

La biodiversità micologica e la sua conoscenza. Funghi tra innovazione e tradizione

QUADERNI
NATURA E BIODIVERSITÀ

18 / 2022



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



Sistema Nazionale
per la Protezione
dell'Ambiente

La biodiversità micologica e la sua conoscenza. Funghi tra innovazione e tradizione

**QUADERNI
NATURA E BIODIVERSITÀ**

18 / 2022

Informazioni legali

L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), insieme alle 21 Agenzie Regionali (ARPA) e Provinciali (APPA) per la protezione dell'ambiente, a partire dal 14 gennaio 2017 fa parte del Sistema Nazionale a rete per la Protezione dell'Ambiente (SNPA), istituito con la Legge 28 giugno 2016, n.132.

Le persone che agiscono per conto dell'Istituto non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questa pubblicazione.

ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
Via Vitaliano Brancati, 48 – 00144 Roma
www.isprambiente.gov.it

ISPRA, Quaderni Natura e biodiversità n. 18/2022
ISBN 978-88-448-1132-7

Riproduzione autorizzata citando la fonte: Paola Angelini, Andrea Arcangeli, Francesca Floccia, Rosalba Padula et al., 2022. La biodiversità micologica e la sua conoscenza. Funghi tra innovazione e tradizione. ISPRA, Quaderni "Natura e biodiversità", n. 18/2022

Elaborazione grafica

Grafica di copertina: Elena Porrizzo - ISPRA – Area Comunicazione Ufficio Grafica
ISPRA – Area Comunicazione

Immagine di copertina: *Sarcosphaera coronaria* (Jacq.) J. Schröt., località: Polino (TR), data ritrovamento: 31/06/2019, fotografia di Giancarlo Bistocchi

Coordinamento pubblicazione online:

Daria Mazzella

ISPRA – Area Comunicazione

Settembre 2022

Autori

Paola ANGELINI (Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Chimica, Biologia e Biotecnologie)¹

Andrea ARCANGELI (Circolo Micologico Naturalistico Perugino)¹

Pietro Massimiliano BIANCO (ISPRA, Servizio per la sostenibilità della pianificazione territoriale, per le aree protette e la tutela del paesaggio, della natura e dei servizi ecosistemici terrestri – Dipartimento BIO)

Giancarlo BISTOCCHI (Circolo Micologico Naturalistico Perugino)²

Grazia CECCHI (Laboratorio di Micologia del Dipartimento di Scienza della Terra dell'Ambiente e della Vita (DISTAV), Università degli Studi di Genova)

Lorenzo CICCARESE (ISPRA, Area per la conservazione e la gestione della flora, della vegetazione e delle foreste, degli habitat e degli ecosistemi dei suoli e per l'uso sostenibile delle risorse agroforestali – Dipartimento BIO)

Luigi COCCHI (Gruppo Micologico e Naturalistico "R. Franchi" di Reggio Emilia – AMB)

Stefano DE CORSO (ISPRA, Servizio per il sistema informativo nazionale ambientale)

Anna DI NOI (ISPRA, Servizio per il sistema informativo nazionale ambientale)

Simone DI PIAZZA (Laboratorio di Micologia del Dipartimento di Scienza della Terra dell'Ambiente e della Vita (DISTAV), Università degli Studi di Genova)

Massimo DIACO (ISPRA, Dipartimento per il monitoraggio e la tutela dell'ambiente e per la conservazione della biodiversità – Dipartimento BIO)²

Francesca FLOCCIA (ISPRA, Dipartimento per il monitoraggio e la tutela dell'ambiente e per la conservazione della biodiversità – Dipartimento BIO)¹

Concettina GIOVANI (Struttura Operativa Semplice (SOS), Centro Regionale per la Radioprotezione, ARPA Friuli-Venezia Giulia)

Mirco IOTTI (Dipartimento di Medicina Clinica, Sanità Pubblica, Scienze della Vita e dell'Ambiente - Università degli studi dell'Aquila)

Rosalba PADULA (ARPA Umbria, Economia Circolare e Progetti)¹

Roberto VENANZONI (Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Chimica, Biologia e Biotecnologie)

Alfredo VIZZINI (AMP - Associazione Micologica Piemontese)

Mirca ZOTTI (Laboratorio di Micologia del Dipartimento di Scienza della Terra dell'Ambiente e della Vita (DISTAV), Università degli Studi di Genova)

¹ Componenti del Comitato di coordinamento editoriale del Quaderno ai sensi dell'art. 5 della Convenzione operativa ISPRA-ARPA Umbria-UNIPG-Circolo Micologico Naturalistico Perugino (Roma, 2021)

² Referenti per l'attuazione della Convenzione operativa ISPRA-ARPA Umbria-UNIPG-Circolo Micologico Naturalistico Perugino (Roma, 2021)

Ringraziamenti

Gli Autori di questo Quaderno ISPRA desiderano esprimere un sentito ringraziamento alla Dott.ssa Francesca Floccia e all'Ing. Massimo Diaco per la disponibilità, il sostegno e la professionalità sempre mostrata nel corso della nostra collaborazione.

Un ringraziamento particolare va al Presidente del Circolo Micologico Naturalistico Perugino, Giancarlo Bistocchi, per aver messo a disposizione di tutti il proprio vasto archivio micologico fotografico e la sua maestria e competenza nella realizzazione dei disegni illustrativi.

Inoltre, si ringraziano anche tutti coloro che hanno condiviso le loro foto per la realizzazione di questo Quaderno: Giancarlo Angeles Flores, Andrea Arcangeli, Lauro Bertani, Enrico Bini, Paola Angelini, Ennio Carassai, Pietro Curti, Bruno Granetti, Alberto Melappioni, Gianluca Mambelli, Edoardo Martinetto, Rosalba Padula, Pino Ratini, Salvatore Silviani.

Sommario

Presentazione	1
Presentazione	2
Presentazione	3
Presentazione	4
Introduzione	6
1 Il Regno dei Funghi	8
1.1 Forme, odori, colori e dimensioni	13
1.2 I funghi commestibili e i funghi tossici	27
Box. I funghi che illuminano il bosco: il misterioso fenomeno della bioluminescenza	29
Box. Paleomicologia	35
Box. Umbria: terra di tartufi per eccellenza	37
Box. I funghi lignicoli	44
2 I funghi e la biodiversità	49
2.1 Importanza dei funghi per l'equilibrio dell'ecosistema terrestre	51
I funghi come parte essenziale del ciclo del carbonio	53
WWW (Wood Wide Web): la comunicazione attraverso la rete micorrizica	56
2.2 I funghi e gli habitat	60
Box. I funghi marini	66
2.3 Le minacce di estinzione per i funghi	73
2.4 La Lista Rossa della sottodivisione Pezizomycotina e dell'ordine Boletales: due casi studio relativi all'Umbria	81
3 La bioindicazione con i funghi	87
3.1 I funghi come indicatori della qualità dei suoli	87
3.2 I funghi come indicatori della biodiversità	91
3.3 I funghi come indicatori dello stato di salute di specie e habitat	100
3.4 I funghi come indicatori dei cambiamenti climatici	108
3.5 I funghi e gli elementi chimici	109
3.6 I funghi e la radioattività	125

4 Le nuove frontiere con i funghi	131
4.1 I funghi e le biotecnologie	131
4.2 I funghi che si nutrono delle sostanze inquinanti: il biorisanamento	135
4.3 I funghi medicinali	138
Box. Le nuove frontiere della microscopia micologica	143
Box. Le nuove frontiere del DNA	146
5 I funghi e le istituzioni	148
5.1 Gli Ispettorati Micologici	149
5.2 Il Micologo	153
5.3 Le Associazioni micologiche	156
5.4 ISPRA e lo studio della biodiversità	159
Il Network per lo studio della Diversità Micologica: un progetto di Open Science quale strumento per la conservazione dei macromiceti	159
Il Sistema Informativo Funghi (SIF)	162
Il Network Nazionale della Biodiversità	163
5.5 Il Dipartimento di Chimica, Biologia e Biotecnologie (DCBB), Università degli Studi di Perugia	165
Il DCBB e la Micologia: Biodiversità, Conservazione e Biotecnologie	166
Glossario	168
Bibliografia	172
Sitografia	191

Presentazione

L'ecosistema è l'unità funzionale fondamentale in ecologia: esso è definito come l'insieme degli organismi viventi e delle sostanze non viventi fra i quali si stabiliscono scambi di materiali e di energia. È fra gli organismi viventi di un ecosistema che troviamo i funghi, i quali partecipano ai processi di decomposizione del materiale organico presente nel suolo, regolano l'equilibrio del carbonio e agiscono come intermediari nella circolazione di acqua, elementi nutritivi e messaggi chimici tra i vegetali superiori.

La diversità micologica, ovvero la varietà e variabilità dei funghi è, quindi, un parametro importante che può contribuire a conoscere e definire lo stato di un ecosistema terrestre, insieme alla flora e alla fauna che in esso svolgono le proprie attività vitali.

Per tale motivo il Dipartimento per il monitoraggio e la tutela dell'ambiente e per la conservazione della biodiversità di cui sono Direttore si occupa di studiare anche i macromiceti terrestri allo stesso modo dei vegetali e degli animali, perché tutte e tre le componenti costituiscono la parte vivente dell'ecosistema, rappresentandone, rispettivamente, i decompositori, i produttori e i consumatori.

In un pianeta sano i funghi sono interconnettori cruciali della natura, tuttavia, essi rappresentano solo lo 0,2 % delle priorità di conservazione globali.

Solo recentemente la componente fungina sta acquistando l'importanza che le è propria, tanto da meritare una posizione di prim'ordine accanto alla flora e alla fauna nell'acronimo FF&F, ovvero Flora, Fauna and Funga. Tale proposta è condivisa da numerosi ricercatori e istituzioni, fra le quali ISPRA.

Pertanto, la realizzazione di questo Quaderno pubblicato nell'ambito della collana "Natura e Biodiversità" di ISPRA si è posto il compito di informare, oltre al pubblico esperto e dei ricercatori, il vasto pubblico allo scopo di inserire i funghi nei processi di consapevolezza del valore dell'ambiente e nei programmi di educazione ambientale.

Ing. Luciano Bonci
Direttore Dipartimento per il monitoraggio
e la tutela dell'ambiente e per la conservazione della biodiversità

Presentazione

La protezione della biodiversità è una delle principali sfide che abbiamo di fronte. Il profondo processo di trasformazione del paesaggio e degli ambienti naturali operato nei secoli dall'uomo, richiede di sviluppare azioni e strumenti di conoscenza del patrimonio naturale regionale e nazionale.

In questo quadro, Arpa Umbria svolge attività di studio, ricerca, monitoraggio e progettazione, anche in collaborazione con altri Enti e soggetti di ricerca, sui diversi temi chiamati in causa da questa sfida, dagli effetti dei cambiamenti climatici alla conoscenza e tutela di Flora, Fauna & Funghi, fino alla diffusione sul territorio di specie aliene invasive.

Nella redazione del Quaderno "Natura e Biodiversità" ARPA Umbria ha voluto condividere le informazioni acquisite durante le sue attività ed ha lavorato insieme agli specialisti di tutto il territorio italiano, favorendo in questo modo una nuova occasione di confronto di competenze ed esperienze, che partendo dalla realtà locale ha acquisito ben presto carattere nazionale.

Parlare di biodiversità dei funghi vuol dire anche studiare il suolo, gli alberi, gli animali e come questi interagiscano con l'aria, l'acqua, l'inquinamento, la salute umana.

Un solo termine "fungo" può in effetti contenere una molteplicità di competenze che includono sì l'uomo e la natura, ma anche la medicina, la storia, la geografia, il clima, l'ecologia, la fisica, la botanica, la religione, la zoologia, la gastronomia, la tecnologia. L'azione semplice, comune, piacevole e coinvolgente di "andare a funghi" diventa quasi un'operazione complessa, che trova nella redazione del presente volume una tappa necessaria al processo di crescita del cittadino e dello studioso.

Una complessità di "saperi" che si trasforma in un documento semplice e completo.

La collaborazione alla redazione del volume vuole essere, dunque, una delle diverse sfide che l'Agenzia raccoglie per rappresentare il territorio e allo stesso tempo per consegnare al cittadino le proprie conoscenze rendendolo partecipe della bellezza che lo circonda.

Quella bellezza che deve essere tutelata per essere consegnata intatta alle future generazioni.

Ing. Luca Proietti
Direttore Generale A.R.P.A. Umbria

Presentazione

La realizzazione di questo Quaderno ha rappresentato per i ricercatori del Dipartimento di Chimica Biologia e Biotecnologie (Università degli Studi di Perugia) una importante collaborazione con ISPRA e anche una preziosa occasione per presentare quanto, a livello di ricerca scientifica, è stato fatto negli ultimi anni nel campo della Micologia.

Perché un Quaderno ISPRA sui funghi?

Già presentazioni che mi hanno preceduto sottolineano l'importanza di questo Regno di viventi negli ecosistemi. Infatti, negli ultimi anni, grazie alle ricerche dei micologi, si è osservato un crescente interesse nello studio tassonomico e ambientale dei funghi.

I funghi anche se non ce ne accorgiamo svolgono ruoli ecologici essenziali in tutto il mondo.

Alcuni hanno stretto simbiosi mutualistiche con le radici delle piante da centinaia di milioni di anni, altri formano delle simbiosi uniche con gli insetti e le piante: basti pensare al ruolo che hanno nella germinazione delle orchidee.

Senza i funghi, le nostre foreste sarebbero ricoperte dagli enormi cumuli di detriti legnosi e il ciclo dei nutrienti verrebbe gravemente interrotto.

Nello stesso tempo i funghi sono responsabili di gravi malattie per le piante e anche per l'uomo.

Sebbene non siano piante (non svolgono fotosintesi) e più strettamente imparentati con gli animali, i funghi sono solitamente trattati in libri di botanica e i botanici si sono assunti l'onere di studiarli al pari delle vere piante.

Le problematiche dei grandi cambiamenti globali hanno reso ancor più impellente la conoscenza della biodiversità fungina che, purtroppo, non è ancora inclusa con la dovuta importanza negli obiettivi della conservazione globale della biodiversità. Solo per fare un esempio, la Lista Rossa fungina dell'IUCN, prende in considerazione prevalentemente la flora e la fauna e, a fronte di migliaia di specie vegetali e animali, circa 600 sono le specie di funghi inserite in tale lista.

I funghi costituiscono una categoria di viventi ancora inesplorata, poco studiata in ambito accademico e dalle enormi potenzialità da utilizzare nei campi della conservazione degli ecosistemi, della riqualificazione ambientale e dell'industria medica e farmaceutica e in questa direzione si pone la realizzazione di questo Quaderno.

Prof. Roberto Venanzoni

Prof. Ordinario di Biologia vegetale e applicata (SSD BIO/03)

Dipartimento di Chimica, Biologia e Biotecnologie, Università degli Studi di Perugia

Presentazione

Il Circolo Micologico Naturalistico Perugino (CMNP) è un'associazione di volontariato che ha come principale fine, quello della divulgazione scientifica della Micologia e delle Scienze Naturali in genere.

Si ritiene che per permettere una comunicazione proficua tra la comunità scientifica e la popolazione, debba esserci un'interfaccia in grado di "tradurre" le importanti scoperte e le notizie che riguardano la salvaguardia dell'ambiente e la salute dell'uomo. È importante in sostanza che ci sia un'organizzazione in grado di comprendere le nuove informazioni e renderle fruibili a tutti coloro che, sebbene interessati alla materia, non possiedono le competenze, linguistiche e scientifiche, per poterle comprendere al meglio.

Il CMNP, attraverso le sue professionalità, ritiene di potersi configurare in questo "ponte comunicativo" tra la scienza e la popolazione.

In quasi 45 anni di vita associativa continuativa, il CMNP, ha portato a termine importanti attività, come:

- corsi di informazione finalizzati alla conoscenza dell'ambiente e al suo rispetto, nonché alla tutela della salute pubblica con l'informazione relativa ai funghi velenosi;
- mostre micologiche per illustrare concretamente quali sono i caratteri importanti nel riconoscimento dei funghi e per "tastare con mano" la biodiversità del nostro territorio, spiegando quanto è importante preservarla;
- interventi presso le strutture scolastiche che ne fanno richiesta, per informare i ragazzi, che sono particolarmente sensibili in queste fasce di età, con la speranza che riportino, all'interno delle proprie famiglie, le conoscenze acquisite,
- corsi di riconoscimento delle principali erbe spontanee per non disperdere il patrimonio di conoscenza sull'utilizzo in cucina delle principali specie commestibili e per conoscere le specie velenose più comuni,
- riconoscimento in sede dei funghi raccolti, mostrando le caratteristiche morfologiche per approcciarsi allo studio corretto della materia micologica, senza peraltro mai sostituirsi all'indispensabile ruolo che rivestono gli Ispettorati Micologici delle Aziende Sanitarie territoriali,
- serate di approfondimento in sede, con videoproiezioni, rivolte a coloro che sono desiderosi di conoscere l'argomento in maniera ancora più dettagliata,
- escursioni didattiche in habitat, con lo scopo principale di informare sul modo migliore per essere fruitori dell'ambiente rispettandolo pienamente ed evitando di lasciare traccia del nostro passaggio,
- mettere a disposizione di tutti i soci una ricca e aggiornata biblioteca,

-
- collaborare con la Scuola di Formazione per Micologi di Perugia che, dall'uscita del D.M. 686/96, svolge attività di formazione dei Micologi,
 - pubblicare libri, articoli scientifici, opuscoli informativi e altro materiale per favorire la divulgazione delle conoscenze,
 - collaborare con vari enti che ne facciano richiesta, in particolare con l'Università degli Studi di Perugia, con ARPA Umbria e anche altre associazioni di volontariato.

È iscritto ad A. Mi. Umbria, il coordinamento regionale di tutte le associazioni micologiche della regione Umbria, con le quali collabora nella realizzazione di incontri di studio, corsi di aggiornamento, mostre ed altre attività di ricerca.

Il CMNP tenendo fede ai dettami previsti dal suo statuto ha inteso offrire a titolo non oneroso, l'aiuto alla redazione del presente testo con il contributo delle conoscenze dei suoi micologi e delle immagini e disegni inedite dei suoi archivi fotografici.

Giancarlo Bistocchi
Presidente del Circolo Micologico Naturalistico Perugino
e Dott. Andrea Arcangeli
Responsabile scientifico del Circolo Micologico Naturalistico Perugino

Introduzione

Questo Quaderno ISPRA, dal titolo "La biodiversità micologica e la sua conoscenza. Funghi tra innovazione e tradizione", di cui scrivo con grande piacere l'introduzione, permette ai lettori di iniziare un viaggio di conoscenza nel mondo dei funghi. Non ha certo la pretesa di essere esaustivo, o di apportare novità all'amplessima letteratura micologica esistente, ma intende piuttosto essere uno strumento divulgativo atto a sollecitare una conoscenza di base, al fine di spingere all'approfondimento e a suggerire un rapporto corretto e responsabile con l'ambiente e con tutte le sue componenti.

Il Quaderno comprende una parte generale riguardante i gruppi che costituiscono il Regno dei Funghi, con descrizione delle diverse forme, colori, dimensioni e tossicità, per poi trattare il tema della biodiversità.

All'interno di una comunità vegetale i funghi svolgono fondamentali attività nella regolazione dei cicli energetici e nutrizionali e delle caratteristiche ed evoluzione dell'humus. A partire da queste osservazioni e innanzitutto dalla consapevolezza del ruolo dei funghi per la vita dell'uomo, la conservazione dei funghi è diventata un'esigenza fondamentale per assicurare un futuro a tutta l'umanità, e a poco a poco è diventata un'attività sempre più importante e articolata dal livello della ricerca scientifica a quello dell'applicazione e all'ambito normativo nazionale e sovranazionale.

Negli ultimi anni le Liste Rosse che elencano le specie rare e minacciate di estinzione a diversi livelli, sono diventate importanti strumenti di base per la conoscenza e la conservazione delle specie fungine. In questo Quaderno, a titolo esemplificativo, si riportano due casi di studio relativi all'Umbria: la Lista Rossa della sottodivisione O.E. Erikss. & Winka e dell'ordine Boletales E.-J. Gilbert.

Per il loro ruolo essenziale nel mantenimento della complessità e della biodiversità, in particolare degli ecosistemi terrestri, i funghi sono stati da tempo individuati quali possibili indicatori per il monitoraggio della biodiversità e dello stato di salute degli habitat.

Oggi giorno i funghi, grazie alla facilità della loro coltivazione e manipolazione, oltre a rappresentare una importante fonte di cibo, vengono impiegati dall'uomo in diversi settori industriali con delle enormi ricadute economiche. Una importante applicazione biotecnologica dei funghi è la *bioremediation*, il risanamento di terreni e falde acquifere inquinati. Tuttavia, elevate concentrazioni di metalli pesanti e di radionuclidi si possono trovare anche nei corpi fruttiferi dei basidiomiceti che crescono negli ambienti inquinati. Questo fenomeno non è ancora chiarito a livello fisiologico, ma è di notevole rilievo a causa del consumo diffuso dei funghi. Infine, il Quaderno si conclude con una parte sui Funghi e le Istituzioni. Alcuni capitoli (1, 2 e 4) sono corredati inoltre da box di approfondimento che toccano problematiche di base, di carattere tecnico-metodologico, ambientale e biotecnologico.

La presente pubblicazione, ricca di dati scientifici e di foto delle specie fungine e dei loro habitat, concretizza e valorizza il grande lavoro svolto da un qualificato gruppo di esperti afferenti al Gruppo di Lavoro per la Micologia della Società Botanica Italiana (Roberto Venanzoni, Paola Angelini, Grazia Cecchi, Simone Di Piazza, Mirco Iotti, Mirca Zotti), all'ARPA Umbria (Paolo Stranieri, Rosalba Padula) e all'ARPA Friuli-Venezia Giulia (Concettina Giovani), all'ISPRA (Pietro Massimiliano Bianco, Lorenzo Ciccarese, Stefano De Corso, Anna Di Noi, Massimo Diaco, Francesca Floccia), al Circolo Micologico Naturalistico Perugino (Andrea Arcangeli, Giancarlo Bistocchi), e al Gruppo Micologico e Naturalistico "R. Franchi" di Reggio Emilia – AMB (Luigi Cocchi). Un lavoro che ha consentito di raccogliere, ordinare e aggiornare informazioni e un gran numero di studi micologici, ora facilmente consultabili e accessibili da tutti nella sintesi offerta dal presente Quaderno.

Un grazie speciale a tutti coloro che hanno collaborato alla realizzazione di questo progetto.

Paola Angelini

Professoressa Associata di Botanica Ambientale e Applicata (BIO/03)

Dipartimento di Chimica, Biologia e Biotecnologie, Università degli Studi di Perugia

1 Il Regno dei Funghi

Di Paola Angelini, Rosalba Padula e Roberto Venanzoni

I funghi rappresentano il più ampio gruppo di organismi (dopo gli insetti) viventi diffusi sulla Terra. A oggi sono state riconosciute circa 100.000 specie di funghi; si stima tuttavia che il numero delle specie fungine effettivamente esistenti si aggiri tra 1.500.000 e 5.100.000; nuove specie vengono infatti regolarmente descritte, ogni anno, in ogni regione del mondo.^{1,2} La check-list dei funghi italiani comprende 4.198 taxa, più esattamente 3.889 specie, 8 sottospecie, 239 varietà e 62 forme, distribuite tra 439 generi del Phylum Basidiomycota.³

Tale elevata biodiversità, riflesso del successo evolutivo dei funghi, corrisponde a uno spettro estesissimo di attività, che conferiscono a questi organismi una notevole importanza economica per l'uomo. Alcuni di essi, infatti, possono essere impiegati in diverse tecnologie (intese come l'impiego di agenti biologici per la produzione di beni e servizi), come a esempio: la panificazione e la produzione di bevande alcoliche, la produzione di sostanze ad attività antibiotica, la produzione di enzimi (pectici, amilasi, chimosina), ecc.⁴

Altri funghi (o meglio i loro corpi fruttiferi) vengono utilizzati come alimento sia freschi che secchi (*Tuber P. Micheli* ex F.H. Wigg., *Boletus* L., ecc.).

I funghi freschi contengono circa il 90% di acqua, il restante 10% è costituito di glucidi (tra i quali il glicogeno), di lipidi e da una quantità molto variabile di proteine, oltre a vitamine e sali minerali.⁵

È anche stato ampiamente dimostrato che i funghi possiedono numerose molecole bioattive, particolarmente benefiche per l'uomo e gli animali; queste hanno un ruolo nel mantenimento di un buono stato di salute e possono contribuire al trattamento di varie patologie come il cancro, i disturbi neurodegenerativi, le infezioni virali, ecc. L'uso di questi composti nei nutraceutici e nella micoterapia è già in corso da diversi anni.⁶

L'apparato vegetativo (tallo) della grande maggioranza dei funghi è di tipo filamentoso, costituito cioè da filamenti denominati ife; l'insieme delle ife costituisce il micelio. Altri funghi presentano talli di tipo lievitoide, elementi unicellulari che si riproducono di solito per gemmazione [questo è a esempio il caso del "lievito" per eccellenza, l'ascomicete *Saccharomyces cerevisiae* (Desm.) Meyen].

Una caratteristica universale dei funghi è di essere organismi eterotrofi: non vi è traccia di fotosintesi in nessuno di essi e necessitano quindi di carbonio in forma organica. Possedendo pareti cellulari rigide, non possono tuttavia ingerire il cibo come gli animali (eterotrofi ingestivi), ma possono assumere esclusivamente piccole molecole in soluzione (monosaccaridi, aminoacidi, acidi organici a basso peso molecolare, ecc.) in grado di attraversare la parete: sono perciò definiti "eterotrofi assorbitivi". Tali sostanze semplici non sempre sono disponibili nell'ambiente, ma

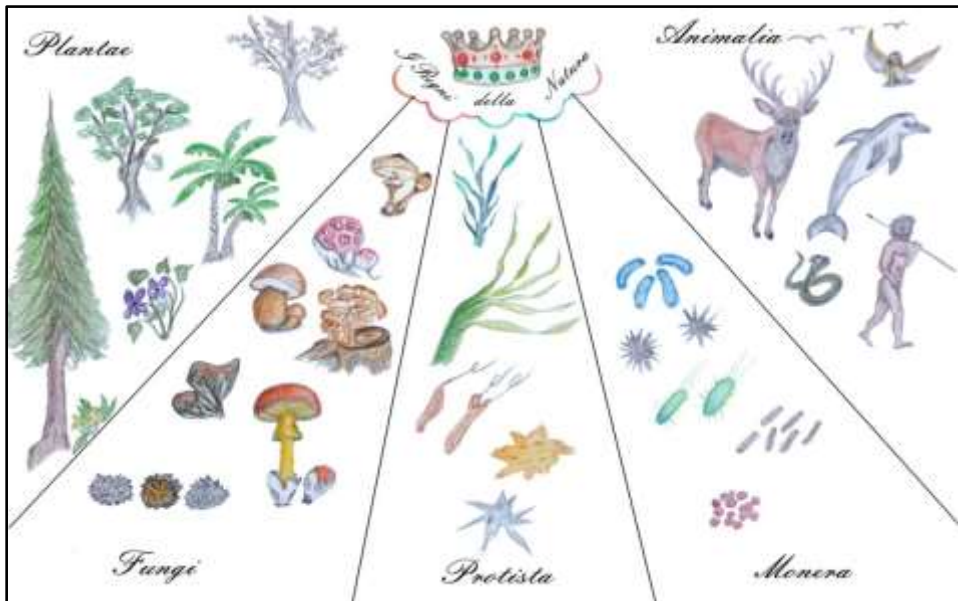
spesso sono ottenute attraverso la degradazione di molecole più complesse, quali disaccaridi, polisaccaridi, proteine o lipidi. La demolizione è effettuata attraverso la secrezione di enzimi digestivi (depolimerasi), rilasciati soprattutto in corrispondenza dell'apice ifale; nei funghi miceliari l'esplorazione dello spazio è dunque strettamente accoppiata alla nutrizione.⁷

In base alla forma in cui si trova il carbonio organico organizzato, si distinguono funghi saprotrofi, simbiotici e parassiti. I funghi saprotrofi si nutrono di materiale organico morto; rivestono in natura un ruolo essenziale nella decomposizione della materia organica e nel ciclo dei nutrienti: sono infatti i principali agenti della decomposizione della cellulosa (il polimero naturale più abbondante sul pianeta) e gli unici organismi in grado di mineralizzare (vale a dire, degradare completamente a CO₂ e acqua) la lignina, il secondo polimero naturale più abbondante e tra i più resistenti. Senza l'attività degradativa da parte dei microrganismi eterotrofi (funghi e batteri), gli elementi incorporati nella biomassa vegetale e animale rimarrebbero immobilizzati e quindi indisponibili, ciò che, nell'arco di pochi anni, porterebbe all'esaurirsi della vita sulla Terra.

Molti vivono nel suolo e nell'acqua, altri formano relazioni parassitarie o simbiotiche con piante o animali. Ovunque sono in gran numero: nel terreno e nell'aria, nei laghi, nei fiumi e nel mare, dentro e all'esterno di piante e animali, nel cibo, nell'abbigliamento e nel corpo umano.⁷

Questi organismi, di diverse forme e dimensioni, sono stati assegnati a un Regno a sé stante, il Regno dei FUNGI Bartling (Plant Life: 4, 1830), ben distinto dal regno delle Piante (Plantae) e quello degli Animali (Dominio degli Eucarioti).⁷

Figura 1. I cinque Regni. Disegno di Giancarlo Bistocchi



La dispersione nello spazio e nel tempo delle specie fungine è garantita da spore derivanti da riproduzione sessuale (meiospore) e/o asessuale (mitospore).

I funghi dei quali non si conosce la riproduzione sessuale, che quindi si riproducono solo asessualmente e presentano micelio settato, ricadono in un gruppo artificiale indicato una volta come Deuteromycotina o "Funghi Imperfetti" e attualmente definiti "Funghi mitosporici".

I funghi mostrano per lo più cicli aplonti, dove la fusione tra nuclei aploidi (cariogamia) porta all'unico elemento diploide, lo zigote. Esso va incontro immediatamente a meiosi, producendo di nuovo spore aploidi.

Nel regno dei funghi sono inclusi 5 (cinque) Phyla:⁸

1. Chytridiomycota Arx 1967: funghi soprattutto unicellulari, esclusivamente acquatici, con spore uniflagellate, saprotrofi, parassiti di piante e animali.
2. Zygomycota Moreau 1945: a questo Phylum appartengono oltre 1000 specie, prevalentemente di ambienti terrestri, che si comportano in generale da saprotrofi nel suolo o su materiale in decomposizione, sia di origine animale che vegetale. Alla classe Zygomycetes appartengono specie che presentano ife cenocitiche (senza setti) e sono presenti veri setti solo per delimitare aree miceliari funzionalmente diverse (strutture riproduttive, aree invecchiate).
3. Ascomycota (Berk.) Caval.-Sm., 1998: comprendono circa il 75% di tutte le specie di funghi censiti. Utilizzano detriti vegetali e animali comportandosi da saprotrofi, ma molte specie sono anche parassite o patogene di piante e animali, compreso l'uomo. Alcune specie sono eduli, di notevole interesse come i tartufi (*Tuber*) e le spugnole (*Morchella* Dill. ex Pers.). Comprendono specie che vanno dai lieviti unicellulari a specie a micelio settato, con forme varie più semplici o più complesse. La struttura caratteristica degli ascomiceti è l'asco, nel quale avviene la cariogamia e la divisione meiotica, con la formazione delle ascospore; queste possono essere in numero di quattro, di otto o multipli, in seguito a successive mitosi.
4. Basidiomycota RT. Moore, 1980: questo phylum comprende circa 30000, caratterizzate da ife tipicamente settate. Si tratta di funghi per lo più saprotrofi, ma anche parassiti, come a esempio, la ruggine delle piante (a esempio i generi *Puccinia* Pers. e *Phragmidium* Link) e il carbone del mais [*Ustilago maydis* (DC.) Corda]. Un numero molto elevato di specie è simbionte radicale (micorriza) di numerose famiglie di gimnosperme e angiosperme. Tra i Basidiomycota ci sono numerose specie velenose e mortali per l'uomo [es. *Amanita phalloides* (Vaill. ex Fr.) Link]. Il basidio è la struttura riproduttiva caratteristica dei Basidiomycota: si forma all'apice delle ife dicariotiche ed è portato dal basidiocarpo nello strato fertile detto imenio. Nel basidio ha luogo la fusione nucleare e la successiva meiosi. Successivamente i nuclei migrano negli sterigmi, restando quindi attaccati all'esterno del basidio; qui continuano la loro maturazione trasformandosi in basidiospore.

5. Glomeromycota C. Walker & A. Schüßler 2001: sono, per la maggior parte, funghi ipogei, in qualche caso epigei, dalla modalità di nutrizione simbiote obbligata; il micelio è settato e il setto appare solo per delimitare le spore o parti di ife morte. Formano micorrizze arbuscolari (AM) nelle cellule corticali delle radici di molte specie di piante, o endocitobiosi con altri organismi fotosintetici (es. cianobatteri).

Negli Ascomycota e Basidiomycota il ciclo è aplodicarionte e solo i miceli che contengono nuclei compatibili possono realizzare la riproduzione, con modalità diverse nei due phyla. Le fasi della singamia (plasmogamia e cariogamia) sono temporalmente separate, passando attraverso una fase in cui le ife contengono due nuclei di diversa sessualità (ife dicariofittiche); esse possono accrescersi in questo stato per giorni, mesi o anni. La cariogamia avverrà solo quando le condizioni ambientali saranno favorevoli e ha luogo in cellule specializzate dette aschi negli Ascomycota e basidi nei Basidiomycota, che porteranno alla formazione di ascospore e basidiospore.⁷

Figura 2. Immagini di aschi: A) asco di *Tuber borchii* Vittad. (campo scuro), B) aschi di *Tuber brumale* Vittad., C) aschi di *Peziza arvernensis* Roze & Boud., D) aschi di *Sarcosphaera coronaria* (Jacq.) J. Schröt. (campo scuro). Foto di Giancarlo Bistocchi

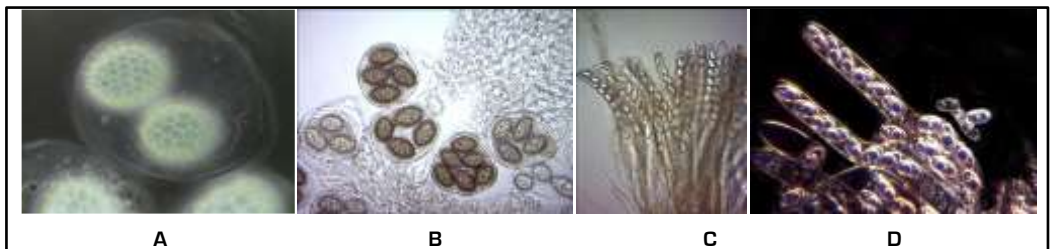


Figura 3. Immagini di basidi: A) basidi tetrasporici su filo lamellare, B) basidi tetrasporici con reazione amiloide delle spore di *Amanita phalloides* (Vaill. ex Fr.) Link, C) basidi trisporici di *Lycoperdon pratense* Pers., D) basidio esasperico di *Pisolithus arhizus* (Scop.) Rauschert. Foto di Giancarlo Bistocchi

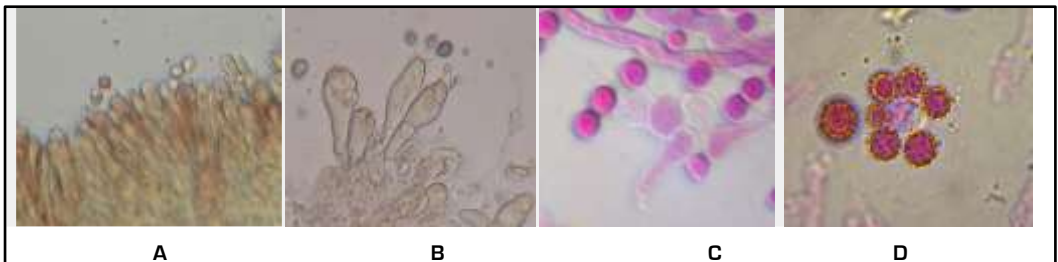
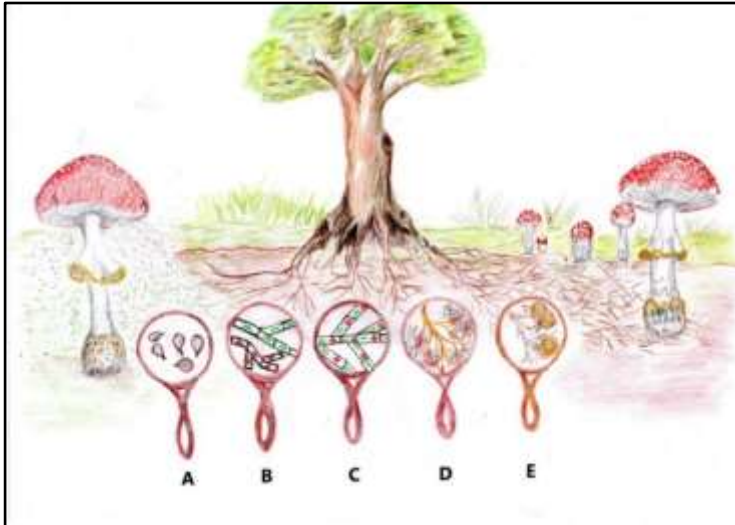


Figura 4. Ciclo vitale di un tipico basidiomicete (*Amanita muscaria* L.): spore visibili al microscopio (A), micelio primario sterile e mononucleato (B), micelio secondario fertile e binucleato (C), simbiosi micorizica (D), primordi fungini (E).
Disegno di Giancarlo Bistocchi



La riproduzione sessuale culmina, sia nei Basidiomycota che negli Ascomycota, nella formazione di strutture riproduttive differenziate, micro o macroscopiche, cioè di sporofori che nei Basidiomycota prendono il nome di basidiomi, mentre negli Ascomycota rappresentano gli ascomi.

Figura 5. *Amanita phalloides* (Vaill. ex Fr.) Link. Foto di Giancarlo Bistocchi



Il ciclo di vita dei funghi è influenzato dalla disponibilità delle risorse nutritive e da fattori ambientali, tra i quali hanno un ruolo prevalente la temperatura, l'umidità, il pH del mezzo, la luce e l'aerazione.

Per ogni fattore i funghi hanno un optimum al di sotto e al di sopra del quale subiscono un'influenza negativa nell'espletamento di tutte le funzioni vitali. Questi valori sono detti punti cardinali. In natura, comunque, i fattori fisici e chimici non influiscono mai singolarmente, ma in modo sinergico.⁸

1.1 Forme, odori, colori e dimensioni

Di Paola Angelini, Rosalba Padula e Roberto Venanzoni

L'affascinante mondo dei funghi trova il suo significato anche nella molteplicità di caratteri che colpiscono i nostri sensi. Le peculiarità macroscopiche immediatamente visibili al cercatore di funghi, nei boschi o in laboratorio, sono senz'altro la diversità di forme, profumi, colori e dimensioni del corpo fruttifero.

Nei Basidiomycota, il basidioma può assumere differenti forme. La più conosciuta dai cercatori di funghi è quella a cappello (pileo) e gambo (stipite) (tipica a esempio dei generi *Agaricus* L. e *Boletus* L.), ma in natura esistono altri tipi morfologici quali funghi a mensola es. *Fomes* (Fr.) Fr., *Trametes* Fr.), resupinati o lobati (es. *Serpula* (Pers.) Gray, *Tremella* Pers.), a trombetta (es. *Craterellus cornucopioides* (L.) Pers.), a pera o sfera (es. *Lycoperdon* Pers., *Calvatia* Fr., *Scleroderma* Pers.), a stella (es. *Geastrum* Pers.), a forma di fallo (es. *Phallus Junius* ex L., *Mutinus* Fr.), a coppa, a disco o a forma di nido (es. *Cyathus* Haller, *Crucibulum* Tul. & C. Tul.), a forma di clava [es. *Clavariadelphus* Donk, *Typhula* (Pers.) Fr.], a forma di corallo o simili a una spugna (es. *Ramaria* Fr. ex Bonord., *Hericium* Pers., *Sparassis* Fr.).⁹

Per i funghi che producono basidiomi con pileo e stipite, la variabilità delle forme, di colore, di dimensioni, di strutture e le reazioni macro-chimiche del pileo, del gambo e della carne a specifici reagenti, così come la presenza o l'assenza del velo sono caratteri tassonomici importanti.^{10,11}

Nei Basidiomycota il pileo può variare nelle differenti specie da 0,5 a 20(-60) cm in diametro. A seconda della sua posizione il pileo può essere unito allo stipite (con tipi di attacco centrale, eccentrico o laterale) o direttamente al substrato (privo di stipite).

La superficie superiore del pileo può essere brillante, secca, umida o appiccicosa, glabra, squamosa (con squame appressate o sollevate), vellutata o finemente ricoperta di polvere. A volte l'intera superficie può essere venata, rugosa, robusta, o irregolare.

La cuticola del pileo può essere facilmente spellata (come nel caso di *Suillus* Gray) o tolta con difficoltà o può essere del tutto non asportabile. A seconda della sua forma il pileo può essere convesso, emisferico, sferico, ovoidale, conico, cilindrico, appiattito, campanulato, umbonato (con umbone centrale), papillato (se l'umbone

centrale è molto piccolo e somiglia a un foruncolo), depresso, umbilicato (con una depressione con un piccolo umbone o tipo foruncolo al centro), imbutiforme (con una profonda depressione), ecc.

Il margine pileico può essere intero, irregolare o diviso; con o senza striature radiali; sottile o spesso; curvato all'esterno, diritto (acuto, ottuso, arrotondato) o involuto. Nelle fasi iniziali di sviluppo il margine è spesso involuto e poi diventa appiattito. L'imenoforo generalmente raggiunge il margine del pileo, ma è anche possibile che non lo raggiunga (questo tipo di margine è detto "sterile").

L'imenoforo può essere composto da lamelle (es. *Agaricus* L., *Amanita* Pers., *Marasmius* Fr.), tubuli (es. *Boletus*, *Suillus*), aculei (es. *Sarcodon* Qué. ex P. Karst., *Hydnum* L.), creste o altre forme.^{10,11}

Figura 6. *Marasmius wynneae* Berk. & Broome, imenoforo con lamelle e lamellule. Foto di Salvatore Silviani (a). *Suillus granulatus* (L.) Roussel, imenoforo con tubuli e pori. Foto di Salvatore Silviani (b). *Hydnum repandum* L., imenoforo ad aculei (c). Foto di Gianluca Mambelli.



L'attacco delle lamelle al gambo può essere:

- 1) libero (le lamelle non raggiungono il gambo e uno spazio circolare è visibile intorno alla parte superiore dello stipite), distante (quando la distanza tra le lamelle e il gambo è ampia) o remoto (quando la distanza è ancora maggiore);
- 2) a lamelle fuso-annesse (strettamente collegate allo stipite), a lamelle adnate (ampiamente attaccate), intaccato (appare come se una tacca è stata rimossa dalla parte più bassa della lamella nel punto di unione con il gambo), o triangolare;
- 3) decorrente (decorrono lungo il gambo) o a lamelle falcate-decorrenti (lamelle decorrenti che formano un arco verso l'interno e l'esterno del margine pileico).

Nelle specie con imenoforo a lamelle, il margine delle lamelle può essere intero (liscio o uniforme), dentato (con sporgenze appuntite simili a denti), serrato (con denti affilati tipo una sega), crenato (grossolanamente frastagliato) o ciliato (frangiato).^{10,11}

La carne del pileo può essere generalmente composta da due tipi di pseudotessuti, con ife generative e ife scheletriche o attaccate. Il principale pseudotessuto è composto da ife generative a parete sottile e pseudotessuti (scheletrici e a volte anche attaccati). A parte questi, i basidiomi di alcune specie possono avere ife laticifere (es.

il pileo del genere *Lactarius* Pers. ha ife che contengono lattice bianco o colorato). A questo bisogna sicuramente aggiungere un ulteriore aspetto relativo alla consistenza della carne che può essere coriacea, legnosa, ma anche spugnosa o gelatinosa. Al tatto, inoltre, un fungo può presentarsi liscio o vellutato, flaccido o pruriginoso. Caratteristiche che possono variare nel tempo e in base al substrato di crescita.^{10,11}

Il gambo (o stipite) è in molti casi la parte non riproduttiva del basidioma e sostiene il pileo, essendo differenzialmente rigido in varie specie. Il pileo è unito centralmente o eccentricamente al gambo.

Nelle specie in cui il pileo è direttamente attaccato al substrato, il gambo è assente. Il gambo è composto da ife interconnesse, fitte e disposte in senso verticale. Esso raggiunge l'imenoforo al di sopra del suolo (o altri substrati, specifici per un particolare fungo), facilitando così una migliore liberazione e dispersione delle spore.

Per la sua forma il gambo può essere sferico, a forma di uovo, a forma di pala, a forma di pala rovesciata, cilindrico, fusiforme, rastremato verso la base, radicante, ecc. Nelle specie con i pilei più pesanti la stabilità dell'intero fungo è assicurata dal graduale allargamento dello stipite dall'apice alla base o dal suo rigonfiamento bulboso alla parte basale.

Lo stipite può essere diritto o curvo, solido, cavo o cavernoso (a camere, con cavità separate), e in sezione trasversale-circolare, appiattito o scanalato. Per la sua tessitura, tipo di superficie o viscosità, lo stipite può essere: fragile o coriaceo; soffice, duro o legnoso; liscio, squamoso, verrucoso, fibrilloso o a superficie solcata; secco, appiccicoso o viscido.

In base alla presenza dei residui del velo parziale o universale, lo stipite può portare o non portare il così detto anello (residuo del velo parziale); e può essere con o senza volva, con collare o con cerchi verrucosi.

Per il pileo, così come per il gambo, è importante valutare i colori in modo appropriato, per cui si raccomanda l'uso di una scala di colori standard.^{10,11}

Nei basidiomiceti si possono distinguere i seguenti principali tipi di basidiomi:

- Basidiomi aperti (senza un velo) o semi-aperti (con un velo), formati da un pileo e da uno stipite o soltanto da un pileo. Il velo può essere universale o parziale. Il velo universale è una sacca coriacea-membranacea, che avvolge completamente il basidioma nelle prime fasi di sviluppo. Durante la crescita, il velo universale si rompe, lasciando residui alla base dello stipite. Questi residui possono essere a forma di volva a sacco, collare o cerchi di verruche o squame. Altri residui del velo possono essere presenti sul pileo in forma di granuli polverosi, squame o verruche di differente forma, dimensione e disposizione sul pileo.^{10,11}

Il velo parziale è membranoso, filiforme o a ragnatela, e negli stadi iniziali di sviluppo del fungo unisce il margine del pileo con la parte superiore dello stipe, ricoprendo lo strato imeniale che è situato sotto la superficie del cappello. Con la crescita del fungo, il velo parziale si rompe e parte di esso rimane sulla parte superiore dello stipe sotto forma di anello persistente o che scompare a completa maturazione. A volte sul pileo possono essere osservati residui squamiformi o filiformi del velo parziale. A seconda della presenza o assenza del velo, i funghi possono essere distinti in: specie con velo universale e velo parziale; specie con solo velo universale o solo velo parziale; specie senza velo parziale e universale.^{10,11}

Figura 7. *Amanita strobiliformis* (Paulet ex Vittad.) Bertill. Foto di Enrico Bini



-
- Basidiomi chiusi di forma sferica, a uovo, tipo tubero o pera, chiusi da uno strato protettivi (peridio). A questo gruppo appartengono i Gasteromiceti.^{10,11}
 - Basidiomi con forme simili ad arbusti o corallo (es. *Phaeoclavulina* Brinkmann) e a forma di bastone (es. *Clavariadelphus* Donk). Lo strato che porta le spore si trova sulla superficie esterna nella parte superiore del basidioma. Nei basidiomiceti, si possono osservare peculiari strutture morfologiche dette giunti a fibbia, cioè connessioni a forma di arco tra due cellule.^{10,11}

Figura 8. *Phaeoclavulina flaccida* (Fr.) Giachini. Foto di Salvatore Silviani



Il taglio del gambo o del cappello del fungo, oppure la frizione tra le dita delle varie parti del carpoforo, determina a volte, la produzione di profumi che possiamo ricondurre a odori facilmente identificabili, perché riportano a sensazioni olfattive conosciute. Queste possono essere piacevoli, come il profumo di miele, di muschio, di anice, di farina, di pane, di inchiostro, di cioccolato, di nocciola, di frutta. Ma non sono meno frequenti funghi completamente inodori oppure funghi che producono sensazioni olfattive sgradevoli, come gli odori amari di bruciato, di aglio, di muffa, di cimice, di cavolo o putrescenti o cadaverini. A volte gli odori possono essere molto penetranti. Anche questa caratteristica organolettica può modificarsi per cause climatiche o ambientali e con la maturazione o dopo la raccolta del fungo. Affinché l'analisi olfattiva possa essere un vero valore aggiunto nello studio micologico, è necessario sia presente in modo costante. Devono essere scelti individui giovani e non eccessivamente maturi. L'esame va eseguito prima di tutto sulla carne e poi sulla

parte imeniale, perché l'odore può essere localizzato in parti differenti. Sono considerati caratteri fondamentali nello studio micologico perché aiutano la determinazione, in quanto l'odore, se presente, è specie-specifico. D'altra parte, però, è un carattere soggettivo, perché può essere percepito in maniera non uguale da persone diverse.^{10,11}

Un altro aspetto, di poca importanza per la determinazione dei funghi, ma sicuramente molto impattante perché li rende facilmente visibili/invisibili nei campi o nelle foreste o su un arenile, è il colore. Il colore dei funghi varia a seconda di diversi fattori che possono riguardare l'età e il grado di umidità, per cui, generalmente, un fungo vecchio o che ha perso umidità assume una tinta più scura. Però la scala cromatica è troppo ampia per essere ugualmente interpretata da tutti gli osservatori. A esempio, il cappello del fungo può assumere i colori base che vanno dal bianco, al beige, al crema, al color ocra, o rosa, malva, violetto, verde, giallo, rosso, marrone, ma anche nero o grigio, e tutte le loro sfumature. La differenziazione cromatica è inoltre visibile anche sugli imenofori e sui gambi, e non necessariamente corrisponde al colore del cappello. Si creano dunque combinazioni di colori con sfumature percettibili solo a una attenta e severa osservazione. Per questo una classificazione precisa dei colori dei funghi è complicata e approssimativa. Inoltre, il colore non è solo una caratteristica esteriore del fungo, ma può appartenere anche alla carne del gambo o del cappello, che, quando vengono rotti o tagliati, modificano il colore neutro, chiaro, solitamente il bianco, verso un colore blu intenso o rosso, grigio o nerastro. Questa azione va sotto il nome di "viraggio" ed è determinata dalla presenza di particolari sostanze chimiche, che al contatto con l'ossigeno dell'aria si ossidano, cambiando appunto il colore.^{10,11}

Ma allora, perché i funghi sono colorati? Il mimetismo non è una risposta sufficiente. A dire il vero ancora oggi non si sa perché lo siano. Si possono formulare molte ipotesi, tutte a modo loro valide, ma i veri motivi, se esistono, sono ancora del tutto ignoti. Ma la natura non lascia niente al caso, e a noi piace pensare che non può essere trascurato un aspetto, la bellezza.

Come l'odore neanche il colore può essere considerato un parametro da utilizzare nella distinzione tra specie commestibili o tossiche.

Per quanto finora detto abbiamo ben compreso che la parte del fungo generalmente visibile è il corpo fruttifero, e proprio la dimensione di questo carpoforo ha dato modo a una grande platea di appassionati e di scienziati, di interessarsi in tempi storici alla micologia.

L'interesse per i funghi nasce molto prima dell'invenzione del microscopio nel XVII secolo, invenzione che ha permesso di riconoscere e identificare una gran varietà di specie fungine anche di dimensioni microscopiche. Tra i più piccoli funghi conosciuti vi sono ovviamente le muffe come *Penicillium chrysogenum* Thom tra i più grandi, invece, possiamo segnalare il fungo africano *Termitomyces titanicus* Pegler & Pearce il cui cappello può superare il diametro di un metro. Il fungo più grande attualmente

conosciuto, è *Armillaria ostoyae* (Romagn.) Herink che copre con le sue ife 890 ettari nelle Blue Mountains, nell'Oregon (Stati Uniti). Il carpoforo più grande ritrovato in Italia, invece, è la vescia gigante *Calvatia gigantea* (Batsch) Lloyd, un puffball ritrovato ad Arzachena in Sardegna e chiamato dai locali Monti Incappidatu.

L'avanzare degli studi scientifici e microscopici ha messo in evidenza che forme, dimensioni e colori sono caratteristiche che non appartengono solo alle peculiarità macroscopiche del fungo. L'uso corretto del microscopio ottico, infatti, ha reso visibile già con obiettivi 20X le diverse forme delle spore. In questo caso le differenze apprezzabili hanno come primo obiettivo la determinazione tassonomica della specie osservata. Tuttavia, non può non colpire la variabilità di queste cellule che, a 400 o 1000 ingrandimenti, mettono in evidenza anche eventuali ornamenti della parete sporale. Si ottiene così una vera e propria suddivisione delle spore in base alla loro forma: globosa (spore a forma sferica), ellittica (spore che hanno il profilo di una ellisse), citriforme (spore a forma di limone), lenticolare (spore con forma rotondeggiante e schiacciata come una lenticchia), larmiforme (spore a forma di goccia), gibbosa (spore che presentano strutture globulari), a stella (spore a forma di stella), troncata (spore con apice tronco), allantoide (spore a forma allungata, di würostel), poligonale (spore con forma asimmetrica), caliptrata (spore che sembrano ricoperte da un velo), reniforme (spore con la forma di un rene, un fagiolo). La forma delle spore, le dimensioni e i caratteri della loro parete, la presenza o assenza del poro germinativo sono importanti caratteri tassonomici. Le spore possono essere lisce o ornamentate (verrucose, echinulate, striate, verrucoso-reticolate, ecc.). Per alcune specie di generi come *Russula* e *Lactarius*, l'ornamentazione delle spore è un importante carattere diagnostico.^{12,13}

Di particolare interesse per l'identificazione delle specie fungine è anche il colore delle spore che si può valutare dopo aver fatto depositare le spore su un foglio di carta (spore in massa).

Il colore delle spore in massa può variare da bianco a crema, da rosa a rosso, da ocraceo ad argilloso, bruno rossastro, porpora o nero. Dal punto di vista sistematico, basandosi sulla colorazione della sporata possiamo suddividere alcuni funghi in leucosporei, con sporata da bianca a crema, come nei generi *Amanita*, *Armillaria* (Fr.) Staude, *Cantharellus* Adans. ex Fr., *Clitocybe* (Fr.) Staude, *Hygrocybe* (Fr.) P. Kumm., *Lepiota* (Pers.) Gray, *Lactarius*, *Lyophyllum* P. Karst., *Marasmius*, *Pleurotus* (Fr.) P. Kumm., *Russula* Pers. e *Tricholoma* (Fr.) Staude; ocroporei, con sporata da ocrea a bruna, ruggine, tabacco, come nei generi *Agrocybe* Fayod, *Boletus*, *Cortinarius* (Pers.) Gray, *Hebeloma* (Fr.) P. Kumm., *Inocybe* (Fr.) Fr., *Paxillus* Fr., *Pholiota* (Fr.) P. Kumm., e *Tubaria* (W.G. Sm.) Gillet; rodosporei, con sporata rosata, rosa salmone, rossa, come nei generi *Clitopilus* (Fr. ex Rabenh.) P. Kumm., *Entoloma* (Fr.) P. Kumm., *Pluteus* Fr., *Rhodocybe* Maire, e *Volvariella* Speg.; iantinosporei, con sporata bruno-violacea, porpora, come nei generi *Agaricus* L., *Hypholoma* (Fr.) P. Kumm., *Psilocybe* (Fr.) P. Kumm., *Stropharia* (Fr.) Quéll.; melanosporei, con sporata da bruno-nerastro a nera,

come nei generi *Coprinus* Pers., *Gomphidius* Fr., *Panaeolus* (Fr.) Quél. e *Psathyrella* (Fr.) Quél.^{12,13}

Figura 9. *Agaricus campestris* L. Foto di Giancarlo Bistocchi



Un buon microscopio ottico o, un microscopio elettronico, permettono anche di misurare le spore. La maggior parte dei funghi hanno spore con dimensioni comprese tra 1 e 300 μm . Per una corretta analisi vanno prese in considerazione sia la lunghezza che la larghezza. Un esempio di specie fungina con spore molto piccole è la *Phaeoclavulina liliputiana* Gonzales-Avila & Estrada, con spore di lunghezza compresa tra 4–6 μm e larghezza compresa tra 2–3 μm . Tra le spore più grandi possiamo ricordare quelle della *Macrolepiota procera* (Scop.) Singer, comprese tra i 12-18 μm di lunghezza e 8-12 μm di larghezza. Spore giganti, invece, sono considerate quelle della *Ptychoverpa bohemica* (Krombh.) Boud. con lunghezze comprese tra i 60-80 μm e larghezze di 15-20 μm .^{12,13}

Le spore o le loro ornamentazioni possono presentare eventuali reazioni chimiche a particolari sostanze. A esempio, si parla di spore amiloidi se diventano azzurre-blu con il reattivo di Melzer (sostanza a base di iodio), oppure di spore destrinoidi se queste diventano rosse sempre col Melzer; le spore cianofile, invece, sono quelle che si colorano intensamente di ciano con il blu cotone (reattivo a base di acido lattico e blu di metile), mentre sono metacromatiche o ortocromatiche le spore che reagiscono con particolari colorazioni in presenza del blu di cresile. In questo caso la colorazione delle spore dipende dalla freschezza del reattivo, dal tempo di contatto con il reattivo e dallo spessore del preparato.^{12,13}

Figura 10. *Agaricus xanthodermus* Genev. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 11. *Boletus edulis* Bull. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 12. *Inocybe geophylla* P. Kumm. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 13. *Chlorophyllum rhacodes* (Vittad.) Vellinga. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 14. *Tricholoma terreum* (Schaeff.) P. Kumm. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 15. *Clathrus ruber* P. Micheli ex Pers. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 16. *Cyathus striatus* Willd. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 17. *Geastrum triplex* Jungh. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 18. *Hydnum albidum* Peck. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 19. *Macrolepiota procera* (Scop.) Singer. Foto di Giancarlo Bistocchi



Negli Ascomycota, gli ascomi possono essere epigei o ipogei (strutture chiuse, tuberiformi dette cleistotecii).^{12,13}

L'ascoma di *Morchella* Dill. ex Pers. è un apotecio. Si tratta di un pileo di forma sferica, sferica-allungata o conica, con superficie esterna a nido d'ape, e una struttura tipo stipite, rigida. Sulla superficie superiore si trova lo strato imeniale che contiene gli aschi, strutture portanti le ascospore (Figura 20).

