (Sum of Frequencies)					LDV _i (Lichen Diversity Value _{tree})
Somma delle frequenze per orientamento	20	16	17	17	Somma delle frequenze per orientamento
					0

LDV _j (Lichen Diversity Value of Sampling Unit)	68,33
Media aritmetica delle LDV _i dell'Unità di campionamento	

Scheda di rilievo			
Unità di campionamento: Faetano (I2)			
Località: Faetano	Foglio: 48	Mappa: 484-9003	Coordinate[WGS84]: 43°55'37" N 12°28'53" E
Altitudine[s.l.m.]: 178 m	Tipologia di area: Area Industriale		
Descrizione area e avvicinamento: Marciapiede lato strada.			

Operatore: Andrea Conti

Mappa topografica



Codice pianta {1}: 43°55'37" N 12°28'53" E	Codice pianta {2}: 43°55'35" N 12°29'02" E	Codice pianta {3}: 43°55'35" N 12°29'03" E
--	--	--

Albero



Foglia



Codice pianta	Specie	Circonferenza a 130 cm da terra	Inclinazione tronco[°]
43°55'37" N 12°28'53" E	Quercus pubescens	194	0
Orientamento			
N	E	S	O
Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0
Vista			
			

Rilevamento pianta {1}					
Conta del numero di quadranti in cui ogni specie è presente, da 1 a 5.					
Specie lichene	N	E	S	O	Abbondanza per specie
1	5	3	1	1	
11	5	4	5	4	
18	5	4	4	3	
4			5		
SF (Sum of Frequencies)					LDV_i (Lichen Diversity Value_{tree})
<i>Somma delle frequenze per orientamento</i>	15	11	15	9	<i>Somma delle frequenze per orientamento</i>
					0

Codice pianta	Specie	Circonferenza a 130 cm da terra	Inclinazione tronco[°]
43°55'35"N 12°29'02"E	Quercus pubescens	98	7
Orientamento			
N	E	S	O
<i>Spostamento[°]:0</i>	<i>Spostamento[°]:0</i>	<i>Spostamento[°]:0</i>	<i>Spostamento[°]:0</i>
Vista			
			

Rilievo pianta {2}					
Conta del numero di quadranti in cui ogni specie è presente, da 1 a 5.					
Specie lichene	N	E	S	O	Abbondanza per specie
1	5	5	5	5	
11	5	5	5	5	
SF (Sum of Frequencies)					LDV_i (Lichen Diversity Value_{tree})
<i>Somma delle frequenze per orientamento</i>	10	10	10	10	<i>Somma delle frequenze per orientamento</i>
					0

Codice pianta	Specie	Circonferenza a 130 cm da terra	Inclinazione tronco[°]
43°55'35"N 12°29'03"E	Quercus pubescens	103	9
Orientamento			
N	E	S	O
Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0
Vista			
			

Rilevamento pianta {3}					
Conta del numero di quadranti in cui ogni specie è presente, da 1 a 5.					
Specie lichene	N	E	S	O	Abbondanza per specie
1	5	5	5	5	
11	5	5	5	5	
12	1	0	1		
13		1	0		
7			1		
SF (Sum of Frequencies)					LDV _i (Lichen Diversity Value tree)
Somma delle frequenze per orientamento	1 1	1 1	1 2	1 0	Somma delle frequenze per orientamento
					0

LDV _j (Lichen Diversity Value of Sampling Unit) Media aritmetica delle LDV _i dell'Unità di campionamento	44,33
---	-------

Scheda di rilievo			
Unità di campionamento: Parco Montecerreto (P3)			
Località: Parco Montecerreto	Foglio: 27	Mappa: 66-166-16	Coordinate[WGS84]: 43°56' 37" N 12°25' 34" E
Altitudine[s.l.m.]: 445 m	Tipologia di area: Area a parco		
Descrizione area e avvicinamento: Camminamento del parco di Montecerreto.			
Operatore: Andrea Conti			
Mappa topografica			
			

Codice pianta {1}: 43°56'37" N 12°25'34" E	Codice pianta {2}: 43°56'37" N 12°25'36" E	Codice pianta {3}: 43°56'37" N 12°25'36" E
Albero		
		
Foglia		
		

Codice pianta	Specie	Circonferenza a 130 cm da terra	Inclinazione tronco[°]
43°56'37" N 12°25'34" E	Quercus pubescens	95	8
Orientamento			
N	E	S	O
<i>Spostamento</i> [°]:0	<i>Spostamento</i> [°]:5	<i>Spostamento</i> [°]:0	<i>Spostamento</i> [°]:0
Vista			
			

Rilevo pianta {1}					
Conta del numero di quadranti in cui ogni specie è presente, da 1 a 5.					
Specie lichene	N	E	S	O	Abbondanza per specie
1	3	1	2	0	0
11	5	5	2	4	
7	3	0	1	0	
4	5	5	2	5	
9		3	1	3	
12		2	4	4	
17		3	0	0	
19			3	3	
10				1	
SF (Sum of Frequencies)					LDV_i (Lichen Diversity Value_{tree})
<i>Somma delle frequenze per orientamento</i>	1 6	1 9	1 5	2 0	<i>Somma delle frequenze per orientamento</i>
					0