La forma ascogena di *Xylaria hypoxylon* (L.) Grev. presenta una superficie granulosa, con numerosi periteci neri dotati di aschi ottosporici (Figura 21). Gli ascomi dei tartufi (*Tuber* P. Micheli ex F.H. Wigg.) sono ipogei e generalmente di forma subglobosa.

Figura 20. *Morchella semilibera* DC. Foto di Enrico Bini



Figura 21. *Xylaria hypoxylon* (L.) Grev. Foto di Enrico Bini



1.2 I funghi commestibili e i funghi tossici

Di Rosalba Padula

L'interesse per il mondo dei funghi è molto spesso determinato dal personale coinvolgimento che abbiamo nell'apprezzerli in cucina. Se non riusciamo a trattenerci dal raccoglierli, è forse perché ne conosciamo la prelibatezza in tavola, ma bisogna esser ben consapevoli che per definire un fungo commestibile è assolutamente necessario sapere che nel termine di commestibilità si nasconde l'assenza del principio tossico. Quasi tutti i funghi allo stato naturale, infatti, possiedono elementi tossici o principi ipersensibilizzanti. Tale presenza è correlata sia a fattori intrinseci delle varie specie (tossicità diretta) sia all'habitat del fungo (tossicità indiretta). Bisogna tener presente che le informazioni di commestibilità/tossicità sono oggi sconosciute per la maggior parte dei funghi noti. Raccogliere un fungo nei campi coltivati dove è possibile l'uso dei pesticidi, o in vicinanza di arterie ad alto

scorrimento di traffico o in prossimità di zone industriali, urbane e minerarie, o adiacenti alle discariche o in luoghi dove possono perdurare effetti di inquinamento radioattivo, deve suggerire molta attenzione perché in questo caso il pericolo non è dato dal fungo ma dalle condizioni di degrado dell'ambiente in cui esso cresce. Altri elementi che condizionano la commestibilità sono riferibili alla consistenza del carpoforo, che, se coriaceo o legnoso, o perché ha aspetto non piacevole, o perché emana odori sgradevoli o repellenti, può non risultare appetibile anche se non si riscontrano elementi certi di tossicità. Inoltre, il concetto di commestibilità è condizionato anche dalle modalità di conservazione, di cottura, dalle dosi assunte e dalla soggettività del consumatore.¹⁴

La commestibilità deve essere dichiarata da esperti ricercatori, enti scientifici, micologi specializzati e non da consuetudini e tradizioni che non hanno valore scientifico e che possono indurre a informazioni errate o comportamenti superficiali. A tal proposito risulta fondamentale il lavoro svolto dagli Ispettorati Micologici delle ASL disponibili su tutto il territorio nazionale.¹⁴

Figura 22. *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm. Foto di Giancarlo Bistocchi



Box. I funghi che illuminano il bosco: il misterioso fenomeno della bioluminescenza

Di Andrea Arcangeli

Introduzione

Sono solo poche decine le specie di funghi che presentano il curioso e affascinante meccanismo biochimico della luminescenza, fenomeno che invece è abbastanza diffuso nel regno animale. Si suppone che questo stratagemma sia finalizzato a richiamare l'attenzione degli insetti che, raggiunto il fungo e muovendosi nei dintorni dello stesso, raccolgono le spore che andranno successivamente a diffondere in nuovi territori da colonizzare.¹⁵

Questi funghi si comportano generalmente da saprotrofi e crescono su vecchi tronchi marcescenti o su manufatti degradati in legno.

Il corpo fruttifero è la parte visibile luminescente, ma è interessante constatare che anche il micelio emette una luce visibile, inoltre, quando si tratta di funghi lignicoli il cui micelio si insinua sotto la corteccia dell'albero ospite, anche il legno risulta a sua volta luminescente. Tale fenomeno indicato come "foxfire" può coincidere con i noti "fuochi fatui". La luce emanata da questi funghi è una luce fredda in quanto non rientra nello spettro degli ultravioletti né in quello degli infrarossi, con un'irrisoria dispersione di energia sotto forma di calore. Si differenzia inoltre dalla chemiluminescenza in quanto in quest'ultima categoria i processi implicati non prevedono l'intervento di enzimi.

Cenni storici

Una delle prime testimonianze relative al fenomeno dei funghi visibili nelle buie notti, è quella di Aristotele (circa 300 anni A.C.) che definiva "fuoco freddo" la corteccia di un albero o un bastone che, colonizzati da funghi bioluminescenti, sembrava fossero illuminati da un fuoco che non provocava però sviluppo di calore.

Citazioni di questi funghi arrivano anche da Gaio Plinio Secondo, meglio noto come Plinio il vecchio, famoso autore latino che documenta questo strano fenomeno nella sua opera monumentale "Historia naturalis", 37 volumi scritti nel 70 D.C. Sebbene Plinio descriva in maniera approfondita la bioluminescenza in diverse specie animali (in particolare meduse e lucciole), riguardo i funghi è facile pensare a un falso storico in quanto nel Cap. XIII del libro XVI, l'attuale *Fomitopsis officinalis* (Vill.) Bondartsev & Singer descritto come "fungo bianco, odoroso, utilizzato in medicina che nasce sugli alberi di cupulifere in Gallia e che ha la proprietà di essere luminescente al buio", in realtà è un fungo che cresce esclusivamente su *Larix decidua* Mill. (larice) e non presenta fenomeni di luminescenza. Questo si può spiegare con il fatto che questa specie poco comune ma dagli importanti usi medicinali, era oggetto di lauti guadagni, pertanto, i raccoglitori non avevano interesse a divulgarne la provenienza (Lazzari, 1973).

Nel 1555 nell'opera principale "Hystoria de gentibus septentrionalibus" lo storico e cartografo svedese Olav Manson (latinizzato in Olaus Magnus), scrive in uno dei 22 libri, che, per avere una debole luce da seguire per il cammino negli oscuri sentieri della Scandinavia, venivano impiegati paletti di legno infissi nel terreno e colonizzati da funghi in grado di renderli visibili al buio.

Nei primi anni del 1900 il farmacologo francese Raphael Dubois è stato il primo a isolare e studiare le componenti necessarie per le reazioni luminose, che chiamò conseguentemente: luciferina e luciferasi; sulla scia di questa ricerca Green e Mc Elroy estrassero e purificarono per la prima volta la luciferasi dalle lucciole.

Nel 1939 a Villa de Natividade, un piccolo paese dell'entroterra brasiliano, il botanico inglese George Gardner osservando lungo le strade alcuni bambini giocare con un pezzo di legno che emetteva inusuali luminescenze, scoprì che questo era colonizzato da un fungo. L'anno successivo Gardner pubblicò un articolo sulla luminescenza fungina, e questo fungo in suo onore fu chiamato *Agaricus gardneri* Berk. In tempi più recenti (anno 2009) Dennis Desjardin con i colleghi ricercatori della State University di San Francisco ha sviluppato nuovi studi morfo-botanici, chimici e biomolecolari di *Agaricus gardneri*, comprovandone una nuova collocazione tassonomica nel genere *Neonothopanus* in quanto gli studi relativi al DNA hanno dimostrato essere "sister" di *Neonothopanus nambi* (Speg.) R.H. Petersen & Krisai.

Durante la guerra del Vietnam legni marcescenti invasi da funghi con micelio bioluminescente, venivano posti sopra gli elmetti dei soldati per segnalare in modo discreto la propria presenza ai compagni nelle fitte foreste, senza farsi individuare dai nemici.

Nel 2017 un team di ricercatori di caratura internazionale, provenienti da importanti università della Russia, del Brasile e del Giappone, ha scoperto il meccanismo di azione della "Bioluminescenza fungina" grazie allo studio su due specie, *Neonothopanus gardneri* e *N. nambi*, molto comuni rispettivamente in Brasile e Vietnam. In questo lavoro viene dimostrato per la prima volta che, la luciferasi, reagendo con altri pigmenti, può modificare colore e intensità della luce risultante.

È possibile che in futuro tale proprietà possa essere sfruttata dall'uomo per interessanti applicazioni, per esempio come gene reporter nella ricerca genetica. Di notevole importanza è stato l'isolamento del gene codificante per l'enzima luciferasi della lucciola e la sua introduzione nel genoma di ceppi batterici di *Escherichia coli* (Migula 1895) Castellani and Chalmers, creando un solido presupposto per l'applicazione della Bioluminescenza nel campo biomedico.¹⁶

Il meccanismo

Oggi sappiamo che il meccanismo che in generale nel mondo dei viventi sottende al fenomeno della luminescenza e che trasforma l'energia chimica in energia luminosa, è determinato dalla luciferina che reagisce con l'ossigeno (o con acqua ossigenata) e, grazie alla mediazione dell'enzima luciferasi e all'ATP, forma una sostanza, la

ossiluciferina, in grado di rendere il fungo luminoso. La ossiluciferina che è in grado di emettere luce continua o intermittente essendo un intermedio elettronicamente eccitato e instabile, tende anche a ritornare allo stato fondamentale provocando il rilascio di un fotone di luce ricostituendo così la luciferina, pronta per ripetere questa straordinaria reazione. Gli animali sono dotati di veri e propri organi luminosi detti "fotofori" assenti nei funghi, nei quali la luce è prodotta dall'intero organismo. Nei funghi la luce è generalmente di colore verde e ha una lunghezza d'onda compresa tra 510 e 520 nm.

Tutte le luciferasi che si conoscono appartengono alla categoria delle ossigenasi, cioè quegli enzimi che per favorire le reazioni utilizzano l'ossigeno molecolare per ossidare un substrato (luciferina).

Di contro nei funghi studiati non sono state isolate vere e proprie luciferasi, ma un complesso enzimatico che include enzimi solubili e insolubili; la lampteroflavina partecipa alla emissione di luce, è stata inoltre trovata una reduttasi NADH dipendente, coinvolta nella riduzione della luciferina.

È necessario mettere in relazione la bioluminescenza con l'attività metabolica della cellula fungina e l'ambiente di crescita, per esempio le caratteristiche chimiche del terreno, la luce, la temperatura, l'indice igroscopico e la concentrazione di ossigeno concorrono a ottenere un effetto più o meno marcato.¹⁷

Quali specie presentano questo fenomeno?

Omphalotus olearius (DC.) Singer è forse in Italia il fungo più famoso per questa curiosa caratteristica di essere visibile nel bosco al buio; questa specie nei paesi anglosassoni è chiamata "Jack" o "lantern", mentre nei paesi francofoni è conosciuta come "faux-clitocybe lumineux", in Italia è semplicemente "il fungo dell'olivo", una specie comune responsabile di numerosi casi di intossicazione.¹⁵

Neonothopanus gardneri, chiamato "flor de coco" negli stati di Goias, Piaui e Tocantins nel centro del Brasile, cresce tra le fronde in decomposizione delle Palme, in particolare *Attalea humilis* Mart. ex Spreng., *A. funifera* Mart. e *A. speciosa* Mart. Si tratta di un fungo giallo, carnoso, con pileo umbonato convesso nei giovani esemplari, fino ad assumere, a completa maturità, un aspetto imbutiforme. Le lamelle sono decorrenti, spaziate, concolori al cappello, gambo fibroso. Sono proprio le lamelle le parti del fungo che brillano di una luce verde facilmente riconoscibile durante le notti di luna nuova.¹⁵

Nel genere *Mycena* alcune specie dei climi temperati hanno mostrato una debole luminescenza, in altre specie tipiche dei climi tropicali, invece, l'effetto della bioluminescenza è molto più visibile anche a occhio nudo. *Poromyцена manipularis*, ad esempio, emette una luce che risulta visibile fino a 40 metri di distanza.

Mycena (Pers.) Roussel, *Armillaria* (Fr.) Staude, *Pleurotus* (Fr.) P. Kumm., *Panellus* P. Karst., *Neonothopanus* R.H. Petersen & Krisai e *Omphalotus* Fayod, sono solo alcuni

dei generi all'interno dei quali si trova il maggior numero di specie che, ad oggi, hanno manifestato fenomeni bioluminescenza.¹⁵

Figura 23. Omphalotus olearius (DC.) Singer. Foto di Giancarlo Bistocchi



Quale futuro per i funghi bioluminescenti

I funghi bioluminescenti crescono soprattutto all'interno di boschi umidi e foreste tropicali, ambienti facilmente ritrovabili in diverse zone geografiche come Taiwan, Sri Lanka, Polinesia, Indonesia, le isole di Hachijo e Bonin in Giappone. A causa della loro stessa fragilità e delle masse turistiche sempre più numerose che creano un forte impatto antropico nei delicati ambienti in cui vivono, purtroppo rischiano l'estinzione. Per crescere e sopravvivere, infatti, questi funghi necessitano di temperature intorno ai 27°C, con un tenore di umidità moderatamente elevato. Attualmente, al fine di ridurre il rischio di estinzione, la comunità scientifica sta studiando come riprodurli in laboratorio.

Figura 24. Colture di *Panellus stipticus* (Bull.) P. Karst. in terreni a base di agar e brodo di patate. Foto di Alberto Melappioni

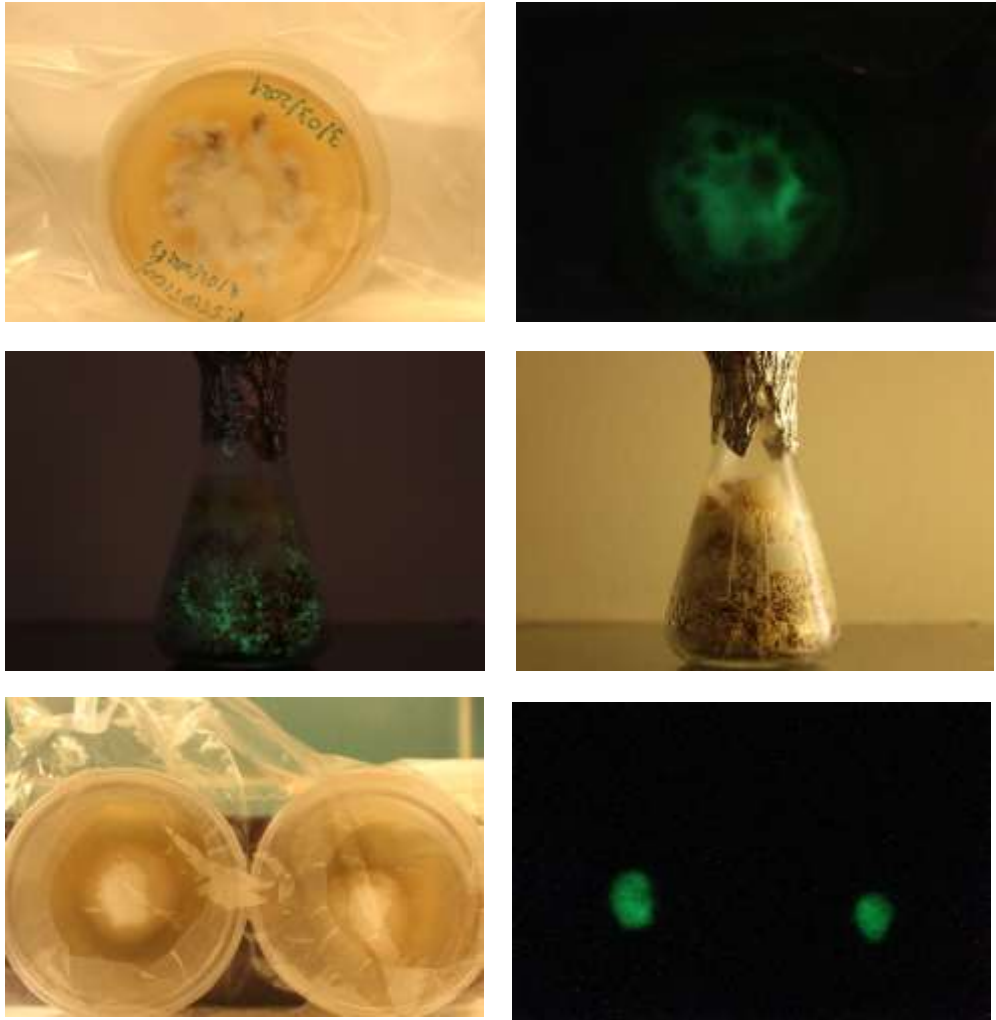


Figura 25. *Omphalotus olearius* (DC.) Singer. Foto di Alberto Melappioni



Box. Paleomicologia

Di Rosalba Padula e Alfredo Vizzini

La disciplina paleontologica legata allo studio dei funghi (paleomicologia) è molto recente.^{18,19}

Nasce come scienza codificata e strutturata solo negli anni '70 del secolo scorso. L'interesse è stato sicuramente ritardato da pregiudizi e scarse conoscenze dovute, a esempio, alla difficoltà di riconoscere le strutture fungine in un fossile a volte scambiato per una pianta o un'alga; oppure il preconcetto che i funghi potessero essere troppo fragili ed effimeri per potersi conservare allo stato fossile anche perché, in effetti, gli ambienti di fossilizzazione non sono semplici.

Secondo i dati più recenti, il fungo fossile a lamelle (agaricoide) più antico è il *Gondwanagaricites magnificus* (Hedges et al. 2017), unico nella sua conservazione perché ritrovato in una pietra calcarea, mentre tutti gli altri funghi agaricoidi fossili finora noti sono stati rinvenuti come inclusioni nell'ambra (Halbwachs 2019) ad esempio *Archaeomarasmius leggetti* Hibbett et al. 1995, 1997, *Aureofungus yaniguaensis* Hibbett et al. 2003, *Coprinites dominicana* Poinar e Singer 1990, *Gerontomyces lepidotus* Poinar 2016 e *Protomyцена electra* Hibbett et al. 1995, 1997.^{20,21} L'eccezionale reperto di *G. magnificus* risale al Cretaceo inferiore, circa 115 milioni di anni fa, ed è stato recentemente scoperto nell'attuale Brasile da un team di ricercatori nordamericani.²⁰ Il fungo fossile, alto 5 cm, ha una forma molto simile a quella dei funghi lamellati attuali (agarici, con cappello e gambo). Poiché si ritiene fosse originario del Gondwana, i ricercatori hanno voluto celebrare l'epoca e il luogo chiamandolo *Gondwanagaricites magnificus*, che significa "magnifico fungo a lamelle fossile del Gondwana".

Uno dei fossili più antichi di probabile natura fungina è il *Tortotubus protuberans* risalente al Devoniano cioè circa 440 milioni di anni fa (periodo che coincide con quello della colonizzazione della terraferma da parte di alcuni organismi). L'attribuzione è stata possibile grazie all'individuazione di fascetti di ife dotate di setti perforati e di strutture simili a conidi. Lo studio è partito dal ritrovamento di una serie di microfossili estratti a New York, Svezia (Gotland) e Scozia, tutti più piccoli della sezione di un capello umano e interpretati da alcuni autori come cordoni miceliari di specie di Ascomycota/Basidiomycota (Dykaria) o, in modo più cauto, come strutture di origine fungina, senza arrivare all'attribuzione del phylum.^{22,23}

Palaeancistrus martinii è stato considerato per molto tempo invece il fossile più antico sicuramente attribuibile a un basidiomicete (Krings et al. 2011). Il suo ritrovamento è avvenuto all'interno del rizoma di una felce fossile nordamericana (*Zygopteris illinoensis*) datato circa 305 milioni di anni fa.^{25,26} *P. martinii* consiste di un micelio provvisto di clamidospore e di "unioni a fibbia", quest'ultime strutture esclusive dei funghi del phylum Basidiomycota. Recentemente però Krings et al.²⁴ hanno descritto

ife provviste di unioni a fibbia nel rachide della felce fossile *Botryopteris antiqua* della Francia centrale, risalente a circa 330 milioni di anni fa.

Il reperto forse più particolare fa riferimento al genere *Prototaxites*, risalente al tardo Devoniano, cioè tra i 430 e il 360 milioni di anni fa. All'interno di questo genere, che comprende 14 specie diverse, vi sono funghi che formano strutture di grandi dimensioni (fino a 8 m d'altezza e 1 m di diametro), rinvenuti in Nord America, Nord Africa, Europa, Asia e Australia, che da lontano, dovevano apparire come imponenti tronchi d'albero e tra i più grandi organismi viventi del tempo.²⁷ Inizialmente questi fossili vennero considerati come dei tronchi di conifere simili a quelli di *Taxus* (da cui il nome *Prototaxites*).²⁸ Carruthers²⁹, Penhallow³⁰ e Jonker³¹ li avevano invece interpretati come enormi talli algali. Il primo a ipotizzarne la natura fungina (senza però fornire nessuna argomentazione) è stato Church³², che fu a lungo ignorato fino all'opera di Hueber³³ che, sulla base della presenza in *Prototaxites loganii* (specie tipo del genere) di strutture ifali paragonabili a quelle degli attuali rappresentanti delle *Polyporaceae*, propose di assimilare le specie di *Prototaxites* a dei basidiomiceti giganteschi. Dopo le analisi di Hueber, la posizione filogenetica delle specie di *Prototaxites* è stata a lungo dibattuta,^{19,27,34-41} anche se l'ipotesi di Hueber³³ sembrerebbe essere la più accreditata.^{19,27,34,41}

Molto di recente per *Prototaxites taiti* (specie originaria della Scozia) è stata riconosciuta una affinità con gli Ascomycota in quanto sono state osservate strutture imeniali formate da aschi polisporici e sottili parafisi plurisetate.²⁷

Figura 26. Rosellinites areolatus, fossile simile alle attuali specie del genere Rosellinia De Not. (Xylariales, Sordariomycetes, Ascomycota). Proviene dalla successione del Messiniano evaporitico di Pollenzo (Bra, Cuneo), età circa 5,8-5,6 milioni di anni. Barra = 5 mm. Foto di Edoardo Martinetto, Prof. del Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino



Box. Umbria: terra di tartufi per eccellenza

Di Paola Angelini, Andrea Arcangeli, Giancarlo Bistocchi e Roberto Venanzoni

I tartufi sono funghi ipogei appartenenti al genere *Tuber* P. Micheli ex F.H. Wigg. (fam. *Tuberaceae* F. Berchtold & J. Presl, div. Ascomycota) che compiono il loro ciclo vitale interamente sottoterra. Sono dei micorrizici obbligati, infatti, per poter completare il loro ciclo vitale, i tartufi, necessitano di formare l'associazione micorrizica con la radice di una pianta opportuna.

L'Italia, insieme a Francia e Spagna rappresenta uno dei principali produttori di tartufi. In questi paesi, che presentano caratteristiche pedo-climatiche ideali per la crescita spontanea dei tartufi più pregiati, da sempre, tradizionalmente, questi vengono raccolti e consumati.⁴²

L'Umbria, terra di tartufi per eccellenza,⁴³ si caratterizza per la presenza di tutte le specie di tartufo che possono essere raccolte e commercializzate in Italia secondo la legge quadro nazionale n. 752/85: *Tuber magnatum* Pico (il tartufo bianco pregiato), *T. melanosporum* Vittad. (il tartufo nero pregiato), *T. borchii* Vittad. (il tartufo bianchetto o marzuolo), *T. aestivum* (Wulfen) Spreng. (il tartufo estivo o scorzone, anche nella forma *T. uncinatum* Chatin), *T. brumale* Vittad. (il tartufo nero d'inverno, anche nella varietà *moschatum*), *T. macrosporum* Vittad. (il tartufo nero liscio) e *T. mesentericum* Vittad. (il tartufo nero ordinario). Tra queste, *T. magnatum*, *T. melanosporum*, *T. borchii* e *T. aestivum* sono le specie di maggiore pregio le cui quotazioni di mercato sono decisamente superiori a quelle degli altri tartufi commercializzati in Italia e in Umbria. Per la sua particolare orografia e la natura calcarea della quasi totalità dei terreni, l'Umbria può ritenersi una grande tartufaia naturale.⁴⁴

***Tuber aestivum* Vittad.**

Nomi comuni

Gran Bretagna: Summer white truffle; Italia: Scorzone; Francia: Truffe de la Sainte Jean, Truffe d'été, truffe de Bourgogne (forma autunnale).

Descrizione

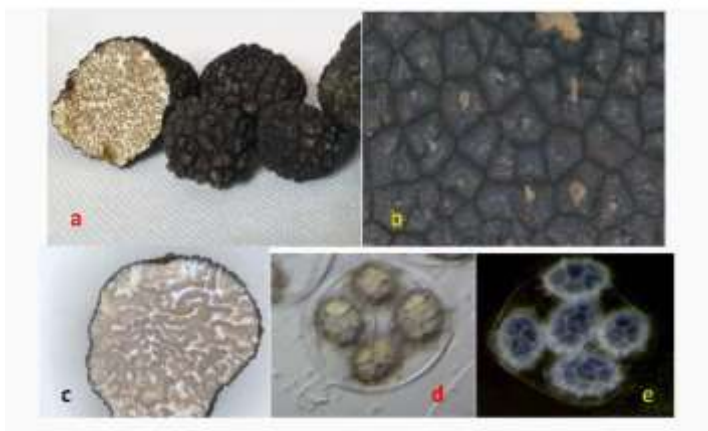
Ascoma: globoso, irregolare, da (1)3 a 10(14) cm, spesso con una concavità alla base poco pronunciata, sodo e compatto.

Peridio: superficie esterna di colore bruno-nerastra, con verruche piramidali a 4–6(7) lati, larghe alla base da 2 a 12 mm e alte da (0,5–)1–2(5) mm, con un apice depresso o concavo e con creste radicali e piccole striature trasversali parallele (Figura 27 a, b).

Gleba: soda e carnosa, dapprima bianca, poi di colore ocra-brunastro; è percorsa da numerose vene, bianche, sottili e variamente anastomosate (Figura 27 c). Gli aschi sono globosi o subglobosi, con brevi peduncoli o sessili, dimensioni 80–100 × 55–75 µm, contenenti (1)3–5(6) spore (Figura 27 d, e).

Spore: reticolato-alveolate, subglobose o largamente ellissoidali, di colore oca-brunastro, con dimensioni $(18-24-35(-40) \times (15-18-27(-36) \mu\text{m}$, esclusa l'ornamentazione. Gli alveoli sono irregolari, larghi $4-10 \mu\text{m}$ e profondi $2-5(-7) \mu\text{m}$, (Figura 27 d, e).

Figura 27. *Tuber aestivum* Vittad.: (a) ascocarpi (foto di Giancarlo Bistocchi); (b) superficie del peridio con evidenti verruche (foto di Giancarlo Bistocchi); (c) sezione gleba: vene sterili chiare, vene fertili brunastre (foto di Giancarlo Bistocchi); (d) asco pedunculato con quattro spore (foto di Giancarlo Bistocchi); (e) asco con cinque spore in campo scuro che evidenziano la forma e la profondità degli alveoli.



Aroma: inizialmente debole, a maturità più intenso, ricorda l'odore dei funghi o del lievito di birra.

Habitat: predilige terreni calcarei e ben drenati, con pH 7–8, in boschi misti e di latifoglie, in piantagioni di conifere, ma anche sotto piante isolate, con una esposizione non preferenziale, a quote variabili dal livello del mare fino a 1400–1600 m s.l.m. Fruttifica anche in superficie. Solitario o aggregato.

Periodo di maturazione: dalla tarda primavera all'inverno.

Piante simbiotiche: *Quercus pubescens* Willd., *Q. ilex* L., *Q. ilex* L. var. *ballota* (Desf.) Samp., *Q. robur* L., *Q. petraea* (Mattushka) Liebl., *Q. cerris* L., *Corylus avellana* L., *Ostrya carpinifolia* Scop., *Carpinus betulus* Willd., *Tilia platyphyllos* Scop., *Fagus sylvatica* L., *Betula verrucosa* Ehrh., *Salix* spp., *Populus* spp., *Pinus nigra* Arnold, *P. pinea* L., *P. sylvestris* L., *P. halepensis* Mill., *P. brutia* Ten., *Picea abies* (L.) Carso e *Cedrus* spp.⁴⁵

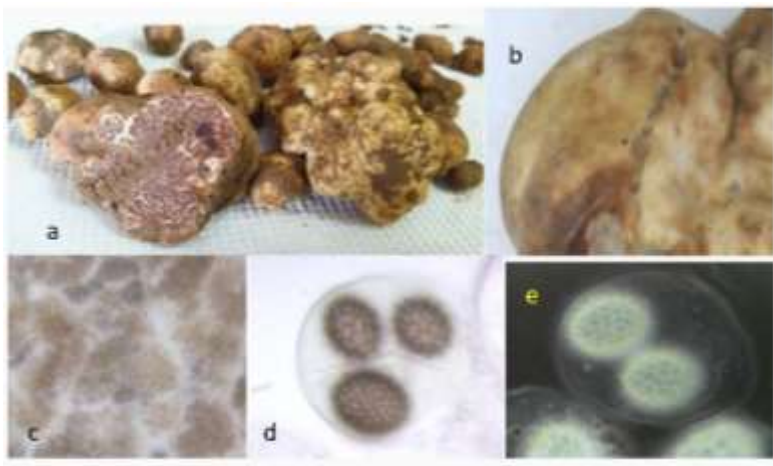
Distribuzione geografica: in quasi tutta Europa (tra 37° e 57° N), Nord Africa, Corea e Cina.⁴⁵

***Tuber borchii* Vittad.**

Nomi comuni.

Gran Bretagna: Whitish truffle, white bait; Italia: Tartufo bianchetto, Marzuolo; Francia: Blanche du Piemont.

Figura 28. *Tuber borchii* Vittad.: (a) Ascomata (foto di Giancarlo Bistocchi); (b) superficie peridio: pubescente (foto di Giancarlo Bistocchi); (c) gleba dove sono visibili gli aschi (foto di Giancarlo Bistocchi); (d) asco con tre spore (foto di Giancarlo Bistocchi) (e) asco con due spore in campo scuro che evidenzia la parete sporale e la profondità degli alveoli. Foto di Giancarlo Bistocchi



Descrizione

Ascoma: globoso, talora lobato o irregolare e con base depressa, ma senza cavità, 2–3(–7) cm di diametro (Figura 28 a).

Peridio: inizialmente biancastro in superficie, poi grigio-giallastro e infine ocrabrunastro, da giovane abbastanza pubescente, poi glabro, spesso con macchie rossastre più scure o più pallide (Figura 28 b).

Gleba: colore ocracchiario, a volte un po' rossastra, poi giallastra e brunastra, con più o meno numerose vene, bianche e tendenti all'ocraceo o brunastra, ramificate da più punti del peridio e anastomizzate (Figura 28 a, c). Aschi per lo più globosi, sessili o brevemente pedunculati, $73\text{--}80 \times 52\text{--}67 \mu\text{m}$, con 1–3(4) spore (Figura 28 d, e).

Ascospore: reticolo-alveolate, ellissoidali, largamente ellissoidali, raramente subsferiche, bruno-rossastre, con dimensioni $(20\text{--})30\text{--}45\text{--}(55) \times (18\text{--})24\text{--}32\text{--}(40) \mu\text{m}$, esclusa l'ornamentazione. Gli alveoli sono poligonali e più o meno regolari, larghi $4\text{--}8\text{--}(10) \mu\text{m}$ e profondi $3\text{--}5 \mu\text{m}$, in numero di (4)5–7 lungo la dimensione maggiore della spora. (Figura 28 d, e).

Aroma: prima gradevole, poi forte e agliaceo.

Periodo di maturazione: dall'autunno alla primavera.

Habitat: in terreni calcarei, argillosi, ma anche sabbiosi (pinete costiere), nei boschi di latifoglie o di conifere o misti, dal livello del mare fino a 1.000 m s.l.m. Solitario e aggregato.

Piante simbiotiche: *Q. pubescens* Willd., *Q. ilex* L., *Q. cerris* L., *Q. petraea* (Mattuschka) Liebl., *Fagus sylvatica* L., *Corylus avellana* L., *Carpinus betulus* L., *Ostrya* sp., *Tilia* sp., *Populus alba* L., *P. nigra* L., *P. tremula* L., *Cistus* spp., *Salix alba* L., *S. caprea* L., *Pinus nigra* Arnold, *P. pinea* L., *P. halepensis* Miller, *Larix decidua* Miller, *Cedrus* sp., *Abies* sp. e *Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco per *T. levissimum* Gilkey.⁴⁵

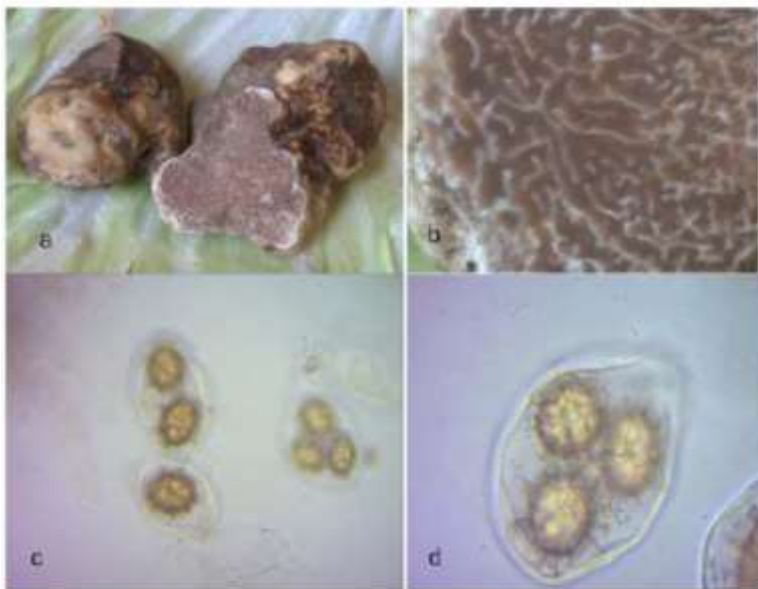
Distribuzione geografica: comunemente distribuito in quasi tutta l'Europa (tra 37° e 55° N), a sud-ovest della Cina e Taiwan con *T. sphaerospermum* (Malençon) (sin. *Tuber borchii* var. *sphaerosperma* Malençon).⁴⁵

***Tuber magnatum* Pico**

Nomi comuni

Gran Bretagna: Piedmont white truffle; Italia: Tartufo bianco del Piemonte, Trifola bianca; Francia: Truffe des Magnats, Truffe Gris.

Figura 29. *Tuber magnatum* Pico: (a) ascomata (foto di Giancarlo Bistocchi); (b) gleba (foto di Giancarlo Bistocchi); (c) aschi con una, due, tre spore (foto di Giancarlo Bistocchi) (d) primo piano di asco con tre spore. Foto di Giancarlo Bistocchi)



Descrizione

Ascoma: globoso più o meno regolare, spesso con lobi, insenature e talvolta appiattito, con dimensioni variabili da 1–2 cm fino a 10-15 cm e oltre (Figura 29 a).

Peridio: apparentemente liscio, in realtà è finemente verrucoso, di colore ocraceo e a volte con macchie color ruggine (Figura 29 a).

Gleba: biancastra, giallo pallido, ocra chiaro, grigio-brunastro, rosata, spesso con macchie rossastre. Abbondanti vene sottili, biancastre, ramificate e anastomizzate (Figura 29 b). Aschi per lo più globosi o subglobosi, sessili o con breve peduncolo, aventi dimensioni variabili 65–80(90) × 42–65(70) µm, con 1–3(4) spore (Figura 29 c, d).

Spore: reticolato-alveolate, da giallastre, ocra pallido a brunastre, globose o globose ovoidee, con dimensioni di (20–)35–50 × (15–)32–42 µm, escluse le ornamentazioni. Gli alveoli sono più o meno regolari, in numero di 2-3 secondo il diametro della spora e profondi 4–6, 5(–8) µm con creste interne (Figura 29 d).

Aroma: gradevole, penetrante, agliaceo e fortemente di formaggio.

Habitat: in terreni marnoso-calcarei, costituiti da arenarie, marne, calcari marnosi e marne argilla; per lo più alla profondità di 10-30 cm (e oltre fino a 80 cm), solitari o raramente aggregati. Crescono sotto i 700(–800) m s.l.m., nei fondivalle, lungo i fossi, in terreno coltivato, leggermente umido, povero di P e N, a pH 7-8(8,5), povero di humus, poco inclinato e non molto soleggiato.

Periodo di maturazione: tarda estate, autunno e inizio inverno.

Piante simbiotiche: *Q. robur* L., *Q. petraea* Liebl., *Q. pubescens* Willd., *Q. cerris* L., *Q. ilex* L., *Populus alba* L., *P. nigra* L., *P. tremula* L., *P. pyramidalis* Roz., *Salix alba* L., *S. viminalis* L., *S. caprea* L., *S. appennina* Skvortsov, *Tilia cordata* Miller, *T. platyphyllos* Scop., *Corylus avellana* L., *Ostrya carpinifolia* Scop., *Alnus cordata* (Loisel.) Desf., *Carpinus betulus* L., *Pinus pinea* L. e *Abies alba* Miller.^{43,45-47}

Distribuzione geografica: in Europa centrale e meridionale (tra 40° e 46° N).^{45,48}

***Tuber melanosporum* Vittad.**

Nomi comuni

Gran Bretagna: Black truffle, Black diamond; Italia: Tartufo nero pregiato; Francia: Truffle du Périgord; Spagna: Trufa negra.

Descrizione

Ascoma: globoso, regolare o irregolare, talvolta lobato, compatto, con diametro da (2)5 a 8(10) cm (Figura 30 a)

Peridio: dapprima bruno-rossastro poi nero-rossastro, nero-brunastro, nerastro a volte con zone rosso scuro o color ruggine, con verruche piramidali, depresse

all'apice, regolari, larghe 3-6 mm alla base con 4-6 sei facce laterali caratterizzate da coste radiali (Figura 30 b).

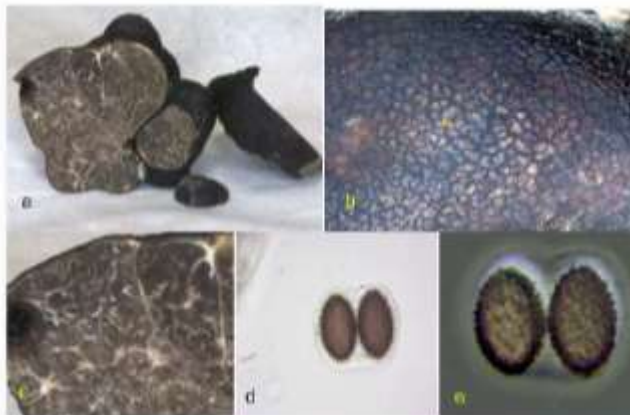
Gleba: compatta, dapprima bianca, poi grigio-bruna o nero-rossastra, con numerose venature sterili sottili, ramificate, prima biancastre, che tendono a scurirsi con l'età. Gli aschi sono globosi, sessili o con breve peduncolo, di colore ocrea chiaro e con dimensioni di 85–145 × 78–127 µm con (1)3–4(6) spore (Figura 30 c).

Spore: contenute negli aschi in numero di 1-3(4). Inizialmente sono trasparenti, poi, a maturità, diventano di colore bruno intenso. Hanno forma ellissoidali allungata e misurano (20–)23–45 × (14–)19–28 µm, escluse le ornamentazioni. Presentano aculei corti e rigidi, a volte ricurvi nelle spore mature, lunghi 2,5-3 µm (Figura 30 d, e).

Aroma: intenso, muschiato e molto gradevole.

Periodo di maturazione: autunno, inverno.

Figura 30. *Tuber melanosporum* Vittad.: (a) Ascomata (foto: Giancarlo Bistocchi); (b) superficie peridio (foto di Giancarlo Bistocchi); (c) gleba (foto di Giancarlo Bistocchi); (d) asco con due spore (foto di Giancarlo Bistocchi) (e) asco con due spore in campo scuro che evidenzia la lunghezza degli aculei e la loro forma. Foto di Giancarlo Bistocchi



Habitat: in terreni calcarei o calcareo argillosi, con 40% o meno di argilla, presenza di Fe, microelementi e scarsi N, P e K, superficie permeabile, soleggiata, raramente a nord, in pendenza, a pH 7,5–8,5. Cresce per lo più gregario da 100 a 1100 m s.l.m. e richiede una piovosità ben distribuita nell'arco dell'anno.

Piante simbiotiche: *Q. pubescens* Willd., *Q. robur* L., *Q. petraea* (Mattuschka) Liebl., *Q. ilex* L., *Q. coccifera* L., *Q. faginea* Lam., *Q. cerris* L., *Q. trojana* Webb, *Q. suber* L., *Fagus sylvatica* L., *Corylus avellana* L., *C. colurna* L., *Salix caprea* L., *S. viminalis* L., *S. alba* L., *Populus nigra* L., *P. tremula* L., *P. alba* L., *P. carolinensis*, *Tilia cordata* Miller, *T. platyphyllos* Scop., *Ostrya carpinifolia* Scop., *Carpinus betulus* L., *Alnus cordata* (Loisel) Desf., *A. glutinosa* (L.) Gaertner, *Betula verrucosa* Ehrh., *Castanea sativa* Miller, *Eucalyptus* sp., *Cistus albidus* L., *C. incanus* L., *C. salvifolius* L., *C. laurifolius* L., *C. crispus* L., *C. monspeliensis* L., *Fumana procumbens* (Dunal) verde. et Godron, *Pinus halepensis*

Miller, *P. nigra* Arnold, *P. sylvestris* L., *P. pinaster* Aiton, *P. pinea* L., *Picea abies* (L.) Karsten, *Abies alba* Miller, *Cedrus atlantica* (Endl.) Carrière, *C. deodara* (D. Don) G. Don. e *Arbutus unedo* L.^{43,45,49,50}

Distribuzione geografica: Europa meridionale (tra 40° e 48° N).^{45,49}

Box. I funghi lignicoli

Di Rosalba Padula

Quando l'apparato vegetativo filamentoso di un fungo, il micelio o tallo fungino, si sviluppa nel legno, parliamo di fungo lignicolo. I funghi lignicoli utilizzano i costituenti cellulari quali lignina, cellulosa, emicellulosa, pectina, ecc, per crescere. Sono molto diffusi in natura e quelli che producono corpi fruttiferi eduli o di interesse farmacologico possono essere coltivati su larga scala utilizzando diversi substrati legnosi morti, compresi tronchi e rami, ceppaie, strobili, trucioli, segatura, paglia, materiali di scarto di attività agricole (sanse); tutti materiali a basso costo.⁵¹ Questo aspetto è ritenuto oggi tanto rilevante che la FAO da diversi anni incentiva tali coltivazioni e l'uso alimentare dei funghi lignicoli anche nei Paesi in via di sviluppo.

I corpi fruttiferi dei funghi lignicoli sono molto spesso coriacei, dall'intenso sapore/odore di legno e più resistenti al gelo rispetto ai funghi di lettiera o ai simbionti. I basidiocarpi possono assumere diverse forme: a gambo e cappello o a forma sferoidale, a cespuglio, a mensola, a ventaglio. Possono avere anche un aspetto crostoso, molto variabile nelle diverse specie, e che si modifica con la sua crescita rispetto allo spessore, alla consistenza (carnosa o tenace), alla colorazione, al peso che da pochi grammi può arrivare anche a diversi kg. Molte specie si comportano inizialmente come parassiti con diverso grado di virulenza e in seguito come saprotrofi continuando a vivere e fruttificare sui resti morti della pianta. Possono essere annuali come *Bjerkandera adusta* (Willd.) P. Karst. o pluriannuali come *Fomitopsis pinicola* (Sw.) P. Karst. Alcune specie sono molto apprezzate per la loro commestibilità; altre per le loro proprietà medicinali.⁵¹

Tra i funghi lignicoli più conosciuti si segnalano per gli aspetti alimentari le specie *Cyclocybe cylindracea* (DC.) Vizzini & Angelini (pioppino), *Fistulina hepatica* (Schaeff.) With. (lingua di bue), *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm. (orecchione); per le proprietà medicinali *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst., *Lentinula edodes* (Berk.) Pegler, *Auricularia auricula-judae* (Bull.) Qué.; per le caratteristiche di tossicità *Omphalotus olearius* (DC.) Singer, *Hapalopilus rutilans* (Pers.) Murrill, *Hypholoma fasciculare* (Huds.) P. Kumm.; per le parassitosi vegetali *Fomes fomentarius* (L.) Fr., *Inonotus hispidus* (Bull.) P. Karst., *Stereum gausapatum* (Fr.) Fr.⁵¹

Figura 31. *Stereum ochraceoflavum* (Schwein.) Sacc. Foto di Bruno Granetti

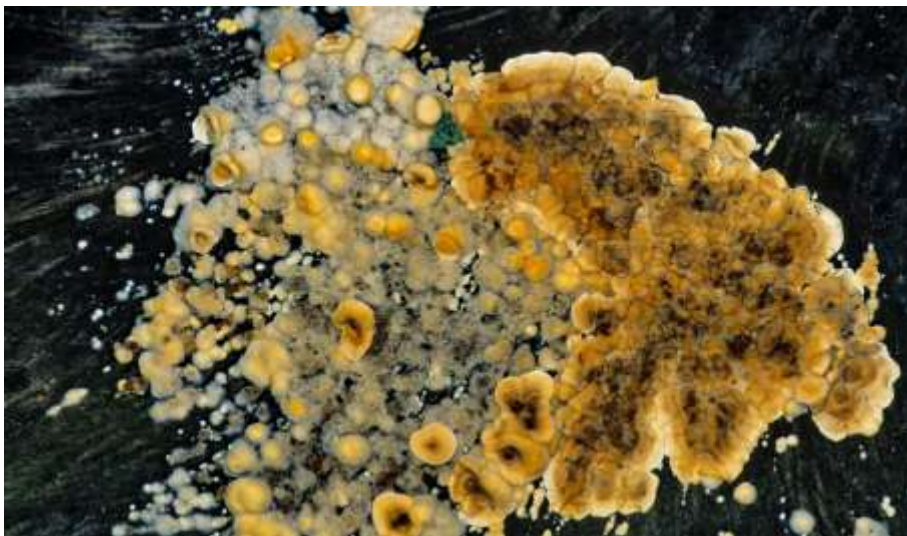


Figura 32. *Fistulina hepatica* (Schaeff.) With. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 33. *Trichaptum bifforme* (Fr.) Ryvarden. Foto di Bruno Granetti



Figura 34. *Auricularia auricula-judae* (Bull.) Qué. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 35. *Fomitopsis pinicola* (Sw.) P. Karst. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 36. *Fomes fomentarius* (L.) Fr. Foto di Giancarlo Bistocchi



2 I funghi e la biodiversità

Di Francesca Floccia

La biodiversità, o diversità biologica, è la ricchezza di vita sulla terra, ovvero i milioni di piante, animali, funghi e microrganismi, i geni che essi contengono e i complessi ecosistemi che essi costituiscono nella biosfera.⁵²

La Convenzione ONU sulla Diversità Biologica definisce la biodiversità come la varietà e variabilità degli organismi viventi e dei sistemi ecologici in cui essi vivono, evidenziando che essa include la diversità a livello genetico, di specie e di ecosistema.^{52,53} In particolare:

1. la diversità di ecosistema definisce il numero e l'abbondanza degli habitat, delle comunità viventi e degli ecosistemi all'interno dei quali i diversi organismi vivono e si evolvono;⁵²
2. la diversità di specie comprende la ricchezza di specie, misurabile in termini di numero delle stesse specie presenti in una determinata zona, o di frequenza delle specie, cioè la loro rarità o abbondanza in un territorio o in un habitat ⁵²
3. la diversità genetica, infine, definisce la differenza dei geni all'interno di una determinata specie; essa corrisponde quindi alla totalità del patrimonio genetico a cui contribuiscono tutti gli organismi che popolano la Terra ⁵²

Pertanto, la varietà biologica non si riferisce solo alla forma e alla struttura degli esseri viventi, ma include anche la diversità intesa come abbondanza, distribuzione e interazione tra le diverse componenti del sistema.

La diversità micologica è, quindi, la variabilità e varietà di specie fungine e dei loro genomi all'interno degli ecosistemi terrestri che essi abitano. Ne deriva che un censimento globale dei funghi descriva sia i luoghi sia le specie di funghi che esistono in natura.

I funghi sono organismi misteriosi, poco studiati e molto diversi.

Sono organismi eucarioti e costituiscono un Regno distinto da quello degli animali e da quello delle piante, più strettamente imparentato con gli animali rispetto a molti altri organismi eucarioti: questi due regni si sono discostati dal loro ultimo antenato comune (un organismo unicellulare che viveva negli oceani spinto da un flagello) nell'ordine di un miliardo di anni fa (Figura 37).

Il regno dei funghi comprende un'enorme diversità biologica, con membri che abbracciano una vasta gamma di stili di vita, forme, habitat e dimensioni, dai funghi ai lieviti, ruggini, fuliggine, muffe e altri organismi con morfologie interessanti ⁵²

I funghi sono il secondo gruppo di organismi più ricco di specie dopo gli insetti; quindi, è più difficile completare l'inventario fungino globale rispetto ad altri organismi come le piante.

Infatti, il regno fungino comprende almeno undici gruppi separati con diverse genetiche e morfologie. La genomica (ovvero la ricerca che utilizza tutto o parte del materiale genetico di un organismo per saperne di più su quell'organismo) ha aperto molte nuove finestre sul mondo dei funghi.⁵²

I funghi sono presenti in ogni ecosistema in cui svolgono ruoli chiave come decompositori, mutualisti e patogeni, sebbene nella maggior parte dei casi il ruolo dei singoli funghi sia ancora sconosciuto.^{52, 53}

Figura 37. Un albero della vita semplificato, che mostra le relazioni tra tre gruppi di eucarioti: funghi e animali sono gruppi fratelli, con le piante come loro parente più prossimo. Tratto dal progetto web albero della vita



Come qualsiasi altro organismo, i funghi possono comportarsi in modo molto diverso a seguito di disturbi dell'ecosistema o quando introdotti in un particolare ecosistema da altre regioni del mondo, provocando anche epidemie nell'uomo e nelle piante.

Tuttavia, nonostante la diversità che la scienza ha rivelato sui funghi e sui loro innumerevoli ruoli nella salute, nell'ecologia e nell'industria, molto di questi organismi rimane un mistero.

I funghi sono conosciuti e usati dall'uomo da secoli, ma la micologia (lo studio scientifico dei funghi) fa risalire i suoi inizi al XVIII secolo, con lo sviluppo del microscopio. Sebbene da allora sia stato scoperto molto, i funghi rimangono oggi un gruppo di organismi criptico e poco studiato.

I progressi nelle tecniche molecolari hanno costituito la base per un impulso negli studi sulla diversità fungina e il rapido sviluppo delle tecnologie di sequenziamento promette ulteriori progressi verso una comprensione più approfondita della diversità e della funzione fungina. L'attuale conoscenza limitata della diversità e della biologia fungina, tuttavia, complica la valutazione dello stato di conservazione delle specie

fungine e ostacola lo sviluppo di strumenti e sforzi di conservazione. Inoltre, l'assenza di metodi rapidi e adeguati a documentare la demografia dei funghi ha reso estremamente difficile inserire i funghi nelle categorie di conservazione IUCN attualmente stabilite. Ci sono, tuttavia, recenti sforzi concertati per portare i funghi nei dibattiti sulla conservazione.⁵⁴

La questione di quante specie di funghi ci siano ha suscitato molte speculazioni, con cifre per lo più ipotizzate da circa mezzo milione a 10 milioni, e in un caso estremo persino 1 trilione.

Poiché nei decenni scorsi è cresciuta la preoccupazione per la conservazione della biodiversità in generale, culminata con la firma della Convenzione sulla diversità biologica nel 1992, sono state necessarie cifre più precise sul numero di specie di tutti i tipi di organismi.

La stima comunemente citata di 1,5 milioni di specie è conservativa e l'intervallo effettivo è attualmente stimato tra 2,2 e 3,8 milioni. Con 120.000 specie attualmente accettate, sembra che nella migliore delle ipotesi solo l'8%, e nel peggiore dei casi solo il 3%, sia stato nominato finora.⁵⁵⁻⁵⁷

2.1 Importanza dei funghi per l'equilibrio dell'ecosistema terrestre

Di Andrea Arcangeli

I funghi si possono considerare come i veri spazzini del nostro pianeta. Infatti, tutte le specie che presentano un trofismo di tipo saprotrofico lavorano incessantemente per decomporre la materia organica e trasformarla in elementi più semplici, utilizzabili dalle piante (organismi autotrofi) che sintetizzano, grazie alla fotosintesi clorofilliana, nuova sostanza organica disponibile per tutti gli organismi eterotrofi.⁵⁸

Se si pensa ad un bosco senza funghi saprotrofi, bisogna immaginare che le foglie cadute, i rami spezzati, gli animali morti, si accumulerebbero in uno strato organico sempre più spesso tale da soffocare il sottobosco prima ed il bosco successivamente.

Di certo non è di secondaria importanza il trofismo di tipo ectomicorrizico che i funghi simbiotici instaurano con molte essenze arboree del bosco. Il micelio di questi organismi (cioè la parte vegetativa che è costituita da minuscole cellule sotterranee dette ife) è in grado di interconnettere piante lontane tra loro e quindi "spostare" i nutrienti da una parte all'altra del terreno in modo da renderli disponibili anche a quegli individui che si trovano in posizioni svantaggiate rispetto ai nutrienti stessi.⁵⁹

C'è una terza tipologia trofica: il parassitismo. Alcune specie fungine unicellulari o pluricellulari, si nutrono a spese di un altro organismo, contribuendo in maniera determinante all'importantissimo equilibrio tra gli esseri viventi nel nostro pianeta. Il concetto nuovo che i Micologi vorrebbero porre all'attenzione di tutti è che i funghi hanno la responsabilità di attaccare alcuni organismi e porre fine alla loro vita, nel

momento in cui questi risultano sofferenti e quando le condizioni diventano inappropriate per lo sviluppo ottimale di una determinata specie.

In altre parole, i funghi svolgono l'importante ruolo di selettori naturali, lasciando in vita gli organismi più sani, più forti, in sostanza più adatti a vivere in un determinato ambiente. Quegli organismi probabilmente hanno il miglior corredo cromosomico per garantire la perpetuazione della specie, con generazioni sempre più forti e resistenti.

Neanche l'uomo si può sottrarre al "giudizio" dei funghi, basti pensare che un'altissima percentuale di decessi nosocomiali in pazienti immunocompromessi, è determinata da infezioni fungine e la metà di questi è causata da *Aspergillus fumigatus* Fresen. Si può sintetizzare questo concetto, sottolineando come i funghi possono da un lato preservare la vita, dall'altro, sancirne la fine.

In un contesto di cambiamento climatico, i funghi possono svolgere un ruolo chiave nell'adattare le foreste, ma anche tutti gli altri habitat, ai cambiamenti globali. Se è vero che gli alberi possono mitigare i cambiamenti climatici riducendo la concentrazione di CO₂ nell'atmosfera, i funghi sono tra i principali protagonisti per la conservazione dello stesso carbonio nel suolo.

Se si considerano gli alberi il polmone del nostro pianeta, in analogia è affascinante pensare ai funghi come al sistema circolatorio in cui il micelio forma centinaia di miliardi di chilometri di reti di interconnessione tra i funghi stessi e gli alberi (Wood Wide Web), un sistema che non serve solo al trasporto di acqua, sali minerali e nutrienti, ma anche alla produzione di particolari composti chimici, trasferiti da una pianta all'altra, consente di informare gli individui vicini della presenza, per esempio, di organismi patogeni, dando loro la possibilità di prepararsi al meglio all'eventuale attacco.⁶⁰

È proprio da questi principi che nasce una nuova disciplina forestale: la micosilvicoltura. Si tratta di una gestione multifunzionale orientata alla conservazione della biodiversità micologica e delle sue conseguenti funzioni ecologiche.

Un progetto "mondiale"

Che i funghi ricoprano questo importante ruolo per la vita sulla terra, è condiviso anche dalla *Society for the Protection of Underground Networks* (SPUN), che ha dato l'avvio alla realizzazione di un progetto per lo studio degli ecosistemi sotterranei, al fine di comprendere meglio la loro importanza, relativamente al contributo climatico e, di conseguenza, promuovere la loro tutela.

Questa grande ricerca comincerà con la raccolta di 10.000 campioni quasi in tutto il mondo, a partire dalla Patagonia per proseguire, nell'arco di circa un anno e mezzo, nella tundra del Canada, presso gli altipiani del Messico, in Sud America, in Marocco, nei deserti del Sahara e Naghev fino alla steppa del Kazakistan, alle praterie del Tibet, alla taiga Russa.

La vita dei funghi è messa a repentaglio da molte attività umane quali: agricoltura industriale, urbanizzazione, inquinamento in genere e l'aridità del terreno dovuta ai cambiamenti climatici. L'obiettivo è quello di capire quali sono gli ecosistemi più a rischio e realizzare un programma condiviso anche dalle organizzazioni locali, per mettere in atto un efficace sistema di conservazione.

I funghi e il "problem solving"

Il Biologo e Micologo inglese Merlin Sheldrake, autore di numerosi articoli scientifici, nel 2020 ha pubblicato un libro dal titolo "l'ordine nascosto".⁶¹ L'Autore sostiene che, anche in assenza di un sistema nervoso, i funghi riescono a sviluppare comportamenti sofisticati di *Problem Solving*. Probabilmente nel rapporto di simbiosi tra pianta e fungo, nessuno dei due organismi ha il controllo della relazione, in ogni momento della loro vita si trovano di fronte a soluzioni in cui è necessario "prendere delle decisioni". Un interessante spunto di riflessione riguarda i semi, infatti in questo particolare organo delle spermatofite non c'è alcuna traccia di funghi e dato che è stato dimostrato che nessuna pianta che cresce in natura è priva di relazioni simbiotiche con i funghi, significa che questo complesso sistema di interazione deve essere costruito durante lo sviluppo e l'accrescimento, in forme di relazione che si possono definire "aperte".

Oggi viene sempre più utilizzato il termine "olobionte", cioè un insieme di organismi che tendono a comportarsi come fossero un tutt'uno. È facile pensare ai licheni che vengono classificati come un unico organismo mentre sono un'associazione tra un'alga e un fungo, ma senza andare troppo lontano da noi, basti pensare ai microbi (batteri, funghi e virus) che vivono all'interno del nostro intestino, che rappresentano il microbiota, dove i microrganismi si trovano in uno strettissimo rapporto funzionale con l'uomo stesso.

I funghi come parte essenziale del ciclo del carbonio

Di Paola Angelini e Roberto Venanzoni

Il ciclo del carbonio

Il carbonio costituisce lo 0,08% della crosta terrestre. È un elemento molto particolare, poiché la sua notevole capacità di combinarsi con se stesso per formare catene più o meno lunghe e ramificate, ne fa l'elemento fondamentale di tutti i composti organici e biologici.⁶²

Le piante terrestri, il fitoplancton, le alghe marine e i cianobatteri, tramite la fotosintesi incorporano l'anidride carbonica presente nell'atmosfera in composti organici più o meno complessi, come zuccheri, emicellulose, pectine, chitina e lignina (fase anabolica del ciclo del carbonio). I microrganismi del suolo, a loro volta, convertono il carbonio organico di tali composti in carbonio minerale che ritorna, come anidride carbonica, all'atmosfera. Tuttavia, non tutto il carbonio minerale ritorna

nell'atmosfera, perché una certa parte va a costituire la frazione organica del suolo, l'humus, la cui mineralizzazione avviene a una velocità piuttosto bassa. L'insieme dei processi di fotosintesi e di respirazione costituisce il ciclo del carbonio.⁶²

Circa 42.000 miliardi di tonnellate di anidride carbonica sono accumulate come CO₂ disciolta negli oceani e circa 700 miliardi di tonnellate nell'atmosfera. Gran parte del carbonio organico si ritrova in piante e altri organismi morti, oltre che nelle foglie, nelle feci e in altri materiali di rifiuto. Tutti questi detriti organici, contenenti i composti del carbonio, si depositano sul suolo o sul fondo degli oceani, dove diventano preda di organismi decompositori, piccoli invertebrati, batteri e funghi (fase catabolica del metabolismo del carbonio).

Il catabolismo del carbonio si conclude con la mineralizzazione, cioè con la trasformazione finale in anidride carbonica che in parte viene fissata nel terreno come carbonato e in parte ritorna nell'aria tellurica e soprattutto in quella atmosferica.⁶²

I funghi

Una delle principali caratteristiche dei funghi è quella di essere organismi eterotrofi: nessuno di essi è in grado di svolgere la fotosintesi e necessitano quindi di carbonio in forma organica.

Come i batteri, i funghi sono per lo più decompositori indipendenti, chemioeterotrofi che assorbono i nutrienti dai rifiuti organici e dagli organismi morti. Molti decompositori fungini, a esempio, sono capaci di degradare la cellulosa e la lignina, i componenti principali della parete cellulare degli organismi vegetali. Si ritiene che non esista in natura forma organica che perlomeno un qualche fungo non sia in grado di utilizzare; i funghi sono inoltre in grado di impiegare sostanze di origine artificiale ("xenobiotici"). Quando i funghi degradano i rifiuti e gli organismi in decomposizione, essi rilasciano acqua, carbonio (sotto forma di CO₂) e le componenti minerali della materia organica che vengono riciclate. Senza questa continua degradazione, i nutrienti essenziali rimarrebbero bloccati all'interno di un'enorme massa di animali morti, feci, rami, tronchi e foglie. I nutrienti non sarebbero perciò disponibili per la crescita di nuove generazioni di forme di vita e la vita stessa potrebbe essere messa in pericolo.

Degradazione della cellulosa

La cellulosa rappresenta il polisaccaride della parete cellulare e della struttura extracellulare delle piante più abbondante nel mondo vegetale.⁶⁴ La cellulosa si trova anche in alcuni vertebrati inferiori. Il peso molecolare minimo della cellulosa proveniente da fonti diverse è stato stimato tra 50.000 e 2.500.000 in specie diverse, equivalente (considerato che il peso molecolare del glucosio è 180) a 278-14.000 residui di glucosio.⁶⁵

La decomposizione della cellulosa nel terreno per via microbiologica sta alla base di quei processi che determinano la formazione dell'humus, complesso di sostanze colloidali di color bruno, in continuo rinnovamento, che rappresenta un particolare

substrato per lo sviluppo e l'attività di microrganismi, specialmente di batteri aerobi, di grande importanza per la fertilità del terreno stesso.⁶⁶ I funghi completano l'attività cellulolitica dei batteri e in alcuni casi, come nei terreni acidi, dove l'azione batterica è ridotta, essi svolgono un ruolo fondamentale.⁶⁶

I funghi idrolizzano aerobicamente la cellulosa con formazione di zuccheri semplici. Tra i funghi che prendono parte a questo processo vi è *Trichoderma harzianum* Rifai (Figura 38) e altre specie appartenenti a generi come *Chaetomium* Kunze, *Trichoderma* Pers., *Stachybotrys* Corda, *Botryosphaeria botryosphaeria* Ces. & De Not., *Penicillium* Link, *Sympodiella* W.B. Kendr, *Helicoma* Corda, *Desmazierella* Lib., ecc.⁶⁷

Figura 38. Colonia di *Trichoderma harzianum* Rifai. Foto di Paola Angelini



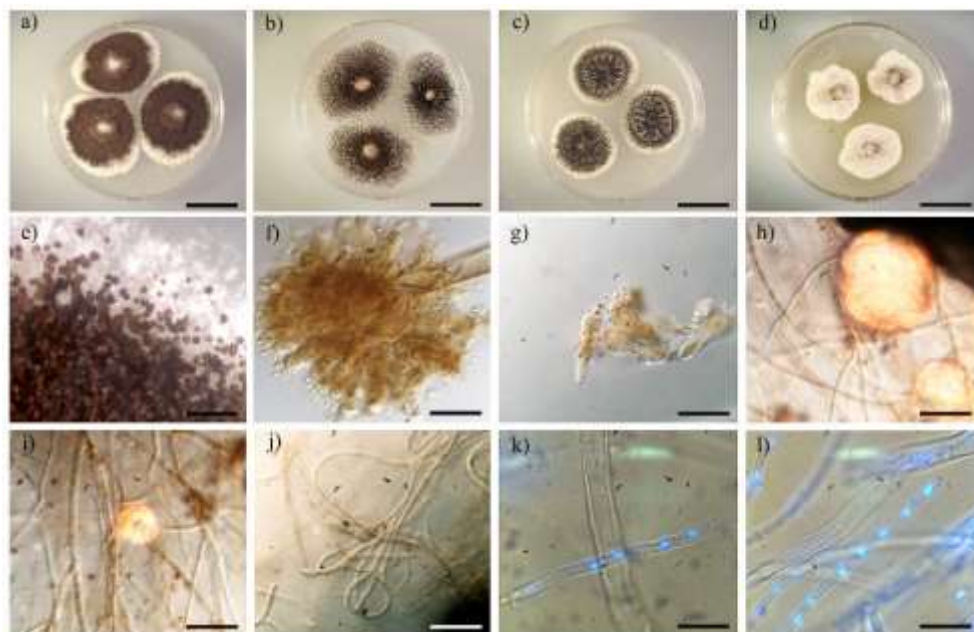
La degradazione della cellulosa è mediata dalle cellulasi, un complesso di enzimi che agiscono successivamente nel corso dell'attacco della fibra di cellulosa nativa: una prima fase avrebbe la funzione di attivare la cellulosa nativa e renderla accessibile al secondo enzima, che ne determina l'idrolisi in unità più piccole.⁶⁸ Queste sono infine idrolizzate da un terzo enzima, la cellobiasi, in glucosio. La presenza di lignina nei residui vegetali rallenta la velocità di degradazione della cellulosa, non solo perché la lignina è lentamente degradata, ma anche perché l'idrolisi della cellulosa è tanto più lenta quanto più elevata è la quantità di lignina che a essa si accompagna.⁶⁸

Degradazione della lignina

La lignina è un costituente fondamentale della parete delle cellule vegetali, a cui, grazie alla sua natura chimica, fornisce un notevole grado di rigidità strutturale, oltre che di protezione da eventuali attacchi microbici.⁶⁹ In natura, dopo la cellulosa, è il biopolimero più abbondante e contribuisce in larga misura, alla formazione del detrito vegetale. La lignina, a differenza della cellulosa, non forma catene molecolari e ai raggi x si presenta come una sostanza amorfa.⁷⁰ È una delle sostanze più resistenti

alla degradazione microbica.⁷⁰ I microrganismi che provocano la degradazione della lignina sono essenzialmente fungini e sono per lo più rappresentati da specie appartenenti ai seguenti generi: *Aspergillus* (Figura 39), *Trichoderma* Pers., *Neurospora* Shear & B.O. Dodge, *Mucor* Fresen., *Lycoperdon* Pers., *Metarhizium* Sorokīn, *Beauveria* Vuill., *Akanthomyces* Lebert.⁷²

Figura 39. *Aspergillus tubingensis* Mosseray: colonie cresciute su CYA-Czapek Yeast Agar (a), CZA-Czapek-Dox Agar (b), MEA-Malt Extract Agar (c) YES-Yeast Extract Sucrose Agar (d), conidi (e), conidioforo (f), metule e fialidi (g), piccoli corpi fruttiferi (h-i), strutture ifali circolari (j), ife trattate con il colorante fluorescente DAPI (k-l). Scale: (a-d) = 2,57 cm; (e) = 0,25 cm; (f) = 20 μm; (g) = 20 μm; (h-i-j) = 40 μm; (k-l) = 20 μm. Foto di Paola Angelini



Molti microrganismi degradano la lignina incompletamente a causa della mancanza della capacità enzimatica di attacco di tutti i vari componenti strutturali del polimero. In tali casi si hanno residui di lignina chimicamente alterata. I frammenti che non possono essere ulteriormente metabolizzati sono probabilmente liberati come prodotti idrosolubili di degradazione incompleta della lignina.⁷¹

WWW (Wood Wide Web): la comunicazione attraverso la rete micorrizica

Di Paola Angelini e Roberto Venanzoni

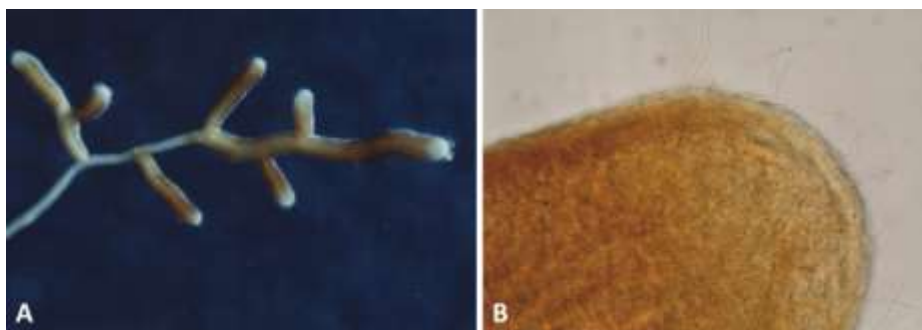
Le relazioni simbiotiche tra le ife di alcuni funghi e le radici delle piante sono dette micorrize (dalle parole greche che significano “fungo” e “radici”). Le micorrize interessano circa l’85% delle piante e oltre il 90% di tutte le famiglie botaniche.⁷³

In base alla localizzazione del fungo nella radice, rispettivamente extra- e intracellulare, si distinguono le "ectomicorrize", caratteristiche di specie arboree delle foreste temperate e boreali (*Fagaceae* Dumort., *Betulaceae* Gray, *Salicaceae* Mirb. e *Pinaceae* Lindley) e le "endomicorrize".⁷⁴

In base alla specifica combinazione pianta-fungo, queste ultime vengono ulteriormente distinte in endomicorrize arbuscolari (tipiche della quasi totalità delle piante erbacee), ericoidi (caratteristiche dei generi *Vaccinium* L., *Calluna* Salisb., *Erica* L., *Rhododendron* L. dell'ordine *Ericales* Dumort.) e di orchidee; esiste infine un terzo tipo di micorriza, con aspetti sia delle ecto- che delle endomicorrize, definito ectoendo-micorriza.⁷⁵

Le ectomicorrize presentano una forma clavata o anche cilindrica con apice arrotondato. Misurano da ½ mm a 3-4 mm di lunghezza e da 0,3 mm a circa 1 mm di larghezza (Figura 40 A, B).

Figura 40. *Populus alba* L.: A) Ectomicorrize in attiva crescita con ife peritrofiche. 37x; B) Apice di micorriza con ife peritrofiche. X 380. Foto di Paola Angelini



Per riconoscere una ectomicorriza è necessario individuare tre caratteri morfologici distintivi:

a) il mantello (micoclona), formato da un denso intreccio di ife fungine che avvolgono gli apici radicali (Figura 41);

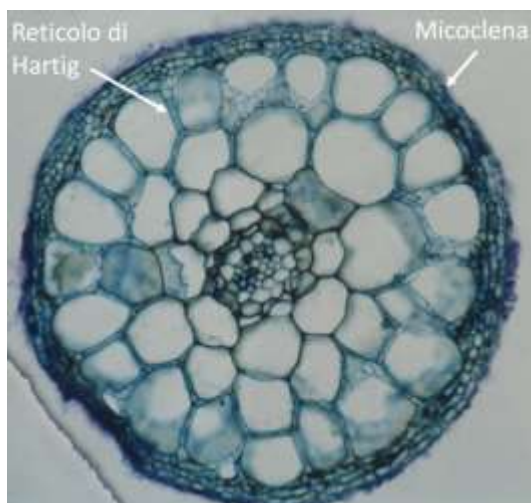
b) il reticolo di Hartig, struttura caratteristica formata da ife con setti trasversali molto ravvicinati che si sviluppano dalla superficie interna della micoclona e penetrano tra le cellule epidermiche della radichetta e tra le cellule sottostanti della corteccia primaria (è in questa sede che avvengono gli scambi trofici tra il fungo e la pianta) (Figura 41);

c) un sistema di ife connesse con il mantello e il reticolo di Hartig che sviluppano nel suolo, destinate all'assorbimento di acqua e sali minerali (Figura 41)⁷⁶. Di solito, in presenza di ectomicorrize, i peli radicali non si sviluppano e le radici sono spesso più corte e talora anche più ramificate.

I funghi che formano ectomicorrize sono rappresentati da circa 6.000 specie, per lo più appartenenti ai Phyla Ascomycota e Basidiomycota. Tra gli Ascomycota, sono

presenti alcune specie ectomicorriziche molto note per le loro caratteristiche organolettiche [es., i tartufi pregiati: *Tuber magnatum* Pico, *Tuber melanosporum* Vittad., *Tuber borchii* Vittad., *Tuber aestivum* (Wulfen) Spreng.]; anche tra i Basidiomycota, vi sono specie molto conosciute, come i porcini (*Boletus* spp.), le russule (*Russula* spp.), i lattari (*Lactarius* spp.) e le amanite (specie velenose, es.: *Amanita phalloides* (Vaill. ex Fr.) Link, *Amanita verna* Bull. ex Lam., *Amanita virosa* Bertill.).⁷⁷⁻⁷⁹

Figura 41. Sezione trasversale di micorriza. Micoclena e reticolo di Hartig. X 400. Foto di Paola Angelini



Le endomicorrize più diffuse sono le micorrize arbuscolari, così chiamate in quanto le ife presenti all'interno delle cellule radicali formano strutture ramificate a forma di albero note come arbuscoli. Gli arbuscoli sono la sede dello scambio di nutrienti tra la pianta e il fungo.

Le endomicorrize arbuscolari forniscono un particolare contributo al miglioramento dell'assorbimento del fosforo da parte della pianta, le micorrize ericoidi a quello dell'azoto, le ectomicorrize accrescono invece l'assunzione di entrambi gli elementi.

La distribuzione geografica delle diverse tipologie micorriziche riflette le loro peculiarità funzionali, infatti, la selezione ha favorito l'affermarsi della micorrizia arbuscolare negli ambienti di prateria temperata e tropicale (dove il fosforo rappresenta l'elemento maggiormente limitante lo sviluppo delle piante), la micorrizia ericoide nelle tundre e brughiere (dove è l'azoto a essere soprattutto carente), e l'ectomicorrizia nelle foreste temperate e boreali (dove sia l'azoto che il fosforo in genere scarseggiano).⁸⁰

Un caso particolare è rappresentato dalle endomicorrize delle orchidee. Le Orchidaceae sono una delle famiglie di angiosperme più diversificate, con circa 35.000 specie. Sin dal momento della germinazione, l'accrescimento di queste piante dipende totalmente dall'instaurarsi di un'associazione con alcuni funghi simbiotici.

Infatti, i semi delle orchidee, piccolissimi e privi di sostanze di riserva, per germinare sono costretti a instaurare una relazione simbiotica con un organismo in grado di apportare le sostanze necessarie. Le specie completamente o parzialmente prive di clorofilla non sono capaci di fotosintesi e devono il loro approvvigionamento di carbonio ai funghi che ne colonizzano le radici, risultando così micoeterotrofe (es.: *Epipogium aphyllum* Sw., *Limodorum abortivum* (L.) Sw., *Neottia nidus-avis* (L.) Rich., Figura 42, Figura 43, Figura 44).⁸¹⁻⁸⁵

I funghi simbiotici di alcune orchidee stabiliscono contemporaneamente tipiche ectomicorrize con piante arboree adiacenti: attraverso il micelio del simbiote in comune si verifica un passaggio di fotosintati dall'ospite arboreo all'orchidea, che si comporta così da "epiparassita" di quest'ultimo.

Figura 42. *Epipogium aphyllum* Sw. (nome comune: epipogio). Specie erbacea perenne alta 5-30 cm. Si caratterizza di un fusto sotterraneo dal quale, ogni anno, si dipartono radici e fusti aerei portanti 2-3 foglie ridotte a delle squame brunastre. È una specie saprofita, priva di clorofilla e completamente dipendente dal suo simbiote endomicorrizico (*Inocybe* sp.) per la sua nutrizione.^{81,82}

Foto di Pino Ratini



Figura 43. *Limodorum abortivum* (L.) Sw. (nomi comuni: limodoro, fior di legna). È una pianta erbacea perenne provvista di un rizoma fascicolato e carnoso che ogni anno emette nuove radici e nuovi fusti. Come le Orchidee dei generi *Epipogium* e *Neottia*, i fusti non sviluppano foglie verdi in quanto il loro accrescimento è fortemente condizionato dalle sostanze fornite da un fungo simbiote (*Russula* spp.) dal quale dipende anche la germinazione dei semi.⁸³ Foto di Pino Ratini



Figura 44. *Neottia nidus-avis* (L.) Rich. (nome comune: nido d'uccello). La pianta è saprofita e vive in simbiosi mutualistica con un fungo (*Rhizomorpha neottiae*)⁸⁵. Foto di Pino Ratini



L'associazione micorrizica ha tipicamente carattere mutualistico in quanto entrambi i partner traggono beneficio: i funghi micorrizici incrementano la capacità della pianta di assorbire acqua ed elementi minerali, inoltre, possono proteggere l'ospite da attacchi di funghi patogeni, dall'essiccamento o da inquinanti (metalli pesanti potenzialmente tossici) presenti nell'ambiente. In cambio di tutti questi vantaggi, i funghi ricevono carboidrati e vitamine essenziali per la loro crescita.⁸⁶

La relativa specificità di queste simbiosi, inoltre, costituisce il presupposto per un ruolo importante a livello di ecosistema, poiché, una stessa pianta può formare micorrize con funghi diversi, e uno stesso fungo con piante diverse, si viene a creare, nel suolo, un complesso reticolo miceliare di funghi simbiotici condivisi che mettono in comunicazione individui vegetali differenti appartenenti alla stessa o a diversa specie (tale fenomeno è stato definito "wood wide web"), con significative ricadute sulle interazioni tra piante, sulla struttura e la dinamica delle comunità vegetali.⁸⁷⁻⁹¹

In rocce datate circa 400 milioni di anni, sono stati scoperti funghi micorrizici all'interno di fossili di antiche piante. Tali rinvenimenti suggeriscono che, quando le piante colonizzarono la terraferma, i loro partner fungini le seguirono. Infatti, il partner fungino può essere stato decisivo affinché le prime piante potessero affermarsi definitivamente sulla terraferma, in quanto, le ife fungine potrebbero aver fornito alle piante acqua e minerali prima dell'evoluzione dei loro sistemi radicali.⁹²

2.2 I funghi e gli habitat

Di Paola Angelini, Giancarlo Bistocchi e Roberto Venanzoni

L'etimologia della parola habitat deriva dal latino habitare = terza persona singolare del presente indicativo, cioè "lui abita". In relazione alla micologia è quel determinato ambiente dove una specie fungina trova la possibilità di crescere, vivere e riprodursi.

Inutile dire che in questi habitat dove l'umidità dell'aria, il clima e la composizione del terreno sono una costante importantissima, non meno importanti sono gli esseri viventi siano essi vegetali, funghi, animali, batteri ecc. che vanno a formare un equilibrio in sintonia tra di loro e l'ambiente che li circonda.

Quando uno di questi elementi viene a mancare oppure ne subentrano altri questo habitat varia, gli equilibri crollano ed è poi difficilissimo ripristinare il tutto in modo naturale.

A tutela di ciò, la Direttiva 92/43/CEE del Consiglio del 21 maggio 1992 relativa alla conservazione degli habitat naturali e seminaturali, della flora e della fauna selvatiche, riconosce, stabilisce e tutela molteplici habitat di tutto il territorio Europeo; nascono così siti che riporteranno come acronimo SCI (*Site of Community Importance*).

Molteplici ricerche e pubblicazioni riportano dati e censimenti storici di specie arboree e specie fungine associate ad habitat individuati in queste zone.

Analizzando un habitat formato da essenze arboree monospecifiche situate in un certo contesto, ci accorgeremo che le specie fungine rinvenute potrebbero essere comuni anche in altri ambienti, mentre altre si trovano solamente in presenza di queste essenze arboree.

Prendendo in esame le Foreste acidofile montane e alpine di *Larix decidua* Mill. potremo sicuramente censire Funghi comuni anche in altri habitat come: *Amanita phalloides* (Vaill. ex Fr.) Link, *A. muscaria* (L.) Lam. o *Boletus edulis* Bull. e così via ma sicuramente in altri habitat non troveremo mai *Suillus grevillei* (Klotzsch) Singer oppure *Suillus laricinus* (Berk.) Kuntze o *S. bresadolae* (Qué.) Gerhold che vivono in simbiosi esclusiva di questa specie arborea.

Altro esempio, nelle Foreste sud appenniniche di *Abies alba* Mill. troveremo *Lactarius salmonicolor* R. Heim & Leclair solo in presenza di questa specie arborea.

Habitat particolari potrebbero venirsi a creare nel momento in cui si parla di pinete con specie diverse che hanno in comune di essere pini a due aghi. I più comuni nel nostro territorio sono: *Pinus pinea* L., *Pinus nigra* Aiton, *Pinus pinaster* Aiton, *Pinus sylvestris* L.

In questi ambienti troveremo funghi particolari associati a questo gruppo di specie arboree, appartenenti al genere *Suillus* Gray, *Lactarius* Pers., *Chroogomphus* (Singer) O.K. Mill. e precisamente: *S. granulatus* (L.) Roussel, *S. luteus* (L.) Roussel, *S. bellinii* (Inzenga) Kuntze, *S. collinitus* (Fr.) Kuntze, *S. mediterraneensis* (Jacquet. & J. Blum) Redeuilh, *Lactarius deliciosus* (L.) Gray, *L. sanguifluus* (Paulet) Fr. infine *Chroogomphus rutilus* (Schaeff.) O.K. Mill.

Le grandi faggete sono presenti in tutto nostro territorio dove vivono in simbiosi esclusiva alcune specie di russule come *Russula olivacea* (Schaeff.) Fr. e *Russula faginea* Romagn., mentre altre come *Russula romellii* Maire e *Russula chloroides* (Krombh.) Bres. pur privilegiando questo ambiente, le possiamo ritrovare anche su altri boschi di latifoglie.

Potremmo continuare con altri esempi ma la sostanza e la finalità del discorso serve solamente per esaltare il ruolo importante che i funghi hanno nel formare e conservare il giusto equilibrio di un habitat.

Abbiamo citato solamente quei funghi che vivono in simbiosi mutualistica con delle piante ospiti ma importantissimi sono tutti quei funghi saprotrofi che nutrendosi, insieme ai batteri, di sostanze organiche in decomposizione trasformano il legname marcescente, fogliame, carcasse di animali ecc. in concimi ricchi di nutrienti naturali completando così il ciclo biologico dell'habitat in cui vivono.

Per ultimi ma sicuramente non per importanza sono tutti quei funghi che vivono come parassiti, quei funghi che portano alla morte più o meno lenta della pianta in cui vivono.

Potrebbero sembrare funghi che arrecano danno all'intero sistema invece hanno un ruolo di controllo degli spazi colpendo gli alberi fragili o vecchi per dare luce ai nuovi germogli che in poco tempo andranno a sanare lo spazio ricavato. Uno dei funghi più significativi di queste due ultime situazioni è *Armillaria mellea* (Vahl) P. Kumm. che in un primo momento attacca la pianta malata ancora viva vivendo come parassita e poi quando la pianta muore la decompone vivendo come saprofita.

Per concludere è necessario che il tesoro naturale del nostro territorio sia salvaguardato e riconsegnato alle nuove generazioni come noi lo abbiamo trovato, prima che sia troppo tardi perché in questo habitat piccolo o grande che sia vive nel Regno animale un essere che ha come definizione tassonomica di specie: *Homo sapiens*.

Figura 45. Ambienti alpini, lariceti. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 46. Ambienti alpini, pecceta. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 47. Bosco di latifoglie. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 48. Ambienti alpini. Foto di Giancarlo Bistocch



Figura 49. Ambienti alpini. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 50. Faggeta. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 51. Pineta di Pinus nigra J.F.Arnold. Foto di Giancarlo Bistocchi



Box. I funghi marini

Di Mirca Zotti, Grazia Cecchi e Simone Di Piazza

Nell'immaginario collettivo, quando si parla di funghi, immediatamente viene alla mente la classica forma con un gambo e un cappello dalle diverse fogge e colori. Una tale forma è stata descritta per una sola specie di acqua dolce *Psatyrella acquatica* J.L. Frank, Coffan & D. Southw, che si sviluppa completamente sommersa nelle acque correnti fredde e limpide del fiume Rogue, in Oregon,⁹³ mentre non è mai stata descritta per gli ambienti marini.

I funghi marini sono in prevalenza funghi microscopici. Un gruppo cospicuo di organismi di cui ancora oggi poco conosciamo, ma verso i quali l'interesse sta progressivamente aumentando.

Una problematica, che ha visto da subito diverse scuole di pensiero, riguarda proprio la definizione stessa di funghi marini. I primi a fornire un'esauriente e ancora oggi molto citata definizione furono Kohlmeyer & Kohlmeyer⁹⁴ che restrinsero i funghi marini a due gruppi ecologici: funghi marini obbligati e funghi marini facoltativi. I funghi marini obbligati erano quelli che crescono e sporulano (formano conidi, spore) esclusivamente in un habitat marino o estuario; i funghi marini facoltativi erano quelli provenienti da ambienti d'acqua dolce o terrestri, in grado di crescere e sporulare in ambienti marini. Tuttavia, questa distinzione non è sempre facile né chiara da applicare ed è abbastanza controversa. Molti funghi isolati da diversi substrati in ambiente marino che si sono dimostrati capaci di produrre moltissimi nuovi metaboliti sono stati genericamente definiti come funghi di derivazione o origine marina.

Recentemente, Pang et al.⁹⁵ hanno rivisto l'uso dei termini "funghi marini" e "funghi di derivazione marina" e hanno cercato di proporre una definizione più ampia. I funghi marini sono definiti come qualsiasi fungo in grado di:

- (i) crescere e/o sporulare (su substrati) in ambienti marini;
- (ii) formare relazioni simbiotiche con altri organismi marini; o
- (iii) adattarsi ed evolversi o essere metabolicamente attivi in ambienti marini.

Inizialmente oltre a sottovalutare il ruolo di questi organismi si pensava anche che i funghi marini fossero in numero decisamente ristretto. Le prime specie a essere state descritte sono state specie legate a piante e alghe, osservate e isolate soprattutto da ambienti costieri, così da far supporre non solo che i funghi marini costituissero un gruppo decisamente contenuto rispetto ai terrestri, ma anche che fossero associati in gran parte a substrati di origine vegetale. Più recentemente, l'uso di metodi di sequenziamento di nuova generazione ha iniziato a rivelare microbiota nascosti in un'ampia gamma di ambienti.⁹⁶

L'attuale incremento di conoscenze verso i funghi marini va di pari passo, da un lato, con l'evoluzione delle tecniche per studiarli e, dall'altro, con l'esplorazione di nuovi habitat.

Solitamente i microfunghi, per poter poi disporre del ceppo, vengono isolati in coltura pura e così conservati. Le moderne indagini indipendenti però dalle colture, basate, a esempio, sul DNA ambientale, hanno iniziato a rivelare una grande micodiversità marina non solo su substrati vegetali, ma in diversi contesti come nella colonna d'acqua, nei sedimenti oceanici, nelle bocche idrotermali, negli invertebrati sessili e mobili, nelle alghe, nei mammiferi marini, sul fitoplancton ecc., dalle profondità marine fino alle acque di superficie.⁹⁶ Se da un lato le attuali ricerche evidenziano come i funghi marini siano abbondanti dall'altro questi studi sottolineano quanto ancora ci sia da indagare.

Fino a oggi, oltre il 90% delle specie marine descritte appartengono ai phyla Ascomycota e Basidiomycota.^{97,98} I funghi marini e acquatici contengono anche una grande quantità di specie nuove e non descritte a livelli tassonomici relativamente alti. Risulta molto difficile stabilire quanti siano i funghi marini, si stima che il numero di specie sia compreso tra 1,5 e 5,1 milioni. I funghi marini rappresentano meno dell'1% delle specie conosciute, rimanendo quindi un gruppo ancora molto poco conosciuto. È stato supposto che il numero di funghi marini varia da 10.000 a 12.500 specie,⁹⁸ anche se più recentemente Garzoli et al.⁹⁹ hanno suggerito che circa 1 milione di specie siano ancora da scoprire. Secondo il sito www.marinefungi.org, aggiornato al 7 febbraio 2021, il numero di specie fungine marine descritte è solo di 1901, distribuite in 769 generi, 226 famiglie, 88 ordini, 22 classi e 7 phyla (*Aphelidiomycota*, *Ascomycota*, *Basidiomycota*, *Blastocladiomycota*, *Chytridiomycota*, *Mortierellomycota* e *Mucoromycota*).

Molto ancora resta da definire anche circa il ruolo ecologico dei funghi marini seppur ormai sia assodato che svolgano un ruolo cruciale nel flusso di energia e nel riciclo dei nutrienti, mediando il ciclo della materia organica disciolta negli ambienti marini.⁹⁸ Rappresentano quindi uno dei principali componenti delle reti alimentari marine e possono essere saprotrofi, simbionti mutualisti o parassiti. Come saprotrofi sono stati individuati su diversi substrati: dalle piante di mangrovia, alle praterie di posidonia, su legni sommersi e alla deriva, sulle barriere coralline, sul ghiaccio marino, ecc. Come mutualisti possono essere associati a spugne, protozoi e fanerogame, dove entrambi gli individui traggono vantaggi. Come parassiti di fitoplancton, macrofite, alghe e animali possono causare la lisciviazione della materia organica disciolta e la distruzione delle popolazioni ospiti.⁹⁸

La plasticità adattativa dei funghi, la loro capacità di passare per esempio dall'essere saprotrofi a opportunisti parassiti si esplica perfettamente anche in ambiente marino. Un esempio per tutti è il caso di *Aspergillus sidowii* (Bainier & Sartory) Thom & Church,¹⁰⁰ un fungo comune, cosmopolita, tipicamente saprotrofo, che è stato trovato in una varietà di ambienti terrestri dall'Alaska alle regioni tropicali. In

ambiente marino non solo è presente, ma è l'agente eziologico di una malattia su alcuni tipi di coralli comparsa a partire dagli anni 80. Tale aspergillo, segnalata per la prima volta in Costa Rica e Colombia, ha assunto, negli ultimi anni proporzioni allarmanti a causa della sua diffusione e del potenziale danno all'ecosistema della barriera corallina. La crescita come patogeno di *A. sydowii* può essere favorita da condizioni di stress ambientale come l'inquinamento organico, la mancanza di ossigeno o alti livelli di fosforo, azoto e anche la temperatura sembra essere un fattore ambientale cruciale per la sua diffusione e patogenicità. Nel 2017 *A. sydowii* è stato segnalato nel Mar Mediterraneo, in sedimenti di fondo marino, acqua e conchiglie calcaree di molluschi bivalvi campionati durante una campagna di caratterizzazione del microbiota nel Porto di Genova (Italia). L'area è caratterizzata da condizioni ambientali avverse (elevata torbidità, inquinamento organico e alte concentrazioni di composti di fosforo e azoto). Questi parametri, in combinazione con l'aumento della temperatura, potrebbero contribuire allo sviluppo e alla dispersione di *A. sydowii*; pertanto, è stato attivato un programma di monitoraggio per la salvaguardia delle spugne calcaree e dei coralli a ventaglio endemici del Mar Mediterraneo. L'esempio fornito da *A. sydowii* costituisce una prova di come i cambiamenti climatici possano avere un forte impatto sulle dinamiche della rete alimentare delle comunità fungine marine, alterandone la struttura e determinando conseguenze imprevedibili. Il clima sta cambiando a livello globale ed è anche essenziale comprenderne gli impatti sulle dinamiche dei funghi marini.

Un altro degli aspetti interessanti e in questo caso vantaggioso per l'uomo che lo hanno spinto a occuparsi sempre più dei funghi marini è che molti dei ceppi isolati in mare costituiscono un'enorme fonte di metaboliti impiegabili soprattutto per la sintesi di nuovi farmaci.⁹⁸ Basti pensare che le cefalosporine, classe di antibiotici β -lattamici individuate una ventina di anni dopo le penicilline grazie a Giuseppe Brotzu professore di igiene all'Università di Cagliari,¹⁰¹ furono scoperte isolando il fungo marino *Acremonium chrysogenum* (Thurum. & Sukapure) W. Gams (= *Cephalosporium chrysogenum* Thurum. & Sukapure).

Da evidenziare ancora, che al pari dei ceppi di funghi terrestri, anche i marini, sempre in virtù delle loro capacità di saprotrofi possono essere considerati un'importante fonte di enzimi di interesse industriale e/o ambientale come a esempio amilasi, cellulasi, chitinasi, glucosidasi, inulinasi, cheratinasi, ligninasi, lipasi, fitasi, ecc.¹⁰² Salinità, alta pressione, bassa temperatura, condizioni oligotrofiche, estremi di pH, contenuti di minerali e diverse condizioni di illuminazione contribuiscono poi a differenziare gli enzimi dei funghi marini rispetto agli omologhi enzimi dei funghi terrestri. Un esempio tra tanti nel contesto ambientale, vede l'impiego di funghi marini nel biorisanamento sostenibile, sia di sedimenti marini (es. portuali), sia di acque marine contaminati da sostanze organiche e/o inorganiche¹⁰³ (<https://interreg-maritime.eu/web/geremia>).

Risulta quindi fondamentale continuare ad ampliare gli studi anche riguardo i funghi marini e, come ormai assodato per molti campi della ricerca, è necessario un

approccio olistico e integrato al fine di incrementare le conoscenze e individuare vincenti strategie di gestione, conservazione e per l'utilizzo biotecnologico dei funghi marini. Emerge anche l'importante esigenza di catalogare, isolare e conservare adeguatamente, nelle collezioni di riferimento (di colture, genomiche), i funghi marini. Questo non solo porterà vantaggi nelle assegnazioni tassonomiche, ma consentirà anche di incrementare un'inesauribile fonte di materiale applicabile soprattutto nelle biotecnologie, non solo in ambito farmaceutico, ma anche per protocolli di *mycoremediation* che vedono i funghi protagonisti nel degradare e/o accumulare sostanze tossiche e inquinanti, plastiche comprese.

Figura 52. *Psathyrella* sp., immagine tratta dal web.



Figura 53. a) Coltura pura in piastra a 7 giorni di *Acremonium* sp. isolato da sedimenti marini; b) Dettaglio allo stereomicroscopio (20x) di *Acremonium* spp.; c) Dettaglio al microscopio ottico (40x) di *Acremonium* spp.; d) Coltura pura in piastra a 7 giorni di *Penicillium expansum* Link isolato da sedimenti marini; e) Dettaglio allo stereomicroscopio (40x) di *Penicillium expansum*; f) Dettaglio al microscopio ottico (40x) di *Penicillium expansum*; g) Coltura pura in piastra a 7 giorni di *Acremonium* sp. isolato da sedimenti marini; h) Dettaglio allo stereomicroscopio (20x) di *Acremonium* spp.; i) Dettaglio al microscopio ottico (40x) *Geotricum europaeum* De Hoog & M.T. Sm.

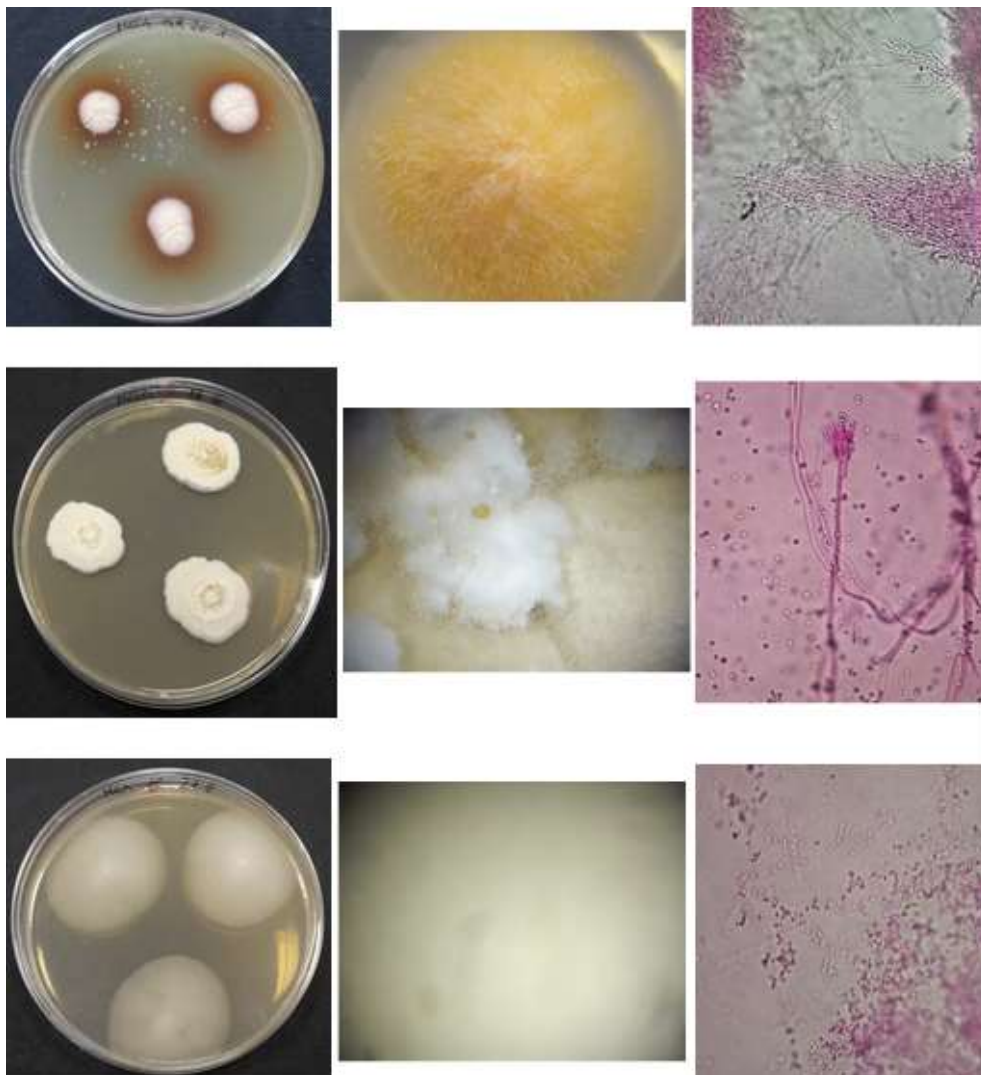
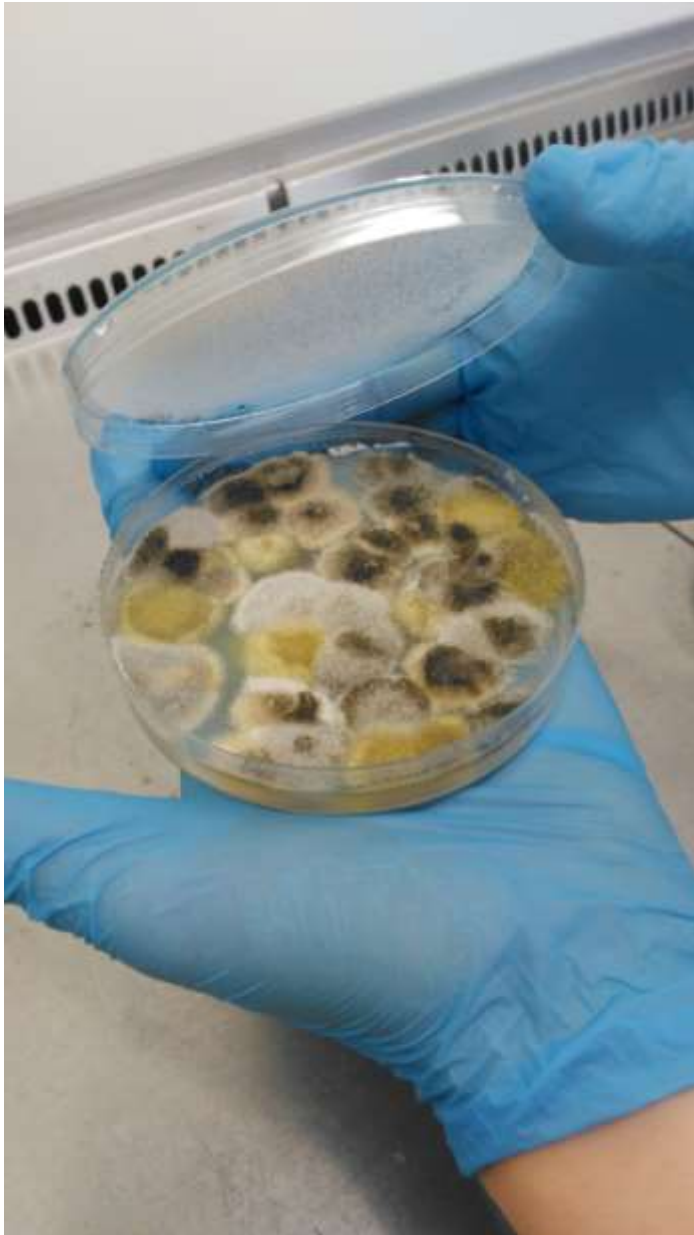


Figura 54. Colonie fungine isolate da ambienti marini



Figura 55. Colture fungine su piastra Petri



2.3 Le minacce di estinzione per i funghi

Di Francesca Floccia

La biosfera è oggi intensamente e urgentemente minacciata e la biodiversità si sta perdendo a livello locale, regionale e globale. A livello globale, le attuali minacce alla biodiversità sono rappresentate principalmente dal cambiamento climatico, il disboscamento e il cambiamento dell'uso del suolo, la frammentazione e la distruzione degli habitat, l'inquinamento e l'aumento delle emissioni, i nuovi agenti patogeni che minacciano i raccolti e la salute, lo sfruttamento eccessivo delle specie di interesse commerciale e il commercio illegale che ha sradicato intere popolazioni di specie locali sostituendole con specie non autoctone (cosiddette "specie aliene").

Gli ecosistemi naturali forniscono numerosi servizi utili all'uomo, quali a esempio la regolazione del clima, la prevenzione delle inondazioni e la filtrazione dell'acqua. Pertanto, le piante e i funghi, in quanto elementi costitutivi degli ecosistemi, possono potenzialmente aiutarci ad affrontare le attuali sfide ambientali, prima fra tutti il cambiamento climatico. Tuttavia, questi benefici naturali sono compromessi dalla perdita di biodiversità.

Per arrestare la perdita di biodiversità e minimizzare le estinzioni future, è fondamentale sapere quali siano le specie viventi minacciate; altresì, non è possibile valutare quanto sia minacciata una specie finché non sappiamo che esiste.

Ogni anno vengono classificate e descritte nuove specie viventi appartenenti al regno vegetale e fungino: nel 2019, i botanici hanno registrato 1.942 nuove specie di piante vascolari e i micologi hanno registrato 1.886 nuovi funghi.

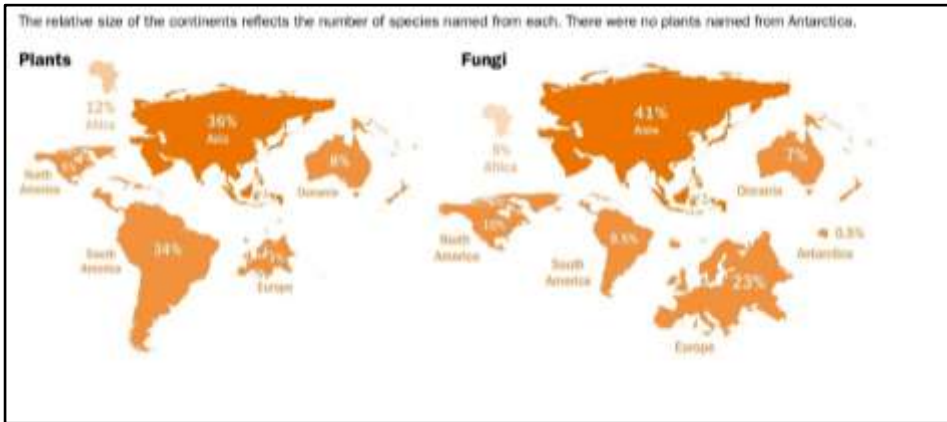
Tuttavia, molte delle nuove specie risultano già minacciate, cosicché può accadere che una nuova specie descritta e classificata sia già in via di estinzione e ciò significa che le specie stanno scomparendo prima ancora che siano state studiate.

Il regno fungino ha prodotto numerose specie nuove: attualmente sono state identificate 148.000 specie di funghi, ciò nonostante, si ritiene che oltre il 90% delle specie fungine sia ancora sconosciute. Il motivo principale per cui si sa così poco sui funghi è perché, mentre quasi tutte le piante sono visibili fuori terra, i funghi spesso rimangono "nascosti".

Infatti, lo studio dei funghi si basa principalmente sulle loro strutture portatrici di spore, chiamate carpofori, e molte specie producono tali strutture solo in determinati periodi dell'anno; inoltre, alcune specie non le producono ogni anno e altre ancora non le producono affatto. Le specie che non producono i carpofori sono, quindi, finora le meno conosciute.

Nel 2019 la maggior parte delle nuove specie di funghi è provenuta dall'Asia (41%) e dall'Europa (23%) (Figura 56).

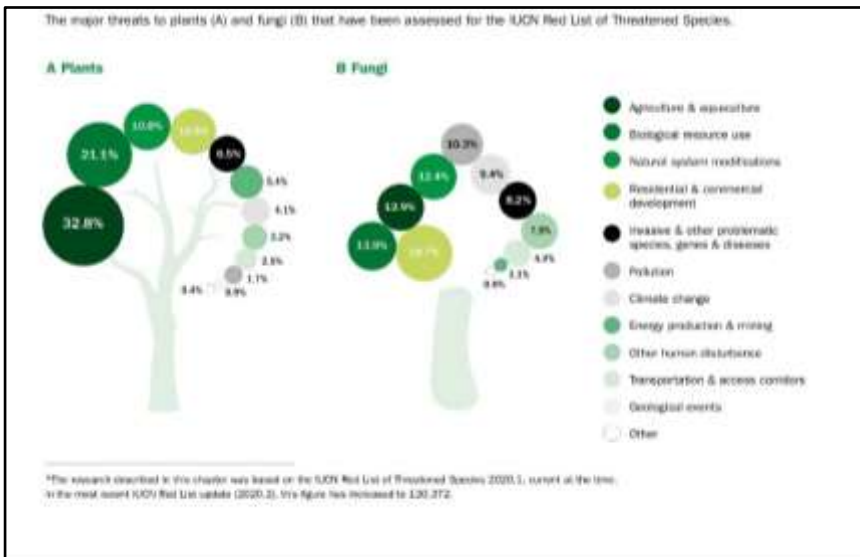
Figura 56. Percentuale di nuove specie vegetali e fungine classificate nel 2019¹⁰⁴



Una volta identificata una specie, il passo successivo è scoprire se essa rappresenti una priorità per la conservazione.

I funghi sono minacciati in particolare dalla perdita di habitat e di ospiti simbiotici, l'inquinamento, lo sfruttamento eccessivo del suolo e i cambiamenti climatici (Figura 57).

Figura 57. Le maggiori minacce a piante e funghi valutate dalla Red List delle specie minacciate della IUCN¹⁰⁴



Per quanto riguarda l'Europa, la principale minaccia alla diversità dei funghi è data dall'intensificazione e dal cambiamento nell'uso del suolo, in particolare dalla silvicoltura e dall'agricoltura. Insieme all'ampliamento degli insediamenti urbani, delle infrastrutture e delle capacità turistiche, ciò ha portato al declino e alla perdita di qualità di habitat precedentemente più diffusi e comuni e ai successivi cambiamenti nella composizione delle specie fungine.

Le principali minacce specifiche identificate per i funghi in Europa sono:

- la diminuzione e la carenza di foreste secolari
- la diminuzione della disponibilità di legno morto grossolano
- la diminuzione del numero di alberi veterani
- l'impovertimento e il declino di vecchie praterie semi-naturali e non fecondate a causa della fertilizzazione, del rimboschimento e della mancanza di pascolo
- l'elevata deposizione di azoto antropogenico in suoli poveri di nutrienti naturali
- l'aumento della frammentazione degli habitat.

Inoltre, in diversi paesi europei (es. Italia, Austria, Germania, Svizzera) la raccolta di funghi commestibili per scopi commerciali o ricreativi ha portato a un diffuso sovrasfruttamento delle risorse fungine, pertanto, alcuni Paesi o regioni hanno introdotto restrizioni legali alla raccolta di funghi commestibili.

La raccolta di funghi commestibili, infatti, può avere effetti collaterali, quali il calpestio intenso e il rastrellamento del terreno (ad esempio durante la raccolta dei tartufi) che possono distruggere e ostacolare lo sviluppo miceliale di alcuni funghi. Inoltre, gli effetti a lungo termine della ridotta disponibilità di spore dovuta alla raccolta di funghi immaturi possono essere un problema per le specie con popolazioni molto piccole.

La Lista Rossa fungina globale

Per proteggere i funghi è necessario comprendere le minacce che tali organismi devono affrontare e se sono a rischio di estinzione: ciò comporta la valutazione dello stato di conservazione delle singole specie. Conoscendo quali funghi siano a rischio e dove, sarà successivamente possibile definire le opportune azioni di conservazione.

La Lista Rossa Globale delle specie minacciate dell'Unione internazionale per la conservazione della natura (IUCN) è ampiamente riconosciuta come l'approccio globale più completo e oggettivo per valutare lo stato di conservazione di tutte le specie viventi, quali animali, vegetali e funghi.

Lo scopo della Lista Rossa è quello di trasmettere l'urgenza delle questioni di conservazione al pubblico e ai responsabili politici, nonché aiutare la comunità internazionale a ridurre il declino e l'estinzione delle specie.

Le valutazioni vengono condotte utilizzando cinque criteri, tra cui la fascia geografica, la dimensione della popolazione e le possibili minacce, che determinano la categoria a cui viene assegnata una specie. Le categorie sono: estinta, estinta in natura, in pericolo di estinzione, in pericolo, vulnerabile, quasi minacciata, minima preoccupazione e carenza di dati (Tabella 1).

Tabella 1. Categorie IUCN

NE, Not Evaluated. La specie non è stata valutata

NA, Not Applicable. L'analisi secondo i parametri consueti non è applicabile alla specie in esame

DD, Data Deficient. Non si hanno dati sufficienti per procedere alla valutazione

LC, Least Concern. La categoria di rischio minimo, in cui si trovano tutte le specie più comuni e diffuse

NT, Near Threatened. La specie è vicina a essere minacciata, ma non rientra in nessuna delle categorie successive

VU, Vulnerable. La popolazione della specie è diminuita del 50% in dieci anni, o il suo areale è calato sotto i 20.000 km², oppure il numero di individui fertili è inferiore a 10.000

EN, Endangered. La popolazione della specie è diminuita del 70% in dieci anni, o il suo areale è calato sotto i 5.000 km², oppure il numero di individui fertili è inferiore a 2.500

CR, Critically Endangered. La popolazione della specie è diminuita del 90% in dieci anni, o il suo areale è sceso sotto i 100 km², oppure il numero di individui fertili è inferiore a 250

RE, Regionally Extinct. La specie si è estinta in una regione geografica nella quale un tempo era diffusa

EW, Extinct in Wild. La specie si è estinta in natura ed esiste solo in cattività

EX, Extinct. La specie si è estinta del tutto

Sebbene la Lista Rossa sia la fonte più completa sul rischio di estinzione globale per le specie, vi sono rappresentate solo circa il 6% di specie di piante, funghi e animali conosciute (116.177 dei circa 2,1 milioni).

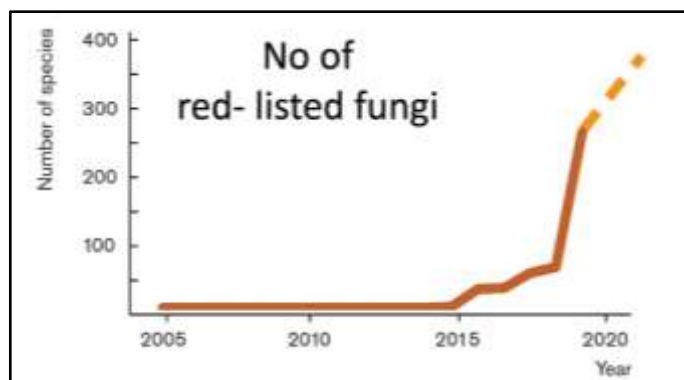
Per quanto riguarda i funghi, questi organismi sono stati a lungo trascurati nelle iniziative internazionali di conservazione. Una delle principali limitazioni dell'attuale Lista Rossa globale è che i funghi, nonostante siano uno dei gruppi di organismi più diversi e importanti, sono poco presenti nella lista. Infatti, delle quasi 41.000 specie mondiali considerate minacciate, solo l'1,46% (circa 600 specie) è rappresentato dai funghi, il restante 98,54% riguarda principalmente specie animali e vegetali. Questa sottorappresentazione dei funghi ostacola notevolmente l'inclusione di tali organismi nelle discussioni sulla conservazione, come anche l'accesso ai programmi di finanziamento, le decisioni politiche e le azioni di conservazione.