Scheda di rilievo			
Unità di campionamento: Fiorentino (U3)			
Località: Fiorentino	Foglio: 62	Mappa: 90	Coordinate[WGS84]: 43°54' 28" N 12°27' 13" E
Altitudine[s.l.m.]: 418 m	Tipologia di area: Area Urbana		
Descrizione area e avvicinamento: Area limitrofa al cimitero.			
Operatore: Andrea Conti			
Mappa topografica			

Codice pianta {1}: 43°54'28" N 12°27'13" E	Codice pianta {2}: 43°54'28" N 12°27'13" E	Codice pianta {3}: 43°54'28" N 12°27'12" E
Albero		
Foglia		

Codice pianta	Specie	Circonferenza a 130 cm da terra	Inclinazione tronco[°]
43°54'28" N 12°27'13" E	Quercus pubescens	235	0
Orientamento			
N	E	S	O
Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:5	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0
Vista			
			

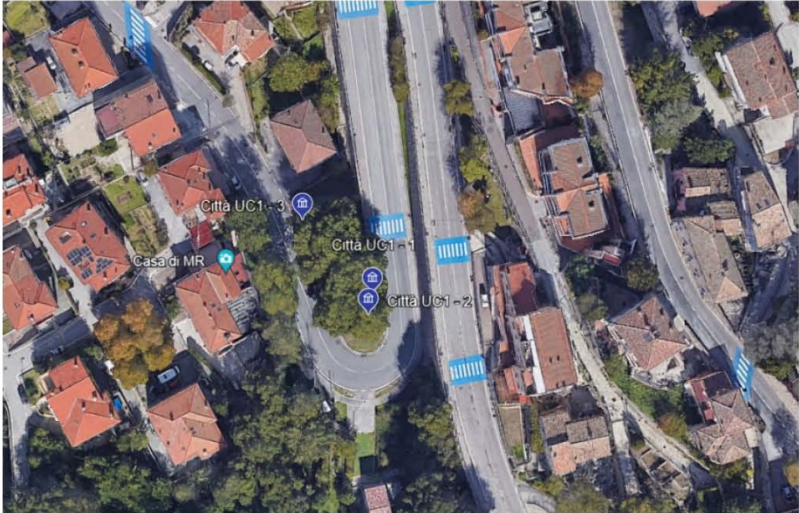
Rilevamento pianta {1}					
Conta del numero di quadranti in cui ogni specie è presente, da 1 a 5.					
Specie lichene	N	E	S	O	Abbondanza per specie
1	1	0	0	2	
11	5	5	5	5	
18	5	4	4	5	
17				1	
SF (Sum of Frequencies)	11	9	9	13	LDV _i (Lichen Diversity Value _{tree})
Somma delle frequenze per orientamento					Somma delle frequenze per orientamento
					0

Codice pianta	Specie	Circonferenza a 130 cm da terra	Inclinazione tronco[°]
43°54'29" N 12°27'12" E	Quercus pubescens	79	5
Orientamento			
N	E	S	O
Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0
Vista			
			

Rilevamento pianta {3}					
Conta del numero di quadranti in cui ogni specie è presente, da 1 a 5.					
Specie lichene	N	E	S	O	Abbondanza per specie
11	3	4	2	3	
18	5	5	5	4	
8			5	5	
12				1	
SF (Sum of Frequencies)					LDV _i (Lichen Diversity Value tree)
Somma delle frequenze per orientamento	8	9	12	13	Somma delle frequenze per orientamento
					0

LDV _j (Lichen Diversity Value of Sampling Unit) Media aritmetica delle LDV _i dell'Unità di campionamento	48,67
---	-------

Scheda di rilievo			
Unità di campionamento: Canepa (U1)			
Località: Canepa	Foglio: 52	Mappa: 101	Coordinate[WGS84]: 43°55' 14" N 12°25' 57" E
Altitudine[s.l.m.]: 370 m	Tipologia di area: Area urbana		
Descrizione area e avvicinamento: Area scarsamente antropizzata.			
Operatore: Andrea Conti			
Mappa topografica			
			
Codice pianta {1}: 43°55'14" N 12°25'57" E	Codice pianta {2}: 43°55'15" N 12°25'56" E	Codice pianta {3}: 43°55'15" N 12°25'55" E	
Albero			
			
Foglia			
			

Scheda di rilievo			
Unità di campionamento: Città di San Marino (U2)			
Località: Città	Foglio: 24	Mappa: 9003	Coordinate[WGS84]: 43°56'14.1"N 12°26'31"E
Altitudine[s.l.m.]: 555 m	Tipologia di area: Area Urbana		
Descrizione area e avvicinamento:			
Operatore: Andrea Conti			
Mappa topografica			
			

Codice pianta {1}: 43°56'14" N 12°26'32" E	Codice pianta {2}: 43°56'14" N 12°26'32" E	Codice pianta {3}: 43°56'14" N 12°26'31" E
Albero		
		
Foglia		
		

Scheda di rilievo			
Unità di campionamento: Montegiardino (U4)			
Località: Montegiardino	Foglio: 66	Mappa: 180	Coordinate[WGS84]: 43°54'34" N 12°28'60" E
Altitudine[s.l.m.]: 360 m	Tipologia di area: Area Urbana		
Descrizione area e avvicinamento:			
Operatore: Andrea Conti			
Mappa topografica			

Codice pianta {1}: 43°54'34" N 12°28'60" E	Codice pianta {2}: 43°54'35" N 12°28'59" E	Codice pianta {3}: 43°54'35" N 12°28'59" E
Albero		
Foglia		

Scheda di rilievo			
Unità di campionamento: Falciano (U5)			
Località: Falciano	Foglio: 7	Mappa: 40 - 776	Coordinate[WGS84]: 43°58'59" N 12°30'8" E
Altitudine[s.l.m.]: 120 m	Tipologia di area: Area urbana		
Descrizione area e avvicinamento:			
Operatore: Andrea Conti			
Mappa topografica			

Codice pianta {1}: 43°58'59" N 12°30'8" E	Codice pianta {2}: 43°58'58" N 12°30'8" E	Codice pianta {3}: 43°58'53" N 12°30'4" E
Albero		
Foglia		

Codice pianta	Specie	Circonferenza a 130 cm da terra	Inclinazione tronco[°]
43°58'59" N 12°30'8" E	Quercus pubescens	60	7
Orientamento			
N	E	S	O
Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0
Vista			
			

Rilevamento pianta {1}					
Conta del numero di quadranti in cui ogni specie è presente, da 1 a 5.					
Specie lichene	N	E	S	O	Abbondanza per specie
19	5	5	5	5	
15	5	5	5	5	
17	0	0	0	1	
SF (Sum of Frequencies)					LDV_t (Lichen Diversity Value_{tree})
<i>Somma delle frequenze per orientamento</i>	1 0	1 0	1 0	1 1	<i>Somma delle frequenze per orientamento</i>
					0

Codice pianta	Specie	Circonferenza a 130 cm da terra	Inclinazione tronco[°]
43°58'58" N 12°30'8" E	Quercus pubescens	59	5
Orientamento			
N	E	S	O
Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0
Vista			
			

Rilevo pianta {2}					
Conta del numero di quadranti in cui ogni specie è presente, da 1 a 5.					
Specie lichene	N	E	S	O	Abbondanza per specie
19	5	5	5	5	
11	5	3	1	5	
21	4	3	3	1	
17	0	0	1	0	
SF (Sum of Frequencies)					LDV_t (Lichen Diversity Value_{tree})
<i>Somma delle frequenze per orientamento</i>	1 4	1 1	1 0	1 1	<i>Somma delle frequenze per orientamento</i>
					0

Codice pianta	Specie	Circonferenza a 130 cm da terra	Inclinazione tronco[°]
43°58'53" N 12°30'4" E	Quercus pubescens	125	5
Orientamento			
N	E	S	O
Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0
Vista			
			

Rilevo pianta {3}					
Conta del numero di quadranti in cui ogni specie è presente, da 1 a 5.					
Specie lichene	N	E	S	O	Abbondanza per specie
11	5	5	5	5	
1	4	3	0	3	
2	4	2	1	0	
19	2	3	3	0	
18	0	0	0	4	
SF (Sum of Frequencies)					LDV _i (Lichen Diversity Value _{tree})
Somma delle frequenze per orientamento	1 5	1 3	9	1 2	Somma delle frequenze per orientamento
					0

LDV _j (Lichen Diversity Value of Sampling Unit) Media aritmetica delle LDV _i dell'Unità di campionamento	45,33
---	-------

Xantoria non prelevabile, prelevata su altri alberi diversi in modo indistinto

Scheda di rilievo			
Unità di campionamento: Chiesanuova (U6)			
Località: Chiesanuova	Foglio: 59	Mappa: 9003	Coordinate[WGS84]: 43°54'8" N 12°25'16" E
Altitudine[s.l.m.]: 500 m	Tipologia di area: Area Urbana		
Descrizione area e avvicinamento:			
Operatore: Andrea Conti			
Mappa topografica			
			

Codice pianta {1}: 43°54'9" N 12°25'16" E	Codice pianta {2}: 43°54'9" N 12°25'16" E	Codice pianta {3}: 43°54'4" N 12°25'22" E
Albero		
		
Foglia		

Codice pianta	Specie	Circonferenza a 130 cm da terra	Inclinazione tronco[°]
43°54'8" N 12°25'16" E	Quercus pubescens	70	4
Orientamento			
N	E	S	O
Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0	Spostamento[°]:0
Vista			
			