La conservazione dei funghi è diventata globale nel 2019 con la *Global Fungal Red List Initiative* (<http://iucn.ekoo.se/en/iucn/welcome>) che ha portato a un aumento significativo della partecipazione da parte della comunità micologica: attualmente nella Lista Rossa Globale sono presenti circa 600 specie (minacciate, valutate e classificate) delle 148.000 descritte, pari allo 0,4% (Figura 58).

Dal 2019 contribuiscono alla Lista Rossa dei funghi cittadini, piccoli gruppi, società micologiche e istituzioni: pertanto, il successo del suddetto progetto dipende dall'impegno della comunità micologica di classificare le specie, fornirne le

informazioni necessarie e controllare e commentare i dati presentati per garantire che i dati richiesti siano disponibili, completi e i più accurati possibile.

Figura 58. Numero totale dei funghi valutati nella Lista Rossa IUCN (Fonte: <http://iucn.ekoo.se/iucn/plans/>)



L'iniziativa della IUCN mira a coordinare gli sforzi della comunità micologica con l'obiettivo di inserire ulteriori specie fungine (minacciate, valutate e classificate), nella Lista Rossa globale.

La Lista Rossa fungina europea

La micologia ha una lunga tradizione in Europa, tuttavia, poiché la ricchezza delle specie è grande e il numero di micologi è ristretto, la conoscenza dei funghi europei è significativamente inferiore rispetto a quella delle piante e dei vertebrati.

Infatti, il numero di micologi professionisti che si occupano di macromiceti è incredibilmente basso nella maggior parte dei Paesi europei (Figura 59).

Inoltre, la conoscenza tassonomica non è affatto risolta in molti gruppi di funghi: ogni anno centinaia di funghi sono pubblicati come nuovi in Europa e, al contempo, si trovano sinonimi di specie già descritte. La maggior disponibilità di strumenti molecolari consente una migliore risoluzione della classificazione di specie fungine, pertanto, alcuni taxa sono stati uniti in un'unica specie, mentre in altri casi, quella che si pensava fosse una singola specie è ora riconosciuta come, di fatto, più specie diverse.

La maggior parte dei Paesi europei ha prodotto liste di controllo di almeno alcuni gruppi di funghi. Tuttavia, risulta che essi solo raramente siano considerati nelle politiche e nelle attività nazionali di conservazione della natura. La ragione principale è probabilmente una combinazione di mancanza di consapevolezza, mancanza di pressione politica e mancanza di informazioni adeguate.

Purtroppo, non è stato ancora fatto alcun tentativo di fare una lista di controllo o una stima per il probabile numero totale di funghi (macromiceti) in Europa. Utilizzando la relazione tra numero di specie di piante vascolari e di specie fungine, adoperato per

le stime globali, è probabile che in Europa siano presenti 100.000 specie fungine e che la ricchezza totale di macromiceti in Europa superi le 10.000 specie (Tabella 2).

Tabella 2. Numero stimato di specie di gruppi di organismi in Europa

Gruppi di organismi	Numero di specie in Europa
Funghi	> 75.000
Funghi macromiceti	> 15.000
Piante vascolari	12.500
Muschi	1753
Farfalle	8470
Uccelli	524
Mammiferi	226

Attualmente si conoscono diverse specie fungine ben studiate che dovrebbero essere considerate endemiche in Europa, quali *Pleurotus nebrodensis* (Inzenga) Quél. (Figura 60), *Tulostoma niveum* Kers, *Calocybe favrei* (R. Haller Aar. & R. Haller Suhr) Bon.

Le principali associazioni micologiche europee sono l'Associazione Micologica Europea (EMA) e il Consiglio Europeo per la Conservazione dei Funghi (ECCF).¹⁰⁵

L'EMA è un'organizzazione non governativa fondata nel 2003 che promuove attività micologiche in tutta Europa (www.euromould.org).

L'ECCF è una rete di micologi di tutta Europa interessati e attivi nella conservazione fungina ed è stato fondato nel 1985. Nel 2003, l'ECCF ha preparato una proposta per l'inserimento di 33 macromiceti nella Convenzione di Berna; inoltre, attualmente sta completando le mappe di distribuzione di 50 specie europee selezionate e sta lavorando a una Lista Rossa europea dei macromiceti (www.eccf.info).¹⁰⁵

Delle 600 specie fungine attualmente pubblicate sulla Lista Rossa globale della IUCN, gran parte sono provenienti dall'Europa.

Nonostante molti progressi siano stati compiuti, è necessario valutare lo stato di conservazione di molte altre specie.

Figura 59. Numero di micologi professionisti che studiano i macromiceti

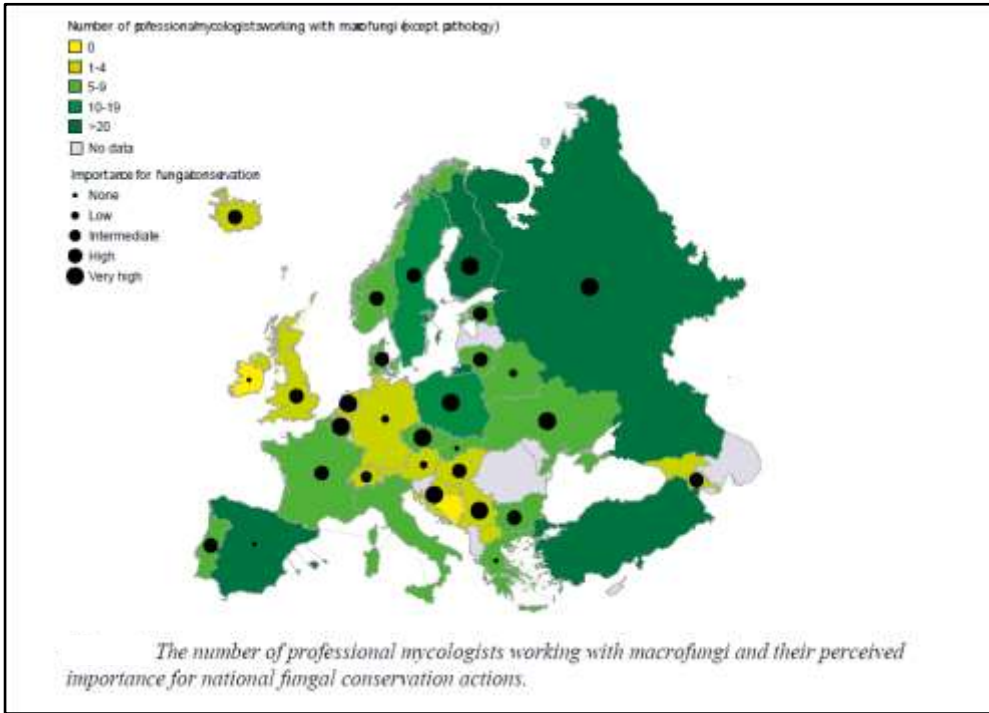


Figura 60. *Pleurotus nebrodensis* (Inzenga) Quél. Foto di Giancarlo Bistocchi 31/05/2014



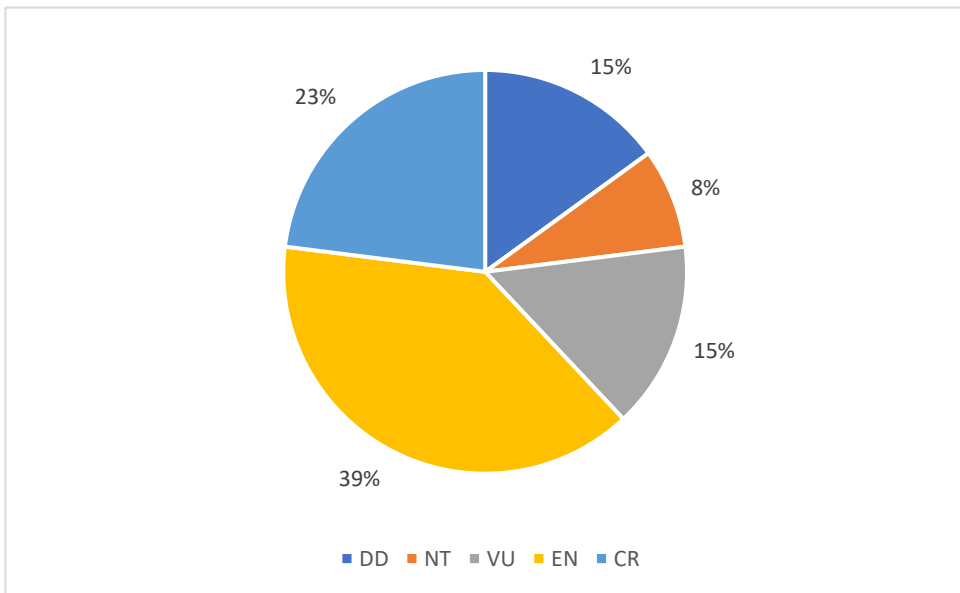
La Lista Rossa fungina italiana

Le caratteristiche geografiche, climatiche e storiche dell'Italia hanno consentito l'insediamento e la permanenza di una variegata e ricca biodiversità, inclusa una gran varietà di specie endemiche, di ambienti esclusivi e di paesaggi caratteristici. Infatti, su una superficie piuttosto limitata, se comparata alla totalità del continente europeo, sono presenti circa 1/3 delle specie animali europee e la metà di quelle vegetali.¹⁰⁶

Per quanto riguarda i macromiceti, il Gruppo di Lavoro della Società Botanica Italiana (SBI) ha individuato fino a oggi, secondo la metodologia utilizzata dalla IUCN, 13 specie fungine, di cui 3 specie gravemente minacciate di estinzione (Tabella 3).¹⁰⁷

Tra le 13 specie valutate, la maggior parte (77%) ricade nelle tre categorie VU, EN e CR (Figura 61).

Figura 61. Percentuale di specie di funghi ricadenti nelle diverse categorie di minaccia



Inoltre, tra le suddette specie, *Pleurotus nebrodensis* (Inzenga) Quél., fungo endemico siciliano, è già incluso nelle 50 specie più minacciate del Mediterraneo.¹⁰⁷

Tabella 3. Specie fungine minacciate in Italia

Specie	Categoria per l'Italia	Categoria globale IUCN	Endemica
<i>Alpova rubescens</i> (Vittad.) Trappe	DD		
<i>Boletus dupainii</i> Boud.	VU	NE	
<i>Disciseda bovista</i> (Klotzsch) Eynhd	DD		
<i>Entoloma bloxamii</i> (Berk & Broome) Sacc.	EN	NE	
<i>Hericium erinaceus</i> (Bull.Fr.) Pers.	EN	NE	
<i>Hygrocybe calyptriformis</i> (Berk. & Broome) Fayod	EN	NE	
<i>Peziza pseudoammophila</i> Bon & Donadini	CR	NE	
<i>Fomitiporia pseudopunctata</i> (A.David, Dequatre & Fiasson) Fiasson	EN	NE	
<i>Plerotus nebrodensis</i> (Inzenga) Qué.	CR	CR	Si
<i>Poronia punctata</i> (L.) Fr.	VU	NE	
<i>Psathyrella ammophila</i> (Durieu & Lév.) P.D.Orto	NT		
<i>Rhizopogon rocabrunae</i> M.P.Martin	CR	NE	
<i>Boletus ichnusanus</i> (Alessio, Galli & Littini) Oolbekk.	EN	NE	

2.4 La Lista Rossa della sottodivisione Pezizomycotina e dell'ordine Boletales: due casi studio relativi all'Umbria

Di Paola Angelini, Andrea Arcangeli, Giancarlo Bistocchi e Roberto Venanzoni

Introduzione

I funghi rivestono un'importanza ecologica fondamentale e, insieme ai batteri eterotrofi, costituiscono i principali decompositori della biosfera. I decompositori sono necessari per la continuità della vita sul nostro pianeta tanto quanto lo sono i produttori di nutrienti organici.¹⁰⁸⁻¹¹¹ Alcuni funghi sono inoltre importanti in medicina e in economia come infestanti, patogeni e produttori di particolari composti (es. antibiotici, enzimi, ecc.).¹¹² Tuttavia, nonostante la loro importanza funzionale, sono spesso trascurati ed esclusi dalle iniziative di conservazione.¹¹³

Le principali minacce per i funghi, così come per gli animali e le piante, riguardano il degrado, la perdita e la frammentazione degli habitat naturali, i cambiamenti climatici e la deposizione di azoto e altri inquinanti, in analogia con quanto emerge sia a livello europeo sia a livello globale per la biodiversità in generale.¹¹⁴⁻¹¹⁵

L'Unione Internazionale per la Conservazione della Natura, meglio conosciuta con la sigla IUCN (*International Union for Conservation of Nature*), è un'organizzazione che comprende 1300 membri (ONG e agenzie governative) e più di 10000 esperti scientifici. Gli obiettivi dell'IUCN sono quelli di "influenzare, incoraggiare e assistere le società del mondo al fine di conservare l'integrità e la diversità della natura e di assicurare che qualsiasi utilizzo delle risorse naturali sia equo ecologicamente sostenibile".

Uno degli strumenti più importanti sviluppati dalla IUCN è la Lista Rossa delle specie minacciate, dove le varie specie (animali, vegetali e funghi) sono classificate secondo

categorie che ne identificano il rischio di estinzione. Queste categorie vengono assegnate in maniera sistematica riferendosi a vari criteri che includono il numero di individui, la distribuzione della specie, l'andamento della popolazione (se in crescita, stabile o in declino), le minacce presenti nell'habitat naturale, se la specie è di interesse commerciale, ecc.¹¹⁶⁻¹²⁰

Questi criteri rendono molto difficile l'applicazione delle categorie di minaccia ai funghi. Il motivo principale alla base della mancanza di protocolli di conservazione dei funghi è la raccolta di dati inerenti le popolazioni fungine e la distribuzione geografica. Il reperimento di tali informazioni, a causa della loro notevole complessità necessitano infatti di personale fortemente specializzato e di gruppi micologici coordinati.

In accordo alle metodologie impiegate dall'Unione Internazionale per la Conservazione della Natura,¹²⁰ il gruppo di lavoro per la micologia del Dip.to di Chimica, Biologia e Biotecnologie (Università di Perugia), in collaborazione con il Consiglio Nazionale delle Ricerche di Perugia (Istituto di Bioscienze e Biorisorse), l'Università di Siena (Department of Life Sciences, BIOCONNET, BIOdiversity and CONservation NETwork), l'Università di Bari "Aldo Moro" (Dipartimento di Biologia), il Circolo Micologico Naturalistico di Perugia e il Gruppo Micologico Ternano, hanno realizzato negli anni 2018-2022 la stesura delle prime Liste Rosse dei macrofunghi dell'Umbria, relative alla sottodivisione *Pezizomycotina* O.E. Erikss. & Winka (Ascomycota) e all'ordine *Boletales* E.-J. Gilbert (Basidiomycota).¹²¹⁻¹²²

Lo scopo di questo lavoro è stato quello di effettuare la valutazione del rischio di estinzione di tutte le specie di *Pezizomycotina* e *Boletales* finora conosciute in Umbria mediante l'applicazione di Categorie e Criteri standard basati sulle linee guida sviluppate dall'IUCN accettate a livello internazionale.¹¹⁶⁻¹²⁰

Molti di questi casi di studio contribuiranno a migliorare la conservazione di Ascomycota e Basidiomycota in Umbria e in Italia e raggiungeranno gli obiettivi riportati nell'ambito della "Bern Convention on the Conservation of European Wildlife and Natural Habitat" (<https://www.coe.int/en/web/bern-convention>).

Risultati

La Lista Rossa dei macrofunghi della sottodivisione *Pezizomycotina* (Ascomycota) dell'Umbria

La Lista Rossa dei macrofunghi della sottodivisione *Pezizomycotina* (Ascomycota) presenti nel territorio umbro, comprende 108 specie appartenenti a 50 generi e 23 famiglie.¹¹⁰

Delle 108 specie, il 60.18% sono classificate come minacciate, mentre il 12.96% sono Quasi a Rischio (NT, Near Threatened), 1.86% a Minor Rischio (LC, Least Concern) e 25% Dati Insufficienti (DD, Data Deficient). All'interno del primo gruppo, solo una specie (1.54%) è stata classificata come Gravemente Minacciata (CR, Critically

Endangered), mentre il 46.15% è Minacciato (EN, Endangered) e il 52,31% è Vulnerabile (VU, Vulnerable) (Tabella 4).¹²¹

Nell'ambito della sottodivisione Pezizomycotina, lo stato di conservazione varia tra le famiglie e i generi. a esempio, nella famiglia delle Diatrypaceae Nitschke, quattro specie su quattro sono classificate come minacciate (100%); nelle *Pezizaceae* Dumort., su dieci specie, sette sono minacciate (70%), una non è minacciata (10%) e due sono DD (20%); nelle *Morchellaceae* Rchb., di nove specie presenti, sei sono minacciate (66.6%) e tre sono DD (33,40%); infine, nelle Helotiaceae Rehm, su tre specie, due non sono minacciate e l'altra è DD.

Inoltre, in ventisette generi, una specie su una è classificata come minacciata (100%); in quattro generi, una specie su una è classificata come non minacciata (100%); nel genere *Scutellinia* (Cooke) Lambotte, delle cinque specie presenti, quattro sono classificate come minacciate (80%) e una non minacciata (20%); nel genere *Tuber* P. Micheli ex F.H. Wigg., su tredici specie presenti, cinque sono minacciate (38.46%), quattro non sono minacciate (30.77%) e quattro sono DD (30.77%).¹²¹

Figura 62. *Dissingia leucomelaena* (Pers.) K. Hansen & X.H. Wang (VU, Vulnerabile). Foto di Enrico Bini



La Lista Rossa dei macrofunghi dell'ordine Boletales (Basidiomycota) del Centro Italia.

La Lista Rossa dei macrofunghi dell'ordine Boletales del Centro Italia comprende 100 specie distribuite in 163 località, appartenenti a 42 generi e 12 famiglie.¹²² La famiglia *Boletaceae* Chevall. è quella dominante, con 62 specie, seguite da *Suillaceae* Besl & Bresinsky (10 specie), *Sclerodermataceae* Corda (5 specie), *Paxillaceae* Lotsy e

Rhizopogonaceae Gäum. & C.W. Dodge (4 specie ciascuna), *Gomphidiaceae* Maire ex Jülich, *Hygrophoropsidaceae* Kühner e *Tapinellaceae* C. Hahn (3 specie ciascuna), *Coniophoraceae* Ulbr. e *Gyroporaceae* Manfr. Binder & Bresinsky (2 specie ciascuna), *Diplocystidiaceae* Kreisel e *Serpulaceae* Jarosch & Bresinsky (1 specie ciascuna).

Tabella 4. Numero (n) e percentuale (%) di specie fungine indicate in ciascuna categoria minacciata (TC, threatened category) nella Lista Rossa delle Pezizomycotina in Umbria.

Categoria di minaccia	Categoria IUCN	n	% (Lista)	% (Specie minacciate)
Dati Insufficienti	Data Deficient (DD)	27	25	
A Minor Rischio	Least Concern (LC)	2	1.86	
Quasi a rischio	Near Threatened (NT)	14	12.96	
	Critically Endangered (CR)	1		1.54
Minacciate	Endangered (EN)	30		46.15
	Vulnerable (VU)	34		52.31
	Specie minacciate (totale)	65	60.18	100
TOTALE		108	100	

Un totale di 67 specie è stato assegnato a una categoria di rischio (Minacciata, EN; Vulnerabile, VU). Altre 19 specie sono state classificate Quasi a Rischio (NT) e 11 specie come a Minor Rischio (LC). Solo 3 specie sono considerate carenti di dati (DD) (Tabella 5). Si tratta di specie (*Serpula lacrymans* (Wulfen) J. Schröt., *Suillus placidus* (Bonord.) Singer, *S. viscidus* (L.) Roussel) per le quali non sono disponibili informazioni sufficienti per effettuare una valutazione del rischio di estinzione in base alla loro distribuzione e dimensione della popolazione.

A livello di famiglie, la percentuale di taxa minacciati è piuttosto variabile. A esempio, nella famiglia *Rhizopogonaceae* Gäum. & C.W. Dodge, quattro specie su quattro sono valutate come minacciate (100%); nelle *Suillaceae* Besl & Bresinsky, quattro specie su dieci sono minacciate (40%), altre quattro non sono minacciate (40%) e due sono DD (20%); nelle *Boletaceae* E.-J. Gilbert, delle 62 specie presenti, 43 sono minacciate (69,35%) e 19 non minacciate (30,65%).

Anche a livello di genere, la percentuale di specie minacciate rivela tendenze specifiche. A esempio, in sedici generi, una specie su una è valutata come minacciata (100%); in entrambi i generi *Boletus* L. e *Leccinellum* Bresinsky & Manfr. Binder, tre specie su quattro sono valutate come non minacciate (75%); nel genere *Suillus* Gray, su dieci specie presenti, quattro sono classificate Minacciate (40%), quattro Non Minacciate (40%) e due sono DD (20%).¹²²

Tabella 5. Numero (n) e percentuale (%) di specie in ciascuna categoria minacciata (TC, threatened category) nella Lista Rossa dell'ordine Boletales del Centro Italia.

Categoria di minaccia	Categoria IUCN	n	% (Lista)	% (Specie minacciate)
Dati Insufficienti	Data deficient (DD)	3	2.97	
A Minor Rischio	Least concern (LC)	9	8.91	
Quasi a Rischio	Near threatened (NT)	21	20.79	
	Critically endangered (CR)	0	0	0
Minacciate	Endangered (EN)	31	30.69	45.59
	Vulnerable (VU)	37	36.63	54.41
	Specie minacciate (totale)	68	67.33	100
TOTALE		101	100	

Conclusioni

Specifiche attività di monitoraggio consentiranno sicuramente una migliore comprensione delle minacce che colpiscono le specie fungine e le dinamiche delle popolazioni. Queste informazioni saranno di grande aiuto per la possibile attuazione in futuro di azioni di conservazione in situ e/o ex situ con l'istituzione di aree protette e con l'intervento di banche del germoplasma.¹²¹⁻¹²³

Figura 63. *Strobilomyces strobilaceus* (Scop.) Berk. (EN, Minacciata). Foto di Giancarlo Angeles Flores



Figura 64. *Suillellus permagnificus* (Pöder) Blanco-Dios (EN, Minacciata). Foto di Giancarlo Bistocchi



3 La bioindicazione con i funghi

Di Pietro Massimiliano Bianco

La qualità ambientale di un'area o di un territorio può essere stimata con l'uso di idonei indicatori che possono essere definiti come strumenti in grado di rappresentare particolari condizioni dell'ambiente.¹²⁴⁻¹²⁵ Un buon indicatore deve avere caratteristiche in grado di garantire rappresentatività, accessibilità, affidabilità, operatività, utilità, validità analitica e misurabilità.¹²⁶⁻¹²⁷

L'esigenza di disporre di indicatori per la valutazione della qualità del suolo nasce dal fatto che il suolo è un sistema complesso e spesso si tende, per oggettive difficoltà d'analisi, a sottovalutarne l'importanza.

L'efficienza delle interazioni dinamiche nelle relazioni trofiche del suolo risulta legata ai diversi elementi ambientali e pedologici e ai rapporti che le varie componenti vegetali, micologiche e della fauna del suolo stabiliscono tra di loro.

All'interno di una comunità vegetale i funghi svolgono fondamentali attività nella regolazione dei cicli energetici e nutrizionali e delle caratteristiche ed evoluzione dell'humus.

Per il loro ruolo essenziale nel mantenimento della complessità e della biodiversità, in particolare degli ecosistemi terrestri, i funghi sono stati da tempo individuati quali possibili indicatori per il monitoraggio della biodiversità e dello stato di salute degli habitat.¹²⁸⁻¹²⁹

In generale, per un appropriato approccio alla conoscenza delle comunità del suolo, l'organizzazione di ricerche approfondite dovrebbe prevedere un elevato grado di multidisciplinarietà. Per identificare le diverse funzioni della comunità del suolo, anche in relazione alle relazioni competitive, simbiotiche e parassitiche con le specie micologiche, sono, infatti, utilizzate, oltre al semplice rilevamento di specie e consistenza delle popolazioni, diverse metodologie, ognuna delle quali in grado di fornire diverse informazioni sull'uso del substrato e sulle relazioni tra gli organismi in relazione al diverso livello di scala di osservazione: la metagenomica, la metatrascrittomica, metodi basati sulla coltura ad alta intensità di tempo combinati con test funzionali, profili fisiologici a livello di comunità.¹³⁰⁻¹³¹

3.1 I funghi come indicatori della qualità dei suoli

Di Pietro Massimiliano Bianco

La componente micologica del suolo svolge un ruolo estremamente importante negli ecosistemi contribuendo alla mineralizzazione dei nutrienti, alla degradazione della sostanza organica morta e al mantenimento di una struttura del terreno favorevole allo sviluppo della vegetazione.¹²⁵⁻¹²⁶

A loro volta i funghi possono risentire di alterazioni fisico-chimiche del suolo determinate da fenomeni di inquinamento, variazioni climatiche o cambiamenti nell'uso del suolo stesso. La diversità e complessità delle reti micorriziche sono correlabili allo stato e alla qualità degli ambienti naturali e antropici e si ripercuotono direttamente sulla salute e capacità di crescita delle singole specie sia in ambito naturale che agricolo.¹²⁵⁻¹²⁶

Dal punto di vista funzionale i funghi possono essere classificati in tre gruppi:

- controllori biologici
- regolatori dell'ecosistema
- decompositori della materia organica e trasformatori dei composti.

I controllori biologici possono regolare malattie, parassiti e la crescita di altri organismi.

I regolatori dell'ecosistema sono responsabili della formazione della struttura del suolo e della modifica degli habitat per altri organismi, regolando la dinamica dei processi nel suolo.

In particolare, le micorrize costituiscono una barriera fisica alla penetrazione di parassiti nell'apice radicale e modificano qualitativamente e quantitativamente i metaboliti vegetali emessi nella rizosfera; inoltre, generalmente producono composti antibiotici che rappresentano una barriera tossica nei confronti di molti microrganismi del terreno.¹²⁷⁻¹²⁹

Ai fini dell'osservazione e della valutazione dei cambiamenti nella funzionalità del suolo è necessario individuare marcatori metabolici: un buon esempio è rappresentato dalla glomalina, una glicoproteina idrofobica prodotta dai funghi micorrizici arbuscolari (AMF), ubiquitari nelle radici delle maggior parte delle piante terrestri: la glomalina, in particolare, si accumula nel suolo sotto forma di una sostanza proteica denominata "Glomalin Related Soil Protein" (GRSP).¹³²

La GRSP è un marcatore, facilmente misurabile, dell'attività di medio-lungo periodo dei funghi AMF. Tale marcatore è stato dimostrato essere sensibile ai cambiamenti ambientali quali l'aumento di CO₂ atmosferica e diversi sistemi di uso e gestione del suolo; inoltre, è anche risultato essere correlato alla stabilità degli aggregati di particelle del suolo, importante parametro di funzionalità del suolo stesso. Infine, è stato possibile correlare le concentrazioni di glomalina nel suolo alla produttività primaria di un ecosistema.¹³²

Nel suolo il micelio fungino è a diretto contatto con l'ambiente esterno ed è in grado di assorbire e accumulare ioni pesanti, che possono essere trasferiti all'interno delle cellule fungine. I funghi hanno, quindi, anche notevoli requisiti per l'identificazione del livello di contaminazione ambientale da metalli pesanti e radionuclidi. Negli ultimi vent'anni in Europa sono stati compiuti numerosi studi sulla determinazione dei

metalli pesanti nei funghi e i risultati ottenuti evidenziano comportamenti diversi tra specie e specie.

L'aumento dell'apporto di nitrati e ammonio, provenienti dagli ambiti agricoli e dall'inquinamento dell'aria, riduce la crescita dei funghi ectomicorrizici nel suolo negli ecosistemi forestali e diminuisce la diversità e la produzione di corpi fruttiferi delle specie ectomicorriziche, mentre le specie saprofiti sono meno colpite. Alcune specie del genere *Russula* Pers. (ad es. *Russula laricina* Velen., *Russula fuscorubroides* Bon.) sono stata segnalate come sensibili all'aumento dei livelli di composti azotati.¹²⁴

Tuttavia, le popolazioni di alcune specie ectomicorriziche, come *Paxillus involutus* (Batsch) Fr. e *Lactarius rufus* (Scop.) Fr. e specie appartenenti alle famiglie *Thelephoraceae* Chevall. e *Corticiaceae* Herter, rimangono in gran parte inalterate o addirittura aumentano la produzione dei corpi fruttiferi nei suoli forestali nei quali si è constatato un aumento di azoto.¹³³⁻¹³⁷

Perciò variazioni temporali della composizione delle comunità fungine in un dato luogo possono essere riferite ai cambiamenti nel tempo delle modalità di gestione dei territori in relazione all'apporto di nutrienti, fornendo anche informazioni sulla capacità dell'ecosistema di organizzare quelli in eccesso.¹²⁷

Interventi che ristabiliscono gli equilibri batterici e micologici sono una valida alternativa all'uso eccessivo di fertilizzanti e il ruolo dei funghi è molto importante anche nella protezione delle piante contro vari microrganismi patogeni. Infatti, negli ultimi anni è stata evidenziata la potenziale applicazione della coltivazione dei funghi per migliorare la qualità dei prodotti, aumentare la produttività degli ecosistemi agricoli e migliorare la stessa salute delle piante coltivate.¹³⁸⁻¹⁴²

Sia negli ecosistemi agricoli che in quelli naturali le variazioni delle popolazioni di funghi possono fornire fondamentali informazioni sullo stato del suolo e sulle sue possibili evoluzioni in relazione alle modalità di gestione (Tabella 6).

Tabella 6. Composizione delle comunità fungine nei diversi ecosistemi del suolo e loro funzione.¹⁴³

Ecosistema	Funghi indicatori	Significato
Agricoltura	Agaricales, Hypocreales	Aumento nei suoli affetti da aridità
	Sordariales, Capnodiales, Eurotiales	Riduzione nei suoli affetti da aridità
	Mortierella, Fusarium, Gibberella	Dominanti nei suoli trattati con Concimi N-P-K
	Mortierella, Fusarium, Schizotherium	Tendenza a diventare dominanti nei suoli trattati con letame
	Ascomycota, Sordariomycetes, Eurotiomycetes, Dothideomycetes	Decompositori chiave nei suoli agricoli. Aumento dopo le fertilizzazioni con composti azotati
	Leotiomycetes, Helotiales	Diminuzione nei suoli fertilizzati con N e P.
	Cyphellophora, Penicillium, Chloridium, Trichodema, Acremonium	Aumento nei suoli fertilizzati
Orticoltura	Exopiala, Clonostachys, Sarcocladium, Schizothecium Magnaporthe, Phaeosphaeriopsis	Diminuiscono nei suoli fertilizzati con N e P
	Glomus, Gigaspora, Scutellospora, Acaulospora, Entrophospora	I funghi arbuscolari micorrizici (AMF) aumentano la crescita delle piante incrementando l'assunzione di fosforo e altri nutrienti
Praterie	Trichoderma asperellum, Trichoderma atroviride, Trichoderma harzianum, Trichoderma virens, Trichoderma viride	Agenti biostimolanti e di biocontrollo, sopprimono funghi patogeni come <i>Fusarium</i> sp., <i>Colletotrichum</i> sp., <i>Rhizoctonia</i> sp.
	Hygrocybe, Camarophylloopsis, Dermoloma, Entoloma, Clavariaceae, Geoglossaceae	Saprotrofi, decompositori
	Glomus	Ruolo dominante tra i funghi arbuscolari micorrizici
	Agaricomycotina, Saccharomyceta, Paraglomerales, Chytridales, Archaeosporales, Lobulomycetales, Rhizophydiales, Glomerales	Funghi arbuscolari micorrizici (AMF), patogeni, decompositori
	Acaulospora, Glomus, Scutellospora	Funghi arbuscolari micorrizici (AMF) importanti per salute del suolo e delle specie vegetale, la loro ricchezza specifica diminuisce nei pascoli degradati.
Foreste	Ascomycota, Glomeromycota, Hypocreales, Pezizales, Dothideales (Aureobasidium), Pleosporales (Alternaria, Cochliobolus, Bipolaris, Phaeosphaeria, Leptosphaeria, Phoma	Aumento degli Ascomycota e diminuzione dei Glomeromycota dopo addizione di N e P nel suolo.
	Clonostachys candelabrum, Geomyces pannorum, Penicillium adametzi, Penicillium commune, Penicillium daleae, Penicillium janczewskii, Trichoderma	Antagonisti che sopprimono fitopatogeni del suolo.
	Tremellomycetes, Dothideomycetes	Classi dominanti nei suoli forestali evoluti

3.2 I funghi come indicatori della biodiversità

Di Pietro Massimiliano Bianco

Gli indicatori di diversità biologica in termini di ricchezza e abbondanza di popolazione sono molto importanti per la conoscenza e la conservazione degli ecosistemi.¹⁴⁴

I macrofunghi sono anche un'importante fonte di cibo per molti animali della foresta e servono da rifugio per insetti del suolo e piccoli organismi, anch'essi parti essenziali di un ecosistema forestale in buone condizioni ecologiche.¹⁴⁵

Su scala globale, le precipitazioni medie annue sembrano essere il motore più forte della ricchezza fungina, ma anche le proprietà del suolo, in particolare pH e concentrazione di calcio, hanno importanti effetti. I funghi del suolo sono generalmente considerati acidofili rispetto ai batteri, ma i risultati attuali suggeriscono che presentano una gamma ampia di pH-tolleranza.

A livello globale, la ricchezza di funghi non diminuisce come la diversità di specie vegetali al crescere della latitudine e il rapporto tra ricchezza di funghi e piante sale verso i poli. I funghi sono, quindi, una componente chiave della biodiversità totale terrestre alle alte latitudini, con importanti implicazioni per la conservazione ambientale.¹⁴⁶⁻¹⁴⁸

La ricchezza relativa dei principali gruppi di funghi, ovvero ectomicorrizici, saprotrofi e patogeni, ha un'ampia variazione tra i principali biomi terrestri. La ricchezza di funghi ectomicorrizici è strettamente correlata alla ricchezza delle specie di piante ospiti e all'elevato pH del suolo; la ricchezza di saprotrofi è positivamente correlata alla precipitazione annuale media; quella dei patogeni è negativamente correlata alla latitudine ma positivamente correlata alla disponibilità di azoto.¹⁴⁹⁻¹⁵¹

I vari tipi di micorrize (Tabella 7) hanno una diversa frequenza negli ambienti soprattutto in relazione alla loro complessità strutturale e alle forme di crescita delle piante a cui sono associate. Nei climi temperati alberi quali *Fagus*, *Picea*, *Pinus*, *Quercus* formano spesso simbiosi ectomicorriziche, molti arbusti formano comunemente micorrize ericoidi (*Ericales* Dumort.) o arbutoidi (*Arbutus* L., *Arctostaphylos* Adans e alcune *Pyrolaceae* Dumort.), mentre le piante erbacee sono caratterizzate dall'abbondanza di micorrize vescicolo-arbuscolari.

I simbionti ectomicorrizici appartengono ad almeno 5.000 specie fungine, tra cui troviamo i generi *Boletus* L., *Lactarius* Pers., *Russula* Pers., *Suillus* Gray, *Amanita* Pers., *Paxillus* Fr., *Morchella* Dill. ex Pers. e *Tuber* P. Micheli ex F.H. Wigg. I funghi ectomicorrizici mutualisti favoriscono intere famiglie di piante come *Fabaceae* Lindl., *Betulaceae* Gray e *Fagaceae* Dumort.

Le micorrize arbuscolari (AM) interessano l'80% delle specie vegetali e la maggior parte delle piante coltivate (grano, mais, orzo, patata, pomodoro, legumi, agrumi, vite, olivo, piante da frutto, cotone, canna da zucchero, albero della gomma, erbe

spontanee dei prati). Le AM sono componenti essenziali dei processi ecosistemici su larga scala e agiscono come "ingegneri ecosistemici" delle comunità vegetali.

Tabella 7. Tipi di micorrize, piante ospiti e funghi simbionti

Tipo di micorriza	Pianta ospite	Fungo simbionte
Ectomicorrize	Piante forestali perenni e ad alto fusto, quali abete, pino, faggio, castagno, quercia	Circa 5000 specie di funghi appartenenti a Basidiomiceti (<i>Amanita</i> , <i>Boletus</i> , <i>Laccaria</i> , Ascomiceti (<i>Tuber</i>) e Zigomiceti (<i>Endogone</i>)
Ecto-endomicorrize	Piante ectomicorriziche (pino e larice), <i>Ericales</i> (<i>Arbutus</i> , <i>Arctostaphylos</i>), generi <i>Monotropa</i> e <i>Pyrola</i>	Ascomiceti, Basidiomiceti, alcuni formanti ectomicorrize (<i>Boletus</i> , <i>Laccaria</i>)
Endomicorrize ericoidi	Specie di <i>Ericales</i> come mirtillo, erica, calluna, rododendro	Due specie di Ascomiceti, <i>Hymenoscyphus ericae</i> e <i>Oiodendron maius</i>
Endomicorrize delle Orchidee	Tutte le specie di orchidee	8 generi di Basidiomiceti, riferiti a <i>Rhizoctonia</i>
Micorrize arbuscolari	Briofite, Pteridofite, Gimnosperme e la maggior parte delle Angiosperme (80% delle specie vegetali)	Circa 150 specie del phylum <i>Glomeromycota</i>

Questa schematizzazione è valida solo a livello statistico, perché funghi di tipi differenti possono coesistere sulla stessa pianta, tuttavia, essa può fornire valide chiavi di interpretazione ecologica, soprattutto nei confronti diacronici, in relazione allo stato evolutivo di un habitat o per la valutazione di interventi quali le riforestazioni (Tabella 8).

Figura 65. *Suillus granulatus* (L.) Roussel. Foto di Giancarlo Bistocchi



Tabella 8. Confronto di antichi siti boschivi, piantagioni e praterie dell'Oxfordshire (UK) in termini di generi identificati¹⁴⁶⁻¹⁴⁷

Tipi di funghi	Generi	Boschi vetusti	Rimboschimenti	Praterie
Ectomicorrizici (ECM)	<i>Amanita</i>	*	*	
	<i>Clavulina</i>	*	*	
	<i>Cortinarius</i>	*	*	
	<i>Gymnopus</i>	*	*	
	<i>Hymenogaster</i>	*		
	Inocybe	*	*	
	Laccaria	*	*	
	Lactarius	*	*	
	Lepista	*		
	Phaeocollybia		*	
	Pseudotomentella	*	*	
	Rhizopogon		*	
	Russula	*	*	
	Sebacina		*	
	Tomentella/Thelephora	*	*	
	Tylospora		*	
Xerocomus	*	*		
Endomicorrizici	Genea			
	Glomus	*	*	*
	Mortierella	*	*	
Saprofiti	Paraglomus			*
	Ascobolus			*
	Ceratobasidium			
	Clavaria			*
	Cladophialophora	*		
	Collybia		*	
	Conocybe		*	
	Coprinus		*	*
	Hebeloma			*
	Heterochaetella	*		
	Hyphoderma		*	
	Infundibulicybe	*		
	Megacollybia		*	
	Mycena	*	*	
	Nolanea	*		
	Phallus	*	*	
	Psathyrella		*	*
	Pseudaleuria	*		
	Rhodotorula			*
	Schizothecium			*
Sphaerobolus	*	*		
Trichosporon			*	
Endofiti simbiotici	Codinaeopsis	*		
	Glomium pusillum	*		
	Hyalodendriella		*	
	Ochrocladosporium	*		
	Scleromitrla			*
	Sphaeriothyrium			*
Endofiti patogeni	Tetracladium			*
	Cryptococcus	*	*	*
	Botryotinia	*		

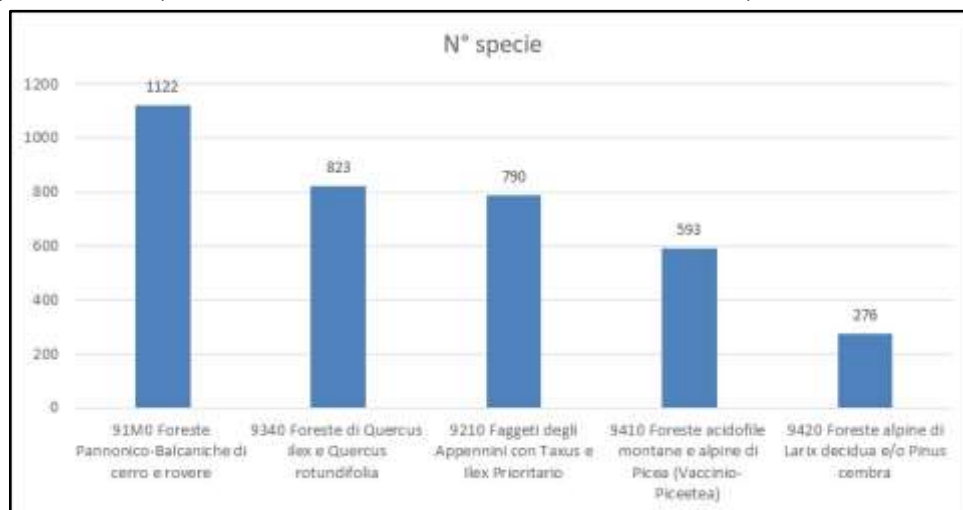
Figura 66. *Suillus granulatus* (L.) Roussel. Particolare dei pori. Foto di Giancarlo Bistocchi



La ricchezza fungina ectomicorrizica è massima alle latitudini settentrionali medio-alte (coincidenti con le foreste temperate e boreali). Nel caso dei *Leotiomycetes* O.E. Erikss. & Winka, che includono funghi che formano associazioni micorriziche con arbusti nani ericoidi, essa aumenta verso i poli.¹⁵²⁻¹⁵³

In ambito italiano, dove sono presenti vari biomi paleartici, dal mediterraneo all'artico-alpino, è stato possibile, dall'analisi della componente macromicetica, rilevare un maggior valore assoluto degli indici di biodiversità micologica nelle foreste di latifoglie termofile rispetto a quelli misurati nelle foreste di conifere subalpine. Tali dati sono confermati dai record attualmente presenti nel SIF (Figura 67).

Figura 67. Diversità specifica di boschi termofili confrontati con formazioni forestali subalpine (dati SIF)



Le ricerche hanno ampiamente dimostrato il ruolo fondamentale dei funghi per la decomposizione del legno morto, e la loro importanza come parte integrante del riciclaggio di carbonio e altri nutrienti. Pertanto, in generale un ecosistema forestale di elevato valore ecologico deve poter mantenere questi elementi che dovrebbero essere considerati strategici nella scelta delle forme di gestione. Primari indicatori di biodiversità sono quindi le specie micologiche la cui rarefazione può essere riferita all'impatto antropico. Con la loro presenza tali specie rappresentano situazioni di pregio ecologico che dovrebbero essere mantenute. Tra di essi sicuramente vanno considerate le specie tipiche delle foreste vetuste (Tabella 9).

Tabella 9. Specie indicatrici di foreste vetuste

Specie	Habitat
<i>Artomyces pyxidatus</i> (Pers.) Jülich	Tronchi nei boschi di latifoglie
<i>Climacocystis borealis</i> (Fr.) Kotl. & Pouzar	Tronchi e ceppi nei boschi di conifere
<i>Fistulina hepatica</i> (Schaeff.) With.	Tronchi e ceppi marcescenti di latifoglie
<i>Antrodia labyrinthica</i> (Bernicchia & Ryvarden) Melo & Ryvarden (syn. <i>Fomitopsis labyrinthica</i> Bernicchia & Ryvarden)	Tronchi marcescenti di <i>Fagus</i> e <i>Abies alba</i>
<i>Ganoderma lucidum</i> (Curtis) P. Karst.	Tronchi marcescenti di latifoglie e più raramente conifere
<i>Grifola frondosa</i> (Dicks.) Gray	Ceppaie di alberi morti o tagliati di recente, alla base di tronchi di latifoglie, soprattutto <i>Castanea sativa</i> e <i>Quercus</i> sp.pl.
<i>Hapalopilus croceus</i> (Pers.) Bondartsev & Singer	Parassita su alberi decidui, saprotrofo su tronchi morti anche in piedi di <i>Quercus</i> , <i>Castanea</i> e <i>Betula</i>
<i>Hericium coralloides</i> (Scop.) Pers.	Tronchi caduti e su legname accumulato in vecchie e mature faggete.
<i>Ischnoderma benzoinum</i> (Wigg.) P. Karst.	Ceppaie e radici di conifere, nei boschi di pini e abeti e nei rimboschimenti.
<i>Oxyporus corticola</i> (Fr.) Ryvarden	Legno morto in piedi in boschi umidi costieri e planiziali.
<i>Phellinus ferruginosus</i> (Schrad.) Pat.	Su legno decorticato di latifoglie, spesso su tronchi a terra.
<i>Polyporus badius</i> (Pers.) Schwein.	Saprobico sul legno morto di latifoglie in particolare <i>Quercus</i> , <i>Populus</i> , <i>Salix</i> occasionalmente su conifere.
<i>Trametes gibbosa</i> (Pers.) Fr.	Tronchi morti in piedi in boschi di conifere e latifoglie
<i>Xylobolus frustulatus</i> (Pers.) P. Karst.	Tronchi morti in piedi

Figura 68. *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 69. *Hericium coralloides* (Scop.) Pers. Foto di Giancarlo Bistocchi



Sono stati proposti vari gruppi funzionali ed ecologici della biodiversità fungina per valutare lo stato di conservazione, il valore naturalistico e gli effetti delle pratiche gestionali degli habitat forestali in Europa (Tabella 10) applicati a vari livelli di scala.¹⁴⁸

Per le *Polyporaceae* Fr. ex Corda, legate alla presenza di alberi senescenti e marcescenti, sono stati descritti quattro ampi modelli ecologici, utili nel loro utilizzo come bioindicatori della qualità forestale e gestionale:

1. l'organizzazione dell'assemblaggio dei polipori nelle foreste naturali segue i principali gradienti di composizione del suolo e degli alberi;
2. la diversità su scala paesaggistica si omogeneizza a causa del drenaggio delle foreste di torbiere e della riduzione delle latifoglie nemorali (prati e parchi alberati tamponano quest'ultimo);
3. le specie che hanno strategie di vita parassite o del marciume bruno sono più substrato-specifiche;
4. le differenze di assemblaggio tra i substrati legnosi sono conseguenti alla gestione dell'habitat.

Tabella 10. Utilizzo di categorie micologiche come indicatori della biodiversità forestale (modificato da: Halme et al.)¹⁴⁸

Indicatore	Tipo forestale	Obiettivo
Taxa micologici forestali	Boschi a dominanza di <i>Fagus sylvatica</i> .	Valutazione dell'integrità biotica Valutazione del valore conservazionistico
	Boschi a dominanza di <i>Fagus sylvatica</i> .	Valutazione del valore conservazionistico. Stesura di liste rosse
	Boschi a dominanza di <i>Fagus sylvatica</i> .	Valutazione del valore conservazionistico
	Boschi a dominanza di <i>Fagus sylvatica</i> .	Valutazione del valore conservazionistico
	Tutti i tipi forestali dell'Europa centrale centrale	Valutazione della qualità strutturale Valutazione della naturalità
	Foreste boreali di conifere	Valutazione dell'integrità biotica Valutazione del valore conservazionistico
	Foreste di <i>Picea abies</i>	Continuità nella presenza di alberi morti
	Habitat forestali inclusi in Natura 2000	Status di conservazione
	Boschi a dominanza di <i>Fagus sylvatica</i> .	Intensità gestionale
	Boschi di <i>Fagus sylvatica</i> e <i>Picea abies</i> vetusti e primari	Identificazione di condizioni di foresta primaria
Polyporales	Foreste boreali di conifere	Identificazione di hot-spot ad alta biodiversità
	Areale del Picchio dorso bianco (<i>Dendrocopos leucotos</i>)	Presenza di Polipori in lista rossa
	Foreste boreali	Ricchezze in specie di Polipori
	Foreste boreali di <i>Picea abies</i>	Valutazione della biodiversità
Diversità specifica dei Macrofunghi	Foreste boreali	Valutazione del valore conservazionistico e naturalistico
	Boschi della zona meridionale della Taiga	Identificazione di condizioni di foresta primaria
	Foreste boreali vetuste	Valutazione del valore conservazionistico
	Foreste di Pinus, Quercus, Fagus e miste Abies-Fagus	Identificazione di condizioni di foresta primaria
	Boschi montani di <i>Fagus sylvatica</i> e <i>Picea abies</i>	Valutazione del valore conservazionistico
	Ecosistemi montani centro-europei	Identificazione di condizioni di foresta primaria
	Foreste montane di <i>Fagus sylvatica</i> e <i>Picea abies</i> e foreste di forra	Identificazione di condizioni di foresta primaria
Cortinarius subg. Phlegmacium	Foreste nemorali di caducifoglie	Valutazione del valore conservazionistico
Phellinus pini	Foreste dominate da Pini	Diversità degli uccelli che nidificano in cavità

3.3 I funghi come indicatori dello stato di salute di specie e habitat

Di Pietro Massimiliano Bianco

I funghi micorrizici migliorano la crescita delle piante aumentando l'assorbimento di sostanze nutritive e proteggendole dagli agenti patogeni e una loro ricchezza è solitamente indice di una buona qualità degli habitat forestali e di una buona salute delle specie vegetali. Le diverse specie micologiche, agendo come simbionti micorrizici, decompositori e agenti patogeni, influenzano, oltre alle caratteristiche dei suoli, anche le fasi di rinnovazione della vegetazione e le caratteristiche specifiche degli habitat.¹⁵¹

La pianta, che fornisce energia al fungo simbiote, ne riceve benefici notevoli, in certi ambienti addirittura fondamentali, quali una migliore assunzione di fosforo e azoto, protezione contro i patogeni e contro lo stress idrico.

Lo stato di salute delle piante, la colonizzazione delle radici, la diversità e la distribuzione delle comunità micorriziche si influenzano reciprocamente e sono significativamente modificati dalle pratiche agricole e dall'inquinamento dei suoli.¹⁵²⁻¹⁵³

Gli zuccheri sintetizzati da una pianta possono essere trasportati ad altre piante, anche appartenenti a specie diverse, quando condividono lo stesso fungo simbiote e sono collegate tra loro da una rete di ife fungine micorriziche: il Wood Wide Web o Rete Micorrizica Comune (CMN, common mycorrhizal networks) aggiunge un ulteriore livello di complessità all'analisi dei benefici nelle interazioni micorriziche. Le Reti micorriziche (MN) sono ormai riconosciute come mediatori delle interazioni tra alberi attraverso i loro effetti sulla sopravvivenza, la crescita e la competitività delle specie.¹⁵²⁻¹⁵³

I funghi simbionti micorrizici, oltre ad assorbire e traslocare nutrienti minerali alla pianta ospite, hanno anche l'importante funzione di redistribuzione delle risorse energetiche all'interno delle comunità vegetali: infatti le piante adulte, attraverso la rete fungina, possono immediatamente fornire nutrimento alle giovani piantine, aumentando la loro possibilità di sopravvivenza.

Campionamenti in varie tipologie di boschi hanno evidenziato un tasso di vitalità e di micorrizzazione maggiore per le piante meno deperenti, dimostrando la corrispondenza tra stato di salute degli individui di una data specie e condizioni dell'apparato radicale.¹³³⁻¹³⁴

Alcune specie, essendo legate a condizioni di suoli evoluti e relativamente indisturbati, possono altresì indicare il buono stato di salute di un habitat. Altri funghi, invece, con la semplice presenza dei propri basidiomi, possono indicare uno stato di sofferenza dell'ecosistema dovuta a un eccesso di necromassa causato da una crisi nel ciclo della decomposizione e altri squilibri ecosistemici in corso, permettendo di predire con un certo anticipo forme di degrado altrimenti difficilmente rilevabili.

A partire dagli anni 80, in Europa è stato osservato un declino nella ricchezza delle specie e nell'abbondanza di specie ectomicorriziche, che è stato interpretato come conseguenza del deperimento forestale dovuto innanzitutto alle pressioni antropiche e in particolare all'aumento dell'apporto atmosferico di azoto e alla sua maggiore disponibilità di esso nel suolo che potrebbero essere le ragioni principali di questo declino.¹³⁵⁻¹³⁶

La vasta gamma genetica e funzionale delle specie fungine fornisce una lista numerosa di specie indicatrici di sofferenza degli ecosistemi dovuta a eccessi di biomassa morta. Un buon indicatore di processi di degrado boschivo in corso è *Megacollybia platyphylla* (Pers.) Kotl. & Pouzar, specie fungina presente sui resti legnosi e indicatrice di notevoli quantità di sostanze azotate nella lettiera, agisce su superfici molto vaste con i propri cordoni miceliari e produce i basidiomi direttamente su questi ultimi.

Cerrena unicolor (Bull.) Murrill, *Coriolopsis gallica* (Fr.) Ryvarden e *Trametes trogii* Berk. possono preannunciare con i propri sporofori l'ingresso nella catena trofica di *Megacollybia platyphylla*. Anche *Clitocybe phaeophthalma* (Pers.) Kuyper è una specie indicatrice di eccessiva quantità di sostanze azotate nella lettiera, ma a differenza di *Megacollybia platyphylla* ha un'azione puntiforme.

Figura 70. *Clitocybe phaeophthalma* (Pers.) Kuyper. Foto di Giancarlo Bistocchi



Un accumulo di lettiera in una località con ristagno idrico e bassa ventilazione, correlato a un'alta frequenza di *C. phaeophthalma*, può indicare processi di deperimento delle piante nell'area circoscritta dai basidiomi, in quanto l'eccesso di biomassa morta inibisce i processi di riciclo legati ad altre specie di funghi. Altre specie dei gasteromiceti epigei, appartenenti principalmente alle famiglie *Phallaceae* Corda, *Lycoperdaceae* F. Berchtold & J. Presl, *Clathraceae* Chevall. sono indicatrici di processi di degrado già in corso (a es. *Mutinus caninus* (Huds.) Fr., *Apioperdon pyriforme* (Schaeff.) Vizzini, *Clathrus ruber* P. Micheli ex Pers.).

Figura 71. *Megacollybia platyphylla* (Pers.) Kotl. & Pouzar. Foto di Giancarlo Bistocchi



Sono anche stati identificati macromiceti indicatori di futuri processi di degrado: si tratta di specie che nutrendosi dei prodotti di scarto di altre specie fungine con funzione di degradatori primari, indicano con la presenza dei loro basidiomi un'alterazione dell'ecosistema che percepiremo solo dopo molto tempo, cioè quando fruttificheranno i degradatori primari, cioè miceti che hanno un ciclo molto lungo e sono i principali organismi in grado di attaccare e degradare i composti organici del suolo e di provocare carie bianca e bruna.

Quando essi superano determinate soglie hanno un effetto negativo sull'ecosistema. Per caratteristiche legate al loro ciclo biologico, sono indicatrici di processi di degrado alcune specie del genere *Mycena* (Pers.) Roussel come *M. rosea* Gramberg, *M. pura* (Pers.) P. Kumm., *M. pelianthina* (Fr.) Quél., *M. galericulata* (Scop.) Gray, *M. niveipes*

(Murrill) Murrill, *M. polygramma* (Bull.) Gray, *M. amicta* (Fr.) Quél., *Atheniella flavoalba* (Fr.) Redhead, Moncalvo, et al.

Il rapporto tra specie micorriziche e altre specie è stato utilizzato come indicatore biologico del grado di disturbo negli ecosistemi forestali terrestri e come indicatore della qualità ed evoluzione di interventi di riforestazione.

Le variazioni del rapporto sono considerate come un riflesso del grado di deperimento forestale. Nella maggior parte degli ecosistemi forestali sani, i corpi fruttiferi dei funghi ectomicorrizici rappresentano tra il 45% e il 50% di tutti i corpi fruttiferi trovati. Nei popolamenti su suoli inquinati solo il 10%.

Sono stati definiti tre livelli di perturbazione forestale sulla base del rapporto tra il numero di corpi fruttiferi di specie micorriziche e quello di altre specie: una percentuale di corpi fruttiferi micorrizici del 40% indica un livello di disturbo "latente", tra il 20% e il 40% un livello "acuto" e al di sotto del 20% un livello "letale".

Sulla relazione tra componente micologica e habitat naturali e prossimo-naturali sono stati avviati studi specifici presso APAT (oggi ISPRA) a partire dal 2003 con l'acquisizione di banche dati e dati bibliografici che hanno permesso di realizzare una serie di pubblicazioni relative agli abbinamenti delle specie fungine nazionali agli habitat definiti secondo la nomenclatura CORINE, Physis, Eunis e Natura 2000 sia a livello nazionale che regionale.

Tali attività permettono di evidenziare le specie particolarmente connesse a determinati habitat e quindi utili al loro monitoraggio e a quello degli interventi di mitigazione e recupero ambientale, e le specie indicatrici di degrado (a es. penetrazione di specie dei prati e dei mantelli in ambito forestale, espansione di funghi parassiti letali).

In particolare, le specie minacciate possono fornire importanti informazioni, insieme alla presenza/assenza/frequenza di specie caratteristiche di un dato habitat, sullo stato di conservazione e sulla qualità della gestione essendo molte di esse strettamente correlate al permanere di buone condizioni ecologiche dei suoli, a una struttura naturale e alla ricchezza specifica delle formazioni vegetali. Possono quindi contribuire al monitoraggio dello stato degli habitat come, a esempio, previsto dalla direttiva 92/43/CE (Tabella 11).

Tabella 11. Specie minacciate secondo la Lista Rossa Italiana 107 e la Global Red List e taxa caratteristici di alcuni habitat Natura 2000 della zona Mediterranea (Dati SIF)

Habitat Natura 2000	Taxa caratteristici	Taxa minacciati
1210 Vegetazione annua delle linee di deposito marine	<i>Coprinopsis ammophilae</i> (Courtec.) Redhead, Vilgalys & Moncalvo <i>Psilocybe halophila</i> (Durieu & Lév.) P.D. Orton	<i>Peziza pseudoammophila</i> Bon & Donadini (CR, Italian Red List)
2110 Dune mobili embrionali	<i>Lamprospora ammophila</i> (Saut.) Boud. <i>Psilocybe halophila</i> (Durieu & Lév.) P.D. Orton	<i>Peziza pseudoammophila</i> Bon & Donadini (CR, Italian Red List)
2120 Dune mobili del cordone litorale con presenza di <i>Ammophila arenaria</i> ("dune bianche")	<i>Agaricus menieri</i> Bon <i>Lamprospora ammophila</i> (Saut.) Boud. <i>Morchella dunensis</i> (Castañera & G. Moreno) Clowez <i>Psilocybe halophila</i> (Durieu & Lév.) P.D. Orton <i>Rhodocybe malençonii</i> Pacioni & Lalli	<i>Peziza pseudoammophila</i> Bon & Donadini (CR, Italian Red List)
2130 Dune costiere fisse a vegetazione erbacea ("dune grigie")*	<i>Arrhenia spathulata</i> (Fr.) Redhead <i>Geopora arenicola</i> (Léveillé) Kers <i>Lyophyllum littoralis</i> (Ballero & Contu) Contu <i>Phellorinia herculanea</i> (Pers.) Kreisel <i>Psilocybe halophila</i> (Durieu & Lév.) P.D. Orton	<i>Peziza pseudoammophila</i> Bon & Donadini (CR, Italian Red List)
2210 Dune fisse del litorale del Crucianellion maritimae	<i>Galerina graminea</i> (Velen.) Kühner <i>Geopora arenicola</i> (Léveillé) Kers <i>Marasmius epodius</i> Bres.	<i>Peziza pseudoammophila</i> Bon & Donadini (CR, Italian Red List)
2230 Dune con prati dei Malcolmietalia	<i>Lyophyllum littoralis</i> (Ballero & Contu) Contu <i>Rhodocybe malençonii</i> Pacioni & Lalli	<i>Peziza pseudoammophila</i> Bon & Donadini (CR, Italian Red List)
2250 Dune costiere con <i>Juniperus</i> spp.*	<i>Amanita boudieri</i> Barla <i>Arrhenia spathulata</i> (Fr.) Redhead <i>Galerina graminea</i> (Velen.) Kühner <i>Geopora arenicola</i> (Léveillé) Kers <i>Helvella juniperi</i> M. Filippa & Baiano <i>Lyophyllum littoralis</i> (Ballero & Contu) Contu <i>Rhizopogon luteolus</i> Fr. <i>Scleroderma meridionale</i> Demoulin & Malençon <i>Trametes junipericola</i> Manjón, G. Moreno & Ryvarden	
2270 Dune con foreste di <i>Pinus pinea</i> e/o <i>Pinus pinaster</i> *	<i>Agaricus aridicola</i> Geml, Geiser & Roysse ex Mateos, J. Morales, J. Muñoz, Rey & Tovar <i>Agaricus bernardii</i> (Quél) Sacc. <i>Agaricus menieri</i> Bon <i>Arrhenia spathulata</i> (Fr.) Redhead <i>Geopora arenicola</i> (Léveillé) Kers	

Habitat Natura 2000	Taxa caratteristici	Taxa minacciati
	<i>Rhizopogon luteolus</i> Fr. Scleroderma meridionale Demoulin & Malençon	
9330 Foreste di <i>Quercus suber</i>	<i>Plectania rhytidia</i> (Berk.) Nannf. & Korf <i>Russula archaeosuberis</i> Sarnari <i>Russula monspeliensis</i> Sarnari <i>Russula roseicolor</i> J. Blum <i>Russula tyrrhenica</i> Sarnari <i>Russula werneri</i> Maire	<i>Alessioporus ichnusanus</i> (Alessio, Galli & Littini) Gelardi, Vizzini & Simonini (VU, Angelini et al., 2021; VU, Global Fungal Red List)
9340 Foreste di <i>Quercus ilex</i> e <i>Quercus rotundifolia</i>	<i>Cortinarius aurilicis</i> Chevassut & Trescol <i>Cortinarius ionochlorus</i> Maire <i>Lactarius ilicis</i> Sarnari <i>Leccinellum lepidum</i> (H. Bouchet ex Essette) Bresinsky & Manfr. Binder <i>Plectania rhytidia</i> (Berk.) Nannf. & Korf <i>Russula quercilicis</i> Sarnari <i>Scleroderma meridionale</i> Demoulin & Malençon	<i>Alessioporus ichnusanus</i> (Alessio, Galli & Littini) Gelardi, Vizzini & Simonini (VU, Angelini et al., 2021; VU, Global Fungal Red List) <i>Entoloma bloxamii</i> (Berk. & Broome) Sacc. (EN, Italian Red List, Vu, Global Red List) <i>Hericium erinaceus</i> (Bull.) Pers. (EN, in Italian Red List) <i>Cortinarius murellensis</i> Cors. Gut., Ballarà, Cadiñanos, Palazón & Mahique (VU, IUCN) <i>Suillellus dupainii</i> (Boud.) Blanco-Dios (VU, Italian Red List)
9540 Pinete mediterranee di pini mesogeni endemici	<i>Boletus pinophilus</i> Pilát & Dermek <i>Rhizopogon luteolus</i> Fr. <i>Scleroderma meridionale</i> Demoulin & Malençon	<i>Entoloma bloxamii</i> (Berk. & Broome) Sacc. (EN, Italian Red List, Vu, Global Red List)

Figura 72. *Paxillus involutus* (Batsch) Fr., specie non sensibile all'aumento di N nel suolo. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 73. *Micena rosea* Gramberg. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 74. *Mycena pura* (Pers.) P. Kumm. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 75. *Mycena renati* QuéL. Foto di Giancarlo Bistocchi



3.4 I funghi come indicatori dei cambiamenti climatici

Di Pietro Massimiliano Bianco e Lorenzo Ciccarese

Le problematiche micologiche relative al clima possono riassumersi in tre linee che verranno esaminate: scomparsa o rarefazione di specie artico-alpine, aumento di funghi patogeni tropicali o subtropicali, loro utilizzo come indicatori sul medio periodo.

Le attività umane, principalmente attraverso la combustione delle fonti fossili di energia, la produzione di cemento e l'uso e la trasformazione di uso del territorio (in gergo LULUCF, acronimo per *land use, land-use change and forestry*),¹⁵⁴ sono la causa principale dell'aumento della concentrazione di CO₂ e altri gas serra nell'atmosfera e dei conseguenti cambiamenti climatici.

Nel peso delle attività LULUCF nell'accumulo di gas-serra in atmosfera un ruolo importante è svolto dalla modalità di gestione dei suoli, che rappresentano il maggiore pool di carbonio del pianeta.

Il carbonio nei suoli si trova in uno stato di continuo equilibrio dinamico, dove agiscono input e output di varia natura. Il principale input di C nel suolo è rappresentato dalla decomposizione della lettiera, ossia della biomassa morta che giace - a diverso stadio di decomposizione - sul suolo. Viceversa, il principale output di C del suolo verso l'atmosfera è legato al flusso di CO₂ causato dalla respirazione delle radici delle piante e dei microrganismi del terreno.¹⁵⁴

L'accumulo o la diminuzione di sostanza organica nel suolo sono legati oltre che alla quantità e qualità dei residui biologici che arrivano al suolo e dal tipo di microflora presente, anche dall'orientamento particolare e dalle velocità relative dei processi di mineralizzazione, umificazione e interazione con la frazione minerale cui i residui biologici vanno incontro, in rapporto alle condizioni climatiche e pedo-ambientali. In questo complesso equilibrio dinamico, i funghi hanno un ruolo centrale, per due motivi:

- (i) i funghi (che rappresentano una frazione importante del regno eucariotico e risiedono in diversi habitat) costituiscono una considerevole stock di biomassa e quindi di carbonio sul pianeta terra;
- (ii) i funghi regolano il ciclo di feedback del carbonio nel suolo derivando cicli biogeochimici. È evidente che la quantità e la velocità del sequestro del carbonio che avviene grazie ai funghi del suolo può contribuire a mitigare l'effetto serra e il cambiamento climatico.

Un secondo aspetto delle complesse relazioni tra funghi e cambiamenti climatici riguarda gli effetti che questi ultimi hanno sui primi. Anche se le informazioni sono carenti, anche in considerazione delle difficoltà nella valutazione dei dati fenologici e distributivi e sul campo, il cambiamento climatico ha già prodotto effetti diretti e

indiretti sulle comunità fungine, soprattutto attraverso l'alterazione della temperatura, del regime pluviometrico e gli eventi meteo-climatici estremi.¹⁵⁵

Gli effetti del cambiamento climatico sulla distribuzione e l'attività dei funghi sono difficili da prevedere perché sono mediati in molti modi diversi, tra cui: fisiologia fungina, riproduzione e sopravvivenza, fisiologia dell'ospite, distribuzione spaziale e temporale degli ospiti, disponibilità di risorse e competizione. Attualmente è difficile monitorare tali effetti sul micelio fungino sul campo. A questo riguardo va sottolineato che i corpi fruttiferi forniscono un utile surrogato: la letteratura disponibile indica larga evidenza degli effetti del cambiamento climatico sui cambiamenti fenologici nella fruttificazione fungina e nella produzione dei corpi fruttiferi. In media la stagione della fruttificazione si sta allungando, anche se per alcune specie si sta contraendo; specie e gruppi ecologici differenti si comportano diversamente; il tempo di fruttificazione dipende dalla posizione geografica; alcuni funghi fruttificano all'inizio dell'anno così come in autunno e la fruttificazione primaverile avviene in anticipo; per alcuni funghi sono state segnalate variazioni dell'ospite; i rendimenti dei fruttiferi variano notevolmente di anno in anno; la quantità, la durata e la frequenza della fruttificazione sono influenzate da numerosi fattori ambientali.

3.5 I funghi e gli elementi chimici

Di Luigi Cocchi

Premessa - prime ipotesi di lavoro

Il riferimento basilare per queste note è l'EUReport pubblicato nel 2010 dalla UE e nato da un accordo di collaborazione con il JRC di Ispra (VA). Tale lavoro ha avuto una gestazione di circa 25 anni e lo spunto iniziale della ricerca è stato l'incidente alla centrale nucleare di Chernobyl del 26 aprile 1986. Si è infatti cominciato a effettuare misure di radioattività e delle concentrazioni di Cesio (Cs) e Potassio (K) in funghi superiori (macromiceti) raccolti nel territorio della provincia di RE. In questa prima fase, durata una decina d'anni, le ipotesi di lavoro erano due:

- individuazione di specie fungine utilizzabili come bioindicatori di contaminazione radioattiva;
- verifica di un'ipotizzata possibile correlazione tra il livello di contaminazione radioattiva e il contenuto di Cs e K nei funghi.

La prima ipotesi di lavoro ha avuto esiti positivi consentendo di individuare non solo le specie maggiormente contaminate ma, soprattutto, di individuare tra esse due specie, *Craterellus lutescens* (Fr.) Fr. (sin. *Cantharellus lutescens* Fr., conosciuta volgarmente come "finferla") e *Cortinarius caperatus* (Pers.) Fr. [sin. *Rozites caperatus* (Pers.) P. Karst, conosciuto volgarmente come "foliota grinzosa"] che, per l'andamento temporale della loro contaminazione dai radioisotopi ¹³⁴Cs e ¹³⁷Cs, si sono rivelate

utili bioindicatrici avendoci consentito di calcolare l'evoluzione temporale della loro contaminazione radioattiva pregressa.

Sulla seconda ipotesi di lavoro, invece, non si sono avute indicazioni chiare e si è allora deciso di estendere le misure a un numero maggiore di elementi chimici e per tutti i funghi. A tale scopo si è mobilitato un gruppo di collaboratori/raccoglitori tra i soci del Gruppo Micologico reggiano. Per la scelta degli elementi chimici da misurare si è, in primis, fatta una ricerca bibliografica che però si è rivelata improduttiva perché, a quei tempi, su questi aspetti, gli articoli scientifici erano rari e quei pochi che si poterono consultare trattavano la problematica di sfuggita e per un piccolo numero di elementi chimici e di campioni. Si è però riusciti a realizzare, nel 1994, una nuova convenzione tra il Gruppo Micologico e l'allora Azienda consortile Gas Acqua della Provincia di Reggio Emilia (AGAC, attualmente integrata in IREN S.p.A.) per misurare la concentrazione di elementi chimici nei funghi nei suoi laboratori dotati di strumenti di misura di avanguardia gestiti da tecnici con alta professionalità. Tutte le misure delle concentrazioni degli elementi chimici sono espresse in "milligrammi su kilogrammo di sostanza secca" (mg/kg s.s.).

Raccolta dati - elaborazione statistica

Fino al 2010, anno di pubblicazione dell'EUReport, si è realizzata una banca dati consistente con la misura, per oltre 9.000 campioni di funghi (solo una parte iniziale fu misurata dal PMP di Reggio Emilia), delle concentrazioni di oltre trenta elementi chimici. L'aspetto molto importante e decisivo per la fondatezza scientifica della ricerca, in pratica l'architettura sulla quale si sono basate tutte le ulteriori valutazioni, è che tale mole di dati ha raggiunto la stabilità statistica. Inoltre, per gli aspetti importanti di affinamento delle analisi, si sono considerati, per ragioni statistiche, solo quelle specie e solo gli elementi chimici per ogni specie per i quali si avevano almeno 30 misure.

L'analisi statistica è stata sviluppata in tre fasi:

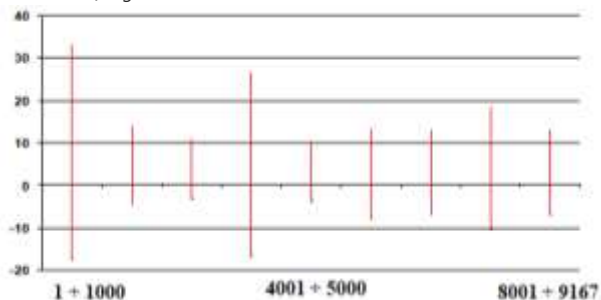
- a) analisi statistica descrittiva con l'organizzazione di tabelle (Valore Medio, Mediana, 1° e 3° Quartile, Valore minimo, Valore massimo, Deviazione Standard Percentuale sul Valore Medio) e istogrammi;
- b) analisi statistica "univariata" con l'elaborazione di grafici che rappresentano "intervalli di confidenza" e "box plots" al 95%;
- c) analisi statistica "multivariata" con la tecnica del Mutidimensional Scaling (MDS).

Stabilità statistica

Si dà subito un esempio della raggiunta stabilità statistica del database. Il grafico riguarda i dati misurati della concentrazione di cadmio (Cd) nei funghi, ma la rappresentazione grafica è molto simile a quella di ogni altro elemento (Figura 76). Come si può ben vedere gli intervalli si sovrappongono sempre in orizzontale. In ascissa (asse orizzontale) sono indicati gli intervalli del numero di campioni misurati,

in ordinata (asse verticale) gli intervalli "valore medio \pm deviazione standard" dei dati, in simboli "VM \pm σ ".

Figura 76. Concentrazione di Cd nei funghi



Impronta digitale chimica – fungo di riferimento

Gli istogrammi, sviluppati nella prima fase dell'analisi statistica descrittiva, rappresentano, per ogni specie e per ogni elemento chimico, lo scarto % della Mediana del singolo elemento rispetto alla Mediana generale dell'insieme dei dati dello stesso elemento. È stato allora definito, prendendo spunto dalla ricerca bibliografica, in particolare dal lavoro di Markert, quindi in analogia con la definizione di "Reference plant" e di "Reference man", il "Reference Mushroom" (Fungo di Riferimento – RM) come il fungo "teorico" con i contenuti degli elementi chimici corrispondenti alle mediane generali per ogni elemento. Lo scarto % delle Mediane per ogni elemento, calcolato con la formula $(\text{Med el.} - \text{Med RM}) \cdot 100 / \text{Med RM}$ è rappresentato sull'asse verticale (l'ordinata) degli istogrammi: tali istogrammi sono stati definiti "Impronta Digitale Chimica" della specie considerata. Già da questi grafici si è avuta l'indicazione che per certe specie le concentrazioni di alcuni elementi chimici fossero caratteristiche: in sostanza, come dato generale, le concentrazioni di elementi chimici nei funghi, in particolare dei metalli pesanti, mostravano di essere specie/specifiche. Si riportano alcuni istogrammi in modo che si possano ben capire le valutazioni fatte.

a) Impronta digitale chimica di *Amanita muscaria* (L.) Lam.

Le concentrazioni di vanadio (V) e zirconio (Zr) relativamente alte in *A. muscaria* (Figura 77) rappresentano un dato molto significativo. Questi due metalli non si trovano allo stato puro in natura e *A. muscaria* è l'unico essere vivente che riesce a "concentrarli" in quantità significative;

b) Impronta digitale chimica e habitat di varie raccolte di *Bovistella utriformis* (Bull.) Demoulin & Rebriev [sin. *Lycoperdon utriforme* Bull.]

Questa specie presenta concentrazioni relativamente molto alte, fino a 30 mg/kg s.s., di piombo (Pb) e molibdeno (Mo) anche in zone molto lontane da centri urbani. La figura 79 mostra una zona di raccolta chiamata "Passone" a circa 2000 m slm nei pressi della cima del Monte Cusna (2120 m slm - RE).

Il grafico della Figura 80, ottenuto con l'analisi statistica univariata, rappresenta gli intervalli di confidenza al 95% per Pb: viene confermato, in modo molto significativo e promettente per l'impostazione della ricerca, che in *Bovistella utriformis* (Bull.) Demoulin & Rebriev, la concentrazione di Pb è molto più alta (quindi caratterizzante con valore tassonomico) rispetto a quelle degli altri taxa studiati.

c) *Agaricus urinascens* (Jul. Schäff. & F.H. Möller) Singer [sin. *A. albertii* Bon – *A. macrosporus* (Jul. Schäff. & F.H. Möller) Pilát]

Questa specie, che raggiunge dimensioni molto grandi con cappelli di diametro anche oltre 30 cm, è stata la prima a dare indicazioni forti e chiare: è stata raccolta sia in pianura, in terreno agricolo nella frazione "Codemondo" del comune di Reggio Emilia (70 m slm), e nello stesso sito di *Bovistella utriformis* (Bull.) Demoulin & Rebriev, con una differenza altitudinale tra i due siti, di circa 1900 m. Sono stati analizzati anche gli elementi chimici nei terreni di crescita, che hanno sempre mostrato valori normali non evidenziando alcuna contaminazione da Cd.

Il confronto delle "impronte digitali chimiche", molto simili, delle due specie *Agaricus sylvicola* e *A. essettei* (entrambe le specie appartengono al Sottogenere *Flavoagaricus* Wasser) è molto interessante (Figura 83): è infatti in atto una discussione sulla loro sinonimizzazione che è partita dalla forte somiglianza anche morfologica sia macro che micro. Per il database Index Fungorum, infatti, i due nomi di specie sono sinonimi. La forte similitudine tra le due "impronte digitali chimiche" rafforzerebbe questa conclusione. Tuttavia, l'analisi genetica indica l'esistenza di due specie distinte. Comunque, che la sinonimia sia accettata o meno (su questo argomento ci sono ancora diverse scuole di pensiero) la sostanza non cambia, anzi rafforza, il possibile ruolo tassonomico dell'analisi statistica del contenuto di elementi chimici nei funghi.

Il grafico a "blox plots" per Cd (Figura 84) conferma le indicazioni delle "Impronte Digitali Chimiche": si confermano per *A. urinascens* (Jul. Schäff. & F.H. Møller) Singer l'alta concentrazione rispetto alle altre specie di *Agaricus* L. del Sottogenere *Flavoagaricus* indagate, ma anche di tutti i funghi analizzati, e il comportamento molto simile di *A. sylvicola* e *A. essettei*. Il grafico è un esempio di analisi statistica univariata costruito con la tecnica dei "box plots" al 95% della concentrazione di Cd nei *Flavoagaricus* Wasser (la scala in ordinata è logaritmica ed è stata scelta per "compattare" il grafico). I "baffi" dei box plots rappresentano i cosiddetti valori fuorilegge ("outlawed values"). La riga orizzontale rossa rappresenta la concentrazione limite di 2 mg/kg s.s. stabilita come limite massimo per i funghi del commercio dal regolamento (CE) n. 1881/2006.

d) Gruppo del *Boletus edulis*

Il termine "Gruppo", che si intende comprendente quattro specie, non ha nessun significato né tassonomico né nomenclaturale. Le quattro specie (*B. edulis* Bull., *B. pinophilus* Pilát & Dermek, *B. aereus* Bull., *B. reticulatus* Schaeff.) sono volgarmente e commercialmente chiamate "porcini".

Gli istogrammi della Figura 85 presentano i valori assoluti delle concentrazioni per Se (grafico di sx) e per Hg (grafico di dx). Da sx a dx: la prima colonna dà i valori medi per tutti i funghi misurati: 6 (Se) e 1,23 (Hg); la seconda i valori medi per tutti i funghi senza i "porcini": 2 (Se) e 1,13 (Hg); la terza i valori per i soli "porcini" 32 (Se) e 2,8 (Hg); la quarta i valori per il solo *B. pinophilus*: 82 (Se) e 5,6 (Hg).

Nella figura 86, come esempio della terza fase dell'approfondimento dell'analisi statistica secondo la tecnica MDS, si rappresentano i "punti" espressione di alcune specie del Genere *Boletus* L. e di due Ordini (*Boletales* E.-J. Gilbert e *Russulales* Kreisel ex P.M. Kirk, P.F. Cannon & J.C. David) (Stress della configurazione finale: < 0,005, valore da considerare ottimo). È interessante la separazione netta tra i "porcini" (racchiusi tra le due ellissi) rispetto agli altri taxa. Questi risultati sono in accordo con le analisi genetiche prodotte con metodi di biologia molecolare.

e) Ci sono altre specie che si distinguono per contenere quantità relativamente rilevanti di altri elementi chimici: per es. alcune specie del Genere *Inocybe* (Fr.) Fr. (in particolare *I. asterospora* Qué.), *Sarcosphaera coronaria* (Jacq) J. Schröt., *Cyanoboletus pulverulentus* (Opat.) Gelardi & Al, contengono elevate quantità di arsenico (As): in questi funghi l'ordine di grandezza può essere di alcuni g/Kg s.s. e questi valori possono avere significato tassonomico come caratteri distintivi delle specie.

f) È interessante anche il caso di specie come *Xerocomus subtomentosus* (L.) Qué (della quale si sono analizzati 35 campioni) le cui concentrazioni di elementi chimici sono, "abbastanza vicine" a quelle del RM (Figura 87).

Figura 77. Concentrazioni di vanadio (V) e zirconio (Zr) in *Amanita muscaria* (L.) Lam.

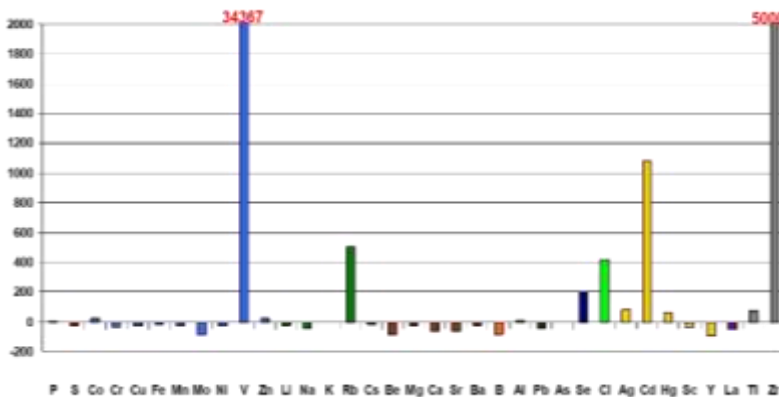


Figura 78. *Amanita muscaria* (L.) Lam. Foto di Lauro Bertani



Figura 79. A sinistra: zona di raccolta "Passone". Foto di Luigi Cocchi; al centro: concentrazione di PB in *L. utriforme*; a destra: *Lycoperdon utriforme*. Foto di P. Curti

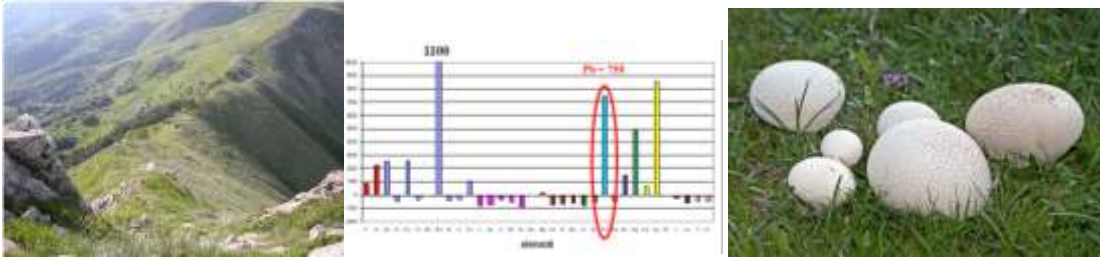


Figura 80. Intervalli di confidenza al 95% per Pb per *C. utriformis*

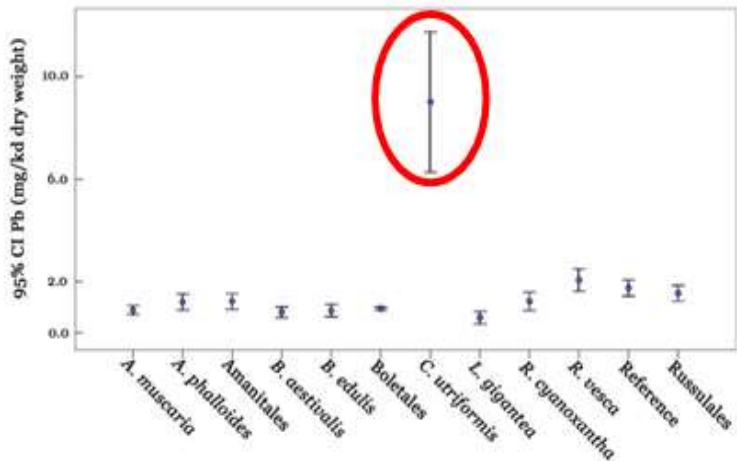


Figura 81. Impronta DIGITALE chimica di *A. urinascens* (Jul. Schäff. & F.H.Möller) Singer

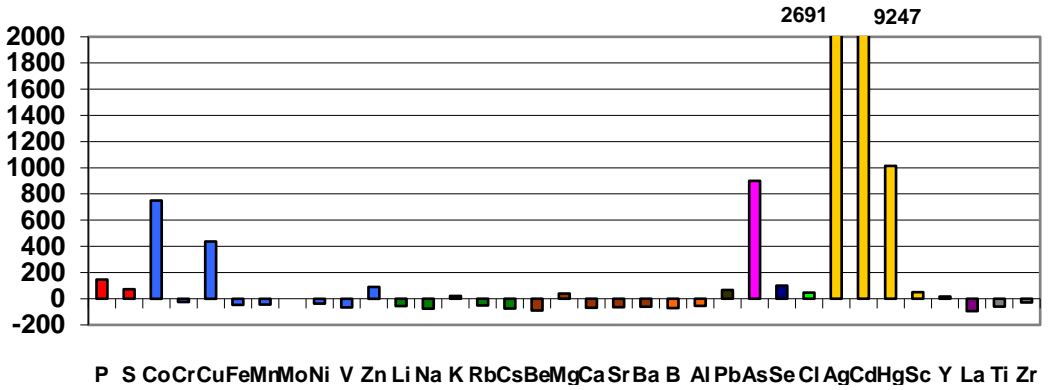


Figura 82. *Agaricus urinascens* (Jul. Schäff. & F.H. Møller) Singer. Foto di Ennio Carassai



Figura 83. Impronta digitale chimica di *Agaricus sylvicola* (Vittad.) Peck (sx) vs *A. essettei* Bon (dx)

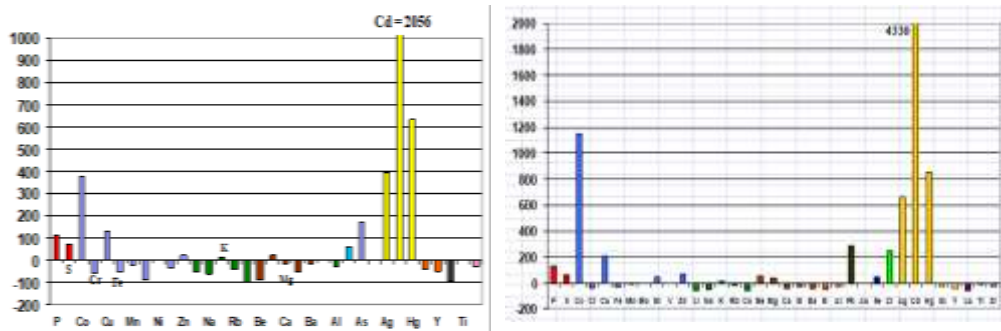


Figura 84. Grafico box-plots per Cd

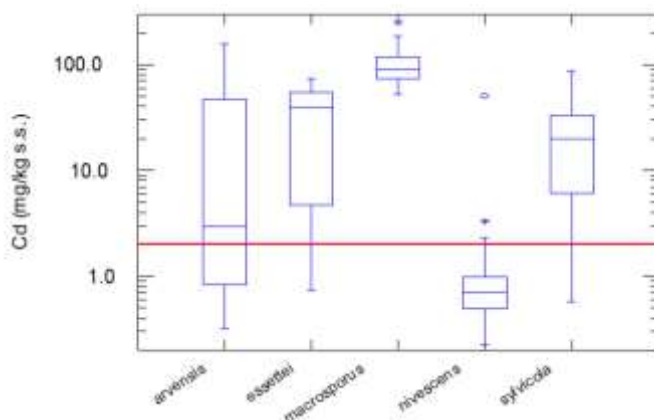


Figura 85. A sinistra: Concentrazione di Se nel *Boletus edulis* confrontata con quella di tutti gli altri generi. A destra: Concentrazione di Hg nel gr. *Boletus edulis* confrontata con quella di tutti gli altri generi

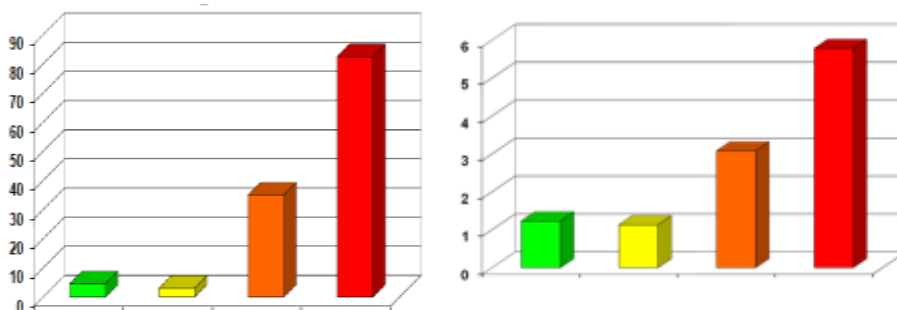


Figura 86. Legenda: BA: *Boletus aereus* Bull.; BC: *Boletus calopus* Pers. [sin. *Caloboletus calopus* (Pers.) Vizzini]; BE: *Boletus edulis* Bull.; BG: *Boletus edulis* Group; BH: *Boletus rhodopurpureus* Smotl. [sin. *Imperator rhodopurpureus* (Smotl.) Assyov & Al]; BL: *Boletus luridus* (Schaeff.) Murril; BP: *Boletus pinophilus* Pilát & Dermek; BR: ordine Boletales; BS: *Boletus reticulatus* Schaeff. [sin. *B. aestivalis* (Paulet) Fr.]; LD: *Leccinum duriusculum* (Schulzer ex Kalchbr.) Singer; RM: Reference Mushroom; RR: ordine Russulales; SG: *Suillus granulatus* (L.) Roussel; SL: *Suillus luteus* (L.) Roussel; XR: *Boletus rubellus* Krombh. [sin. *Hortiboletus rubellus* (Krombh.) Simonini & Al]; XS: *Xerocomus subtomentosus* (L.) Quéf.

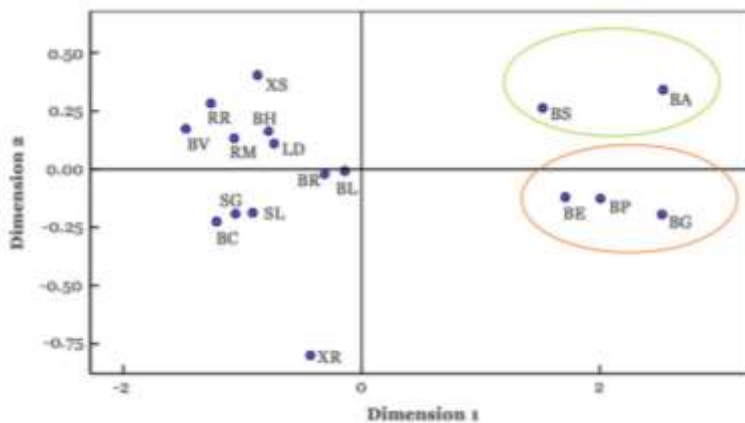
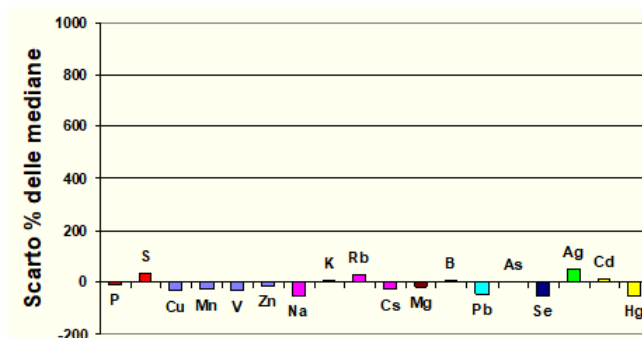


Figura 87. Impronta digitale chimica di *Xerocomus subtomentosus* (L.) Quéf.



Quelle che finora sono state date sono solo alcune indicazioni, fra le più significative, che sono state ricavate dalla elaborazione statistica dei dati. Per l'elaborazione statistica complessiva si rimanda all'EUReport.

Fungo di riferimento

L'elaborazione statistica eseguita con la tecnica del MDS ha permesso di indicare conclusioni su piani diversi e l'aspetto molto interessante è stato che le considerazioni sopra riportate derivate dai grafici basati sulla statistica descrittiva e univariata, sono poi state supportate dalla molto più approfondita MDS, come si può dedurre dal grafico (Figura 88).

Figura 88. Sigle delle specie (per un totale di circa 7.000 campioni analizzati: la nomenclatura usata è datata al 2008, anno nel quale è stata eseguita l'elaborazione statistica): *Agaricus arvensis* Schaeff. = AA; *Agaricus bisporus* (J.E. Lange) Imbach = AB; *Agaricus bitorquis* (Quél.) Sacc. = AC; *Agaricus urinascens* (Jul. Schöff. & F.H. Möller) Singer = AM; *Amanita caesarea* (Scop.) Pers. = AI; *Amanita muscaria* (L.) Lam. = AF; *Amanita phalloides* (Vaill. Ex Fr.) Link = AP; *Armillaria mellea* (Vahl) P. Kumm. = AR; *Boletus edulis* Bull. = BE; *Suillus luridus* (Schaeff.) Murrill. (sin. *Boletus luridus* Schaeff.) = BL; *Boletus pinophilus* Pilát & Dermek = BP; *Calocybe gambosa* (Fr.) Donk = CG; *Lycoperdon utriforme* Bull. = CU; *Cantharellus cibarius* Fr. = CC; *Craterellus lutescens* (Fr.) Fr. = CL; *Infundibulicybe geotropa* (Bull.) Harmaja [sin. *Clitocybe geotropa* (Bull.) Quél.] = CA; *Entoloma saundersii* (Fr.) Sacc. = ES; *Helvella crispa* (Scop.) Fr. = HC; *Hydnum repandum* L. = HR; *Marasmius oreades* (Bolton) Fr. = MO; *Morchella semilibera* DC. = MS; *Cortinarius caperatus* (Pers.) Fr. = RC; *Russula cyanoxantha* (Schaeff.) Fr. = RA; *Russula vesca* Fr. = RV; *Hortiboletus rubellus* (Krombh.) Simonini & Al [sin. *Boletus rubellus* Krombh.] = XR; *Xerocomus subtomentosus* (L.) Quél. = XS; Reference Mushroom = RM. Il coefficiente di Stress del grafico è 0,129, valore da considerare molto buono per la rappresentatività del grafico.

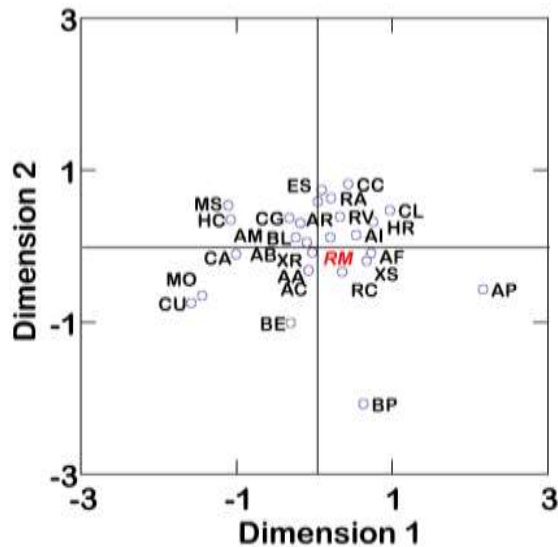


Figura 89. *Amanita caesarea* (Scop.) Pers. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 90. *Armillaria mellea* (Vahl) P. Kumm. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 91. *Boletus aereus* Bull. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 92. *Marasmius oreades* (Bolton) Fr. Foto di Giancarlo Bistocchi



Possibile ruolo tassonomico

In Micologia, e non solo, non esiste tuttora una definizione definitiva di "specie", ma si sta procedendo, recentemente con tecnologie sempre più raffinate come l'analisi genetica, a individuare aspetti tassonomici discriminanti che hanno, ovviamente, forti ripercussioni sulla nomenclatura.

Nel periodo temporale in cui si è svolto il lavoro culminato con l'EUReport la specie era caratterizzata sostanzialmente solo sulla base di criteri morfologici (macro e micro), organolettici, reazioni macrochimiche con l'uso di particolari reagenti e, in diversi casi, caratteristiche del substrato e dell'habitat di crescita.

La definizione di RM può aggiungere nuovi criteri tassonomici per la determinazione delle specie sulla base della concentrazione di elementi chimici, con una solida base statistica. Tuttavia, non si è ancora in grado di dire qualcosa di significativo sui taxa superiori.

Questo aspetto ha portato a sostenere che, come già succede da tempo per i micromiceti e i funghi filamentosi, si possa aprire la possibilità di un'impostazione "polifasica" della tassonomia anche per i macromiceti. In pratica si tratta di eseguire l'analisi statistica MDS considerando i vari aspetti utilizzati in precedenza con l'aggiunta di approfondimenti riguardanti biochimica del metabolismo (oltre alle concentrazioni degli elementi chimici anche lo studio delle molecole organiche, in particolare proteine), fattori di concentrazione nei carpofori dei vari elementi chimici presenti nel substrato di crescita, ecc. è ben vero che dalla data di pubblicazione dell'EUReport a oggi è "esplosa" l'analisi genetica dei funghi, con importanti ricadute tassonomiche e nomenclaturali. Il problema è che l'analisi genetica potrà essere decisiva per stabilizzare tassonomia e nomenclatura (obiettivi storici della ricerca non solo micologica ma che si può riferire a tutte le "specie" dei viventi) solo quando sarà possibile ottenere il sequenziamento completo del DNA (fino a oggi le analisi genetiche si limitano soprattutto sulla regione del DNA siglata ITS) il che potrà permettere una sorta di "codice a barre" univoco e definitorio della specie. Ma tale obiettivo richiederebbe ingenti sforzi tecnologici e finanziari per tempi lunghi. Nel frattempo, sarebbe opportuno procedere a una metanalisi dei dati presentati nella letteratura scientifica sulle concentrazioni delle diverse molecole presenti nei funghi, analisi oggettivamente utile e non in contrasto, ma complementare alle analisi genetiche. Un altro aspetto che si ritiene molto importante è lo studio dei rapporti di convivenza trofica dei miceli fungini con la fauna edafica: nello strato più superficiale del suolo (i primi 10/20 cm di profondità) esiste una vera e propria "orchestra biochimica", fondamentale per tutta la vita sulla terra. Ogni orchestrale deve essere in sintonia armonica con tutti gli altri: se questo accordo salta, per inquinamento, ma in generale per azioni umane, dall'orchestra esce stridore, frastuono e baccano, che significa morte: per tornare all'armonia, cioè alla vita nel suolo, occorrono secoli. È ormai consapevolezza diffusa che i "veri funghi" sono i miceli (complessi di ife) che vivono nei diversi substrati spesso in rapporto simbiotico non solo con gli apici

radicali (tale rapporto micorrizico è fondamentale per la vita in salute delle piante) ma con la fauna edafica e i batteri: lo studio di questo "universo" sotterraneo, ancora in buona parte sconosciuto, potrà aggiungere importanti pezzi di conoscenza sulla vita, sul metabolismo e sul ruolo naturale del "Regno dei Funghi". Questi "pezzi" potrebbero essere anche utili e necessari in chiave di "tassonomia polifasica".

Bioindicazione – Biorimedio - Biotecnologie

Non è mai stato definito il cosiddetto "fungo bianco", cioè un fungo "astratto" che contenga le concentrazioni "naturali" degli elementi chimici e possa quindi costituire il termine di confronto (di riferimento, appunto) in modo che sia possibile giudicare la "naturalità" o meno della presenza degli elementi chimici, in particolare dei metalli pesanti. Ciò deriva dalla ancora molto scarsa conoscenza del metabolismo: in attesa che tale conoscenza progredisca la definizione qui data di "Reference mushroom" - RM ("Fungo di riferimento") è un primo passo per permette di stimare se la concentrazione di elementi chimici in una particolare specie è naturale oppure indotta.

Sono in atto ricerche per verificare le possibilità di biorimedio da contaminazione di metalli pesanti. Nell'ultima decade del secolo scorso si diffuse rapidamente l'idea che le alte concentrazioni di determinati metalli pesanti presenti nei funghi fossero indice di inquinamento ambientale della zona di crescita. Anche per questa ragione si ritiene importante la definizione del RM che può, appunto, aiutare a comprendere meglio alcune questioni riguardanti Bioindicazione e Biorimedio. Infatti, per capire se una specie fungina può essere considerata bioindicatrice e/o bioaccumulatrice di contaminanti ambientali come i metalli pesanti, bisogna capire se la concentrazione di tali elementi chimici è naturale o no e questo è reso possibile dalla definizione del RM. Per es. *Agaricus urinascens* (Jul. Schäff. & F.H. Møller) Singer (ma in generale tutte le specie comprese nel Sottogenere *Flavoagaricus* Wasser, escluso, al più, *Agaricus nivescens* F.H.Möller), presentano naturalmente alte concentrazioni di Cd, Ag e Hg ma non sono da considerare bioindicatrici di contaminazione da tali elementi: è molto probabile, invece, che tali elementi, Cd in particolare, giochino nel metabolismo di questi funghi un ruolo enzimatico che ne favorisce la crescita, per cui il micelio capta dal substrato tali elementi chimici per "golosità" naturale. Tale proprietà potrebbe invece essere utile in chiave di biorisanamento di substrati contaminati. Un ragionamento analogo vale per *Bovistella utrififormis* (Bull.) Demoulin & Rebriv (ex *Lycoperdon utriforme* Bull.) in riferimento al Pb. Sono comunque ormai diversi gli studi e le ricerche sui funghi come bioindicatori dello stato di salute ambientale e capaci di "decontaminare" suoli da sostanze tossiche per l'uomo e per l'ambiente.

Sono anche molto interessanti recenti ricerche per utilizzare funghi in diverse applicazioni tecnologiche biocompatibili.

Impatto tossicologico – Questione alimentare

Si pone un'ovvia domanda circa l'impatto sulla salute umana del consumo alimentare di funghi contenenti metalli pesanti. Il RM può permettere una stima più accurata dell'assunzione di metalli pesanti dal consumo alimentare di particolari specie fungine considerate ottime commestibili ma che presentano concentrazioni relativamente alte di metalli pesanti (Cd, Pb, Hg in particolare). Non risulta comunque che si siano mai avute intossicazioni a breve insorgenza da ingestione di funghi contenenti metalli pesanti. Dalla bibliografia e dal web si hanno informazioni che riguardano varie forme di intossicazione (la più nota è il "saturnismo" provocata da lunghe esposizioni a vapori di Pb) ma provocate da prolungate esposizioni conseguenti, soprattutto, ad attività industriali (vapori, inquinamento, ecc.).

La problematica va comunque divisa in due parti:

a) Raccolta funghi a scopo amatoriale: bastano i consigli di cautela dati dal Ministero della Salute, i più importanti dei quali sono "consumare funghi in quantità moderate e non troppo frequentemente" e "raccolgere funghi in buone condizioni lontano da fonti inquinanti, quali arterie ad alto traffico, zone industriali", ecc.

b) Diverso è l'aspetto della commercializzazione: per i funghi, sia coltivati che selvatici, messi in commercio vengono stabiliti dalla UE limiti massimi di concentrazione sui prodotti freschi, in particolare Pb, Cd.

- Regolamento (UE) 2021/1323 della Commissione del 10 agosto 2021 che modifica il regolamento (CE) n. 1881/2006 per quanto riguarda i tenori massimi di cadmio in alcuni prodotti alimentari (Testo rilevante ai fini del SEE).
- Regolamento UE 2021/1317 che modifica il regolamento (CE) n. 1881/2006 abbassandone i tenori massimi di piombo nelle frattaglie commestibili e in alcuni alimenti destinati all'infanzia. Tenori massimi aggiuntivi sono fissati per funghi selvatici, zenzero fresco e curcuma, vini liquorosi, spezie e sale.

In pratica per Cd vengono posti i seguenti limiti massimi (unità di misura: mg/kg wet weight, cioè sul prodotto tal quale): Funghi coltivati = 0,050; *Lentinula edodes* (Berk.) Pegler (Fungo Shiitake) e *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm. (Fungo ostrica) = 0,15; Funghi selvatici = 0,5 e per Pb Funghi selvatici = 0,80.

I prodotti alimentari elencati negli allegati dei Regolamenti indicati, saranno legalmente commercializzati prima della loro entrata in vigore e potranno rimanere sul mercato fino al 28 febbraio 2022.

In riferimento ai funghi del Gruppo del *Boletus edulis* Bull., i funghi selvatici più largamente consumati non solo in Italia e oggetto di intensa attività commerciale di import-export, è necessario segnalare che tali funghi, *Boletus pinophilus* Pilát & Dermek in particolare, sono caratterizzati, oltre che da elevata presenza di Hg, anche da forti quantità di Se. La UE non ha stabilito, per i "porcini" commercializzati, "limiti massimi" per questi due elementi. Per la pericolosità di Hg, per il quale la UE ha posto

limiti solo per i prodotti della pesca, già si è detto. Per il Se la problematica è complessa: questo elemento è essenziale come componente dell'enzima glutatione perossidasi (GSH-Px) presente nelle cellule epatiche deputate alla detossificazione quindi, in quantità fisiologiche, deve essere presente nel corpo umano, ma in quantità elevate diventa tossico. Il problema è che ancora non si conosce la soglia sotto la quale il Se è benefico e sopra la quale è dannoso. L'O.M.S. indica un'assunzione giornaliera (Dietary Reference Intake) di Se per adulti (uomini/donne) di 55 µg (µg = millesimo del mg = milionesimo di g). Il National Research Council (USA) raccomanda 1 µg di Se per kg di peso corporeo al giorno. In ogni caso non vanno superati i 100 µg (un decimo di milligrammo), che è considerata la dose massima utilizzabile.

Considerazioni finali

Il termine "conclusioni", per la problematica trattata, sarebbe stato improprio: infatti la ricerca sulle varie questioni considerate è (o dovrebbe essere) ancora ampiamente aperta per verificare la portata scientifica e l'utilità della conoscenza della presenza degli elementi chimici nei funghi come un aspetto del loro metabolismo. Le questioni importanti sulle quali sarebbe utile orientare lo sviluppo della ricerca sono:

a) estendere, per tutte le specie fungine, le misure delle concentrazioni a un numero maggiore di elementi chimici e alle molecole organiche (per es. proteine) anche se presenti in concentrazioni molto piccole, inferiori al mg/kg s.s. Spesso l'importanza funzionale di un elemento chimico o di una molecola organica negli organismi viventi non è semplicemente legata alla quantità;

b) misurare le concentrazioni degli elementi anche nei substrati di crescita: il calcolo del "fattore di concentrazione", cioè del rapporto tra la concentrazione nei carpofori e nei substrati può dare informazioni molto significative;

c) approfondire la conoscenza della complessità delle forme di vita del suolo e dei loro legami simbiotici con i miceli fungini: è nell'ecosistema "suolo", infatti, che i funghi vivono e sviluppano i loro rapporti di scambio trofico, oltre che con le radici vegetali, con la fauna edafica, compresi i batteri;

d) eseguire metanalisi sul complesso dei dati che la letteratura scientifica ha, in tempi relativamente recenti, messo a disposizione ed estendere a tutti questi dati l'analisi statistica MDS;

e) per le finalità tassonomiche, e quindi nomenclaturali, occorre mantenere un costante confronto sinergico con le ricerche genetiche;

f) come per tutti i progetti scientifici sono fondamentali l'organizzazione di adeguate strutture gestionali e di attrezzature tecnico/strumentali con adeguati sostegni finanziari sia pubblici che privati: l'auspicio è che tali disponibilità possano diventare evidenti necessità vista la crescente e scientificamente riconosciuta importanza che tutto il "Regno dei Funghi" sta assumendo per affrontare le attuali emergenze ambientali in una visione planetaria.

3.6 I funghi e la radioattività

Di Concettina Giovani

I primi studi che dimostrarono l'accumulo di radionuclidi nei funghi furono condotti all'inizio degli anni '60.¹⁵⁶⁻¹⁵⁷ Grüter¹⁵⁸⁻¹⁶⁰ trovò valori più elevati nei carpofori dei funghi che nelle altre specie forestali. Uno studio di Maushart¹⁶¹ dimostra che, in gruppi selezionati di popolazione, la concentrazione di radiocesio raddoppia durante l'autunno, rispetto alla restante parte dell'anno, in gran parte a causa della stagionale ingestione di funghi. I dati radioecologici riportati negli studi pre-Chernobyl riguardanti la concentrazione di radionuclidi nei funghi risultano spesso piuttosto contraddittori: alcuni autori trovarono significative differenze fra specie,¹⁶²⁻¹⁶⁴ altri trovarono differenze anche fra diversi individui della stessa specie che crescevano sullo stesso tipo di suolo.¹⁶²⁻¹⁶³ Si ritrovava un certo accordo nelle relazioni tra l'attività di radiocesio nei funghi e il tipo di suolo: i valori risultavano più alti in suoli sabbiosi,^{157,160-162} o suoli organici con basso pH.¹⁶⁴ Ijpelaar,¹⁶⁵ tuttavia, imputò le notevoli differenze nel contenuto di radioattività nei funghi alle differenze specie-specifiche e non al tipo di suolo. Uno dei più grandi lavori sulla concentrazione di radioattività nei funghi prima dell'incidente di Chernobyl fu pubblicato da Seeger & Schweinshaut,¹⁶⁶ i quali studiarono più di 1000 campioni di funghi europei. Differenze significative nel contenuto di cesio furono osservate anche in individui della stessa specie nello stesso sito. Prima dell'incidente di Chernobyl, c'erano soltanto poche possibilità di collegare i dati di radioattività nei funghi con i fattori ecologici. Secondo Röhleder,¹⁶⁶ i funghi simbiotici e i funghi lignicoli hanno generalmente contenuti di radionuclidi più bassi rispetto ai funghi saprofiti, ma questi dati non sono confermati da quelli presentati da Seeger & Schweinshaut.¹⁶³

Immediatamente dopo l'incidente di Chernobyl alti livelli di radioattività furono misurati in molti paesi europei.¹⁶⁷⁻¹⁶⁸ Contaminazioni elevate nella carne di capriolo ritrovate in Canada, furono attribuite a una dieta consistente principalmente di funghi.¹⁶⁹ Un fenomeno analogo fu notato in Friuli-Venezia Giulia.¹⁷⁰ Variazioni stagionali nella radiocontaminazione di mammiferi selvatici sono state spesso attribuite a diete ricche di funghi in certi periodi dell'anno. A causa di ciò i funghi furono oggetto di particolare attenzione dopo l'incidente di Chernobyl, essendo considerati un'importante sorgente di radiocontaminazione per gli animali e per l'uomo.

Aspetti fisiologici

Seeger & Schweinshaut,¹⁶³ trovarono che in un singolo carpoforo, il contenuto in Cesio era normalmente più alto nella polpa del cappello, più basso nelle lamelle o, più raramente, nel gambo; la radioattività nel gambo era solitamente non più del 48% di quella nella media del cappello.¹⁷¹⁻¹⁷³ Analoghi risultati furono ottenuti da Rückert & Diehl,¹⁷⁴ Heinrich,¹⁷⁵ Heinrich et al.¹⁷⁶, Rückert & Diehl e Bakken & Olsen,¹⁷⁷⁻¹⁷⁸ misurarono i tubuli di *Boletus* L. separatamente dai gambi e trovarono che essi mostravano un'attività dal 50% al 100% più alta rispetto a quella misurata nel

cappello, esclusi i tubuli. Questo può essere spiegato dal fatto che il radiocesio si comporta, all'interno dei carpofori, come il potassio che generalmente è presente in quantità maggiore nel cappello.¹⁷⁹⁻¹⁸⁰

Aumann et al. (1989) trovarono che badione e norbadione, due pigmenti presenti nella cuticola del cappello di *Imleria badia* (Fr.) Vizzini, e nelle specie a esso correlate, sono in grado di complessare il radiocesio e ciò può portare a un notevole accumulo di questo isotopo. Molzahn et al. (1990) misurarono una attività maggiore nella cuticola che nella polpa di *Xerocomus* Quéf.

Molto poco è noto a proposito delle necessità di elementi minerali nei funghi; alti contenuti di potassio sono stati ritrovati in numerose specie¹⁸² e, secondo Mascanzoni,¹⁷² ci si può aspettare un meccanismo di competizione Cs-K simile a quello di molte piante, con un grande assorbimento di radiocesio nei suoli poveri di potassio. Guillitte et al.,¹⁸³ studiando i funghi di una foresta boreale svedese, trovarono che le concentrazioni più alte di radiocesio si potevano misurare in individui appartenenti ai *Gasteromycetes* Fr., un gruppo tassonomico caratterizzato da un contenuto di potassio nel carpoforo estremamente basso, d'altra parte concentrazioni elevate di radiocesio furono ritrovate in membri della famiglia delle *Cortinariaceae* Singer, i quali mostrano i valori più elevati di contenuto di potassio. Altri autori, tuttavia, osservarono che la concentrazione di cesio nei funghi è molto variabile, mentre quella di potassio è piuttosto costante.^{172,184} Ciò non è necessariamente correlato a un assorbimento differenziale dei due ioni, le principali cause potrebbero piuttosto essere la differenza di ripartizione del cesio nel suolo, e la differenza nella profondità di micelio delle diverse specie nel suolo. Secondo Andolina e Guillitte,¹⁸⁵ un'importante frazione di cesio negli orizzonti organici è legata alla lignina; i valori di contaminazione più elevati nei funghi potrebbero in parte essere spiegati con la loro abilità nel decomporre la lignina; parte del cesio non disponibile per le altre piante potrebbe essere invece disponibile per i funghi.