Rilevamento pianta {2}					
Conta del numero di quadranti in cui ogni specie è presente, da 1 a 5.					
Specie lichene	N	E	S	O	Abbondanza per specie
1	5	5	2	4	
11	5	5	5	5	
4	4	4	3	4	
2	2	4	0	0	
18	3	4	1	0	
7	0	2	0	0	
SF (Sum of Frequencies) <i>Somma delle frequenze per orientamento</i>	1 9	2 4	1 1	1 3	LDV_t (Lichen Diversity Value_{tree}) <i>Somma delle frequenze per orientamento</i> 0

Allegato B - Atlante fotografico delle specie

Documentazione fotografica

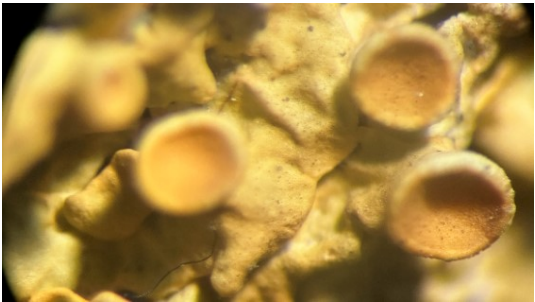
Il presente documento riunisce i licheni ritrovati all'interno dei siti indagati.

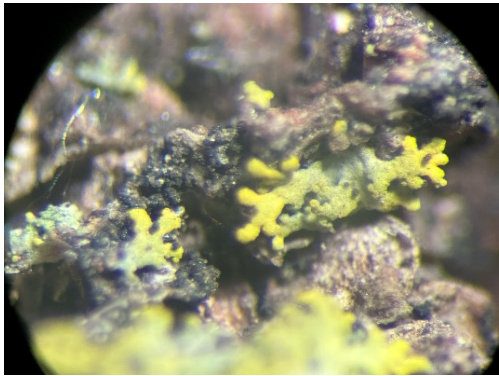
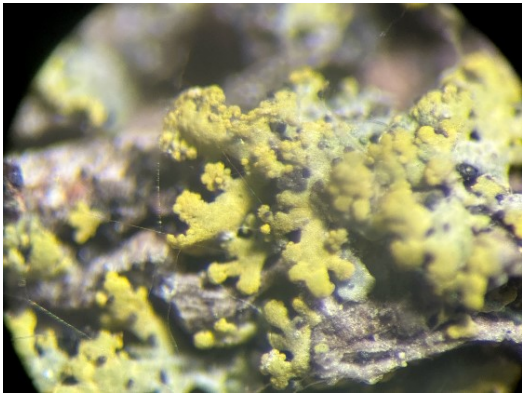
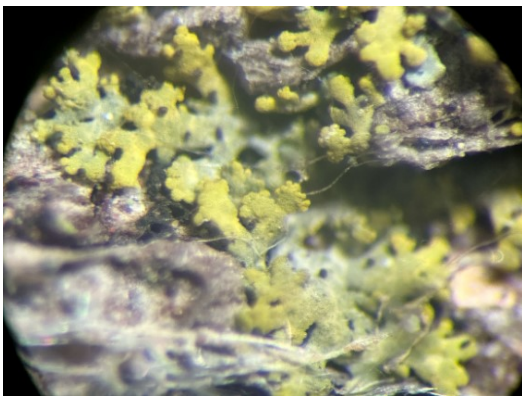
Per ogni tipologia viene inserita una o più foto di campioni differenti accorpati per similarità.

Per ogni foto è stata attribuita una specie ipotizzata, tale specie è stata individuata in modo non rigoroso in assenza delle soluzioni (C - K - KC - P), le risorse utilizzate sono le seguenti:

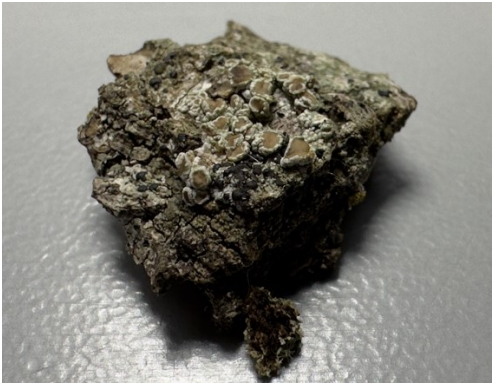
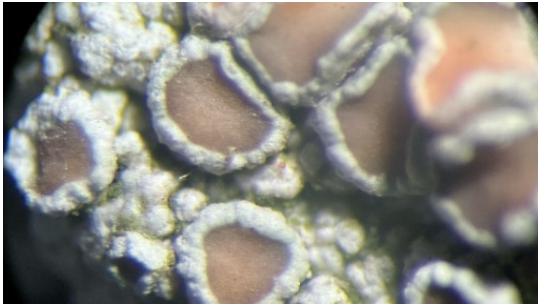
- Chiave dicotomica:
 - **Felci, muschi, licheni d'Europa di Hans M. Jahns.**
 - **Manuale ANPA**

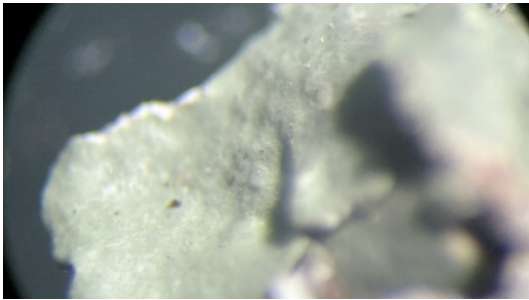
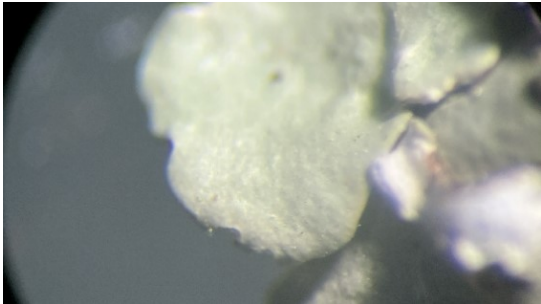
- Riconoscimento per immagine:
 - **ITALIC 8.0**

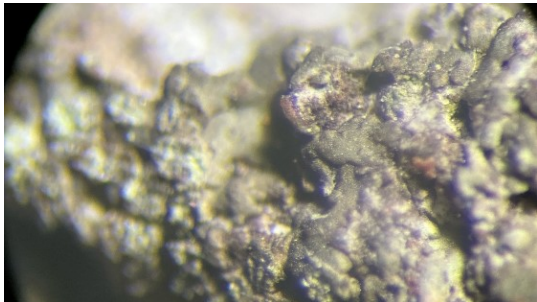
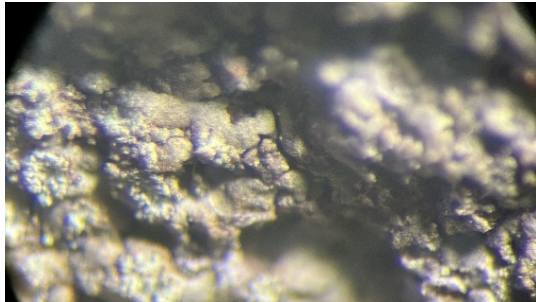
Specie N°1		
	Nome (presunto):	<i>Xanthoria parietina</i>
	Foto	Dettaglio
A		
B		
C		

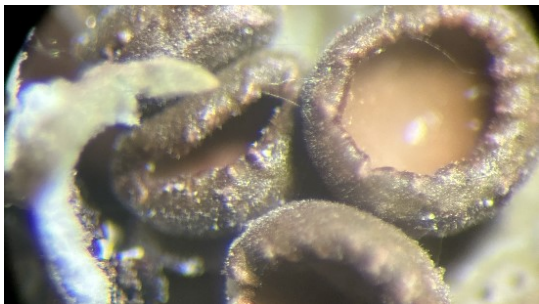
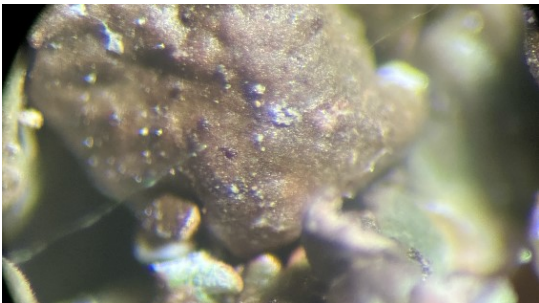
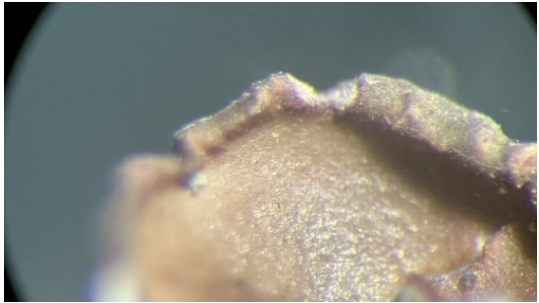
Specie N°2		
	Nome (presunto):	<i>Candelaria concolor</i>
	Foto	Dettaglio
A		
B		
C		

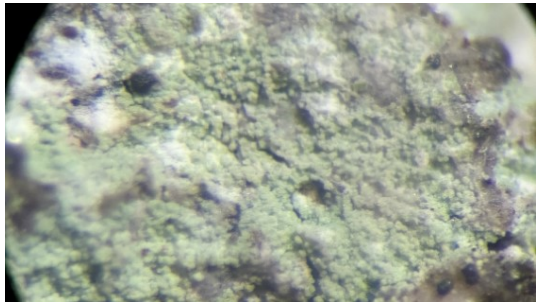
Specie N°3		
	Nome (presunto):	<i>Athallia cerinella</i>
	Foto	Dettaglio
A		
B		
C		