I meccanismi coinvolti nell'accumulo di cesio nei funghi non sono noti; tuttavia, un'ipotesi plausibile è che esso dipenda dalle proprietà degli enzimi di trasporto nelle membrane cellulari e dalla discriminazione fra gli ioni Cs⁺ e K⁺. Secondo Oujia & Myttenaere (1994), tuttavia, il Cesio è probabilmente accumulato nella biomassa come Cs⁺, e non complessato con componenti organici. In contrasto con la ben nota preferenza dei funghi per il potassio rispetto al cesio,¹⁸⁶ Olsen et al. (1990) condussero esperimenti e dimostrarono che colture pure di funghi micorrizogeni non mostravano alcuna preferenza per il potassio rispetto al cesio e che, addirittura, alcune specie mostravano una preferenza per il cesio rispetto al potassio. L'accumulo di radiocesio è significativamente dipendente da caratteristiche specie-specifiche e la variazione nei coefficienti di trasferimento può essere dovuta all'affinità dei carriers trasportatori di Cs nelle plasmamembrane delle ife per questo metallo alcalino,¹⁸⁷ o alle differenze nella struttura delle pareti cellulari.

I fattori di trasferimento

Uno dei problemi principali riguardanti il calcolo del coefficiente di trasferimento per i carpofori dei funghi risiede nel fatto che il micelio si espande molto, sia orizzontalmente che verticalmente, nel suolo. Mascanzoni¹⁷², suggerì come coefficiente di trasferimento per i funghi, il rapporto fra l'attività nel carpoforo (espressa in termini di Bq/kg di peso fresco) e l'attività superficiale del suolo espressa in termini di Bq/m². Secondo Nimis,¹⁸⁸ questa definizione di coefficiente di trasferimento può essere criticata da diversi punti di vista. Primo, nei funghi l'espressione dell'attività espressa in termini di peso fresco può costituire una fonte rilevante di incertezza; Mascanzoni¹⁷², ritiene che la conversione della concentrazione di radionuclidi da peso fresco a peso secco possa essere facilmente effettuata tenendo conto di un contenuto di acqua nel fungo dell'ordine del 90% con piccole variazioni; ciò, tuttavia, è vero soltanto per i funghi con un ottimo stato di idratazione; durante persino brevi periodi di siccità, il contenuto di acqua nel fungo risulta considerevolmente inferiore e ciò ha un'ovvia influenza sul risultato della misura.

Guillitte et al.¹⁸⁹ e Lambinon et al.¹⁹⁰ svilupparono un approccio per la stima della profondità alla quale il micelio si sviluppa e, quindi, per l'identificazione del fattore di trasferimento dallo strato di suolo effettivamente colonizzato dai funghi. Il metodo è basato sulla stima del rapporto Cs-137/Cs-134 nei carpofori e nei differenti orizzonti del suolo, e sull'assunzione che il rapporto osservato nel fungo debba essere identico a quello del suolo nel quale si espande il micelio corrispondente a quel fungo. Il metodo è analogo a quello utilizzato da altri autori. Il fattore di trasferimento può allora essere calcolato sulla base del contenuto di radioattività dell'orizzonte di suolo nel quale si sviluppa il micelio. Questo metodo, tuttavia, può essere applicato solo per un periodo di tempo breve, dopo l'avvenuta deposizione al suolo di radionuclidi, a causa del breve tempo di dimezzamento del Cs-134; i problemi relativi all'applicazione del metodo possono nascere anche pochi anni dopo la deposizione, anche a causa della progressiva sparizione dei pattern verticali di radiocesio all'interno degli orizzonti organici.¹⁹¹

I funghi come indicatori di radioattività

L'uso dei funghi quali bioindicatori o bioaccumulatori di inquinamento radioattivo, è spesso stato messo in discussione dall'alta variabilità dei dati provenienti dalle campagne di misura. Inoltre, la maggior parte dei funghi può essere raccolta soltanto in brevi periodi e la produzione dei carpofori non è regolare nel tempo. Tuttavia, in alcune situazioni particolari e adottando particolari criteri è possibile l'utilizzo della matrice funghi come indicatore: diverse possibili applicazioni sono riportate da vari autori.¹⁹²⁻¹⁹⁵

Andolina & Guillitte,¹⁸⁵ trovarono una buona correlazione tra il cesio disponibile nell'orizzonte organico e la contaminazione di *Xerocomellus chrysenteron* (Bull.) Šutara. Una mappa della radiocontaminazione del Friuli-Venezia Giulia fu pubblicata da Nimis et al.,¹⁹⁶ usando i funghi saprofiti come bioindicatori. Mappe di

radiocontaminazione della Polonia furono pubblicate da Mietelski et al.,¹⁹⁷ usando *Imleria badia* (Fr.) Vizzini come bioaccumulatore. Il rapporto fra la concentrazione di Cs-137 e quella di Cs-134 nei funghi fu usata come indicatore della localizzazione della maggior parte del micelio nel suolo forestale da Rühm et al.¹⁹⁸ Una lista delle precauzioni metodologiche da adottare usando i funghi come bioindicatori è stata pubblicata da Fraiture¹⁹⁹. Guillitte et al.,²⁰⁰ analizzarono il ruolo dei funghi nel ciclo del radiocesio all'interno dell'ecosistema forestale e nel trasferimento del radiocesio dalla foresta all'uomo. Lo studio della radiocontaminazione dei funghi rappresenta un buon esempio dei progressi fatti dalla radioecologia negli studi post Chernobyl.

Gli studi in Friuli-Venezia Giulia

In Italia, e in particolare in Friuli-Venezia Giulia, furono condotti molti studi, alcuni dei quali già citati in precedenza, sia sulla concentrazione di radiocesio in diverse specie, in diversi gruppi ecologici, in diverse parti dei funghi, sia sulla possibilità di utilizzo dei funghi come indicatori di radioattività. Gli studi condotti sulla base dei risultati di decine di campagne di campionamento annuali a seguito delle quali sono state eseguite analisi di spettrometria gamma su migliaia di campioni appartenenti a oltre 200 specie fungine, hanno portato a alcune importanti conclusioni di seguito riassunte.²⁰¹

È stato possibile quantificare il fenomeno della contaminazione radioattiva dei macromiceti in Friuli-Venezia Giulia a seguito dell'incidente di Chernobyl: nel 1986 sono state riscontrate concentrazioni massime di radiocesio dell'ordine delle centinaia di migliaia di Bq/kg di peso secco. Sulla base dei risultati della misura dei campioni di funghi saprofiti raccolti in 37 stazioni sul territorio del Friuli-Venezia Giulia è stato possibile redigere una mappa regionale della distribuzione della concentrazione del Cs-137. Tale mappa è risultata significativa ai fini dell'individuazione delle aree della regione dove la deposizione di radionuclidi al suolo è stata maggiore (Alta Val del Torre, Val Raccolana, Val Resia e Val di Tramonti). È stato dimostrato che la concentrazione media di Cs-137 nei macromiceti non è sostanzialmente cambiata, a meno del decadimento fisico, dal 1986 a oggi. Al più c'è stata una diminuzione della concentrazione di Cs-137 in alcune specie e un aumento della stessa concentrazione in altre specie.

Nel corso degli anni è stata validata l'ipotesi formulata alla fine della prima campagna di campionamento e misurata sulla causa principale della differenza di contaminazione da radiocesio fra specie diverse all'interno della stessa stazione: l'orizzonte pedologico, e quindi la profondità, in cui è localizzata la maggior parte del micelio del fungo è responsabile del diverso contenuto di Cs-137 nelle diverse specie. Risulta quindi corretta e opportuna, per studi effettuati nel campo della radioecologia, la suddivisione dei macromiceti in gruppi ecologici in funzione della profondità del micelio: funghi lignicoli, funghi saprofiti, funghi simbiotici (eventualmente suddivisi in funghi simbiotici con conifere e funghi simbiotici con latifoglie).

È stata valutata la possibilità di utilizzo dei macromiceti come indicatori di radioattività ambientale. Essi sono risultati utili come indicatori di deposizione di radionuclidi al suolo soltanto in alcuni casi particolari quali a esempio l'utilizzo dei soli funghi saprofiti entro pochi mesi dall'avvenuta deposizione. È risultata invece evidente la possibilità di utilizzare la concentrazione di radiocesio nei funghi quale indicatore di migrazione del radiocesio in profondità. In questo caso l'indicatore specifico è rappresentato dal rapporto tra la concentrazione del Cs-137 e quella del Cs-134 nei macromiceti.

Sono stati valutati i possibili rischi sanitari per la popolazione che consumi anche grandi quantità di funghi selvatici, raccolti o commercializzati sul territorio del Friuli-Venezia Giulia dal 1986 a oggi. È stato anche effettuato uno studio mirato per la valutazione della dose a un gruppo particolare della popolazione rappresentato dai consumatori abituali di funghi selvatici. In questo caso sono state tenute in considerazione anche le eventuali perdite di radionuclidi dovute alle pratiche culinarie. In ogni caso il rischio sanitario per la popolazione è risultato trascurabile.

Un ulteriore risultato delle indagini effettuate, e in particolare nell'ambito dell'analisi del rapporto tra le concentrazioni del Cs-137 e del Cs-134 nei funghi, è rappresentato dall'evidenza della capacità che i funghi hanno dimostrato di assorbire dal suolo anche il Cs-137 pre-Chernobyl, che non risulta invece più disponibile per l'assorbimento da parte delle piante superiori. Nell'ambito di uno studio di dettaglio riguardante il contenuto di radiocesio in diverse parti del corpo fruttifero dei macromiceti (diverse zone del cappello e gambo) è stato inoltre possibile verificare alcuni dati di letteratura: a esempio è risultato generalmente più contaminato il cappello dei funghi rispetto al gambo. Tuttavia, in altri casi le osservazioni sono risultate in disaccordo con altri dati di letteratura.

Nonostante molti autori si siano fino a oggi cimentati in studi riguardanti il contenuto di radiocesio nei macromiceti, la loro capacità di assorbimento dei radionuclidi dal suolo e la possibilità di utilizzo di tale matrice quale indicatore di contaminazione radioattiva, numerosi aspetti non sono stati chiariti e numerosi problemi rimangono aperti. In particolare, non è ancora chiaro quale sia il meccanismo di assorbimento del radiocesio dal suolo da parte dei funghi e se esso sia effettivamente analogo a quello del potassio, come alcuni autori sostengono. La suddivisione dei funghi in gruppi ecologici in base alla profondità del micelio non è sempre risultata sufficiente a rendere i gruppi omogenei, anche all'interno dello stesso sito di campionamento, allo scopo di effettuare studi di radioecologia o di utilizzare la matrice quale indicatore di radioattività ambientale. Molte ricerche andrebbero ancora condotte nell'ambito di singole specie per poter poi, eventualmente, effettuare raggruppamenti. Le variazioni pedologiche, floristiche e meteorologiche fra diversi siti di campionamento, oltre alle diversità di contaminazione superficiale dei suoli, rendono estremamente difficile effettuare confronti fra singole specie di macromiceti raccolte in zone diverse. Spesso le singole specie mostrano comportamenti ecologici diversi in ambienti diversi e anche la profondità del loro micelio è fortemente

dipendente dal tipo di suolo forestale in cui crescono. Come già indicato, i funghi sono in grado di assorbire dal suolo anche il Cs-137 pre-Chernobyl. Questo fatto potrebbe avere delle conseguenze importanti dal punto di vista della radioprotezione della popolazione: le piante superiori, potrebbero essere in grado, se in simbiosi micorrizica, di assorbire dal suolo, attraverso i funghi, quel radiocesio che altrimenti non risulterebbe, dopo alcuni anni dalla deposizione, più disponibile. Va infine considerato che, per quanto riguarda la disponibilità per l'assorbimento, da parte delle piante, del radiocesio dal suolo, i funghi con le loro ife, potrebbero costituire un serbatoio continuo di radiocesio disponibile.

4 Le nuove frontiere con i funghi

4.1 I funghi e le biotecnologie

Di Paola Angelini e Roberto Venanzoni

Il termine biotecnologia è stato coniato nel 1917 dall'ingegnere ungherese Karl Ereky, per indicare l'impiego di agenti biologici per la produzione di beni e servizi. In realtà le biotecnologie hanno origini molto remote, come testimoniato dall'antichità dei processi di panificazione e produzione di bevande alcoliche.²⁰²

Oggi giorno i funghi, grazie alla facilità della loro coltivazione e manipolazione, oltre a rappresentare una importante fonte di cibo, vengono impiegati dall'uomo in diversi settori industriali con delle enormi ricadute economiche.²⁰³

Agaricus bisporus (J.E. Lange) Imbach, lo "champignon" (specie addomesticata dai francesi nel XVIII secolo), è la specie fungina più consumata a livello mondiale. È un ottimo fungo commestibile, coltivato su larga scala in molti Paesi, fra cui la Polonia che ne rappresenta il maggiore esportatore. Negli ultimi 30 anni, l'interesse per questo fungo si è un po' ridotto a causa del crescente numero di altre specie fungine eduli introdotte nel mercato, quali *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm. (Figura 93), *P. eryngii* (DC.) Qué. e soprattutto in Giappone e nel sud-est asiatico, *Lentinula edodes* (Berk.) Pegler ("shii-take"), *Volvariella volvacea* (Bull.) Singer (molto utilizzata nella cucina cinese) e *Flammulina velutipes* (Curtis) Singer ("enokitake"). La notevole capacità degradativa di questi funghi permette loro di utilizzare gli scarti di produzione di industrie agro-alimentari come substrati di crescita, al fine di rendere i processi più ecosostenibili.²⁰⁴⁻²⁰⁶

Figura 93. *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm. su diversi substrati composti da sottoprodotti di provenienza agroalimentare. A) primordi, B) corpi fruttiferi maturi. Foto di Paola Angelini.



L'elevato contenuto proteico e la velocità di crescita di alcuni funghi (sia unicellulari che filamentosi), sono alla base dell'idea di utilizzare biomasse microbiche come cibo a basso costo ("single cell proteins"). *Saccharomyces cerevisiae* (Desm.) Meyen [comunemente noto come "lievito di birra"], coltivato su melassa all'interno di un

fermentatore, è un esempio di single-cell proteine impiegate nella produzione di vari prodotti alimentari. Nei Paesi anglosassoni esistono inoltre prodotti a base di lievito, come a esempio la marmite, una crema da spalmare derivante dalla lavorazione del residuo di lieviti proveniente dalla produzione della birra.²⁰⁷

Inoltre, il micelio di *Fusarium venenatum* Nirenberg coltivato in fermentatore, essiccato e trattato, viene commercializzato in diversi paesi europei come "Quorn". Tale prodotto viene pubblicizzato come alternativa alla carne ("micoproteina"), in virtù dell'alto contenuto proteico, dei bassi livelli di lipidi e dell'assenza di colesterolo.²⁰⁸

Indipendentemente dal consumo diretto, molto importante è anche l'impiego dei funghi in un'ampia varietà di prodotti alimentari, a esempio, nel settore caseario. Un esempio tipico lo troviamo nel noto Gorgonzola, formaggio originario della provincia di Milano. Esso presenta strette analogie con il "fromage bleu" del sud e del centro della Francia, cioè con il Roquefort; è inoltre analogo allo Stilton degli inglesi (con "venature" blu-verde ottenute inoculando *Penicillium roqueforti* Thom nella pasta del formaggio) e al Camembert e Brie di origine francese (in questo caso, la crescita di *Penicillium camemberti* Thom sulla superficie del formaggio determina la formazione della crosta).

L'erborinatura, cioè la maculatura verdastra che presentano questi formaggi è dovuta alla presenza e allo sviluppo di varie specie di *Penicillium* Link. Si tratta di funghi filamentosi capaci di distruggere l'acidità lattica e inoltre, di produrre proteasi e lipasi in grado di conferire le tipiche proprietà organolettiche. Tra questi, *Penicillium roqueforti* rappresenta la specie più conosciuta e dominante (Penicillo del Gorgonzola).²⁰⁹

Diverse sono anche le specie fungine importanti nella produzione di un'ampia varietà di vini pregiati quali, a esempio, il Sauternes o il Tokaji (risultato dall'ammuffimento controllato delle uve a opera di *Botrytis cinerea* Pers., "muffa nobile dell'uva").²¹⁰ Tradizionale è inoltre, nelle cucine orientali, la preparazione di una varietà di soia, il miso, l'indonesiano tempeh, ottenuti da diversi substrati (soprattutto riso e soia) a seguito di trasformazioni operate da più microrganismi. Alcune specie fungine appartenenti ai generi *Rhizopus* Ehrenb., *Aspergillus* P. Micheli ex Haller, *Mucor* Fresen., *Actinomuor* Schostak., grazie alle loro capacità proteolitiche, lipolitiche e/o amilolitiche rendono più digeribile e gustoso il materiale di partenza, mentre i prodotti della degradazione da essi operata vengono successivamente utilizzati da batteri, i quali abbassano il pH creando condizioni adatte allo sviluppo di lieviti.²¹¹

D'interesse in diversi processi produttivi sono gli enzimi fungini extracellulari, rilasciati nel terreno di coltura, da cui vengono estratti per essere commercializzati: i) pectinasi (prodotte da specie di *Aspergillus* e *Rhizopus*), sono degli eteropolisaccaridi che idrolizzano le pectine. Si impiegano per chiarificare i succhi di frutta; ii) amilasi (da specie di *Aspergillus* e *Rhizopus*), vengono usate per convertire l'amido a maltosio durante i processi di panificazione.

Altri enzimi fungini trovano diverse applicazioni: alcol ossidasi prodotte da lieviti [*Yarrowia lipolytica* (Wick., Kurtzman & Herman) Van der Walt & Arx, *Ogataea polymorpha* (Morais & M.H. Maia) Y. Yamada, et al., *Komagataella pastoris* (Guillierm.) Y. Yamada, et al.) entrano, come sbiancanti, nella formulazione di diversi detersivi; le ligninasi di funghi "white rot" (a esempio *Auricularia* Bull., *Flammulina* P. Karst., *Lentinula* Earle, *Pleurotus* (Fr.) P. Kumm., *Trametes* Fr. (Figura 94), ecc. Particolarmente studiata è la specie *Phanerodontia chrysosporium* (Burds.) Hjortstam & Ryvarden, molto efficiente nella degradazione della lignina), se impiegata su larga scala per la delignificazione dei residui delle colture e dell'industria della lavorazione del legno, potrebbero fornire grandi quantità di cellulosa a basso costo (in natura la cellulosa si trova fortemente complessata a lignina, sotto forma di lignocellulosa) da utilizzarsi come substrato economico per la produzione di alcol combustibile.²¹²⁻²¹⁴

Figura 94. *Trametes versicolor* (L.) Lloyd, fungo "white rot" o fungo della "carie bianca del legno": degrada la lignina. Foto di Enrico Bini

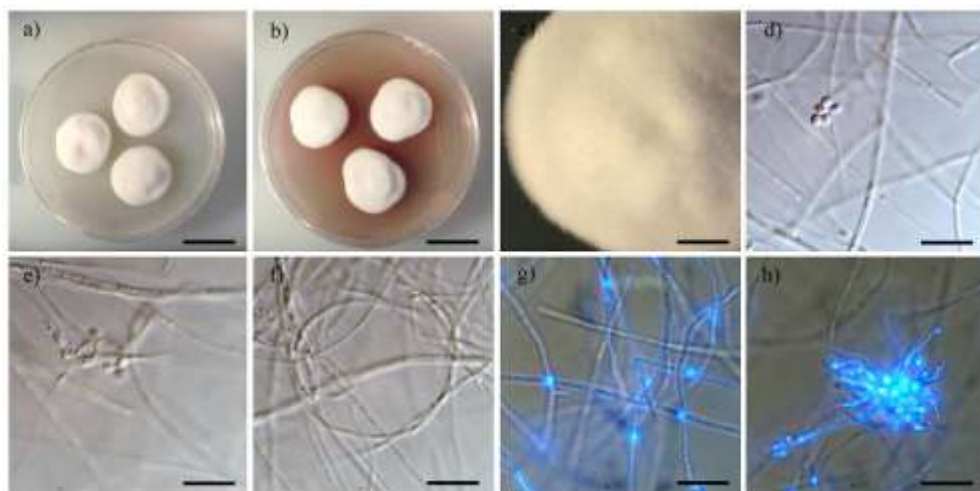


In altri casi, possono rivestire un notevole interesse industriale alcuni processi enzimatici interni al fungo: diverse specie sono a esempio in grado di effettuare reazioni di deidrogenazione, ossidrilazione e altre trasformazioni estremamente specifiche su complesse molecole aromatiche steroidee. La produzione commerciale dei composti cortisonici utilizzati come antinfiammatori o antitumorali viene realizzata fornendo al fungo (a es., *Cunninghamella* sp.pl. e *Rhizopus* sp.pl.) precursori vegetali a basso costo, che, assorbiti dal fungo e opportunamente trasformati, vengono poi rilasciati nel mezzo di coltura e di qui recuperati (in tal caso si parla di bioconversioni).²¹²

Numerosi metaboliti fungini presentano inoltre un notevole impiego industriale. Tra i metaboliti primari d'interesse industriale, il più importante è l'acido citrico. Quest'ultimo, molto impiegato nell'industria delle bevande analcoliche, si ottiene da *Aspergillus niger* Tiegh., coltivato in presenza di melasse a bassi valori di pH (circa 2): in tale condizione la specie fungina è capace di convertire ad acido citrico fino al 95% dello zucchero fornito. Oggigiorno è in tal modo che in tutto il mondo si fabbrica l'acido citrico, mentre la tradizionale fonte di approvvigionamento (estrazione dagli agrumi) è stata completamente abbandonata.²¹⁵

Nel settore ambientale, al fine di limitare un notevole impiego di "pesticidi" chimici (erbicidi, insetticidi, fungicidi) è sempre più considerata la possibilità di ricorrere ai funghi patogeni o antagonisti di artropodi ("micoinsetticidi"), nematodi ("miconematocidi"), funghi fitopatogeni ("micofungicidi"), erbe infestanti ("micoerbicidi") quali agenti di lotta biologica. Allo stato attuale esistono in commercio numerosi bio-formulati a base di diversi microrganismi, a esempio, *Metarhizium anisopliae* (Metschn.) Sorokin e *Beauveria bassiana* (Bals.-Criv.) Vuill. (Figura 95) (per il controllo di ortotteri, coleotteri e altri insetti), *Akanthomyces lecanii* (Zimm.) *Spatafora*, et al. (contro afidi e mosca bianca delle serre), specie di *Sphaerostilbella* (Henn.) Sacc. & D. Sacc. e *Trichoderma* Pers. (antagoniste e parassite di *Pythium* Pringsh. e *Rhizoctonia* DC.).²¹⁶

Figura 95. *Beauveria bassiana* (Bals.-Criv.) Vuill., fungo patogeno di insetti: a) colonie cresciute in Malt Extract Agar, b) colonie cresciute in Yeast Extract Sucrose Agar, c) margine colonia: cotonoso, d) cluster di conidi, e-f) strutture ifali circolari, g) ife trattate con il colorante fluorescente DAPI, h) conidiofori trattati con il colorante fluorescente DAPI. Scale: (a) = 2,30 cm; (b) = 2,14 cm; (c) = 0,45 cm; (d-h) = 10 µm. Foto di Paola Angelini.



4.2 I funghi che si nutrono delle sostanze inquinanti: il biorisanamento

Di Andrea Arcangeli

Generalità

Con il termine biorisanamento, spesso indicato nella forma anglofona "bioremediation", si intende quella tecnica finalizzata alla decontaminazione di un terreno che presenta un accumulo di sostanze tossiche e che differisce dalle classiche tecniche basate sull'utilizzo di sostanze chimiche. Il biorisanamento è affidato a organismi biologici, nel caso specifico ai funghi, ed è pertanto corretto parlare di "micorisanamento".²¹⁷⁻²¹⁸

In presenza di particolari specie fungine, le molecole tossiche vengono progressivamente degradate (biodegradate) in molecole semplici come acqua, anidride carbonica e biomassa, sostanze cioè biocompatibili.²¹⁸

L'impiego di funghi deve essere comunque ponderato in quanto la loro presenza potrebbe perturbare l'equilibrio ecologico dell'habitat, anche se, quando le sostanze tossiche si esauriscono, anche il micelio fungino tende a ridursi fino a scomparire.²¹⁹ Anche per questo motivo è importante l'utilizzo di specie fungine autoctone, cioè naturalmente presenti nel territorio che si deve biorisanare, in quanto, anche in virtù della complessità degli habitat naturali, l'inserimento di un elemento biologico estraneo all'ambiente, potrebbe non essere perfettamente controllato.

È inoltre doveroso sottolineare che il biorisanamento non è, almeno ad oggi, una tecnica in grado di risolvere tutti i problemi ambientali, in quanto non tutte le sostanze inquinanti prodotte dall'attività umana, possono essere degradate da funghi o batteri.

Cenni storici

Sono più di 50 anni che si è constatato come alcune specie fungine abbiano la capacità di assorbire metalli pesanti dal terreno. Lavori di Cocchi e Vescovi alla fine degli anni 90 dimostrarono come negli sporocarpi di alcuni funghi la concentrazione di elementi chimici come Piombo, Cadmio o Mercurio, fosse superiore a quella riscontrabile nel terreno dove gli stessi carpofori fruttificavano. Si è appurato successivamente che i metalli pesanti non vengono assorbiti casualmente dal fungo (ad eccezione del bioassorbimento che vedremo più avanti), ma rientrano proprio nella "dieta" degli stessi. Il genere *Agaricus* L. è sicuramente il più noto per tale caratteristica.²¹⁹

Discorso analogo si può fare relativamente alla presenza di isotopi radioattivi in alcune specie fungine particolarmente attratte da tali elementi chimici, basti pensare ad alcune specie del genere *Craterellus* Pers. oppure al consumato e conosciuto *Xerocomus badius* (Fr.) E.-J. Gilbert. Molti studi furono effettuati in merito a questo argomento, nel periodo successivo all'esplosione del reattore nucleare di Chernobyl

(1986), quando, gli operatori del Dipartimento di Fisica Sanitaria dell'Università di Perugia, venivano riforniti di grandi quantità di funghi epigei spontanei che la scuola di Micologia di Perugia utilizzava per le esercitazioni didattiche, al fine di rintracciare la presenza dell'isotopo Cesio-137 per verificare le ripercussioni di quel tragico evento dell'Italia centrale.

Figura 96. *Craterellus cornucopioides* (L.) Pers. Foto di Giancarlo Bistocchi



Come funziona

L'azione decontaminante fungina^{217,220} prevede un meccanismo di azione che può essere differenziato in:

- Biodegradazione: gli inquinanti vengono "degradati" in composti più semplici e non dannosi per l'ambiente. Questo processo è favorito da enzimi extracellulari, tra cui è importante ricordare il ruolo della lignina perossidasi che degrada noti inquinanti ambientali come nitroglicerina, pesticidi, erbicidi, idrocarburi policiclici aromatici e bifenili policlorurati.
- Bioassorbimento: è un processo di cattura passiva (quindi senza dispendio energetico) degli inquinanti. Il micelio assorbe i liquidi e conseguentemente le sostanze in essi disciolte; prevede anche l'utilizzo della biomassa fungina morta che garantisce un'elevata produzione e costi di esercizio molto bassi.
- Bioconversione: questo metodo consiste nella coltivazione di funghi che utilizzano, per il loro accrescimento, scarti organici industriali e agricoli. È questo il caso di alcuni funghi ligninolitici che riescono a degradare l'ossitetraclina.

Funghi “antiamianto”

Il largo impiego di amianto nelle costruzioni fino a pochi decenni fa, sia per le sue caratteristiche di isolante, che per le sue proprietà ignifughe, ha lasciato nell'ambiente notevoli quantità di materiale che, in seguito alla degradazione dello stesso, porta alla liberazione delle pericolose fibre che se ispirate possono provocare gravi problemi di salute come l'asbestosi e il mesotelioma pleurico. Gli effetti nocivi di queste microscopiche fibre dipendono da vari fattori, uno di questi è il contenuto in ferro. La crocidolite, una delle forme di asbesto che si conoscono, contiene fino al 29% di ferro; esperimenti in vitro hanno dimostrato che la rimozione del ferro riduce la pericolosità dell'amianto riducendo in maniera sensibile la possibilità di indurre la formazione di tumori, come dichiarato dal centro Interdipartimentale per lo Studio degli Amianti e di altri Particolari Nocivi “G. Scansetti” dell'Università di Torino.

Molti microrganismi necessitano di ferro per le proprie attività metaboliche e si conoscono alcune specie fungine che possiedono efficaci strategie per recuperare questo metallo dall'ambiente, attraverso il rilascio di potenti “chelanti” che catturano gli atomi di ferro dal suolo e li portano in soluzione. L'azione dei chelanti fungini contribuisce a modificare in vitro la superficie delle fibre di amianto, eliminando i siti attivi verosimilmente coinvolti nei meccanismi di carcinogenesi. Inoltre, le ife fungine grazie alla complessa rete di filamenti che li costituiscono, riescono a immobilizzare le fibre di asbesto riducendo la loro dispersione nell'ambiente.

L'Istituto per la Protezione Sostenibile delle Piante del CNR, ha dimostrato che le specie più efficaci tra quelle testate sono: *Fusarium oxysporum* Schltld., *Linnemannia hyalina* (Harz) Vandepol & Bonito e *Oidiodendron majus* G.L. Barron.

Funghi che mangiano la plastica

Il Dipartimento di Scienza della vita e Biologia dei Sistemi dell'Università di Torino, ha isolato decine di specie fungine che crescono su diverse tipologie di plastiche presenti in discarica; questi funghi sono stati isolati e coltivati in presenza di Polietilene come unica fonte di carbonio. È stata dimostrata la capacità che alcuni funghi hanno di mineralizzare velocemente la plastica.

Questi ceppi sono stati messi in incubazione per 30 giorni su film di polietilene. Le successive analisi al microscopio elettronico a scansione (SEM) hanno mostrato significativi cambiamenti relativamente allo strato superficiale del polietilene. Analisi di spettroscopia hanno inoltre evidenziato la comparsa di gruppi funzionali associati all'ossidazione del polietilene, come ad esempio i gruppi estere, individuati con picchi che risultano assenti nel campione di controllo.

4.3 I funghi medicinali

Di Paola Angelini, Andrea Arcangeli, Giancarlo Bistocchi e Roberto Venanzoni

I funghi medicinali sono impiegati nella medicina popolare da migliaia di anni, in particolar modo nella Medicina Tradizionale Cinese (MTC), dove i funghi hanno un ruolo essenziale nel mantenimento del benessere e nell'aumentare la durata della vita.²²¹

Negli ultimi 50 anni, lo studio delle proprietà medicinali dei funghi è stato oggetto di numerose ricerche anche da parte della medicina occidentale.²²²⁻²²³ Le proprietà biologiche dei funghi più studiate sono quelle antitumorali e immunostimolanti, principalmente attribuite alla presenza dei beta-glucani (polisaccaridi) a livello della parete cellulare.^{6, 224-225} Sono molte, tuttavia, le ricerche internazionali che riguardano l'attività antimicrobica che hanno portato all'isolamento di nuovi antibiotici, come a esempio la plectasina, isolata da *Pseudoplectania nigrella* (Pers.) Fuckel, efficace nei confronti di batteri resistenti ai convenzionali antibiotici.²²⁶⁻²²⁷ Altri importanti antibiotici scoperti nel passato sono la penicillina (da *Penicillium chrysogenum* Thom), la ciclosporina A (antibiotico peptidico liposolubile estratto da *Tolyposcladium inflatum* W. Gams, *Fusarium solani* (Mart.) Sacc., *Fusarium neocosmosporiellum* O'Donnell & Geiser, *Aspergillus terreus* Thom), la griseofulvina (estratta da *Penicillium griseofulvum* Dierckx: blocca la crescita dei funghi dermatofiti), le sordarine (agenti fungicidi principalmente isolati da *Podospora araneosa* (Cain) Cain) e gli antibiotici appartenenti alla classe delle cefalosporine (principalmente efficaci contro batteri Gram-positivi), isolate da *Acremonium* sp. pl.²²⁸⁻²³¹

Il Ministero della Salute Italiana impiega il termine di "Botanicals" per indicare le sostanze vegetali e le varie preparazioni contenute negli integratori alimentari (food supplements). I funghi, pur appartenendo al Regno dei Funghi, separato da quello delle piante, sono inclusi nella lista dei Botanicals e, allo stato attuale, sono riportate le seguenti 18 specie (approvate dal Ministero della Salute Italiana, 19 gennaio 2019): *Agaricus blazei* Murrill, *Auricularia auricula-judae* (Bull.) Qué., *Auricularia nigricans* (Sw.) Birkebak, Looney & Sánchez-García, *Bovista plumbea* Pers., *Calvatia gigantea* (Batsch) Lloyd, *Coprinus comatus* (O.F. Müll.) Pers., *Fomes fomentarius* (L.) Fr., *Hericium erinaceus* (Bull.) Pers., *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst., *Grifola frondosa* (Dicks.) Gray, *Inonotus obliquus* (Fr.) Pilát, *Lentinula edodes* (Berk.) Pegler, *Ophiocordyceps sinensis* (Berk.) G.H. Sung, J.M. Sung, Hywel-Jones & Spatafora, *Phellinus igniarius* (L.) Qué., *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm., *Polyporus umbellatus* (Pers.) Fr., *Trametes suaveolens* (L.) Fr., *Wolfiporia cocos* (F.A. Wolf) Ryvarden & Gilb.

I funghi medicinali possono essere impiegati come: 1) alimenti dietetici, 2) integratori alimentari, 3) principi attivi dei farmaci, 4) cosmeceutici (es. alcuni polisaccaridi, β glucani, glucuronosilomannani, tirosinasi, ecc.), 5) agenti naturali di biocontrollo nella protezione delle piante con attività insetticida, fungicida, battericida, erbicida, nematocida e antivirale.

La gran parte dei funghi utilizzati per la produzione di estratti fungini sono funghi eduli e coltivati.

***Ophiocordyceps sinensis* (Berk.) G.H. Sung, J.M. Sung, Hywel-Jones & Spatafora**

O. sinensis (sinonimo: *Cordyceps sinensis*) è un fungo appartenente al phylum Ascomycota (famiglia: *Ophiocordycipitaceae* G.H. Sung et al.; ordine: *Hypocreales* Lindau). È una specie fungina endemica dell'altopiano del Tibet e delle montagne dell'Himalaya, utilizzata da secoli nella medicina tradizionale cinese. In occidente, tale fungo si conosce solo da circa 20 anni, durante i quali sono stati realizzati molti studi scientifici al fine di validarne le sue proprietà biologiche.²³²

O. sinensis è un fungo parassita che solitamente aggredisce le larve del lepidottero *Thitarodes armoricanus* Oberthür (famiglia *Hepialidae* Stephens), noto con il nome di "falena fantasma". Nel tardo autunno le spore fungine infettano le larve, germinano ed emettono ife fungine. L'ingresso delle ife fungine nell'emolinfa sopprime il sistema immunitario larvale e provoca la cessazione della vita dell'insetto. Con la fine della primavera e l'inizio dell'estate il fungo raggiunge la maturità: il corpo mummificato del bruco è completamente occupato dal micelio fungino che esercita una pressione interna fino a fuoriuscire attraverso la sua testa (Figura 97).

Negli stati Uniti, *O. sinensis* è denominato caterpillar (fungo del bruco), ma la sua etimologia è da ricondurre al latino "cord" = "bastone", "ceps" = "testa" e "sinensis" = "proveniente dalla Cina".

La forma selvatica è piuttosto rara e il suo prezzo è elevatissimo, ma fortunatamente, oggi si riesce a coltivarlo in laboratorio mediante tecniche di colture "in vitro", riducendo in tal modo i costi e permettendo l'utilizzo di questo rimedio in tutto il mondo.

O. sinensis rappresenta una ricca sorgente di composti biologicamente attivi, ritenuti molto importanti dal punto di vista nutrizionale; contiene mono-, di- e oligosaccaridi, polisaccaridi, proteine, steroli, tutti gli aminoacidi essenziali, vitamine (E, K, B1 e B2, B12), nucleosidi e macro e microelementi (K, Na, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, Zn, Pi, Se, Al, Si, Ni, Sr, Ti, Cr, Ga, V, e Zr). Altri importanti composti bioattivi sono gli analoghi dei nucleosidi: la cordicepina (3'-deossiadenosina), l'acido cordicepico, la 2'-deossiadenosina, e gli altri analoghi dei nucleotidi deossigenati (uridina, deossiuridina, adenosina, dideossiadenosina).²³³

In occidente, gli atleti e gli anziani, rappresentano i principali consumatori di *O. sinensis*. Alcune ricerche scientifiche hanno evidenziato che l'impiego di questo fungo migliora l'utilizzo dell'ossigeno e porta a un incremento della produzione di ATP fino al 55%. Questo consentirebbe negli atleti, un'estensione dei tempi di performance aerobica.²³⁴

Negli anziani esso è in grado di migliorare la qualità del sonno, l'umore, la lucidità mentale e la capacità di concentrazione, inoltre, ha la proprietà di rafforzare la risposta del sistema immunitario e controllarne anche la risposta esacerbata.²³⁵

Svolge inoltre un'azione di regolarizzazione della glicemia e di aumento della sensibilità periferica all'insulina utili in presenza di sindrome metabolica o diabete di tipo 2. Insieme a *Coprinus comatus* (O.F. Müll.) Pers e *Grifola frondosa* (Dicks.) Gray (Mai-take), *O. sinensis* è una delle specie fungine più indicate per il trattamento della sindrome metabolica e del diabete di tipo 2.²³⁶ Esso possiede anche un'azione antivirale, evidenziata sia da studi sull'HIV che sull'epatite virale B e C e Covid 19.²³⁷

Figura 97. *Ophiocordyceps sinensis* (Berk.) G.H. Sung et al. Disegno di Giancarlo Bistocchi



***Coprinus comatus* (O.F. Müll.) Pers**

C. comatus (famiglia: Agaricaceae, phylum: Basidiomycota), è una delle poche specie fungine medicinali le cui potenzialità terapeutiche sono state scoperte in Europa e non dalla Medicina Tradizionale Cinese (Figura 98).

In Europa, infatti, *C. comatus* è molto diffuso, dalla primavera all'autunno, cresce come saprotrofo nei prati, nei giardini, ai lati dei sentieri del bosco e lungo i bordi delle strade. È comunque un fungo cosmopolita, commestibile e molto apprezzato per le sue qualità organolettiche solo quando è giovane.

In Italia, *C. comatus* è conosciuto con il nome comune di fungo "dell'inchiostro" in quanto, con l'invecchiamento, le sue lamelle tendono a liquefarsi per autodigestione, in modo da rilasciare le basidiospore e assicurare così la riproduzione del fungo. In America, questo fungo è invece denominato "Shaggy mane" = "criniera arruffata", la

cui etimologia è da ricondurre al termine latino "comatus" che significa "dotato di chioma" con riferimento alle numerose squame filamentose presenti sul cappello.

Il valore nutrizionale di *C. comatus* è stato esaminato da vari ricercatori. In 100 g di corpi fruttiferi essiccati, sono presenti: carboidrati (49.2-76.3 g), fibre insolubili in acqua ($32.8 \pm 4.2\%$), fibre solubili in acqua ($1.79 \pm 1.1\%$), proteine (11.8-29.5 g) e grassi (1.1-5.4 g). Gli aminoacidi presenti in maggiore concentrazione sono l'acido glutammico (441.6 mg) e l'alanina (222.8 mg), mentre la cistionina (1.9 mg) e la metionina (5.3 mg) sono presenti con un minor contenuto. Gli acidi grassi polinsaturi raggiungono il valore del 66%, mentre gli acidi grassi saturi sono il 18.72%. Tra i composti fenolici sono stati evidenziati flavoni, flavonoli, flavanoni, biflavonoidi, isoflavoni, acidi idrossibenzoici, acidi idrossicinnamici, cumarine e acidi clorogenici. Sono presenti anche vari macroelementi (fosforo, potassio, magnesio sodio, e calcio) e microelementi (ferro, zinco e manganese).²³⁸

Alcuni studi scientifici riguardanti gli effetti di *C. comatus* sul metabolismo glucidico hanno evidenziato una interessante azione ipoglicemizzante, molto utile nel trattamento del diabete di tipo I e II.²³⁹⁻²⁴⁰ Tale proprietà è rafforzata dal suo notevole contenuto in Vanadio, minerale con effetto ipoglicemizzante. Tuttavia, l'utilizzo del minerale in sé ha dimostrato alcune controindicazioni per cui il suo impiego non è sempre consigliato. Per contro, l'azione del Vanadio presente in *C. comatus* non evidenzia alcun effetto collaterale in quanto è bilanciata dall'elevato contenuto in ferro.²⁴¹

C. comatus è stato anche descritto molto utile nella stipsi e nel trattamento delle infezioni intestinali, grazie agli effetti prebiotici dei suoi polisaccaridi sul microbiota intestinale.²⁴²⁻²⁴⁴

Uno studio realizzato da Gu e Leonard²⁴³ ha inoltre valutato l'azione di *C. comatus*, in sinergia con *Coprinellus* sp. e *Flammulina velutipes* (Curtis) Singer (Figura 99), insieme ad altri 38 basidiomiceti, su cellule di carcinoma mammario ormono-dipendenti e ormono-indipendenti.

L'azione antiproliferativa e citotossica dei tre estratti (*C. comatus*, *Coprinellus* sp., *F. velutipes*) è risultata essere dose-dipendente.

Figura 98. *Coprinus comatus* (O.F. Müll.) Pers. Foto di Giancarlo Bistocchi



Figura 99. *Flammulina velutipes* (Curtis) Singer. Foto di Giancarlo Bistocchi



Box. Le nuove frontiere della microscopia micologica

Di Rosalba Padula

Dopo l'osservazione morfologica e organolettica che si svolge in campo, è sempre indispensabile, per un corretto inquadramento sistematico, un attento esame al microscopio che permette non solo di osservare le caratteristiche morfologiche delle strutture invisibili a occhio nudo, ma anche valutare le eventuali reazioni microchimiche utilizzando appositi reagenti. Le indagini microscopiche sono dunque complementari allo studio in campo e vanno eseguite con grande attenzione.¹²⁻¹³

Gli elementi fungini che posso essere analizzati al microscopio sono: le ife e il sistema delle ife, le cuticole dei rivestimenti, la trama imeniale, i veli, le spore, i basidi, i cistidi, i giunti a fibbia e i pigmenti. Per l'osservazione microscopica possono essere utilizzate diverse tipologie di strumenti e diverse tecniche, che richiedono sempre un'opportuna preparazione del campione e un preparato particolarmente sottile. Qualunque sia il dispositivo utilizzato è oggi, però, indispensabile che sia sempre collegato a un sistema di misura (software) e di registrazione delle immagini (video-fotocamera) dedicato.

Gli strumenti più comunemente usati sono lo stereomicroscopio, il microscopio ottico e il microscopio elettronico.¹²

Lo stereomicroscopio può considerarsi un ingranditore di immagini, raggiungendo facilmente i 60 ingrandimenti (6X). È largamente impiegato nella preparazione delle sezioni e permette di valutare caratteri quali la tomentosità del cappello, la pruinosità o i cistidi del gambo, cioè quegli elementi al limite tra l'osservazione macroscopica e la microscopia.

Il microscopio ottico, invece, mette in evidenza le microstrutture cellulari. Predisponendo preparati molto sottili che vengono attraversati da un fascio luminoso, o utilizzando tecniche di fluorescenza, contrasto di fase, interferenza, polarizzazione, si possono rilevare diverse strutture che raggiungono anche dimensioni inferiori a 0,2 μ (micron). In questo caso gli obiettivi più comunemente utilizzati vanno dai 40X ai 100X (400-1000 ingrandimenti rispettivamente).¹²

In alternativa o a integrazione della microscopia ottica, un campione può essere studiato anche con il microscopio elettronico a scansione (SEM-Scanning Electron Microscope), moderno strumento di analisi utile per la ricerca scientifica.²⁴⁵ Il SEM permette di ottenere informazioni di tipo morfologico e strutturale di un organismo o di una sostanza, informazione che può essere integrata anche dall'analisi chimica (microanalisi) quali-quantitativa puntuale, se il microscopio elettronico è corredato di un EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrometry), cioè di uno spettrometro a raggi X. Con questo strumento si possono raggiungere ingrandimenti molto elevati (anche 0,05 nm (1)) evidenziando dettagli tridimensionali. Il preparato, oltre a essere opportunamente disidratato, deve però anche essere metallizzato con un sottilissimo

strato di elementi cristallini dotati di ottima conducibilità, come oro, argento, platino o cromo.

Al posto della luce visibile, per l'osservazione viene utilizzata una camera sottovuoto più o meno spinto e un fascio di elettroni, primari, focalizzati, che colpiscono il campione e lo "scansionano" cioè lo leggono in sequenza, punto dopo punto, riga dopo riga. Nell'interazione tra il fascio primario di elettroni e gli atomi costituenti il campione, vengono emesse numerose particelle, fra le quali gli elettroni secondari, SE Secondary Electrons (legati ai livelli atomici più esterni con energia compresa tra 0 e 50 eV, ed emessi da spessori superficiali del campione: sono generalmente utilizzati per lo studio della morfologia superficiale), gli elettroni retrodiffusi, BSE Backscattering Electrons (elettroni riflessi con energia che va da 50 eV fino a quella di incidenza, che provengono da profondità massime di alcuni μm : forniscono informazioni sulla composizione del campione), i raggi X. Gli elettroni catturati da speciali detector vengono convertiti in impulsi elettrici, e rinviati in tempo reale a uno schermo (un monitor). Il risultato è un'immagine in bianco e nero a elevata risoluzione e grande profondità di campo. Il microscopio elettronico però, non permette di fare osservazioni in vivo, né di ottenere immagini colorate.

La rivoluzione del SEM è sicuramente affidata all'alta risoluzione e profondità di campo, che aiutano a osservare strutture fino a oggi poco dettagliate. Rimane però uno strumento sofisticato, costoso, che richiede un'alta professionalità per l'uso e la gestione. Esistono vari tipi di SEM. Il loro potere di ingrandimento arriva, in quelli particolarmente sofisticati, fino a 1.000.000 di volte.¹⁸²

Figura 100. *Cortinarius trivialis* J.E. Lange, *Entoloma hirtipes* (Schumach.) M.M. Moser, *Myriostoma coliforme* (Dicks.) Corda, *Russula delicata* Fr. Foto di Rosalba Padula.

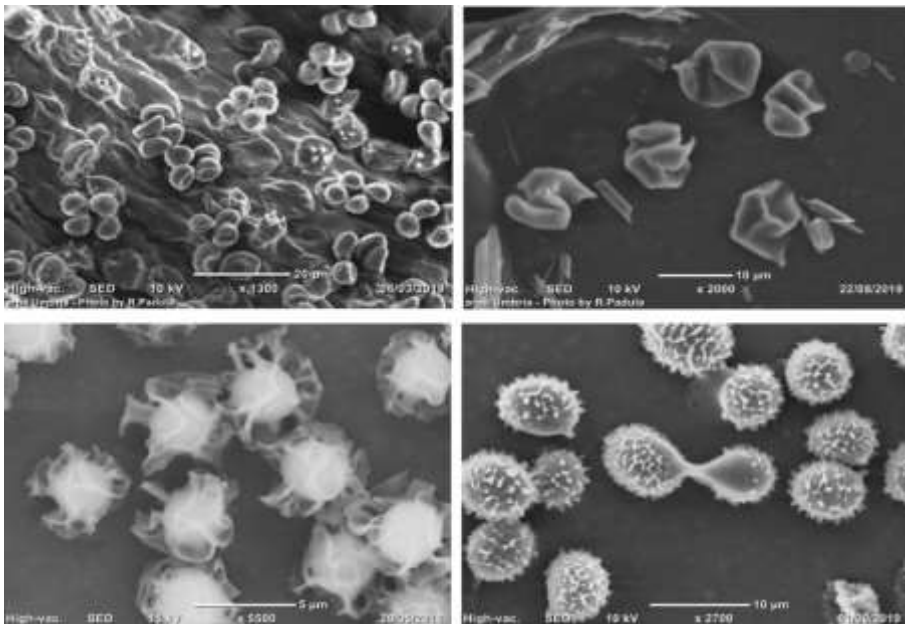


Figura 101. *Helvella crista* (Scop.) Fr., *Lactarius zonarius* (Bull.) Fr., *Battarreia phalloides* (Dicks.) Pers., *Pluteus cervinus* (Schaeff.) P. Kumm. Foto di Rosalba Padula

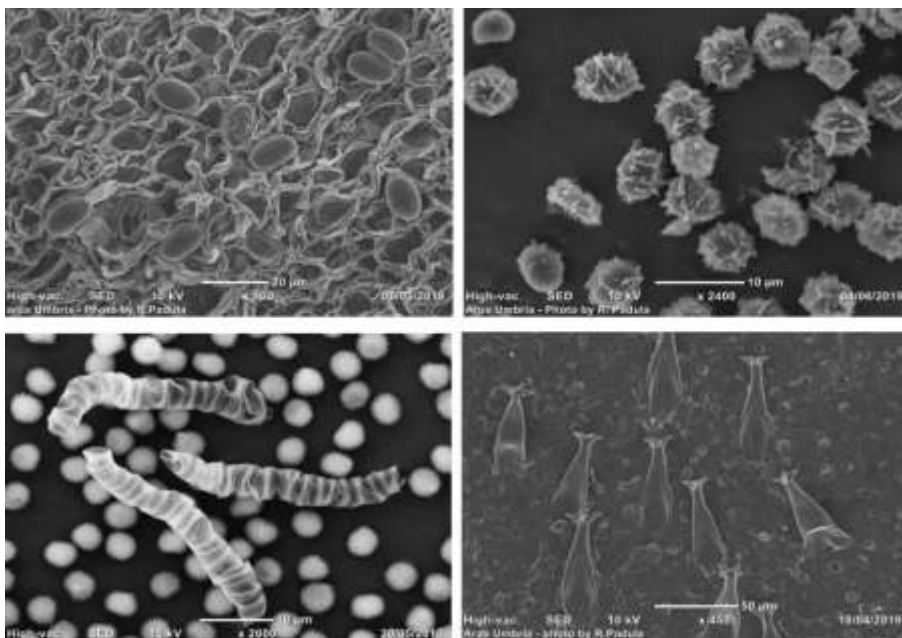
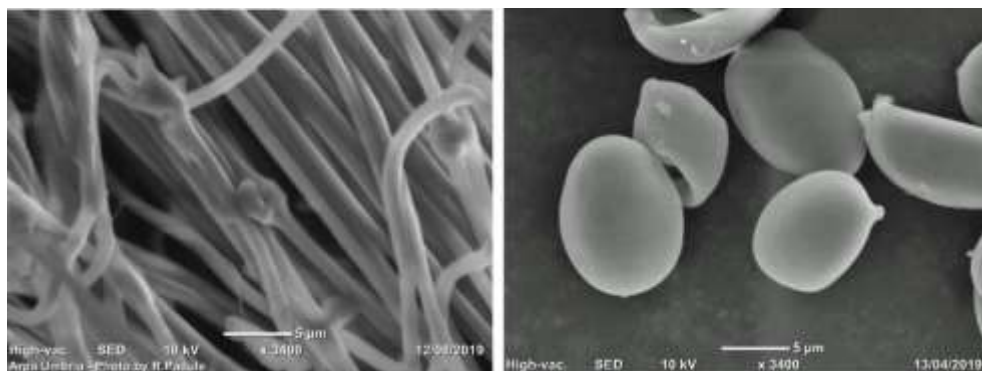


Figura 102. *Cyathus olla* (Batsch) Pers., *Volvopluteus earlei* (Murrill) Vizzini, Contu & Justo. Foto di Rosalba Padula.



Box. Le nuove frontiere del DNA

Di Mirco Iotti

Per diversi secoli i caratteri macroscopici e microscopici dei corpi fruttiferi sono stati gli unici elementi disponibili per descrivere e classificare le specie fungine. La caratterizzazione morfologica, seppur relativamente semplice e immediata, risente fortemente dell'influenza delle condizioni ambientali nella definizione del fenotipo fungino. Il fattore ambiente concorre, infatti, ad aumentare la variabilità intraspecifica di diversi caratteri morfologici, che spesso si sovrappone a quella interspecifica. Inoltre, i funghi, come molte altre tallofite, possiedono un minor numero di caratteri tassonomici utili alla loro classificazione rispetto ad organismi più complessi come le piante vascolari e gli animali superiori. A partire dalla fine degli anni 80, i metodi molecolari, sviluppati in ambito medico, sono stati applicati alla tassonomia e allo studio della diversità fungina. In particolare, l'analisi del DNA ha avuto uno sviluppo esponenziale in diversi ambiti della micologia, fra i quali quello tassonomico e sistematico. Il DNA ha il vantaggio di mantenersi costante in qualsiasi condizione ambientale o fase del ciclo biologico di un fungo, di fornire un elevato numero di caratteri tassonomici utili, di poter essere applicato anche su materiale parzialmente deteriorato e di permettere diagnosi oggettive e riproducibili nel tempo e nello spazio. Inoltre, l'analisi del DNA permette di risolvere il problema della speciazione criptica (organismi morfologicamente simili ma geneticamente separati), fenomeno molto comune nel regno dei funghi. Il principale fattore limitante per lo sviluppo della tassonomia molecolare a livello scientifico e amatoriale è stato per molti anni il costo delle analisi ma con lo sviluppo della tecnologia di riferimento, attualmente è possibile analizzare sequenze di DNA con pochi euro e molti laboratori privati e pubblici offrono tale servizio di diagnosi.²⁴⁷

Nel 2003 il ricercatore canadese Paul D.N. Herbert ([Università di Guelph](#)) propose il concetto di "DNA barcoding" (Background – iBOL) quale metodica per identificare in modo rapido e accurato una specie, sfruttando la variabilità di uno specifico e relativamente corto frammento di DNA (marcatore molecolare). Per differenti gruppi di organismi (piante, animali, batteri) sono stati selezionati marcatori molecolari differenti. Per i funghi la scelta è ricaduta sulla regione degli spaziatori di trascrizione interni del DNA ribosomiale nucleare (più semplicemente regione ITS). Questa regione ha mostrato di possedere un potenziale di discriminazione a livello di specie adeguatamente efficiente per molti gruppi di funghi. Questa regione è composta da due spaziatori di trascrizione interna separati dal gene 5.8S (lungo circa 150 nucleotidi) che è estremamente conservato in funghi differenti. Nel complesso tale regione ha dimensioni variabili fra i 500 e i 1200 (più spesso 600-700) nucleotidi a seconda della specie fungina. Le regioni ITS hanno una variabilità nucleotidica limitata fra individui della stessa specie (generalmente <2-3%) e più marcata fra individui di specie differenti. La presenza di geni conservati che fiancheggiano tale regione (a monte il 18S o SSU e a valle il 28S o LSU) ha permesso di selezionare primer (inneschi) universali in grado di amplificare tramite PCR le sequenze ITS di qualsiasi fungo. I

primer più utilizzati sono l'ITS1F (5'-CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA-3') che si appaia alla fine del gene SSU e il primer ITS4 (5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3') che si appaia all'inizio del gene LSU. In bibliografia sono riportati molti altri primer che possono essere utilizzati per amplificare per intero la regione ITS o separatamente le regioni ITS1 e ITS2 ([Conserved primer sequences for PCR amplification of fungal rDNA | Vilgalys Mycology Lab – Duke University](#)).

L'analisi del DNA, comunque, non risolve tutti i problemi di riconoscimento delle specie. In alcuni casi risulta difficile identificare la specie con accuratezza per la mancanza di sequenze di DNA di riferimento affidabili o per la carenza di informazioni sulla reale variabilità genetica di uno specifico gruppo di funghi. Inoltre, la maggior parte delle sequenze depositate nelle banche dati ([GenBank Overview \(nih.gov\)](#)) derivano da campioni ambientali a cui non è stato associato un nome di una specie o di un genere e molte sequenze sono state ottenute da corpi fruttiferi erroneamente identificati. Attualmente si sta cercando di ovviare a queste criticità creando dei database più dettagliati e affidabili ([UNITE \(ut.ee\)](#)) o applicando soluzioni informatiche capaci di limitare gli errori di valutazione. Un'errata identificazione molecolare di una specie fungina può derivare anche da errori tecnici o contaminazioni ambientali che si verificano durante il processo di analisi del DNA. Nei casi in cui si devono definire nuove specie fungine è comunque doveroso applicare analisi più approfondite non limitandosi al solo sequenziamento della regione ITS. Altri marcatori molecolari possono essere sequenziati e analizzati contemporaneamente per verificare che tutti diano la stessa risposta in termini di raggruppamento degli esemplari oggetto d'indagine e, di conseguenza, di definizione della nuova specie. Quelli più utilizzati sono il gene LSU, la β -tubulina, il fattore di allungamento 1 alpha (EF-1 α), RNA polimerasi B (RPB1 e RPB2) ma anche molti altri geni o parti di geni, fra cui quelli coinvolti nella riproduzione sessuale (MAT1-1-1 e MAT1-2-1). Per quanto possibile sarebbe necessario analizzare più esemplari della nuova specie raccolti in località differenti e confrontarli con il maggior numero possibile di sequenze di specie affini depositate nei database genetici. Molto utile sarebbe la caratterizzazione genetica dei tipi depositati presso gli erbari anche se questa opzione è spesso vanificata dal cattivo stato di conservazione e dall'età dei campioni d'erbario che rendono difficoltosa l'amplificazione dei marcatori molecolari.