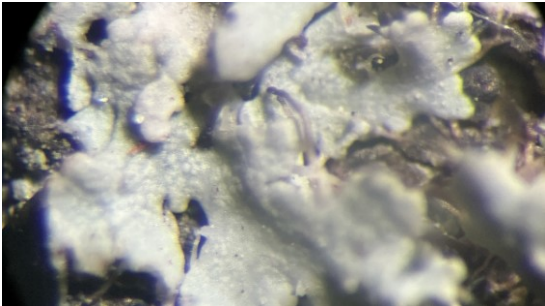
Specie N°4		
	Nome (presunto):	<i>Lecanora chlarotera</i>
	Foto	Dettaglio
A		
B		
C		

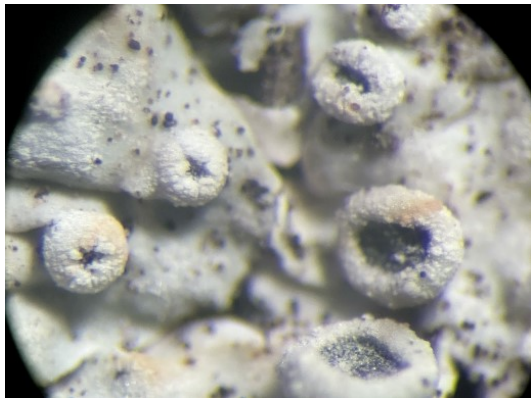
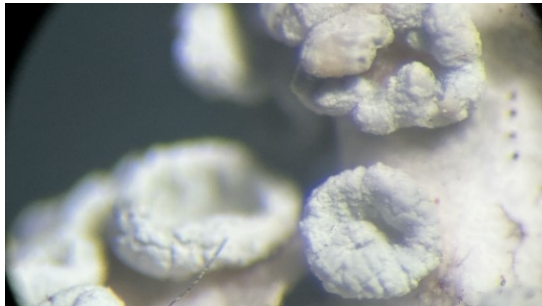
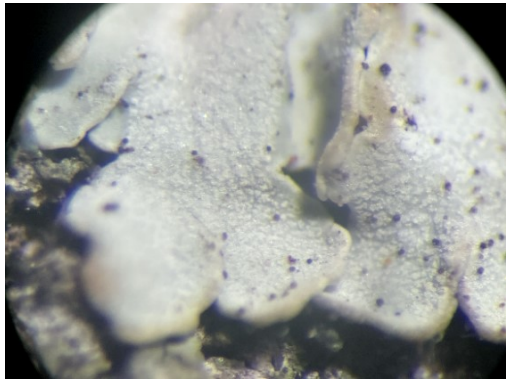
Specie N°7		
	Nome (presunto):	<i>Flavoparmelia caperata</i>
	Foto	Dettaglio
A		
B		
C		

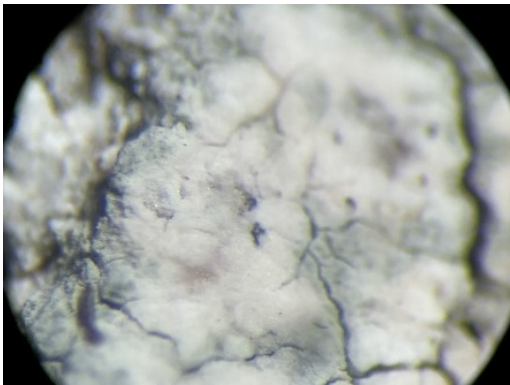
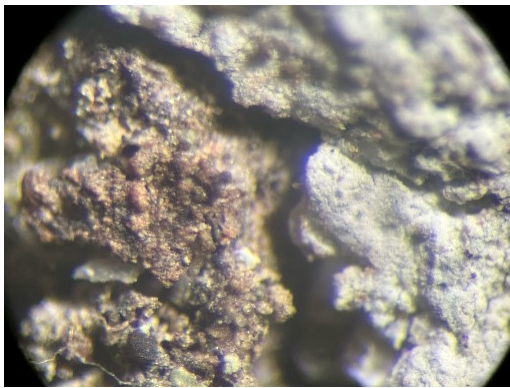
Specie N°8		
	Nome (presunto):	<i>Phaeophyscia orbicularis</i>
	Foto	Dettaglio
A		
B		
C		