Per conseguire una classificazione dei funghi sempre più affidabile e oggettiva è necessario adottare il concetto di "tassonomia integrata" che tende a combinare approcci di studio differenti (molecolari, morfologici, biologici, ecologici, filogeografici, ecc.) che non entrano in competizione fra loro ma si integrano a vicenda.

5 I funghi e le istituzioni

L'Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale (ISPRA) è ente pubblico di ricerca sottoposto alla vigilanza del Ministro della transizione ecologica - MiTE, che si avvale dell'Istituto nell'esercizio delle proprie attribuzioni, impartendo le direttive generali per il perseguimento dei compiti istituzionali.

In particolare, Il Dipartimento per il monitoraggio e la tutela dell'ambiente e per la conservazione della biodiversità assicura la predisposizione di idonei strumenti per la programmazione e lo svolgimento, coerentemente con le direttive comunitarie in materia, delle necessarie azioni di monitoraggio delle matrici ambientali, della biodiversità e dei processi ecologici attraverso la predisposizione di idonee basi conoscitive e lo sviluppo di metodi e strumenti innovativi di analisi.

Nell'ambito dello studio della biodiversità e degli ecosistemi, si sviluppa l'attività del Network per lo studio della Diversità Micologica, con l'obiettivo principale di creare e mantenere una banca dati nazionale, permanente e accessibile di censimento dei macromiceti.

Il Network, oltre a incardinarsi nelle attività istituzionali in linea con i livelli prioritari di azione indicati dal MiTe, risponde alla necessità scientifica, recentemente richiamata a livello globale dall'Unione Mondiale per la Conservazione della Natura (IUCN), di raccogliere dati e informazioni sul regno dei funghi (Funga) in modo che l'Italia possa contribuire allo studio e alla tutela di tali organismi viventi che sono essenziali agli ecosistemi terrestri.

L'attività del Network si basa su una rete di persone giuridiche e fisiche competenti che raccolgono e inviano a ISPRA dati e informazioni sui macromiceti secondo regole e standard condivisi con la Società Botanica Italiana e Associazioni micologiche italiane, fra le quali l'Unione Micologica Italiana (UMI) E L'Associazione Micologica Ecologica Romana (AMER).

Il processo di raccolta e acquisizione dei dati è certificato secondo la ISO9001.

Arpa Umbria è ente di pubblica amministrazione sottoposto alla vigilanza della Giunta Regionale, che svolge attività tecnico-scientifica nel campo della prevenzione e della tutela ambientale. In particolare, provvede alla promozione della ricerca, alla raccolta sistematica, validazione, elaborazione, pubblicazione e diffusione di dati, alla gestione di reti di monitoraggio, alla collaborazione e alla cooperazione a livello tecnico e scientifico con enti e istituzioni operanti nel settore della prevenzione ambientale e igienico-sanitaria.

Negli ultimi anni Arpa Umbria ha avviato molteplici attività di studio sul tema della biodiversità, sviluppando un significativo interesse per la micologia. Importanti approfondimenti sono stati condotti nell'ambito della ricerca e della raccolta di dati. Sono state effettuate campagne di rilevamento delle specie fungine in habitat di particolare interesse naturalistico e siti Natura 2000; sono stati realizzati incontri

specialistici con esperti nazionali e internazionali, eventi dedicati alla diffusione dell'informazione e al coinvolgimento dei cittadini. Ruolo importante ha assunto Arpa Umbria anche nella pubblicazione dei dati, delle informazioni e di documentazione, con la stampa di un libro dedicato ai funghi lignicoli e con la recente pubblicazione di un portale dedicato visitabile sul sito istituzionale dell'Agenzia: www.arpa.umbria.it/pagine/funghi.

La sensibilità di Arpa Umbria a incrementare la conoscenza di questi organismi viventi ha indotto alla sottoscrizione di importanti collaborazioni con diverse Università, con il Circolo Micologico Naturalistico Perugino, con ISPRA, con l'obiettivo di realizzare una forte rete di competenze, professionisti e istituzioni che lavorano per migliorare e condividere informazioni sui macromiceti.

5.1 Gli Ispettorati Micologici

Di Andrea Arcangeli e Giancarlo Bistocchi

Già nel 1700 il commercio dei funghi spontanei freschi e conservati doveva essere molto importante e probabilmente causava ogni anno numerosi episodi di intossicazione. Per questo, al fine di garantire maggiori controlli, nel 1820, durante il periodo della dominazione austro-ungarica, fu promulgata dall'Imperiale Regio Governo di Milano e delle Province Venete la prima normativa quadro "italiana" che si conosca. Si tratta della Governativa Notificazione 11 aprile 1820 n° 8732-750 (Regolamento sulla vendita dei funghi), che fu corredata da integrazioni e modifiche negli anni successivi, con l'avviso I.R. Delegazione Provincia di Milano del 25 settembre 1822, la Circolare 28 luglio 1823 n° 22968-1447 (Nuove prescrizioni per la vendita dei funghi secchi o conservati in sale od in olio) e la notificazione dell'I.R. Luogotenenza Lombarda 21 maggio 1856 n° 11810-522, che coordina entrambe le precedenti apportando ulteriori modifiche.

Si tratta di un quadro normativo ammirevole per la modernità delle disposizioni che conteneva: divieto di vendita delle specie velenose o non appartenenti agli elenchi di quelle consentite, commercio dei funghi limitato a un solo mercato in ogni città e divieto di vendita itinerante, obbligo di riporre i funghi in un solo strato in modo da renderli tutti visibili, obbligo di controllo da parte di "idonei periti" per l'identificazione delle specie e dello stato di conservazione, necessità di speciali licenze (gratuite) per gli esercenti che intendessero vendere funghi secchi e conservati (solo le specie consentite), con l'obbligo del controllo prima dell'essiccazione. Le Delegazioni Provinciali avevano il compito di pubblicare ogni anno l'elenco delle specie commercializzabili, designate con i nomi botanici corredate dai "nomi vernacoli".

Nei paesi di campagna, la diffusione era garantita, sempre per disposizione della normativa del Governo centrale, dai parroci che ne davano lettura in chiesa nei giorni festivi.

Dal 1837, anche la congregazione speciale di Sanità a Roma iniziò a controllare la vendita dei funghi sulla pubblica piazza, come già avveniva nel Lombardo-Veneto. A Napoli il Regolamento Proposto da Briganti (1862), se promulgato, avrebbe previsto anche controlli obbligatori per funghi secchi, in salamoia o diversamente conservati e il divieto di vendita della "polvere di funghi per condimento, poiché non può riconoscersi quali spezie s'impieghino per prepararla" e l'intervento del "Delegato" (il controllore dei funghi) per visitare gli intossicati al fine di "indagare la specie nociva".

In tempi più recenti, a Milano 1917, la riforma del Regolamento Comunale di Igiene stabilì che: "tutti i funghi freschi secchi o conservati importati dai negozianti in città, prima di essere posti in vendita, dovessero subire la visita di un perito Micologo municipale".

Sempre nei primi anni del '900 venne attivato il primo servizio pubblico Micologico in Milano, presso il Laboratorio chimico Municipale e un corso di Micologia teorico-pratico per Medici, Veterinari e Chimici. Il controllo sulla vendita dei funghi viene affidato a personale di vigilanza appositamente addestrato.

La Micologia ispettiva nacque insieme all'esigenza di effettuare i controlli necessari alla prevenzione del fenomeno delle intossicazioni, che ogni anno portavano a morte diverse persone e che all'epoca derivavano in prevalenza da funghi acquistati sul pubblico mercato. I servizi pubblici di controllo Micologico erano dedicati soprattutto alla merce in vendita nei mercati.

In seguito, nella seconda metà del '900, con l'arrivo del benessere e della motorizzazione di massa, l'espansione dell'attività amatoriale di raccolta dei funghi portò a un importante cambiamento: mentre erano ormai rare le intossicazioni da funghi acquistati, aumentava rapidamente il numero dei casi dovuti alla raccolta amatoriale per auto consumo. Per prevenire gli avvelenamenti, quindi, acquisiva sempre maggiore importanza il controllo della commestibilità dei funghi freschi svolto gratuitamente per raccoglitori privati.

Infatti, in anni più recenti a partire dal 1966, anche in considerazione dell'elevato numero di avvelenamenti da funghi verificatisi nel 1965, il Ministero della Sanità perveniva alla determinazione di provvedere alla formazione di personale addestrato al riconoscimento pratico di funghi eduli, affidando la parte didattico-teorica e pratica alla Provincia Autonoma di Trento che si avvaleva del ben noto "Gruppo Micologico Bresadola" di Trento diretto dall'ing. Bruno Cetto.

Molto importante fu la nascita della Scuola per Micologi dell'Umbria, la cui attività di formazione rivolta al personale deputato al controllo dei funghi freschi, risale ai primi anni "ottanta", in particolare nel biennio 1986/87 si è svolto il primo corso di qualificazione in Micologia: dei 14 partecipanti sono stati formati 9 operatori (5 delle ULSS della regione Umbria, uno del Comune di Perugia, 2 dell'ULSS di Roma e 1 della ULSS di Arezzo). A tutt'oggi la scuola continua regolarmente l'attività formativa, così che ogni biennio vengono licenziati nuovi Micologi mentre vengono tenuti

annualmente corsi di aggiornamento e specializzazione per i Micologi già in possesso dell'attestato ai sensi del D.M. 686/96.

Con il Decreto del Ministero della Salute 686 del 29 novembre 1996, viene riconosciuta la figura del Micologo e viene strutturato il corso per conseguire tale qualifica, i requisiti minimi per accedervi, le materie di corso, la durata, le modalità di svolgimento e d'esame finale.

La raccolta e la commercializzazione dei funghi epigei freschi e conservati è regolata in Italia dalle seguenti norme:

- Legge 23 agosto 1993 n° 352 "Norme quadro in materia di raccolta e commercializzazione dei funghi epigei freschi e conservati".
- D.P.R. 26 luglio 1995 n° 376 "Regolamento concernente la disciplina della raccolta e commercializzazione dei funghi epigei freschi e conservati". Questo Decreto, che modifica e integra la Legge, è stato predisposto e pubblicato con urgenza, in quanto questa si era dimostrata carente, inesatta, non in linea con le normative di carattere generale (a esempio etichettatura delle sostanze alimentari) e riportante errori, principalmente nella elencazione positiva delle specie commercializzabili. Anche il DPR si è dimostrato non del tutto soddisfacente alle esigenze degli addetti ai lavori; infatti, una commissione appositamente nominata e operante presso il Ministero, sta lavorando ancora oggi a una normativa chiara e attuale che si possa applicare in maniera univoca in tutto il territorio nazionale.

La Legge quadro regola altresì un aspetto importante nella prevenzione delle intossicazioni da funghi: stabilisce infatti che le Regioni e le Province Autonome istituiscano, nell'ambito di ogni ASL, uno o più centri di controllo Micologico pubblico chiamati "Ispettorati Micologici".

Negli Ispettorati operano soggetti in possesso dell'attestato di Micologo, rilasciato dalle Regioni secondo i criteri e le modalità previste dal D.M. Sanità 29 novembre 1996 n° 686.

L'Ispettorato Micologico, che riveste una rilevanza notevole in ambito sanitario, è un servizio facente parte del Dipartimento di Prevenzione, Area funzionale Igiene degli alimenti e della nutrizione (D.M. 16 ottobre 1998 Organizzazione del Servizio Igiene degli Alimenti e della Nutrizione). I compiti degli Ispettorati Micologici sono:

1. Attività di prevenzione (gratuite)

- a) controllo dei funghi freschi spontanei destinati al consumo diretto;
- b) supporto alle strutture ospedaliere aziendali e alla medicina di base in caso di sospetta intossicazione da funghi;
- c) vigilanza sulla raccolta, commercializzazione e condizionamento dei funghi spontanei (preparati, congelati, surgelati e secchi);

d) educazione alla salute e promozione di corsi didattici, convegni e di iniziative culturali e scientifiche (come previsto dall'art. 10 della L. 352/93);

e) commissioni di esame, previste dall'art. 14 della L. 352/93, modificato dall'art. 2 del D.P.R. 376/95, per il riconoscimento dell'idoneità alla identificazione delle specie fungine commercializzate, agli esercenti che devono ottenere la prescritta autorizzazione comunale.

2. Attività di certificazione e consulenza (a pagamento):

- certificazione di commestibilità dei funghi freschi spontanei destinati alla vendita al dettaglio e/o alla somministrazione;
- consulenza per conto di altre Aziende USL, in assenza di personale esperto qualificato;
- consulenza alle strutture ospedaliere extra aziendali;
- docenza a corsi organizzati da Enti diversi se non rientrano nei piani di educazione alla salute della propria Azienda USL".

Nel caso di sospetto avvelenamento da funghi, l'intervento del Micologo può risultare determinante per salvare la vita all'intossicato: un tempestivo riconoscimento della specie responsabile dell'intossicazione, può consentire, infatti, al personale sanitario di seguire l'opportuno protocollo, in concerto con il centro antiveneno di riferimento, che risulterà specifico in funzione della specie fungina velenosa che è stata consumata.

In questi casi il Micologo provvede:

- alla compilazione dell'apposita scheda informativa, mediante colloquio diretto con le persone interessate al caso;
- a esaminare il materiale recapitato alla struttura ospedaliera e a svolgere ogni altra iniziativa utile al possibile riconoscimento delle specie fungine consumate;
- a effettuare, ove necessario, i test chimici preliminari;
- a inoltrare a un laboratorio attrezzato, se del caso, con tempestività il materiale disponibile per i successivi accertamenti microscopici e tossicologici;
- a comunicare le conclusioni al personale medico della struttura ospedaliera fornendo ogni eventuale indicazione necessaria;
- a segnalare, se necessario, i fatti alle competenti autorità.

L'attenzione dimostrata ben 300 anni fa e gli effetti positivi che nel tempo si sono riscontrati, dovrebbero far comprendere alle amministrazioni odierne quanto questo settore debba essere potenziato, al fine di contribuire in maniera sostanziale alla tanto declamata prevenzione e di investire energie per contribuire concretamente alla tutela della salute pubblica. Si pensi quindi a implementare la diffusione capillare nel

territorio di ulteriori sedi di controllo, aumentare il numero di micologi e aggiornare costantemente quelli attualmente in servizio.

5.2 Il Micologo

Di Andrea Arcangeli e Giancarlo Bistocchi

Il Micologo in Italia è una figura un po' particolare che viene riconosciuta formalmente solo nel 1996 quando il Ministero della Salute emana il D.M. n. 686. D'altra parte, la Micologia stessa è una scienza che ha acquisito una certa indipendenza, anche in questo caso da un punto di vista formale, solo nel 2012, quando al congresso di Melbourne è nato il Codice Internazionale di Nomenclatura per le Alghe, Funghi e Piante, in sostituzione del "vecchio" Codice Internazionale di Nomenclatura Botanica che vedeva la Micologia come una semplice propaggine della Botanica.

Per comprendere come la Micologia abbia faticosamente acquisito una sua indipendenza basti pensare allo studio dei corsi di laurea in cui questa materia viene affrontata ancora oggi almeno nella maggior parte dei casi, ovvero all'interno del programma di Botanica Sistematica.

I primi "Micologi" erano personaggi legati al modo delle Scienze in generale, i Medici e i Botanici erano le figure professionali più rappresentate tra coloro che si interessavano allo studio dei funghi.

La particolarità della figura del Micologo, intesa come previsto dal D.M. 686/96, è che tale professionalità nasce con lo scopo di salvaguardare la sicurezza dei consumatori di funghi, espletando il controllo degli stessi utilizzati per scopi alimentari. Invece il Micologo con una accezione più ampia, è colui che approfondisce gli studi sui funghi a prescindere dal loro utilizzo come fonte di cibo, ma in tutti i vari aspetti come quelli legati alla ricerca del loro impatto ecologico in natura, la tassonomia e la sistematica o conoscenza dei contenuti chimici dei corpi fruttiferi e del micelio.

In era moderna tra i Micologi ci sono sia persone con estrazioni culturali molto diverse, la maggior parte delle quali svolge questa attività come momento ricreativo, ma anche la figura professionale delle strutture pubbliche: nelle ASL per il controllo dei funghi destinati all'alimentazione, nelle Università per la ricerca, oltre che nel mondo dell'Industria per la certificazione dell'idoneità al commercio. Oggi il micologo non si limita più al solo compito di riconoscimento delle specie, ma svolge analisi merceologiche ed entomologiche atte a ottenere valutazioni sui lotti, esprimendone tutte le caratteristiche, pregi e difetti, e dando le dovute indicazioni agli addetti al confezionamento.

Per tutti i Micologi che hanno conseguito l'attestato ai sensi del D.M. 686/96, al termine del corso avviene l'iscrizione nel registro regionale/provinciale (nella regione o provincia autonoma dove si è tenuto il corso) cui segue da parte del Ministero della

Salute la redazione e pubblicazione in gazzetta ufficiale dell'aggiornamento del Registro Nazionale dei Micologi.

Sarebbe importante un riconoscimento della figura del Micologo quantomeno all'interno della Comunità Europea. Infatti, alcuni paesi hanno riconosciuto e regolamentato questa figura, tuttavia i requisiti sono diversi a seconda del paese; per fare un esempio della disomogeneità basti pensare che un Micologo che ha acquisito questo titolo in Svizzera, non viene riconosciuto, come tale, in Italia.

Figura 103. Ricerca macromiceti Isola Polvese (Lago Trasimeno) PG.



Figura 104. Micologi dell'Azienda USL Umbria 1, al lavoro.



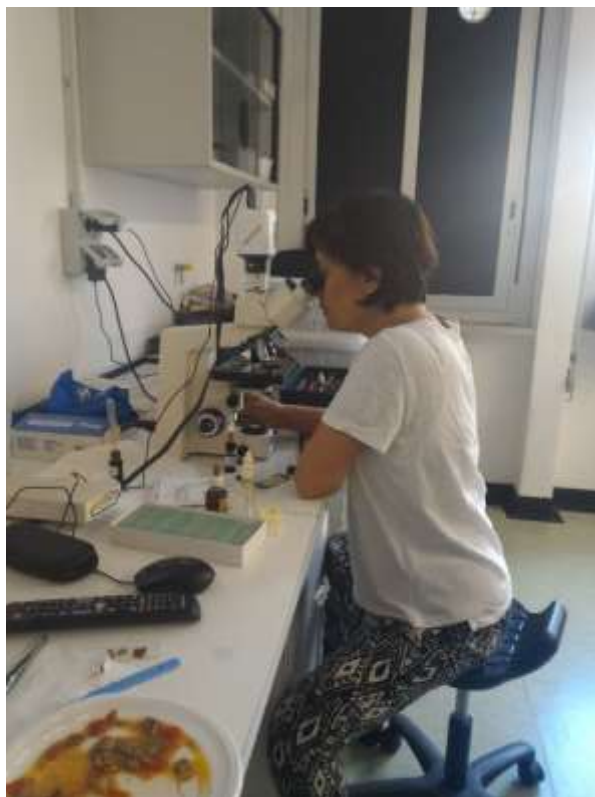
Figura 105. Micologo sul campo.



Figura 106. Studio al microscopio elettronico presso il Centro "Cambiamento Climatico e Biodiversità degli Ambienti Lacustri e Aree Umide" di Arpa Umbria sull'isola Polvese (PG).



Figura 107. Studio al microscopio ottico (Lab. Microscopia, Dipt. Chimica, Biologia, Biotecnologie).



5.3 Le Associazioni micologiche

Di Andrea Arcangeli e Giancarlo Bistocchi

Durante la metà del secolo scorso, sono nate le Associazioni micologiche locali e i Gruppi Nazionali volti allo studio e alla divulgazione della scienza micologica; nel consiglio direttivo di tali associazioni è possibile trovare ricercatori di grande spessore micologico che, con i loro studi, le loro ricerche e pubblicazioni, hanno fornito e forniscono un grande impulso alla conoscenza dei funghi, rendendo fruibile al grande pubblico e agli appassionati di questo settore naturalistico, lo studio dell'attuale micologia.

Una delle più importanti associazioni che è rimasta nel tempo e che si è radicata in tutto il nostro Paese, è l'Associazione Micologica Bresadola (A.M.B.), costituitasi nell'anno 1957, formata da gruppi micologici che riportano come acronimo la sigla A.M.B. per onorare la memoria di uno dei più grandi Micologi italiani, l'Abate Trentino Giacomo Bresadola, ma che mantengono tuttavia la loro autonomia locale. Altra storica associazione, legata al mondo accademico, nata nel 1969, è l'Unione

Micologica Italiana (U.M.I.) che si è prefissata nel tempo analoghi obiettivi anche se più indirizzata verso la ricerca scientifica.

Con l'inizio del nuovo secolo e con l'avvento del Regionalismo (processo di decentramento e delle autonomie Regionali), sono nate associazioni con valenza territoriale più circoscritta, che hanno avuto un ruolo importante per la realizzazione di corsi, mostre, manifestazioni e studi in equipe.

Tutte queste Associazioni nascono senza scopo di lucro e hanno come obiettivo la divulgazione e lo studio della scienza micologica, la tutela dell'ambiente, la raccolta di pubblicazione e materiale didattico, educazione sanitaria e divulgazione della micologia anche a livello scolastico.

L'attività svolta da questi Circoli è capillare e copre tutto il territorio nazionale, importantissimo inoltre è l'aspetto sociale e ricreativo che trova la massima espressione nell'organizzazione di giornate ecologiche nelle quali i partecipanti condividendo il rispetto della natura stringono tra loro veri legami di amicizia durevoli nel tempo.

La divulgazione e lo studio della scienza micologica viene favorita dalla presenza di esperti micologi, che quasi sempre nascono dapprima come "micofagi", per poi specializzarsi nel tempo, prima come micofili fino a riunirsi in gruppi di ricerca all'interno delle varie associazioni: lì studiano, determinano, censiscono, raccolgono dati, il tutto svolto con passione e dedizione, avvalendosi dei mezzi che, con gli anni, sono stati messi a disposizione dei soci.

Fornitissime biblioteche, stereomicroscopi, microscopi ottici con sistemi di registrazione delle immagini, reagenti chimici, sono le dotazioni che le varie associazioni mettono a disposizione per consentire ai Micologi di poter effettuare uno studio macroscopico e microscopico, reazioni chimiche e infine, più recentemente, programmi e applicazioni da utilizzare per lo studio e le analisi del DNA che permettono loro di confrontare i propri risultati con le banche dati di tutto il mondo.

Altri lavori svolti da queste realtà sono i corsi di base, rivolti alla popolazione, che vengono tenuti dai micologi nei vari periodi dell'anno, volti alla conoscenza delle specie fungine, a dare gli strumenti per evitare possibili confusioni tra specie eduli e specie velenose, a fornire informazioni utili per la loro conservazione, per le preparazioni gastronomiche in sicurezza e più in generale per il loro corretto consumo. Questa educazione sanitaria è un utile supporto al lavoro delle Unità Sanitarie Locali, ha sicuramente contribuito a evitare tantissimi avvelenamenti e continuerà a prevenirli finché troverà persone attente e responsabili, rispettose della natura, degli habitat e dediti alla divulgazione delle conoscenze acquisite.

Le Associazioni Micologiche durante l'anno organizzano mostre di funghi dal vero, durante le quali è molto vivace il confronto che è alla base della crescita delle conoscenze. Moltissimi sono gli appuntamenti che richiamano appassionati da tutto

il territorio Nazionale, ognuna di queste manifestazioni è unica perché specifica di quell'habitat e per la grande biodiversità raccolta e censita nei diversi periodi dell'anno.

Le informazioni che ogni singolo visitatore ottiene da queste mostre concorrono ad arricchire il bagaglio di conoscenze personali evitando a volte di incorrere in errori anche mortali.

Le Associazioni Micologiche organizzano anche Comitati Scientifici che richiamano esperti da tutto il territorio nazionale e internazionale durante i quali vengono presentate relazioni volte a far conoscere (anche in maniera più fruibile) i risultati di pubblicazioni o studi inerenti alla cultura Micologica e un continuo scambio di informazioni messe a disposizione di tutti. Inoltre, nei giorni che interessano l'evento si effettuano escursioni in diversi ambienti alla ricerca di specie che vengono poi determinate dai micologi specializzati nei vari generi.

Le informazioni acquisite durante le mostre micologiche e nei Comitati Scientifici, serviranno anche per il censimento delle specie rinvenute negli habitat che, confrontati con i dati climatici, consentono innumerevoli considerazioni quali:

- la valutazione della salute dei boschi (presenza o assenza di sostanze inquinanti, ricerca delle specie ipercaptanti, ecc.);
- un contributo allo studio sui cambiamenti climatici, grazie alla presenza di specie che richiedono esigenze ecologiche particolari e che in passato non risultavano presenti in un certo territorio;
- la presenza di specie poco conosciute o addirittura rare da segnalare per l'inserimento in speciali Red List finalizzate alla loro protezione.

Questa bellissima realtà ha dato e continuerà a dare ottimi risultati. La ricerca capillare insieme alla ricerca delle applicazioni svolte da Enti Pubblici o Privati riuscirà a offrire nuove soluzioni alternative alla medicina tradizionale, all'agricoltura, all'alimentazione, alla chimica, anche riportando alla luce vecchie tradizioni popolari usate dai nostri avi e poi, spesso troppo frettolosamente accantonate perché non supportate da prove scientifiche.

Le Associazioni Micologiche hanno bisogno di un ricambio continuo di volontari: i giovani sono le colonne che sostengono queste realtà, ma purtroppo si parla ancora solamente di volontariato anche se rimane la speranza che le Istituzioni riescano in qualche modo ad apprezzarne il lavoro svolto, agevolando e sostenendo queste realtà.

5.4 ISPRA e lo studio della biodiversità

Di Francesca Floccia

L'Agenda 2030 delle N.U. per lo sviluppo sostenibile (recepita dall'Italia) riconosce la necessità di preservare la biodiversità e gli ecosistemi e l'interconnessione tra sviluppo sostenibile, cambiamenti climatici e conservazione della biodiversità.

D'altra parte, in linea con gli obiettivi del Green Deal europeo e con le Direttive europee, che mettono al centro la partecipazione e l'impegno del pubblico e di tutti i portatori di interessi, il ruolo delle istituzioni (Governo, Ministeri ed Enti pubblici) è quello di garantire "l'accessibilità e l'interoperabilità" delle informazioni quali pilastri dell'innovazione guidata dai dati per la salvaguardia della biodiversità di specie e habitat.

Sul tema "biodiversità" ISPRA garantisce un'adeguata copertura alle più diverse richieste (locali, nazionali e sovra-nazionali) di conoscenza, dati e informazioni rispetto a temi che riguardano la conservazione e il restauro degli ecosistemi, la biodiversità marina e costiera, le complesse relazioni fra i cambiamenti climatici e la biosfera, le foreste, la biodiversità delle aree interne, le aree protette, la biodiversità in agricoltura, l'uso sostenibile della biodiversità, la produzione di bioenergia, le specie aliene invasive e, recentemente, anche la diversità micologica (o diversità fungina).

Inoltre, negli ultimi anni ISPRA, sulla base di livelli prioritari d'azione stabiliti dal Ministro vigilante, ha intensificato le attività di networking con il mondo accademico e i centri di ricerca e le istituzioni internazionali, inclusa la partecipazione alla rete delle agenzie europee per la protezione della natura.

È in questo contesto che si inserisce il Network per lo studio della Diversità Micologica, il cui intento principale è quello di creare una rete di unità sul territorio nazionale che effettuino, secondo standard e metodi condivisi, il censimento e il monitoraggio delle componenti fungine.

Il Network per lo studio della Diversità Micologica: un progetto di Open Science quale strumento per la conservazione dei macromiceti

Di Massimo Diaco e Francesca Floccia

La strategia della biodiversità 2030 ha rinnovato l'allarme sulla perdita di biodiversità e ha stimolato gli ecologisti del XXI secolo a capirne le cause e a porre i rimedi. Questa ricerca richiede grandi quantità di dati sulla composizione genetica, tassonomica e funzionale delle comunità viventi nello spazio e nel tempo.

Negli ultimi anni, lo studio della conservazione dei Funghi, accanto alla Flora e Fauna, ha acquisito maggiore importanza rispetto al passato, in quanto le componenti

micologiche sono state riconosciute come attori chiave del funzionamento degli ecosistemi; pertanto, è sempre più rilevante la necessità di considerarli nelle politiche di conservazione.

I funghi sono un regno con una grande biodiversità e gli strumenti molecolari ne stanno migliorando le conoscenze, ma sono necessari ulteriori dati per migliorare l'accuratezza affinché questi ultimi siano significativi per le attività di conservazione.

Si tratta di una sfida particolarmente difficile a causa dell'enorme diversità del regno, delle carenze tassonomiche e della difficile rilevabilità dei funghi: questa sfida è stata rilanciata sia dalla IUCN (Unione Mondiale per la Conservazione della Natura) che chiede di porre maggior enfasi allo studio dei funghi, sia dal rapporto 2018 sullo "Stato di conservazione dei funghi nel mondo" che ha constatato la grave carenza di dati micologici.

Oggi esistono molte banche dati sui funghi che non sono tra loro interoperabili e la disomogenea distribuzione sul territorio italiano di dati rafforza questa necessità di agire in fretta e bene esortando all'innovazione degli approcci e all'integrazione delle conoscenze.

ISPRA, sia in sinergia con le recenti Direttive Europee sull'uso dei dati e con le leggi 112/2016 e 132/2016, sia in linea con le direttive del MiTE, è chiamata a individuare soluzioni gestionali per collaborare in integrazione con più soggetti (pubblici e privati) allo scopo di reperire, verificare e sistematizzare le informazioni che devono essere esatte, coerenti e affidabili oltre che essere aperte al pubblico.

D'altra parte, la biodiversità è in connessione diretta con i recenti cambiamenti climatici che impongono un'attitudine nuova rispetto ai tradizionali modi con cui vanno affrontati i problemi ambientali. Inoltre, per allargare la platea delle osservazioni e dei dati nonché garantire la digitalizzazione delle informazioni possono essere di grande aiuto quelle iniziative che, attraverso modalità di partecipazione e collaborazione condivisa, consentano la partecipazione di cittadini esperti alle attività di ricerca scientifica.

Il concetto di Open science, riconosciuto anche a livello accademico, è definito come una modalità di "fare scienza" in modo che anche cittadini esperti possano prendere parte a un progetto di collaborazione con scienziati professionisti e ricercatori, collaborando alla raccolta di dati e contribuendo ai processi necessari per ottenerli. Secondo la Commissione Europea, l'*Open Science* è:

- condivisione - in modo aperto e trasparente – di metodologie, conoscenze, processi e strumenti
- trasparenza nella metodologia sperimentale, nell'osservazione dei fenomeni e nella raccolta dei dati
- affidabilità e riusabilità pubblica dei dati scientifici e dei prodotti della ricerca
- accessibilità pubblica e trasparenza dei processi di comunicazione scientifica

-
- utilizzo e condivisione di tools web - based per facilitare la collaborazione scientifica.

Pertanto, in analogia con quanto accade in Europa, questa modalità di inclusione ai progetti scientifici, oltre a permettere una sistematica raccolta e analisi di dati e informazioni sulla biodiversità estesi a livello spazio-temporale, è ritenuta un potenziale mezzo per la verifica della perdita della biodiversità e la valorizzazione del ruolo del sapere scientifico nei processi di conservazione della stessa.

Ciò è ancor più evidente in Italia dove c'è un numero esiguo di soggetti esperti in grado di rilevare dati sulla biodiversità fungina e la ricerca esistente è spesso limitata ad ambiti locali o focalizzata su determinati argomenti di ricerca o su specifici gruppi di funghi: tale numero limitato di indagini copre solo una piccola parte della diversità fungina.

Nonostante queste sfide, la micologia ha una ricca storia in Italia e la pressione per l'esplorazione e la caratterizzazione della ricca biodiversità micologica sta aumentando e vanno individuati gli strumenti per intercettare gli studiosi e gli appassionati dei funghi che hanno sempre poco tempo e risorse per continuare il lavoro esplorativo e descrittivo o anche per insegnare e aiutare gli altri a farlo.

Risulta chiaro che ci muoviamo in scenari sociali e ambientali in rapida evoluzione determinati da:

- una cittadinanza sempre più attenta alla biodiversità e alla qualità dell'ambiente, da cui la necessità e l'opportunità di dare più visibilità al regno dei funghi come suggerito dalla IUCN;
- risorse comunque indirizzate verso quelle iniziative che dimostrino di saper "costruire" massa critica, da cui la necessità di porre, come priorità, la realizzazione di una banca dati nazionale permanente con modalità standard per il censimento delle specie fungine;
- conoscenze specialistiche sempre più approfondite, da cui la necessità di intercettare e capitalizzare gli sforzi e le competenze degli specialisti del settore universitario, degli Enti di ricerca e dei *citizen scientists*, soprattutto i micologi riconosciuti ai sensi del DM 686/1996, per monitorare, anticipare e comprendere i cambiamenti in atto prima che sia troppo tardi.

Su queste basi nel 2020 ISPRA ha avviato un'iniziativa di Open Science rivolta al coinvolgimento di esperti, i "cittadini scienziati", sulla tematica denominata Network per lo studio della Diversità Micologica per il censimento e il monitoraggio delle componenti micologiche a livello nazionale.

Il Network è composto da soggetti esterni pubblici e privati, quali Università, Associazioni micologiche, micologi ed esperti, che collaborano, per la prima volta in Italia con regole condivise, a un progetto di censimento e monitoraggio dei

macromiceti sul territorio nazionale e allo sviluppo di indicatori di qualità degli habitat naturali.

L'innovatività è rappresentata dall'approccio inclusivo utilizzato nella rete, dall'utilizzo delle moderne tecnologie per acquisire dati sistematizzati in modo omogeneo e affidabile, secondo processi certificati, in una banca dati nazionale permanente. Infatti, i partecipanti dispongono di applicazioni per il rilevamento in campo dei dati ambientali e geografici e per i processi di verifica e memorizzazione.

Attraverso tale Network ISPRA, assumendo un ruolo chiave nel coordinamento della raccolta, gestione e diffusione dei dati micologici, intende coinvolgere il maggior numero di soggetti pubblici e privati, che sono quindi chiamati a "parlare" la medesima lingua. Da qui la necessità di condividere linee guida per la raccolta dei dati e un processo codificato per garantire un coerente sviluppo delle attività.

Un censimento della diversità micologica e lo studio del trend in risposta a problemi su scala più ampia, compresi quelli biologici, quali invasioni, inquinamento, cambiamento dell'uso del suolo e cambiamento climatico globale è indispensabile per studiare gli ecosistemi e le loro funzioni e per trovare le migliori risposte per tutelarli.

Un progetto incrementale, quindi, che non si esaurisce mai considerato lo scopo di implementare costantemente una banca dati pubblica permanente, denominata "Sistema Informativo Funghi" i cui dati raccolti, verificati e sistematizzati secondo gli standard definiti, potranno essere utilizzati da tutti quale strumento libero e gratuito.

Il Sistema Informativo Funghi (SIF)

Di Stefano De Corso

Nato dall'esigenza di informatizzare e centralizzare il flusso di dati provenienti da diverse fonti, il SIF è un sistema completo di acquisizione, validazione, gestione e pubblicazione di dati e rilievi geografici relativi al Network per lo studio della Diversità Micologica.

Il sistema è integrato nella SDI, Spatial Data Infrastructure di ISPRA definita SINACLOUD, portale cartografico in grado di gestire dati GIS e applicazioni WebGIS in cloud. Il SIF è strutturato in modo tale da poter integrare nel sistema tutte le operazioni utili ad acquisire, validare, gestire e pubblicare i dati raccolti dal NDM. Le suddette operazioni sono esercitate da diversi gruppi di lavoro:

- UE - Unità Esterne che partecipano alle procedure di acquisizione dei dati
- GdL-BIO - garantisce la raccolta dati e si occupa di tutte le fasi di validazione
- DG-SINA - garantisce il corretto flusso dei dati e la pubblicazione degli stessi.

Sul portale SINACLOUD sono state sviluppate tutte le applicazioni necessarie a garantire tutte le fasi di lavorazione e gestione dei dati di supporto al SIF:

1. Il sito Web SIF: pagine web per la divulgazione delle informazioni;
2. Il Web GIS NDM: applicazione WebGis aperta al pubblico per la consultazione della banca dati geografica;
3. App Survey123 per il rilievo di campo: applicazione per il rilievo di campo erogata in due modalità (html per il rilievo sincrono, app per dispositivi per rilievo asincrono);
4. App dedicate: applicazioni riservate, dedicate ai gruppi di lavoro per il controllo dei flussi dei dati.

Le fasi di lavorazione possono essere così riassunte:

- Fase di Acquisizione dei dati

L'acquisizione di nuovi dati avviene attraverso l'utilizzo delle "App Survey123 per il rilievo di campo". I dati vengono acquisiti dalle Unità Esterne (UE) che hanno aderito al Network e vengono integrati direttamente nel sistema.

Il GdL-BIO si occupa della raccolta dei dati storici e del successivo invio a DG-SINA per l'integrazione nel sistema.

- Fase di verifica

I dati acquisiti e integrati nel sistema vengono validati dal GdL-BIO mediante l'utilizzo delle "App dedicate" presenti nel SIF. La validazione prevede una verifica tassonomica e l'associazione degli habitat.

- Fase di pubblicazione dei dati

I dati validati vengono presi in carico da DG-SINA che si occupa del controllo del flusso dei dati e della pubblicazione dei dati sul "Web GIS NDM".

Il Network Nazionale della Biodiversità

Di Anna Di Noi

Il Network Nazionale della Biodiversità (NNB) nasce come iniziativa pilota nell'ambito del progetto "Sistema Ambiente 2010", promosso dal Ministero dell'Ambiente italiano (ora Ministero della Transizione Ecologica) a supporto della "Strategia Nazionale per la Biodiversità".

Parte essenziale del Network è la "rete dei soggetti accreditati, a livello internazionale e nazionale, per la gestione di dati primari di biodiversità", che condividono i propri database attraverso un'infrastruttura tecnica e tecnologica appositamente sviluppata.

I dati e le informazioni riguardanti la biodiversità sono di diverso tipo, così come diversi sono i soggetti che li detengono. Sono numerose, infatti, le collezioni di reperti di specie storicamente conservate in musei ed erbari, giardini botanici e zoologici, acquari e banche del seme, così come sono altrettanto numerose le banche dati contenenti osservazioni botaniche o faunistiche direttamente prese sul campo da ricercatori, studiosi, cultori della materia. Tutte queste tipologie di dati e informazioni, messe insieme, rappresentano un consistente patrimonio di conoscenza, di cui è facilmente intuibile, accanto all'indiscusso valore scientifico, la rilevanza nel caso di studi condotti su specie e habitat finalizzati alla conservazione della biodiversità o alla definizione di politiche di gestione e di sviluppo sostenibile. Per far sì che questo patrimonio sia condiviso e facilmente accessibile in rete occorre rendere "interoperabili" le banche dati che lo costituiscono.

L'infrastruttura tecnica riflette l'organizzazione del Network e, per rispondere a questa esigenza, è stata sviluppata come un "sistema federato e distribuito", costituito da un "nodo centrale", che permette di eseguire operazioni di ricerca e gestione dati, e da vari "nodi periferici", che mettono in condivisione i loro repository, rendendo accessibili dati e informazioni. Il Network così strutturato consente ai soggetti che ne detengono proprietà e diritti legali (provider) di condividere le loro banche dati senza che sia necessario trasferirne il contenuto.

Costruite da soggetti diversi e per finalità differenti (università, enti, istituzioni, organizzazioni), le banche dati dei "nodi periferici" del Network differiscono per struttura ("campi" diversi) e architettura (Access, Oracle, Mysql, ecc.). Tuttavia, grazie alla scelta di aderire al "Protocollo BioCAsE" (Biological Collection Access Service), le stesse sono condivise e interoperabili. Infatti, i soggetti che, disponendo di repository di dati primari di biodiversità (collezioni di reperti di specie e database di osservazioni), aderiscono al Protocollo BioCAsE, devono utilizzare standard condivisi a livello internazionale, come lo "Schema ABCD" (Access to Biological Collection Data), che garantisce la condivisione di grandi quantità di informazioni associate a un singolo record (metadati).

Nell'implementare il Network e la sua infrastruttura, la scelta di aderire al Protocollo BioCAsE e di utilizzare lo Schema ABCD, ha garantito l'interoperabilità tra i nodi stessi (centrale e periferici) e tra questi e il "Network di BioCAsE", consentendo di entrare a far parte della "rete cooperativa europea per la condivisione dei dati primari di biodiversità", che a sua volta si integra nel "Network mondiale GBIF" (Global Biodiversity Information Facilities).

Sviluppata per funzionare nel rispetto e in coerenza con quanto previsto dalla Direttiva INSPIRE (INfrastructure for SPatial InfoRmation in Europe), l'infrastruttura del Network, oltre che con le piattaforme analoghe (come GBIF), garantisce l'interoperabilità con il Geoportale Nazionale, assicurando così l'accesso e l'utilizzo di tutte le informazioni territoriali e ambientali ivi disponibili per la produzione di cartografie tematiche.

Tutti i dati e le informazioni disponibili nel Network Nazionale della Biodiversità sono raccolti e gestiti mediante un unico geodatabase in grado di gestire contemporaneamente i dati alfanumerici – relativi alle informazioni “anagrafiche” delle specie osservate - e i dati cartografici, relativi invece alla loro visualizzazione su mappa, provenienti dalle banche dati censite nel Network. Sul sito web ufficiale della infrastruttura, è possibile effettuare ricerche in tutti i formati (a es. con spazi e virgole) e in tutti gli standard (shape file, WCM). È, inoltre, disponibile il Geoviewer di NNB, il visualizzatore cartografico che consente di visualizzare direttamente su mappa l’esito di una ricerca. Recentemente, l’infrastruttura è stata implementata in maniera da consentire l’integrazione dei dati ufficiali forniti dai provider del Network NNB con quelli provenienti da fonti di Citizen Science accreditate a livello mondiale (iNaturalist, LifeWatch, GBIF).

5.5 Il Dipartimento di Chimica, Biologia e Biotecnologie (DCBB), Università degli Studi di Perugia

Di Paola Angelini e Roberto Venanzoni

Il Dipartimento di Chimica, Biologia e Biotecnologie dell’Università degli Studi di Perugia è uno dei più prestigiosi luoghi di ricerca scientifica di Area Chimica sulla scena internazionale, con risultati di eccellenza in settori che vanno dalla chimica teorica e computazionale alla dinamica delle reazioni chimiche, dalla chimica sostenibile e la catalisi alla progettazione molecolare e farmaceutica, dalla fotochimica allo studio dei materiali per i beni culturali, dai nano materiali per le biotecnologie allo studio e applicazioni di tecnologie chimiche per l’ambiente.

Nella recente Valutazione della Qualità della Ricerca 2011-2014, effettuata dall’ANVUR, il DCBB si è classificato al primo posto fra i Dipartimenti italiani della propria fascia dimensionale per l’Area CUN 03 – Scienze Chimiche, e al quinto posto nella classifica generale indipendente dalla dimensione.

Questi risultati gli sono valsi un eccellente piazzamento nella speciale classifica di performance dei Dipartimenti italiani (indice ISPD) stilata dall’ANVUR nel maggio 2017, con 99 punti su 100. Il Dipartimento compete quindi, a seguito della L. 11/12/2016 n. 232, a essere designato fra i Dipartimenti Italiani di Eccellenza e ad accedere al relativo finanziamento, stimato in 8.675 milioni di euro per il quinquennio 2018-2022. A questo fine, ha presentato il richiesto progetto di sviluppo dipartimentale, che ha denominato AMIS – Un Approccio Molecolare Integrato per lo sviluppo Sostenibile. Il progetto è stato ingegnerizzato per condurre il DCBB a divenire un centro di riferimento internazionale nel campo degli aspetti molecolari della sostenibilità. Essendosi classificato al primo posto fra i Dipartimenti dell’Ateneo perugino, il DCBB entra nella fase 1 della competizione.

Il DCBB e la Micologia: Biodiversità, Conservazione e Biotecnologie

Le attività di ricerca dell'ultimo decennio hanno riguardato soprattutto lo studio della biodiversità e dell'ecologia dei macrofunghi in Umbria, raccogliendo ogni informazione utile per il data-base relativo alla check-list e alla mappatura degli Ascomycota e Basidiomycota.

Alla luce degli allarmanti segnali sulle perdite registrate gli ultimi anni sulla biodiversità a vari livelli, gli studi sulla conservazione del patrimonio naturale hanno assunto notevole importanza.

Il gruppo di lavoro per la Micologia del DCBB, già da diversi anni è attivo sia nel campo della ricerca di base che in quello della micologia applicata.

Di seguito un breve excursus sulle attività portate avanti dal gruppo:

Ricerche di base

- Indagini qualitative sui macrofunghi presenti in vari habitat della regione Umbria, dall'Habitat-EU prioritario 7220* [Sorgenti pietrificanti con formazione di tufi (Cratoneurion)], caratterizzato da comunità vegetali a prevalenza di briofite fino ai Boschi a dominanza di *Quercus ilex* L., di *Q. cerris* D.C., *Q. frainetto* Ten. o *Q. petraea* (Matt.) Liebl., di *Castanea sativa* Mill., di *Fagus sylvatica* L., di *Salix* sp.pl. e *Populus* sp.pl., ecc.
- Analisi qualitative e quantitative di comunità fungine prevalentemente in ecosistemi forestali dell'Umbria (provincia di Perugia), al fine di conoscere la biodiversità delle micocenosi e le relazioni tra funghi e ambiente.

Applicazioni

- Conservazione in situ ed ex situ di specie a rischio di estinzione.
- Censimento con la redazione della prima check-list dei macromiceti dell'Umbria (Angelini et al. 2017) e delle Red List dei funghi appartenenti alla sottodivisione Pezizomycotina O.E. Erikss. & Winka e all'ordine Boletales E.-J. Gilbert (Wagensommer et al. 2018, 2022)
- Monitoraggi in determinate stazioni permanenti per seguire, nel tempo, lo stato di alcune specie fungine o dell'intera comunità macromicetica per individuare le cause degli eventuali cambiamenti.
- Raccolta di corpi fruttiferi di funghi di interesse conservazionistico, alimentare, medicinale e biotecnologico nei boschi umbri e isolamento del micelio in coltura pura al fine della sua conservazione all'interno di una collezione di ceppi fungini da impiegare in studi sistematici, filogenetici e/o per vari aspetti applicativi, es.: messa a punto di protocolli per la coltivazione di funghi saprotrofi eduli e/o per la formulazione di nuovi nutraceutici.
- Proprietà antimicrobiche e antiossidanti di funghi eduli e/o medicinali.

-
- Analisi metabolomiche di estratti fungini al fine di comprendere la relazioni tra i principi attivi e le proprietà biologiche degli stessi.

Ricerche precedenti sono state condotte in diversi campi della micologia:

- Identificazione di *Tuber* spp. e corrispondenti ectomicorrize mediante marcatori molecolari.
- Micorrizzazione con *Tuber magnatum* Pico di alcuni cloni micropropagati di *Populus alba* L. dell'Italia centrale. I cloni ottenuti sono poi stati selezionati in vista del loro impiego nella moderna tartuficoltura.
- Caratterizzazione morfologica, molecolare e biochimica di ectomicorrize prodotte da *Tuber* spp. con piante arboree tartufigene.
- Gli allelochimici del tartufo in agricoltura biologica.
- Studi relativi alla biodiversità degli endofiti fungini associati a *Phragmites australis* del Lago Trasimeno (Perugia).

Progetti di Ricerca

- Regione Umbria – PSR 2014/20, Sottomisura 16.2, Intervento 16.2.2: Progetto “Valorizzazione degli ecotipi umbri di *Pleurotus* come fitocomplessi attivi nel controllo della glicemia e dislipidemie” – Acronimo “Pleu-food” - Numero SIAR: 2017/00000000709. Coordinatore: Prof. Roberto Venanzoni.
- Regione Umbria – PSR 2007/13, Asse 1, Misura 1.2.4, III fase di attuazione: Progetto “Gli allelochimici del tartufo in agricoltura biologica” – Acronimo “AlleloTuber” - Numero Domanda SIAN: 84750697322 Rettificata: 8475072908. Coordinatore: Prof. Roberto Venanzoni
- Bando Fondazione Cassa di Risparmio di Perugia 2014: Progetto “Utilizzo degli allelochimici del tartufo nelle coltivazioni orticole e nella preparazione di prodotti gastronomici a base di funghi”. Codice Progetto: 2014.0094.021 Ricerca Scientifica e Tecnologica (2014-2015). Coordinatore: Prof. Roberto Venanzoni.
- Bando Fondazione Cassa di Risparmio di Perugia 2012: Progetto “Studi sui metaboliti secondari allelopatici isolati da ascocarpi di *T. melanosporum* e *T. aestivum* e loro applicazione in agricoltura biologica”. Codice Progetto: 2012.0283.021 Ricerca Scientifica e Tecnologica, (2012-2013). Coordinatore: Prof. Roberto Venanzoni.
- Bando Fondazione Cassa di Risparmio di Perugia 2009: Progetto “valorizzazione del tartufo come biorisorsa: verifica delle applicazioni delle proprietà allelopatiche di principi attivi degli estratti metanolici di varie specie di tartufi”. Codice Progetto: 2009.020.0094 Ricerca Scientifica e Tecnologica, (2009-2010). Coordinatore: Prof. Roberto Venanzoni.

Glossario

Agar: sostanza gelatinosa estratta da alcune alghe rosse.

Ambra: l'ambra è una resina fossile di colore giallo, aranciato, rossastro o nero, di origine vegetale.

Antibiotici: sostanze di natura chimica molto varia, prodotte da vari organismi (*Penicillium* sp., *Cephalosporium* sp., *Streptomyces* sp. ecc.) che risultano tossiche per altri (batteri, funghi) e usate quindi per combatterli.

Antiproliferativo: sostanza capace di ridurre lo sviluppo delle cellule (in particolare tumorali).

Aploide: che ha un solo assetto cromosomico (n), al contrario del diploide (2n).

Asco: cellula specializzata, caratteristica degli ascomiceti, nella quale due nuclei aploidi si fondono formando lo zigote, che si divide per meiosi; a maturità, l'asco contiene le ascospore.

Ascospora: spora fungina prodotta nell'asco; si trova negli Ascomycota.

Ascoma, pl. Ascomata: struttura pluricellulare degli Ascomycota a forma di coppa, di vaso o di sfera; contiene cellule specializzate, dette aschi, nelle quali ha luogo la fusione dei nuclei e la meiosi; possono essere aperti o chiusi: chiamato anche ascocarpo.

Autotrofi: autotrofi sono gli organismi vegetali, come le piante verdi, che si nutrono di sostanze organiche partendo da sostanze inorganiche, capaci di sintetizzare gli zuccheri partendo dall'anidride carbonica ambientale e dall'acqua del substrato, impiegando come energia la luce solare.

Basidio: speciale cellula riproduttiva dei Basidiomycota, spesso a forma di clava, nella quale avvengono la fusione dei nuclei e la meiosi.

Basidioma, pl. Basidiomata: struttura pluricellulare caratteristica dei Basidiomycota entro cui si formano i basidi (nota anche con il nome di basidiocarpo).

Beta-glucani: zuccheri complessi presenti nelle pareti cellulari di funghi, lieviti, alghe, licheni e cereali. Agiscono favorevolmente sul microbiota intestinale e sul sistema immunitario, modulandolo e rendendolo più reattivo contro attacchi di virus e batteri esterni.

Calcare: il calcare è una roccia sedimentaria il cui componente principale è rappresentato dal minerale calcite.

Cellulosa: carboidrato, principale componente della parete cellulare delle piante e di alcuni protisti; carboidrato complesso insolubile formato da molecole di glucosio legate l'una all'altra.

Chitina: polisaccaride contenente azoto dotato di elevata resistenza che forma le pareti cellulari di alcuni funghi, l'esoscheletro degli artropodi e la cuticola epidermica o altre strutture superficiali di alcuni protisti o animali.

Ciclo biologico: intera sequenza delle varie fasi dell'accrescimento e dello sviluppo di un organismo dalla formazione dello zigote alla produzione dei gameti.

Citotossico: sostanza che lede le cellule viventi.

Cleistotecio: ascocarpo sferoidale, chiuso.

Corpo fruttifero: sinonimo di sporocarpo, basidioma, sporoforo o carpoforo.

Dicarion: nei funghi, micelio con nuclei appaiati, ognuno dei quali deriva da uno dei genitori.

Dicariote: nei funghi, organismo che ha coppie di nuclei all'interno di cellule o compartimenti.

Diploide: nucleo che presenta due serie di cromosomi (2n).

Enzima: proteina che è capace di accelerare specifiche reazioni chimiche, abbassando l'energia di attivazione richiesta e rimanendo inalterato alla fine del processo: un catalizzatore biologico.

Estratto: preparazione galenica ottenuta esaurendo le droghe con appositi solventi per estrarne i principi attivi e concentrando poi le soluzioni per raggiungere la consistenza voluta.

Eterotrofo: organismo incapace di sintetizzare sostanze organiche a partire da sostanze inorganiche, per cui deve nutrirsi di sostanze complesse contenute in piante e animali.

Eucariote: cellula che ha il nucleo circondato da membrana, organelli circondati da membrane e cromosomi nei quali il DNA è associato a proteine; un organismo costituito di tali cellule.

Funghi mitosporici: funghi che si riproducono solo per via agamica o nei quali non è stato osservato il ciclo sessuale.

Gasteromiceti: funghi basidiomiceti, caratterizzati dal corpo fruttifero ipogeo o epigeo di varia forma, spesso globoso, nel quale si distingue un involucro sterile (peridio) e una parte micelica interna (gleba), nella quale si formano le spore.

***Gondwanagaricites magnificus*:** il nome del genere è la combinazione di Gondwana, l'antico supercontinente, la parola greca agarikon (αγαρίκον), "fungo", e il suffisso greco -ites che denota un fossile. L'epiteto specifico è l'aggettivo latino magnificus, che significa "magnifico, splendido" in riferimento alla notevole conservazione dell'olotipo.

Humus: miscuglio colloidale di sostanze organiche provenienti da decomposizione di resti animali e vegetali, presente nel terreno.

Immunostimolante: sostanza capace di sollecitare l'azione del sistema di difesa dell'organismo (sistema immunitario) per aumentarne la capacità di combattere infezioni e malattie, inclusi i tumori.

Ipoglicemizzante: medicamento che abbassa la glicemia.

Imenio: la struttura dello sporoforo dove vengono prodotte le spore.

Lignina: uno dei maggiori costituenti della parete secondaria, anche se non tutte le pareti secondarie contengono lignina; dopo la cellulosa, la lignina è il polimero più abbondante.

Meiospore: spore che si formano attraverso la meiosi e che sono, quindi, aploidi.

Micelio: massa di ife che forma il corpo di un fungo.

Micorriza: associazione simbiotica tra alcuni funghi e le radici di piante; caratteristica della maggior parte delle piante vascolari.

Micosina: biopolimero naturale abbondantemente presente nella parete cellulare dei funghi.

Micron: unità di misura di lunghezza pari a 1 milionesimo di metro o, millesimo di millimetro (μm).

Nanometri: è un'unità di misura di lunghezza corrispondente a 10^{-9} metri, cioè un miliardesimo di metro, o un milionesimo di millimetro.

Nucleoside: molecola composta da uno zucchero pentoso (il 2'-Deossiribosio: composto da cinque atomi di carbonio) e una base azotata.

Ordine: categoria tassonomica compresa tra la famiglia e la classe; le classi contengono uno o più ordini, gli ordini, invece, sono costituiti da una o più famiglie.

Parassiti: qualsiasi organismo che viva a spese di un altro.

Pedologico: relativo allo studio del terreno.

Pileo: dal latino pileus = cappello; a sua volta dal greco pilos = cappello. In micologia, sinonimo di cappello: la parte superiore di molti funghi.

Puffball: funghi con un gambo breve o sessili, caratteristici per la produzione di nubi di spore marroni, simili a polvere, che vengono emesse quando il corpo fruttifero maturo esplose. I puffball comprendono diversi generi, tra cui *Calvatia*, *Calbovista* e *Lycoperdon* le cui spore vengono prodotte internamente al corpo fruttifero.

Saprotrofi: saprotrofi o saprofiti sono i funghi che si nutrono di materia organica animale o vegetale in decomposizione. Secondo il genere o la specie, possono svilupparsi su una grande varietà di substrati: su legno morto degradato (lignicoli), su

escrementi animali o sterco (fimicoli), su resti di animali morti (necrofilii), su humus (umicoli), su altri funghi (fungicoli), su detriti vegetali (di lettiera), su sostanze degradate da un incendio (pirofilii), su cellulosa (lignivori).