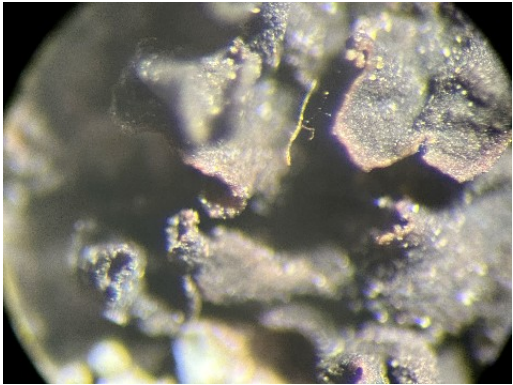
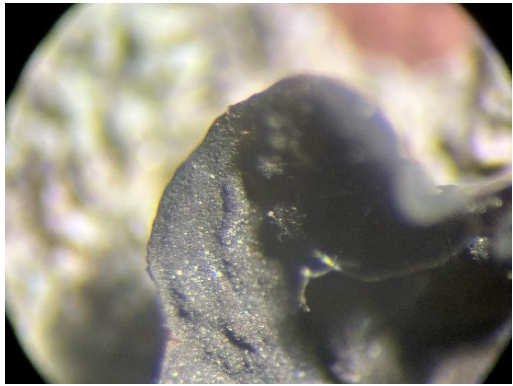
Specie N°9		
	Nome (presunto):	<i>Pleurosticta acetabulum</i>
	Foto	Dettaglio
A		
B		
C		

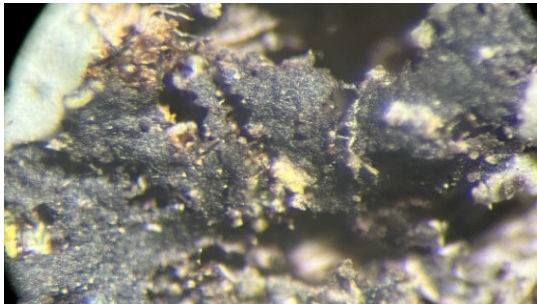
Specie N°10		
	Nome (presunto):	<i>Lepraria cf. incana</i>
	Foto	Dettaglio
A		
B		
C		

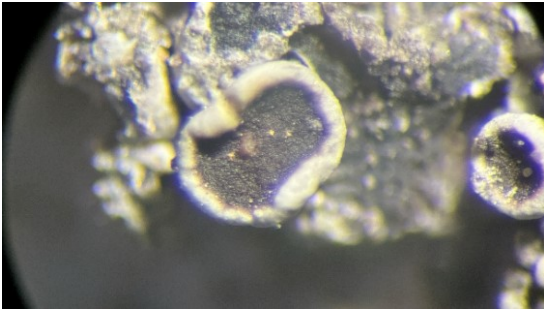
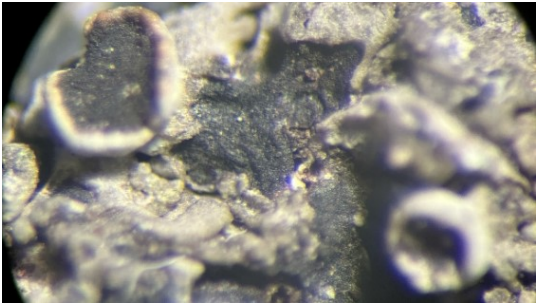
Specie N°11		
	Nome (presunto):	<i>Physcia adscendens</i>
	Foto	Dettaglio
A		
B		
C		

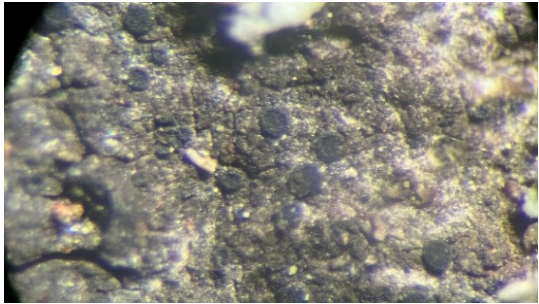
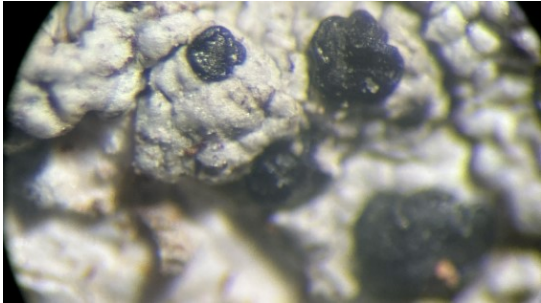
Specie N°12		
	Nome (presunto):	<i>Physcia aipolia</i>
	Foto	Dettaglio
A		
B		
C		

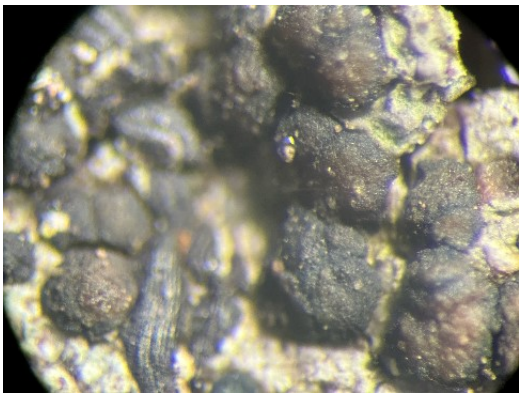
Specie N°13		
	Nome (presunto):	<i>Phlyctis argena</i>
	Foto	Dettaglio
A		
B		
C		

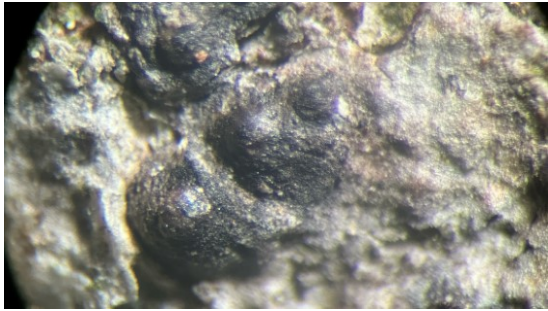
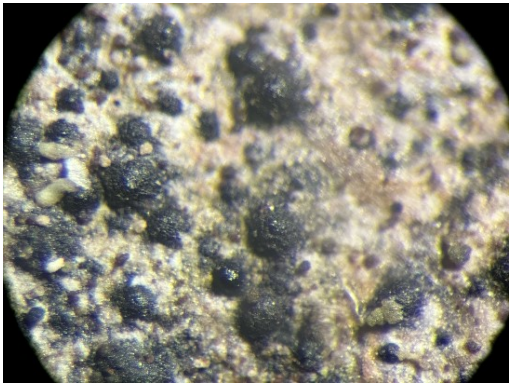
Specie N°14		
	Nome (presunto):	<i>Collema furfuraceum</i>
	Foto	Dettaglio
A		
B		
C		

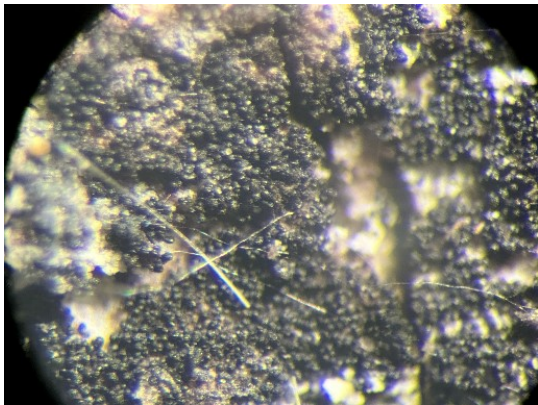
Specie N°15		
	Nome (presunto):	Non identificato
	Foto	Dettaglio
A		
B		
C		

Specie N°16		
	Nome (presunto):	<i>Physcia stellaris</i>
	Foto	Dettaglio
A		
B		
C		

Specie N°17		
	Nome (presunto):	<i>Lecidella elaeochroma</i>
	Foto	Dettaglio
A		
B		
C		

Specie N°18		
	Nome (presunto):	<i>Amandinea punctata</i>
	Foto	Dettaglio
A		
B		
C		

Specie N°19		
	Nome (presunto):	Non identificato
	Foto	Dettaglio
A		
B		
C		

Specie N°21		
	Nome (presunto):	Non identificato
	Foto	Dettaglio
A		
B		
C		

Specie N°23		
	Nome (presunto):	<i>Parmelina tiliacea</i>
	Foto	Dettaglio
A		
B		
C		

Specie N°24		
	Nome (presunto):	<i>Physconia grisea</i>
	Foto	Dettaglio
A		
B		
C		

Allegato C - Distribuzione delle specie

ID	Specie lichenica	1 (P1)	2 (P2)	3 (P3)	4 (I1)	5 (I2)	6 (U1)	7 (U2)	8 (U3)	9 (U4)	10 (U5)	11 (U6)	N° stazioni
1	<i>Xanthoria parietina</i>	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	11
2	<i>Candelaria concolor</i>		/		/		/	/			/	/	6
3	<i>Athallia cerinella</i>						/		/			/	3
4	<i>Lecanora chlorotera</i>			/	/	/	/	/	/			/	7
7	<i>Flavoparmelia caperata</i>		/	/		/						/	4
8	<i>Phaeophyscia orbicularis</i>			/					/			/	3
9	<i>Pleurosticta acetabulum</i>			/			/	/					3
10	<i>Lepraria cf. incana</i>			/									1
11	<i>Physcia adscendens</i>	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	11
12	<i>Physcia aipolia</i>		/	/		/	/		/	/		/	7
13	<i>Phlyctis argena</i>					/			/				2
14	<i>Collema furfuraceum</i>								/				1
15	<i>Non identificato (sp.15)</i>			/			/	/		/	/		5
16	<i>Physcia stellaris</i>			/					/			/	3
17	<i>Lecidella elaeochroma</i>		/	/	/			/	/	/	/	/	7
18	<i>Amandinea punctata</i>					/	/	/	/	/	/	/	7
19	<i>Non identificato (sp.19)</i>			/						/	/	/	4
21	<i>Non identificato (sp.21)</i>						/			/	/	/	4
23	<i>Parmelina tiliacea</i>						/		/				2
24	<i>Physconia grisea</i>						/	/					2
	Ricchezza specifica (n° specie)	2	6	12	5	7	12	9	12	8	8	12	