Simbionti: individui che vivono in simbiosi con altri.

Sterigma: piccolo peduncolo sottile di un basidio che porta una basidiospora.

Stipite: gambo di un fungo.

Tallo: corpo vegetativo non differenziato in radice, fusto e foglie.

Tallofite: termine impiegato per indicare funghi e alghe.

Unicellulare: organismo costituito da una sola cellula.

Zigote: cellula diploide (2n) risultante dalla fusione dei gameti maschile e femminile.

Bibliografia

1. Hawksworth D.L. 2001. The magnitude of fungal diversity: The 1.5 million species estimate revisited. *Mycol. Res.* 105: 1422- 1432.
2. Blackwell M. 2011. The fungi: 1, 2, 3 ... 5.1 million species? *American Journal of Botany* 98(3): 426-438.
3. Onofri S., Bernicchia A., Filipello Marchisio V., Padovan F., Perini C., Ripa C., et al. 2005. Checklist dei funghi italiani. Checklist of Italian fungi Basidiomycetes Basidiomycota. Carlo Delfino Editore.
4. Molitoris H.P. 1995. Fungi in biotechnology. Past, present, future. *Czech Mycol.* 48(1): 53-65.
5. Cateni F., Gargano M.L., Venturella G., Cirlincione F., Ferraro V. 2022. Mycochemicals in wild and cultivated mushrooms: nutrition and health. *Phytochem. Rev.* 21:339-383.
6. Venturella G., Ferraro V., Cirlincione F., Gargano M.L. 2021. Medicinal mushrooms: bioactive compounds, use, and clinical trials. *Int. J. Mol. Sci.* 22: 624.
7. Mauseth J.D. 2020. *Botanica – Fondamenti di Biologia delle Piante*. IV Ed. Editore: Idelson-Gnocchi. ISBN: 887947698X.
8. Pasqua G., Abbate G., Forni C. 2019. *Botanica generale e diversità vegetale*. IV edizione, Piccin Nuova Libreria S.p.A., Padova.
9. Boccardo F., Traverso M., Vizzini A., Zotti Z. 2008. *Funghi d'Italia*. Editore: Zanichelli, pp. 620.
10. Denchev C.M., Denchev T.T., Polemis E., Venturella G., Gargano M.L., Zervakis G.I. 2013. General Aspects of Mushroom Fungi. In book: Identification and sustainable exploitation of wild edible mushrooms in rural areas Chapter: 1 Publisher: Technological Educational Institute of Thessaly, Larissa, Greece Editors: G. Venturella, G.I. Zervakis, C.M. Denchev, E. Polemis, M.L. Gargano, T.T. Denchev.
11. Venturella G., Gargano M.L. 2020. *Funghi. Alimentazione e nutraceutica*. Editore: libreriauniversitaria.it, ISBN: 8833592901; pp. 146.
12. Basso M.T. 2005. *Manuale di Microscopia dei Funghi*. Editore: Mykoflora, Alassio-Moglio (SV).
13. Basso M.T. 2012. *Manuale di Microscopia dei Funghi*. Vol. 2. Editore: Mykoflora, Villanova d'Albenga.
14. Assisi F. 2020. *I funghi: guida alla prevenzione delle intossicazioni*. Ministero della Salute, IZSLER BS (Istituto Zooprofilattico Sperimentale della Lombardia e dell'Emilia-Romagna), A.S.C.A. (Associazione Sostenitori Centro Antiveneni).

-
15. Desjardin D.E., Oliveira A.G., Stevani C.V. 2008. Fungi bioluminescence revisited. *Photochem. Photobiol. Sci.* 7: 170-182.
 16. Capelari M., Desjardin D.E., Perry B.A., Asai T., Stevani C.V. 2011. *Neonothopanus gardneri*: a new combination for a bioluminescent agaric from Brazil. *Mycologia* 103(6): 1433-1440.
 17. Ke H.-M., Tsai I.J. 2022. Understanding and using fungal bioluminescence – Recent progress and future perspective. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 33: 100570.
 18. Taylor T.N., Krings M., Taylor E.L. 2015. *Fossil Fungi*. Academic Press, London, UK, pp. 382.
 19. Berbee M.L., Strullu-Derrien C., Delaux P.M., Strother P.K., Kenrick P., Selosse M.A., Taylor J.W. 2020. Genomic and fossil windows into the secret lives of the most ancient fungi. *Nat. Rev. Microbiol.* 18(12):717-730.
 20. Heads S.W., Miller A.N., Crane J.L., Thomas M.J., Ruffatto D.M., Methven A.S., Raudabaugh D.B., Wang Y. 2017. The oldest fossil mushroom. *PLoS ONE* 12(6): e0178327.
 21. Halbwachs H. 2019. Fungi trapped in amber—a fossil legacy frozen in time. *Micol. Prog.* 18: 879-893.
 22. Smith M.R. 2016. Cord forming Palaeozoic fungi in terrestrial assemblages. *Bot. J. Linn. Soc.* 180: 452-460
 23. Auxier B., Bazzicalupo A., Betz E., Dee J.M., Le Renard L., Roushdy M.M., Schwartz C., Berbee M. 2016. No place among the living: phylogenetic considerations place the Palaeozoic fossil *T. protuberans* in Fungi but not in Dikarya. A comment on M. Smith. *Bot. J. Linn. Soc.* 182 (4): 723-728.
 24. Krings, M., Dotzler, N., Galtier, J., Taylor TN., 2011 Oldest fossil basidiomycete clamp connections. *Mycoscience* 52, 18-23 (2011).
 25. Dennis R.L. 1969. Fossil mycelium with clamp connections from the Middle Pennsylvanian. *Science* 163:670-671.
 26. Dennis R.L. 1970. A middle Pennsylvanian basidiomycete mycelium with clamp connections. *Mycologia* 62:578-584.
 27. Honegger R., Edwards D., Axe L., Strullu- Derrien C. 2018. Fertile *Prototaxites taiti*: a basal ascomycete with inoperculate, polysporous asci lacking croziers. *Phil. Trans. R. Soc. B* 373: 20170146.
 28. Dawson J.W. 1859. On the fossil plants from the Devonian rocks of Canada. *Q. J. Geol. Soc. Lond.* 15, 477-488.

-
29. Carruthers W. 1872 On the history, histological structure, and affinities of *Nematophycus logani* (*Prototaxites logani* Dawson), an alga of Devonian age. *Montly Microscop. J.* 8:160-172.
 30. Penhallow D.P. 1888 On *Nematophyton* and allied forms from the Devonian (Erian) of Gaspe and Bay des Chaleurs. *Royal Society of Canada's (RSC) Transactions and Proceedings 1st ser., 6, sect. iv,* 27-47.
 31. Jonker F.P. 1979 *Prototaxites* in the Lower Devonian. *Palaeontographica* 171B, 39-56.
 32. Church A.H. 1919 *Thalasssiophyta* and the subaerial transmigration. *Oxford Bot. Mem.* 3, 1-95.
 33. Hueber, F.M. 2001. Rotted wood-alga-fungus: the history and life of *Prototaxites* Dawson 1859. *Rev. Palaeobot. Palynol.* 116 (1): 123-158.
 34. Selosse M.A. 2002. *Prototaxites*, a 400 Myr old giant fossil, a saprophytic basidiomycete, or a lichen. *Mycological Research* 106: 641-644.
 35. Boyce C.K., Hotton C.L., Fogel M.L., Cody G.D., Hazen R.M., Knoll A.H., Hueber F.M. 2007. Devonian landscape heterogeneity recorded by a giant fungus. *Geology* 35: 399-402.
 36. Boyce C.K., Hotton C.L. 2010. *Prototaxites* was not a taphonomic artefact. *Am. J. Bot.* 97: 1073.
 37. Graham L.E., Cook M.E., Hanson D.T., Pigg K.B., Graham J.M. 2010. Structural, physiological, and stable carbon isotopic evidence that the enigmatic Paleozoic fossil *Prototaxites* formed from rolled liverwort mats. *Am. J. Bot.* 97(2):1-9.
 38. Graham L.E., Cook M.E., Hanson D.T., Pigg K.B., Graham J.M. 2010. Rolled Liverwort mats explain major *Prototaxites* features: Response to Commentaries. *Am. J. Bot.* 97(7): 1079-1086.
 39. Taylor T.N., Taylor E.L., Decombeix A.-L., Schwendemann A., Serbet R., Escapa I., Krings M. 2010. The enigmatic Devonian fossil *Prototaxites* is not a rolled-up liverwort mat: Comment on the paper by Graham et al. (*AJB* 97: 268-275). *Am. J. Bot.* 97, 1074-1078.
 40. Retallack G.J., Landing E. 2014. Affinities and architecture of Devonian trunks of *Prototaxites loganii*. *Mycologia* 106(6), 2014, pp. 1143-1158.
 41. Hawksworth D.L. 2018. *Research News. IMA Fungus* 9: A14-A16.
 42. Ciani A., Granetti B., Vicenti D., 1992. Il tartufo in Italia e nel mondo: aree di produzione, mercato e prezzi. *L'informatore agrario*, 47: 51- 62.
 43. Granetti B., De Angelis A., Materozzi G. 2005. Umbria terra di tartufi. Regione Umbria, Assessorato Regionale Agricoltura, Foreste, Caccia e Pesca. Gruppo Micologico Ternano.

-
44. Bencivenga M., Baciarelli Falini L. 2012. Manuale di tartuficoltura. Esperienze di coltivazione dei tartufi. Regione Umbria, Assessorato Regionale Agricoltura e Foreste; Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Biologia Applicata. ISBN 978-88-96277-12-6.
 45. Angelini P., Bricchi E., Akhtar M.S., Properzi A., Fleming J.L.E., Tirillini B., Venanzoni R. 2016. Isolation and identification of allelochemicals from ascocarp of Tuber species. In book: Plant, Soil and Microbes: Mechanisms and Molecular Interactions, Edition: 1, Chapter: 11, 225-252, Publisher: Springer International Publishing Switzerland, Editors: Hakeem KR, Akhtar MS, ISBN 978-3-319-27453-9.
 46. Figliuolo G., Trupo G., Mang S. 2013. A realized Tuber magnatum niche in the upper Sinni area (South Italy). *Open J. Genet.* 3:102-110.
 47. Iotti M., Leonardi M., Lancellotti E., Salerni E., Oddis M., Leonardi P., Perini C., Pacioni G., Zambonelli A. 2014. Spatio-temporaldynamic of Tuber magnatum mycelium in natural truffle grounds. *PLoSOne*9:e115921.
 48. Rubini A., Paolocci F., Riccioni C., Vendramin G.G., Arcioni S. 2005. Genetic and phylogeographic structures of the symbiotic fungus Tuber magnatum. *Appl. Environ. Microbiol.* 71:6584-6589.
 49. Rubini A., Belfiori B., Riccioni C., Arcioni S., Martin F., Paolocci F. 2011. Tuber melanosporum: mating type distribution in a natural plantation and dynamics of strains of different mating types on the roots of nursery-inoculated host plants. *New Phytol.* 189: 723-735.
 50. Belfiori B., Riccioni C., Tempesta S., Pasqualetti M., Paolocci F., Rubini A. 2012. Comparison of ectomycorrhizal communities in natural and cultivated Tuber melanosporum truffle grounds. *FEMS Microbiol. Ecol.* 81:547-561.
 51. Granetti B. 2016. Le specie fungine lignicole nell'isola Polvese del Lago Trasimeno. Arpa Umbria/Università degli Studi di Perugia.
 52. Branco S. 2011. Fungal Diversity - An Overview. In book: The Dynamical Processes of Biodiversity - Case Studies of Evolution and Spatial Distribution, pp. 211-226.
 53. Oyanedel R., Hinsley A., Dentinger B.T.M., Milner-Gulland E.J., Furci G. 2022. A way forward for wild fungi in international sustainability policy. *Conservation Letters* e12882.
 54. Irga P.J., Dominici L., Torpy F.R. 2020. The mycological social network a way forward for conservation of fungal biodiversity. *Environmental Conservation* 47(4): 243-250.
 55. Hawksworth D.L. 1991. The fungal dimension of biodiversity: magnitude, significance, and conservation. *Mycological Research* 95: 641-655.

-
56. Hawksworth D.L., Kirk P.M., Sutton B.C., Pegler D.N. 1995. *Ainsworth & Bisby's Dictionary of the Fungi* - eighth ed. CAB International, Wallingford
57. Hawksworth D.L., Lücking R. 2017. Fungal Diversity Revisited: 2.2 to 3.8 Million Species. *Microbiology Spectrum* 5(4).
58. Naranjo-Ortiz M.A., Gabaldón T. 2019. Fungal evolution: major ecological adaptations and evolutionary transitions. *Biol. Rev.* 94: 1443-1476.
59. Mohan J.E., Cowden C.C., Baas P., Dawadi et al. 2014. Mycorrhizal fungi mediation of terrestrial ecosystem responses to global change: Mini-review. *Fungal Ecol.* 10: 3-19.
60. Azevedo O., Ashwood F. 2022. The Soil Fungi: A Web of Life That Protects Trees and Fight Climate Change. *Front. Young Mind.* 10: 652660.
61. Sheldrake M. 2020. *Entangled Life. How Fungi Make Our World, Change Our Minds and Shape Our Futures.*
62. Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., et al. 2013. Carbon and other biogeochemical cycles. In: *Climate Change: The physical science basis. Contribution of working group to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* [T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 465-570.
63. Ballantyne A.P., Alden C.B., Miller J.B., Tans P.P., White J.W. 2012. Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years. *Nature* 488(7409): 70-72.
64. Maleki S.S., Mohammadi K., Ji K.S. 2016. Characterization of cellulose synthesis in plant cells. *Sci. World J.*, Article ID 8641373, 8 p.
65. Younes M., Aggett P., Aguilar F., Crebelli R., Di Domenico A., Dusemund B., et al. 2018. Re-evaluation of celluloses E 460(i), E 460(ii), E 461, E 462, E 463, E 464, E 465, E 466, E 468 and E 469 as food additives. *FSA Journal* 16(1): 5047
66. Wang S., Wang N., Xu J., Zhang X., Dou S. 2019. Contribution of microbial residues obtained from lignin and cellulose on humus formation. *Sustainability* 11: 4777.
67. Sivaramanan S. 2014. Isolation of Cellulolytic Fungi and Their Degradation on Cellulosic Agricultural Wastes. *Journal of Academia and Industrial Research*, 2, 458-463.
68. Horn S.J., Vaaje-Kolstad G., Westereng B., Eijsink V.G.H. 2012. Novel enzymes for the degradation of cellulose. *Biotechnol. Biofuels* 5:45
69. Zhang B., Gao Y., Zhang L., Zhou Y. 2021. The plant cell wall: biosynthesis, construction, and functions. *J. Integr. Plant Biol.* 63: 251-272.

-
70. Burton, R.A., Gidley, M.J., and Fincher, G.B. 2010. Heterogeneity in the chemistry, structure and function of plant cell walls. *Nat. Chem. Biol.* 6: 724-732.
71. Janusz G., Pawlik A., Sulej J., Swiderska-Burek U., Jarosz-Wilkolazka A. 2017. Lignin degradation: microorganisms, enzymes involved, genomes analysis and evolution. *FEMS Microbiol. Rev.* 41: 941-962.
72. Karthik N., Akanksha K., Binod P., Pandey A. 2014. Production, purification and properties of fungal chitinases-A review. *Indian J. Exp. Biol.* 52: 1025-1035.
73. Ferlian O., Biere A., Bonfante P., Buscot F., Eisenhauer N., Fernandez I., Hause B., Herrmann S., Krajinski-Barth F., Meier I.C., Pozo M.J., Rasmann S., Rillig M.C., Tarkka M.T., van Dam N.M., Wagg C., Martinez-Medina A. 2018. Growing research networks on mycorrhizae for mutual benefits. *Trends Plant Sci.* 23(11):975-984.
74. Angelini P., Granetti B. 1995. Mycorrhization of some micropropagated clones of *Populus alba* L. with *Tuber magnatum* Pico. *Plant Biosystems* 129(5-6): 1161-1177.
75. Brundrett M. 2003. Diversity and classification of mycorrhizal associations. *Biol. Rev.* 79: 473-495.
76. Granetti B., Angelini P., Rubini A. 1995. Morfologia e struttura delle micorrize di *Tuber magnatum* Pico e *Tuber borchii* Vitt. con *Tilia platiphyllos* Scop. *Micologia Italiana* 24(2): 27-34.
77. Paolocci F., Angelini P., Cristofari E., Granetti B., Arcioni S. 1995. Identification of *Tuber* spp. and corresponding ectomycorrhizae through molecular markers. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 69: 511-517. DOI: 10.1002/jsfa.2740690416.
78. Angelini P., Granetti B., Bellini M. 2007. Effetti di alcune combinazioni di fonti di azoto sullo sviluppo del micelio in coltura pura di *Boletus aereus*, *Boletus aestivalis*, *Boletus edulis* e *Boletus pinophilus*. *Pagine di Micologia* 27: 109-115.
79. Angelini P., Tirillini B., Properzi A., Rol C., Venanzoni R. 2015. Identification and bioactivity of the growth inhibitors in *Tuber* spp. methanolic extracts. *Plant Biosyst.* 149(6): 1000-1009.
80. Soudzilovskaia N.A., van Bodegom P.M., Terrer C., van't Zelfde M., McCallum I., McCormack M.L., Fisher J.B., Brundrett M.C., de Sá N.C., Tedersoo L. 2019. Global mycorrhizal plant distribution linked to terrestrial carbon stocks. *Nature Communications* 10: 5077.
81. Roy M., Yagame T., Yamato M., Iwase K., Heinz C., Faccio A., Bonfante P., Selosse M.A. 2009. Ectomycorrhizal *Inocybe* species associate with the mycoheterotrophic orchid *Epipogium aphyllum* but not its asexual propagules. *Annals of Botany* 104: 595-610.
82. Taylor L., Roberts D.L. 2011. Biological flora of the British Isles: *Epipogium aphyllum* Sw. *J. Ecol.* 99: 878-890.

-
83. Larriba E., Belda A., Lopez-Llorca L.V. 2015. A PCR based method to detect *Russula* spp. in soil samples and *Limodorum abortivum* roots in Mediterranean environments. *Forest Systems* 24(1): e019.
84. Yeh C.-M., Chung K.M., Liang C.-K., Tsai W.-C. 2019. New insights into the symbiotic relationship between orchids and fungi. *Appl. Sci.* 9: 585.
85. Ogura-Tsujita Y., Yukawa T., Kinoshita A. 2021. Evolutionary histories and mycorrhizal associations of mycoheterotrophic plants dependent on saprotrophic fungi. *Journal of Plant Research* 134: 19-41.
86. Francis R., Read D.J. 1995. Mutualism and antagonism in the mycorrhizal symbiosis, with special reference to impacts on plant community structure. *Canad. J. Bot.* 73:1301-1309.
87. Granetti B., Angelini P. 1992. Competizione tra alcuni funghi ectomicorrizici e *Tuber melanosporum* in una tartufaia coltivata. *Micologia e Vegetazione Mediterranea* 7(1): 173-188.
88. Granetti B., Angelini P. 1992. Livelli di micorrizzazione di carpino nero con *Tuber melanosporum* Vitt. in una tartufaia coltivata. *Micologia Italiana* 21(2): 3-14.
89. Whitfield J., 2007. Fungal roles in soil ecology: underground networking. *Nature* 449: 136-138.
90. Simard S.W., Beiler K.J., Bingham M.A., Deslippe J.R., Philip L.J., Teste F.P. 2012. Mycorrhizal networks: mechanisms, ecology and modelling. *Fungal Biology Reviews* 26: 39-60.
91. Castro-Delgado A., Elizondo-Mesén S, Valladares-Cruz Y., Rivera-Méndez W. Wood Wide Web: communication through the mycorrhizal network. *Tecnología en Marcha*. 33-34: 114-125.
92. Strullu-Derrien C., Martin F.M. 2018. The origin and evolution of mycorrhizal symbioses: from palaeomycology to phylogenomics. *New Phytol.* 220: 1012-1030.
93. Frank J.L., Coffan R.A., Southworth D., 2010. Aquatic gilled mushrooms: *Psathyrella* fruiting in the Rogue River in southern Oregon. *Mycologia* 102(1): 93-107.
94. Kohlmeyer J., Kohlmeyer E., 1979. *Marine Mycology: The Higher Fungi*. Academic Press: London, UK.
95. Pang K.L., Overy, D.P., Jones E.B.G. et al., 2016. 'Marine fungi' and 'marine-derived fungi' in natural product chemistry research: Toward a new consensual definition. *Fungal Biology Reviews* 30: 163-175.
96. Amend A., Burgaud G., Cunliffe M., Edgcomb V.P., Ettinger C.L., Gutiérrez M.H., Heitman J., Hom E.F.Y., Ianiri G., Jones A.J., Kagami M., Picard K.T., Quandt C.A., Raghukumar S., Riquelme M., Stajich J., Vargas-Muñiz J., Walker A.K., Yarden O.,

Gladfelter A.S. 2019. Fungi in the marine environment: open questions and unsolved problems. *Ecol. Evol. Sci.* 10(2): e01189-18.

97. Jones E.G., Pang K.L.; Abdel-Wahab M.A., et al., 2019. An online resource for marine fungi. *Fungal Diversity* 96: 347-433.

98. Gonçalves M.F.M., Hilário S., Van de Peer Y., Esteves A.C., Alves A. 2022. Genomic and metabolomic analyses of the marine fungus *Emericellopsis cladophorae*: insights into saltwater adaptability mechanisms and its biosynthetic potential. *J. Fungi* 8, 31.

99. Garzoli L., Poli A., Prigione V. et al., 2018. Peacock's tail with a fungal cocktail: first assessment of the mycobiota associated with the brown alga *Padina pavonica*. *Fungal Ecology* 35: 87-97.

100. Greco G., Capello M., Cecchi G. et al., 2017. Another possible risk for the Mediterranean Sea? *Aspergillus sydowii* discovered in the Port of Genoa (Ligurian Sea, Italy). *Mar. Pollut. Bull.* 122 (1-2): 470-474.

101. Brotzu G. 1984. Ricerche su di un nuovo antibiotico. *Lavori dell'Istituto di Igiene di Cagliari*. Disponibile online: <http://medicina.unica.it/pacs/brotzu.pdf>

102. Bonugli-Santos R., dos Santos Vasconcelos M.R., Passarini M.R.Z., et al., 2015. Marine-derived fungi: diversity of enzymes and biotechnological applications. *Front. Microbiol.* 6: 269.

103. Cecchi, G., Cutroneo, L., Di Piazza, S., Vagge, G., Capello, M., Zotti, M., 2020. From waste to resource: mycoremediation of contaminated marine sediments in the SEDITERRA project. *Journal of Soils and Sediments* 20(6): 2653-2663.

104. Antonelli A., Fry C., Smith R.J., Simmonds M.S.J., Kersey P.J., Pritchard, H.W et al. 2020. *State of the World's Plants and Fungi 2020*. Royal Botanic Gardens, Kew. DOI: <https://doi.org/10.34885/172>.

105. Senn-Irlet B., Heilmann-Clausen J., Genney D., Dahlberg A. 2007. Guidance for conservation of macrofungi in Europe. Document prepared for the European Council for Conservation of Fungi (ECCF) within the European Mycological Association (EMA) and the Directorate of Culture and Cultural and Natural Heritage, Council of Europe, Strasbourg.

106. Montmollin B., Strahm W. (Eds). 2005. *The Top 50 Mediterranean Island Plants: Wild plants at the brink of extinction, and what is needed to save them*. IUCN/SSC Mediterranean Islands Plant Specialist Group. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK, 110 pp.

107. Rossi G., Montagnani C., Gargano D., Peruzzi L., Abeli T., Ravera S., Cogoni A., Fenu G., Magrini S., Gennai M., Foggi B., Wagensommer R.P., Venturella G., Blasi C., Raimondo F.M., Orsenigo S. (Eds.), 2013. *Lista Rossa della Flora Italiana*. 1. Policy

Species e altre specie minacciate. Comitato Italiano IUCN e Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.

108. Angelini P., Bistocchi G., Arcangeli A., Rubini A., Venanzoni R. 2016. Inventory, diversity and communities of macrofungi in the Collestrada forest (Umbria, central Italy). *Plant Biosyst.* 150(5):1096–1105.

109. Angelini P., Compagno R., Arcangeli A., Bistocchi G., Gargano M.L., Venanzoni R., Venturella G. 2016. Macrofungal diversity and ecology in two Mediterranean forest ecosystems. *Plant Biosyst.* 150(3):540–549.

110. Angelini P., Arcangeli A., Bistocchi G., Rubini A., Venanzoni R., Perini C. 2017. Current knowledge of Umbrian macrofungi (central Italy). *Plant Biosyst.* 151(5):915–923.

111. Desprez-Loustau M.L., Robin C., Buee M., Courtecuisse R., Garbaye J., Suffert F., Satchell I., Rizzo D.M. 2007. The fungal dimension of biological invasions. *Trends Ecol Evol.* 22(9):472–480.

112. Angelini P., Girometta C.E., Venanzoni R., Bertuzzi G. 2021. Micoterapici per la medicina estetica sistemica: i funghi contro l'invecchiamento cutaneo. *Natural* 1, 44.

113. Zotti M., Persiani A., Ambrosio E., Vizzini A., Venturella G., Donnini D., Angelini P., Di Piazza S., Pavarino M., Lunghini D., et al. 2013. Macrofungi as ecosystem resources: conservation versus exploitation. *Plant Biosyst.* 147(1):219–225.

114. Dahlberg A, Mueller G.M. 2011. Applying IUCN red-listing criteria for assessing and reporting on the conservation status of fungal species. *Fungal Ecol.* 4:147–162.

115. Bansard, J. & Schröder, M. (2021). The Sustainable Use of Natural Resources: The Governance Challenge. BRIEF #16, International Institute for Sustainable Development. <https://www.iisd.org/system/files/2021-04/still-one-earth-natural-resources.pdf>.

116. IUCN. 2012a. IUCN red list categories and criteria: version 3.1. 2nd ed. Gland: IUCN; http://s3.amazonaws.com/iucnredlistnewcms/staging/public/attachments/3097/redlist_cats_crit_en.pdf

117. IUCN. 2012b. Unified classification of direct threats: version 3.2. <http://www.iucnredlist.org/technical-documents/classification-schemes/threats-classification-scheme>

118. IUCN. 2012c. Guidelines for application of IUCN red list criteria at regional and national levels: version 4.0. Gland: IUCN; [accessed 2017 Apr 30]. http://s3.amazonaws.com/iucnredlist-newcms/staging/public/attachments/3101/reg_guidelines_en.pdf.

-
119. IUCN. 2017. Guidelines for using the IUCN red list categories and criteria. Version 13. Standards and Petitions Subcommittee; [accessed 2017 May 7]. <http://www.iucnredlist.org/documents/RedListGuidelines.pdf>.
120. IUCN. 2019. Guidelines for using the IUCN Red List categories and criteria. Version 14. <https://www.iucnredlist.org/resources/redlistguidelines>.
121. Wagensommer R.P., Bistocchi G., Arcangeli A., Rubini A., Perini C., Venanzoni R., Angelini P. 2018. An assessment of Red List data for the Pezizomycotina (Ascomycota): Umbria (Italy) as a test case. *Plant Biosyst.* 152(6):1329–1337.
122. Wagensommer R.P., Angeles Flores G., Arcangeli A., Bistocchi G., Maneli F., Perini C., Venanzoni R., Angelini P. 2022. Application of IUCN red listing criteria at the regional level: a case study with Boletales across the Apennine province ecoregion and EU-habitats of Central Italy. *Plant Biosystems* 156(3): 743-753.
123. Angelini P., Antonini D., Antonini M., Arcangeli A., Bianco P., Bistocchi G., Campana L., Ceci A., Floccia F., Gargano M., Gelardi M., Lalli G., Leonardi M., Maneli F., Perini C., Perrone L., Salerno E., Segneri G., Siniscalco C., Persiani A.M. 2021. New insights on the occurrence and conservation status in Italy of *Alessioporus ichnusanus* (Boletaceae), an IUCN red listed mycorrhizal species. *Plant Biosyst.* 155(2): 195-198.
124. Zervakis G.I., Venturella G. 2007. Adverse effects of human activities on the diversity of macrofungi in forest ecosystems. *Boccone* 21: 77-84. 2007.
125. Egli S. 2011. Mycorrhizal mushroom diversity and productivity—an indicator of forest health? *Annals of Forest Science* volume 68: 81–88.
126. Abrego N., Bässler C., Christensen M., Heilmann-Clausen J. 2015. Implications of reserve size and forest connectivity for the conservation of wood-inhabiting fungi in Europe. *Biol. Conserv.* 191(2):469-477.
127. Ainsworth M. 2004. Developing tools for assessing fungal interest in habitats. 1: beech woodland saprotrophs. *Engl. Nat. Res. Rep.* 597:1-76.
128. Luoma D.L., Eberhart J.L., Molina R., Amaranthus M.P. 2004. Response of ectomycorrhizal fungus sporocarp production to varying levels and patterns of green-tree retention. *For. Ecol. Manag.* 202: 337–354
129. Kranabetter J. M., Friesen J., Gamiet S., Kroeger P. 2009. Epigeous fruiting bodies of ectomycorrhizal fungi as indicators of soil fertility and associated nitrogen status of boreal forests. *Mycorrhiza* 19(8): 535-548.
130. Castañeda L.E., Barbosa O., 2017. Metagenomic analysis exploring taxonomic and functional diversity of soil microbial communities in Chilean vineyards and surrounding native forests. *PeerJ* 5: e3098.
131. Damon C., Lehembre F., Oger-Desfeux C., Luis P., Ranger J., Fraissinet-Tachet L., et al. 2012. Metatranscriptomics reveals the diversity of genes expressed by eukaryotes in forest soils. *PLoS One* 7: e28967.

-
132. Singh P.K. 2012. Role of glomalin related soil protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi: a review. *Agri. Sci. Res. J.* 2(3): 119-125.
133. Arnebrant K. 1994. Nitrogen amendments reduce growth of extramatrical mycelium. *Mycorrhiza* 5: 7-15.
134. Arnolds E. 1988. The changing macromycete flora in the Netherlands. *Trans. Brit. Mycol. Soc.* 90: 391-406.
135. Arnolds E. 1991. Decline of ectomycorrhizal fungi in Europe. *Agric. Ecosyst. Environ.* 35: 209-244.
136. Arnolds E. 2001. The future of fungi in Europe: threats, conservation and management. In: *Fungal Conservation - Issues and Solutions*, eds D. Moore, M. M. Nauta, S. E. Evans, and M. Rotheroe (Cambridge: Cambridge University Press), 64-80.
137. Bagyaraj D.J., Ashwin R., 2017. Soil biodiversity: role in sustainable horticulture. *Biodivers. Hortic. Crops* 5: 1-18.
138. Baldo M., 2009. Il deperimento della farnia in boschi planiziali. Stato ectomicorrizico e possibilità di controllo. Tesi di Dottorato, Università degli studi di Padova, XXI° ciclo. http://paduaresearch.cab.unipd.it/1369/1/Mirco_Baldo.pdf
139. Bastida F., Torres I.F., Hernandez T., García C. 2017. The impacts of organic amendments: do they confer stability against drought on the soil microbial community? *Soil Biol. Biochem.* 113: 173-183.
140. Beiler K., Durall D., Simard S., Maxwell S., Kretzer A. 2009. Architecture of the wood-wide web: Rhizopogon spp. genets link multiple Douglas-fir cohorts. *The New Phytol.* 185: 543-53.
141. Benedetti A., Gianfreda C. 2004. *Metodi di analisi biochimica del suolo*. Franco Angeli Ed.
142. Behnke-Borowczyk J., Kwaśna H., Bełka M. 2012. Molecular methods used in studies of diversity of the soil microorganisms. *Sylvan* 156: 294-304.
143. Frąć M., Hannula S.E., Bełka M., Jędryczka M. 2018. Fungal biodiversity and their role in soil health. *Front. Microbiol.* 9: 707.
144. Martins A. 2017. The numbers behind mushroom biodiversity. In: *Wild Plants, Mushrooms and Nuts: Functional Food Properties and Applications*. Ferreira I.C.F.R., Morales P., Barros L. (eds), Chapter 2. Published by John Wiley & Sons, Ltd.
145. Mortimer P.E., Boa E., Hyde E.B., Li H. 2021. Macrofungi as Food. In book: *Encyclopedie of Mycology* 1: 405-417.
146. Johnson D., Vandenkoornhuysen P.J., Leake J.R., Gilbert L., Booth R.E., Grime J.P. et al. 2003. Plant communities affect arbuscular mycorrhizal fungal diversity and community composition in grassland microcosms. *New Phytol.*, 161: 503-515.

-
147. Johnson J., Evans C., Brown N., Skeates S., Watkinson S., Bass D. 2014. Molecular analysis shows that soil fungi from ancient semi-natural woodland exist in sites converted to non-native conifer plantations. *Forestry* 87(5): 705-717
148. Halme P., Holec J., Heilmann-Clausen J. 2017. The history and future of fungi as biodiversity surrogates in forests. *Fungal Ecol.* 27: 1-9.
149. Laganà A., Salerni E., Barluzzi C., Perini C., De Dominicis V. 2002. Macrofungi as long-term indicators of forest health and management in central Italy. *Crypt. Myc.* 23(1): 39-50.
150. García Jiménez P, Fernández Ruiz A, Sánchez Sánchez J, Rodríguez de la Cruz D. 2020. Mycological Indicators in evaluating conservation status: the case of *Quercus* spp. Dehesas in the Middle-West of the Iberian Peninsula (Spain). *Sustainability* 12(24): 10442.
151. Figueiredo A.F., Boy J., Guggenberger G. 2021. Common mycorrhizae network: a review of the theories and mechanisms behind underground interactions. *Front. Fungal Biol.* 2: 735299.
152. Brandrud T.E. 1995. The effects of experimental nitrogen addition on the ectomycorrhizal fungal flora in an oligotrophic spruce forest at Gårdsjön, Sweden. *For. Ecol. Manag.* 71: 111–122.
153. Bredesen B., Haugan R., Aanderaa R., Lindblad I., Okland B., Rosok O. 1997. Wood-inhabiting fungi as indicators on ecological continuity within spruce forests of southeastern Norway. *Blyttia* 55: 131-140.
154. Nabuurs G.J., Arets E.J.M.M., Schelhaas M.J. 2018. Understanding the implications of the EU-LULUCF regulation for the wood supply from EU forests to the EU. *Carbon Balance Manage* 13, 18.
155. Herrero C., Berraondo I., Bravo F., Pando V., Ordóñez C., Olaizola J., Martín-Pinto P., Oria de Rueda J.A. 2019. Predicting mushroom productivity from long-term field-data series in mediterranean *Pinus pinaster* Ait. forests in the context of climate change. *Forests* 10(3): 206.
156. Marah A.E., Merten D., Szafranietz F. 1962. Zur 90-Strontium Gehalt einiger Pilzarten. *Med. Ernii.hr.* 3: 253.
157. Kiefer H., Maushart R. 1965. Erhohter Cs-137 Gehalt in menschlichen Körper nach Pilzgenuss. *Atompraxis. Direct Information:* 15.
158. Grüter H. 1964. Eine selektive Anreicherung des Spaltprodukts ¹³⁷Cs in Pilzen. *Naturwissenschaften* 51(7): 161-162.
159. Grüter H., 1966. Verhalten einheimischer Pilzarten gegenüber dem Spaltprodukt Caesium-137. *Zeitschr. Lebensmus.-Forsch.* 134(3): 173-179.

-
160. Grüter H. 1971. Radioactive fission product cesium-137 on mushrooms in W Germany during 1963-1970. *Health Phys.* 20: 655-656.
161. Maushart H.U. 1966. Ganzkörpermessungen am Menschen. 3. Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung. Bundesminist. Wiss. Forsch. Bad Godesberg. 149-153.
162. Haselwandtner K. 1978. Accumulation of the radioactive nuclide ^{137}Cs in fruitbodies of Basidiomycetes. *Health Phys.* 34(6):713-715.
163. Seeger R., Schweinshaut P., 1981. Vorkommen von Caesium in höheren Pilzen. *Sci. Tot. Envir.* 19: 253-276.
164. Johnson W., Nayfield C.L. 1970. Elevated levels of ^{137}Cs in common mushrooms (Agaricaceae) with possible relationships to high levels of ^{137}Cs in whitetail deer 1968-69. U.S.A. *Radiol. Health Data Rep.* 11(10): 527-531.
165. Ijpelaar P., 1980. Het Caesium-137 gehalte van verschillende paddelstoelsoorten. *Coolia* 23(4): 86-91.
166. Röhleder K. 1967. Zur radioaktiven Kontamination von Speisepilze. *Deutsch. Lebensmus. Rundsch.* 63: 135-138
167. Kuyper T. 1987. Radioactive Cesium in fungi. *Health Phys.* 57(3): 495.
168. Mascanzoni D. 1987. Chernobyl's challenge to the environment: a report from Sweden. *Sci. Tot. Envir.* 67(2-3): 133-148.
169. Meyerhof D., Marshall H. 1990. The non- agricultural areas of Canada and radioactivity. In: Desmet G. et al. (eds.): *Transfer of radionuclides in natural and semi-natural environments.* Elsevier, London and New York, 48-55.
170. Padovani R., Contento G., Giovani C., Malisan R. 1990. Field study of fallout radiocaesium in upland soil. In: Desmet G. et al. (eds.): *Transfer of radionuclides in natural and seminatural environments.* Elsevier, London and New York, 292-299
171. Mascanzoni D. 1990. Uptake of ^{90}Sr and ^{137}Cs by mushrooms following the Chernobyl accident. In: Desmet G. et al. (eds.): *Transfer of radionuclides in natural and semi-natural environments.* Elsevier, London and New York, 459-467.
172. Fraiture A., Guillitte O., Lambinon J. 1989. Enquête sur la radiocontamination des produits alimentaires des milieux naturels forestiers. Rapport de l' étude subsidiée par la Commission des Communautés Européennes. DG Environnement, Protection des Consommateurs et Sécurité Nucléaire 1-92.
173. Fraiture A., Guillitte O., Lambinon J. 1990. Interest of fungi as bioindicators of the radiocontamination in forest ecosystems. In: Desmet G. et al. (eds.): *Transfer of radionuclides in natural and semi-natural environments.* Elsevier, London and New York, 477-484.

-
174. Rückert G., Diehl J.F. 1987. Anreicherung von Cäsium-137 und Cäsium-134 in 34 Pilzarten nach dem Reaktorunglück von Tschernobyl. *Zeitschr. Lebensmus. Unters. Forsch.* 185(2): 91-97.
175. Heinrich G. 1987. Zur radioaktiven Belastung verschiedener Pflanzen in Graz nach dem Reaktorunglück von Tschernobyl. *Mitt. naturwiss. Ver. Steiermark* 117: 7-25.
176. Heinrich G., Müller H.J., Oswald K. & Gries A. 1989. Natural and artificial radionuclides in selected Styrian soils and plants before and after the reactor accident in Chernobyl. *Biochem. Physiol. Pfl. (BPP)*, 185(1-2): 55-67.
177. Rückert G., Diehl J.F. 1987. Anreicherung von Cäsium-137 und Cäsium-134 in Pilzarten nach dem Reaktorunglück von Tschernobyl. *Zeitschr. Lebensmus. Unters. Forsch.* 185(2): 91-97
178. Bakken L.R., Olsen R.A. 1990. Accumulation of radiocaesium in fruit bodies of fungi. In: Desmet G. et al. (eds.): *Transfer of radionuclides in natural and semi-natural environments*. Elsevier, London and New York, pp. 664-668.
179. Steinberg R.A. 1946. Specificity of potassium and magnesium for growth of *Aspergillus niger*. *Am. J. Bot.* 33: 210-214.
180. Seeger R. 1978. Kaliumgehalt höherer Pilze. *Zeitschr. Lebensm. Unters.-Forsch.* 167: 23-31.
181. Guillitte O., Melin J. & Wallberg L. 1994. Biological pathways of radionuclides originating from the Chernobyl fallout in an Boreal forest ecosystem. *Sci. Tot. Envir.*, 157: 207-215.
182. Iotti M. 2019. Passato, presente e future della tassonomia e sistematica fungina con esempi relative al genere *Tuber*. XXVII Giornate Micologiche CEMM: 84-99.
183. Eckl P., Hofmann W., Türk R. 1986. Uptake of natural and man-made radionuclides by lichens and mushrooms. *Radiation and Environ. Biophys.* 25(1): 43-54.
184. Andolina J., Guillitte O. 1990. Radiocaesium availability and retention sites in forest humus. In: Desmet G. et al. (eds.).
185. Conway E.J., Duggan F. 1958. A cation carrier in the yeast cell wall. *Biochem. J.* 69: 265-274.
186. Rothstein A. 1965. Uptake and translocation. In: Ainsworth G.C. & Sussmann A.S. (eds.): *The Fungi. An advanced treatise*, vol. 1. *The Fungal Cell*. Academic Press, New York and London.
187. Nimis P.L. 1996. Radiocaesium in plants of forest ecosystems. *Studia Geobotanica*. Vol. 15: 3-49.

-
188. Guillitte O., Fraiture A., Lambinon J. 1990. Soil-fungi radiocaesium transfers in forest ecosystems. In: Desmet G. et al. (eds.): Transfer of radionuclides in natural and seminatural environments. Elsevier, London and New York, 468-476.
189. Lambinon J., Fraiture A., Gasia M.C., Guillitte O. 1988. La radiocontamination des champignons sauvages en Wallonie (Belgique) suite à l'accident de Tchernobyl. Commissariat à l'Energie Atomique, E: 37-44
190. Kammerer L., Hiersche L., Wirth E. 1994. Uptake of radiocesium by different species of mushrooms. *J. Environ. Radioactivity* 23: 135-150.
191. Nimis P.L., Giovani C., Padovani R. 1986. La Contaminazione da cesio-134 e cesio-137 nei macromiceti del Friuli-Venezia Giulia nel 1986. *Studia Geobotanica* 6: 3-121.
192. Haselwandtner K., Berreck M., Brunner P. 1988. Fungi as bioindicators of radiocaesium contamination: pre- and postChernobyl activities. *Trans. Brit. Mycol. Soc.* 90(2): 171-174.
193. Nimis P.L., Cebulec E. 1989. I macromiceti quali indicatori di contaminazione da cesio radioattivo nel Friuli-Venezia Giulia. *Inf. Bot. It.* 21(1-3): 181-188.
194. Gremigni G. 1994. Radionuclidi nei funghi e nel terreno prelevati nel parco naturale Migliarino - S. Rossore - Massaciuccoli e nelle colline livornesi a seguito dell'incidente di Chernobyl. Provincia di Livorno - Consorzio Parco Naturale «Migliarino - S. Ros- sore - Massaciuccoli». Supplemento n. 3 al vol. 11 (1990) dei Quaderni del Museo di Storia Naturale di Livorno- Tip. O. Debatte e F., Livorno.
195. Nimis P.L., Bargagli R., Benedet A., Castello M., Gasparo D., Lazzarin G., A., Olivieri S., Tretiach M. 1990. Licheni come biondicatori di inquinamento atmosferico nell'Alto Vicentino. *Atti Mus. St. Nat. Verona*.
196. Mietelski J.W., Kasinska M., Kubica B., Kozak K., Macharski P. 1994. Radioactive contamination of Polish mushrooms. *Sci.Tot. Envir.* 157: 217-226.
197. Rühm W., Kammerer L., Hiersche L., Wirth E. 1997. The Cs-137/Cs-134 ratio in fungi as indicator of the major mycelium location in forest soil. *J. Environ. Radioact.* 35: 129-148.
198. Fraiture A. 1992. Introduction to the radioecology of forest ecosystems and survey of radioactive contamination in food products from forests. *Commiss. Eur. Comm., Rad. Prot. Rep.* 57: 1-103.
199. Guillitte O., Melin J., Wallberg L. 1994. Biological pathways of radionuclides originating from the Chernobyl fallout in an Boreal forest ecosystem. *Sci. Tot. Envir.* 157: 207-215.
200. Giovani C., Garavaglia M. 2013. Protocolli per l'uso di indicatori di radioattività ambientale: sviluppo e risultati, in atti del Convegno "Chernobyl 25 anni dopo: studi riflessioni e attualità". Udine 21-22-23 giugno 2012, pp.93-110.

-
201. Lange L. 2014. The importance of fungi and mycology for addressing major global challenges. *IMA Fungus* 5(2): 463-471.
202. Meyer V., Basenko E.Y., Benz J.P. et al. 2020. Growing a circular economy with fungal biotechnology: a white paper. *Fungal. Biol. Biotechnol.* 7: 5.
203. Zhang Y., Geng W., Shen Y., Wang Y., Dai Y.C. 2014. Edible mushroom cultivation for food security and rural development in China: bio-innovation, technological dissemination and marketing. *Sustainability* 6: 2961-2973.
204. Jongman M., Khare K.B., Loeto D. 2018. Oyster mushroom cultivation at different production systems: a review. *EJBPS* 5(5):72-79.
205. Angelini P., Pellegrino R.M., Tirillini B., Angeles Flores G., Alabed H.B.R., Ianni F., Blasi F., Cossignani L., Venanzoni R., Orlando G., Menghini L., Ferrante C. 2021. Metabolomic profiling and biological activities of *Pleurotus columbinus* Quél. cultivated on different agri-food byproducts. *Antibiotics* 10: 1245.
206. Onofre S.B., Bertoldo I.C., Abatti D., Refosco D. 2017. Chemical composition of the biomass of *Saccharomyces cerevisiae* - (Meyen ex E. C. Hansen, 1883) yeast obtained from the beer manufacturing process. *IJEAB* 2(2): 558-562.
207. Derbyshire E.J., Delange J. 2021. Fungal protein - what is it and what is the health evidence? A systematic review focusing on mycoprotein. *Front. Sustain. Food Syst.* 5: 581682.
208. Vallone L., Giardini A., Soncini G. 2014. Secondary metabolites from *Penicillium roqueforti*, a starter for the production of Gorgonzola cheese. *Ital. J. Food Saf.* 3: 2118.
209. Magyar I., Soós J. 2016. Botrytized wines - Current perspectives. *Int. J. Wine Res.* 8: 29-39.
210. Sharma R., Garg P., Kumar P., Bhatia S.K., Kulshrestha S. 2020. Microbial fermentation and its role in quality improvement of fermented foods. *Fermentation* 6: 106.
211. Verona O. 1985. *Il vasto mondo dei funghi*. Edagricole, Bologna.
212. Guimarães L.H.S., Peixoto-Nogueira S.C., Michelin M., Rizzatti A.C.S., Sandrim V.C., Zanoelo F.C., Aquino A.C.M.M., Junior A.B., Polizeli MLTM. 2006. Screening of filamentous fungi for production of enzymes of biotechnological interest. *Braz. J. Microbiol.* 37: 474-480.
213. Durairaj P., Hur J.S., Yun H. 2016. Versatile biocatalysis of fungal cytochrome P450 monooxygenases. *Microb. Cell Fact.* 15:125.
214. Show P.L., Oladele K.O., Siew Q.Y., Zakry F.A.A., Lan J.C.W., Ling T.C. 2015. Overview of citric acid production from *Aspergillus niger*. *Front. Life Sci.* 8(3): 271-283.

-
215. Köhl J., Postma J., Nicot P., Ruocco M., Blum B. 2011. Stepwise screening of microorganisms for commercial use in biological control of plant-pathogenic fungi and bacteria. *Biol. Contr.* 57: 1-12.
216. Mauseth J.D. 2020. *Botanica: fondamenti di biologia delle piante*. IV ed., Idelson-Gnocchi.
217. Nasrawi H.A. 2019. Role of fungi in bioremediation. *Adv. Biotech. & Micro.* 12(4): 96:100.
218. Ediriweera A.N., Karunarathna S.C., Yapa P.N., Schaefer D.A., Ranasinghe A.K., Suwannarach N., Xu J. 2022. Ectomycorrhizal mushrooms as a natural bio-indicator for assessment of heavy metal pollution. *Agronomy* 12, 1041.
219. Temporiti M.E.E., Nicola L., Nielsen E., Tosi S. 2022. Fungal Enzymes Involved in Plastics Biodegradation. *Microorganisms*10: 1180.
220. Dai Y.C., Yang Z.L., Cui B.K., Yu C.J., Zhou L.W. 2009. Species diversity and utilization of medicinal mushrooms and fungi in China. *Int. J. Med. Mushrooms* 11(3):287-302.
221. Gründemann C., Reinhardt J.K., Lindequist U. 2019. European medicinal mushrooms: do they have potential for modern medicine? An update. *Phytomedicine* 66: 153131.
222. Sitotaw R., Lulekal E., Abate D. 2020. Ethnomycological study of edible and medicinal mushrooms in Menge District, Asossa Zone, Benshangul Gumuz Region, Ethiopia. *J. Ethnobiol. Ethnomedicine* 16: 11.
223. Angelini P., Tirillini B., Bistocchi G., Arcangeli A., Rubini A., Pellegrino R.M., Fabiani R., Cruciani G., Venanzoni R., Rosignoli P. 2018. Overview of the biological activities of the methanolic extract from wild *Fomitopsis pinicola* fruiting body from Central Italy. *Int. J. Med. Mushrooms* 20(11): 1047-1063.
224. Girometta C. 2019. Antimicrobial properties of *Fomitopsis officinalis* in the light of its bioactive metabolites: a review. *Mycology* 10(1): 32-39.
225. Angelini P., Girometta C., Tirillini B., Moretti S., Covino S., Cipriani M., D'Ellena E., Angeles G., Federici E., Savino E., Cruciani G., Venanzoni R. 2019. A comparative study of the antimicrobial and antioxidant activities of *Inonotus hispidus* fruit and their mycelia extracts. *International Journal of Food Properties* 22(1): 768-783.
226. Covino S., D'Ellena E., Tirillini B., Angeles G., Arcangeli A., Bistocchi G., Venanzoni R., Angelini P. 2019. Characterization of biological activities of methanol extract of *Fuscoporia torulosa* (Basidiomycetes) from Italy. *International Journal of Medicinal Mushroom* 21(11): 1051-1063.
227. Mygind P.H., Fischer R.L., Schnorr K.M., Hansen M.T., Sönksen C.P., Ludvigsen S., Raventós D., Buskov S., Christensen B., De Maria L., Taboureau O., Yaver D., Elvig-Jørgensen S.G., Sørensen M.V., Christensen B.E., Kjærulff S., Frimodt-Møller N., Lehrer

-
- R.I., Zasloff M., Kristensen H.H. 2005. Plectasin is a peptide antibiotic with therapeutic potential from a saprophytic fungus. *Nature* 437: 975-980.
228. Hu Y., Liu A., Vaudrey J., Vaiciunaite B., Moigboi C., McTavish S.M., et al. 2015. Combinations of β -lactam or aminoglycoside antibiotics with plectasin are synergistic against methicillin-sensitive and methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*. *PLoS ONE* 10(2): e0117664.
229. Domínguez M.J., Gómez-Lorenzo M.G., Martín J.J. 1999. Sordarin inhibits fungal protein synthesis by blocking translocation differently to fusidic acid. *JBC* 274(32): 22423-22427.
230. Bennett J.W. 2001. Alexander Fleming and the discovery of penicillin. *Adv. Appl. Microbiol.* 49: 163-184.
231. Weber R.W.S., Meffert A., Anke H., Olov Sterner O. 2005. Production of sordarin and related metabolites by the coprophilous fungus *Podospora pleiospora* in submerged culture and in its natural substrate. *Mycol. Res.* 109(5): 619-26.
232. Khan N.T. 2017. Cyclosporin a production from *Tolipocladium inflatum*. *General Medicine* 4(4): 1-3.
233. Baral B. 2017. Entomopathogenicity and biological attributes of Himalayan treasured fungus *Ophiocordyceps sinensis* (Yarsagumba). *Journal of Fungi* 3, 4.
234. Liu Y., Wang J., Wang W., Zhang H., Zhang X., Han C. 2015. The chemical constituents and pharmacological actions of *Cordyceps sinensis*. *eCAM*, Article ID 575063, 12 pages.
235. Kreipke V.C., Moffatt R.J., Tanner C.J., Ormsbee M.J. 2021. Effects of concurrent training and a multi-ingredient performance supplement containing *Rhodiola rosea* and *Cordyceps sinensis* on body composition, performance, and health in active men. *J. Diet. Suppl.* 18(6):597-613.
236. Das G., Shin H.S., Leyva-Gómez G., Prado-Audelo M.L.D., Cortes H., Singh Y.D., Panda M.K., Mishra A.P., Nigam M., Saklani S., Chaturi P.K., Martorell M., Cruz-Martins N., Sharma V., Garg N., Sharma R., Patra J.K. 2021. *Cordyceps* spp.: a review on its immune-stimulatory and other biological potentials. *Front. Pharmacol.* 11:602364.
237. Wu W.T., Hsu T.H., Lee C.H., Lo H.C. 2020. Fruiting bodies of Chinese Caterpillar mushroom, *Ophiocordyceps sinensis* (Ascomycetes) alleviate diabetes-associated oxidative stress. *Int. J. Med. Mush.* 22(1): 15-29.
238. Kaymakci M.A., Guler E.M. 2020. Promising potential pharmaceuticals from the genus *Cordyceps* for COVID-19 treatment: a review study. *Bezmialem Science* 8(Supplement 3): 140-144.
239. Nowakowski P., Naliwajko S.K., Markiewicz-Zukowska R., Borawska M.H., Socha K. 2020. The two faces of *Coprinus comatus*-functional properties and potential hazards. *Phytother. Res.* 34(11): 2932-2944.

-
240. Cao H., Ma S., Guo H., Cui X., Wang S., Zhong X., Wu Y., Zheng W., Wang H., Yu J., Ma L., Chun-Chao H. 2019. Comparative study on the monosaccharide compositions, antioxidant and hypoglycemic activities in vitro of intracellular and extracellular polysaccharides of liquid fermented *Coprinus comatus*. *Inter. J. Biol. Macromol.* 139: 543-549.
241. Stojkovic D., Smiljkovic M., Ciric A., Glamoclija J., Van Griensven L., Ferreira I.C.F.R., Sokovic M. 2019. An insight into antidiabetic properties of six medicinal and edible mushrooms: inhibition of α -amylase and α -glucosidase linked to type- 2 diabetes. *S. Afr. J. Bot.* 120: 100-103.
242. Wang G., He M., Yi P., Wang J., Li B., Li J., Fu Y., Bai L., Fu Q. 2012. Comparison of effects of vanadium absorbed by *Coprinus comatus* with those of inorganic vanadium on bone in streptozotocin-diabetic rats. *Biol. Trace Elem. Res.* 149: 391-398.
243. Li W., Wang Y., Sun M., Liang Y., Cai X., Qi D., Zhang Y., Han C. 2020. The prebiotic-like effects of *Coprinus comatus* polysaccharides on gut microbiota in normal mice and those with acute alcoholic liver injury: a comparative study. *eCAM*, Article ID 2027570, 6 pages.
244. Gu Y.H., Leonard J. 2006. In vitro effects on proliferation, apoptosis and colony inhibition in ER-dependent and ER-independent human breast cancer cells by selected mushroom species. *Oncol. Rep.* 15: 417-423.
245. Czymmek K., Dahms T. 2015. Future directions in advanced mycological microscopy. In: Dahms, T., Czymmek, K. (eds) *Advanced Microscopy in Mycology*, pp. 143-162. *Fungal Biology*. Springer, Cham.

Sitografia

Acta Fungorum www.actafungorum.org

ARPA Umbria <https://www.arpa.umbria.it/>

Index Fungorum <http://www.indexfungorum.org/>

Natura Mediterraneo <https://www.naturamediterraneo.com/>

Associazione Micologica Micelia <http://www.micelia.it/>

Microbiologia Italia <https://www.microbiologiaitalia.it/>

Notizie scientifiche <https://notiziescientifiche.it/>

Mondo funghi <https://www.mondofunghi.com/>

Funghi italiani <https://www.funghiitaliani.it/>

ISPRA Cos'è la biodiversità <https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/biodiversita/le-domande-piu-frequenti-sulla-biodiversita/cose-la-biodiversita>

The Fungal Kingdom: diverse and essential roles in earth's ecosystem

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK559443/>

SINACloud GIS Portal <https://sinacloud.isprambiente.it/portal/home/index.html>

Network Nazionale Biodiversità <https://www.nnb.isprambiente.it/it/il-network>

The Global Fungal Red List Initiative <http://iucn.ekoo.se/en/iucn/welcome>

IUCN position on the updated zero draft of the post-2020 Global Biodiversity

Framework - April 2021 <https://www.iucn.org/files/iucn-position-updated-zero-draft-post-2020-global-biodiversity-framework-april-2021pdf>

Network per lo studio della diversità micologica

<https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/biodiversita/lispra-e-la-biodiversita/attivita-e-progetti/network-per-lo-studio-della-diversita-micologica>

QUADERNI
NATURA E BIODIVERSITÀ

18 / 2022