

I GEORGOFILI



I FOCUS DEI GEORGOFILI

Firenze, 2025

Società  Editrice Fiorentina

I GEORGOFILI



I FOCUS DEI GEORGOFILI

Supplemento agli Atti dei Georgofili 2024

Con il contributo di



FONDAZIONE
CR FIRENZE



DIREZIONE GENERALE
EDUCAZIONE,
RICERCA E
ISTITUTI CULTURALI

Copyright © 2025
Accademia dei Georgofili
Firenze
<http://www.georgofili.it>

Proprietà letteraria riservata

Supplemento a «I Georgofili. Atti della Accademia dei Georgofili»
Anno 2024 - Serie VIII - Vol. 21 (200° dall'inizio)

Direttore responsabile: Paolo Nanni

ISSN 0367-4134

SOCIETÀ EDITRICE FIORENTINA
via Aretina, 298 - 50136 Firenze
tel. 055 5532924
info@sefeditrice.it - www.sefeditrice.it

ISBN 978-88-6032-787-1

Indice

<i>Presentazione</i> di Massimo Vincenzini	»	7
CRISTINA NALI, GIACOMO LORENZINI, ELISA PELLEGRINI, GEMMA BIANCHI, SAMUELE RISOLI E LORENZO COTROZZI		
<i>Piante, cambiamento climatico e stress ossidativo</i>	»	9
GIOVANNI VANNACCI, GIUSEPPE FIRRAO E SABRINA SARROCCO		
<i>I funghi questi sconosciuti.</i>		
<i>Parte 1: il lato oscuro</i>	»	28
GIOVANNI VANNACCI, GIUSEPPE FIRRAO E SABRINA SARROCCO		
<i>I funghi questi sconosciuti.</i>		
<i>Parte 2: come i funghi ci possono aiutare a salvare il mondo</i>	»	48

Presentazione

Per individuare e affrontare tematiche ritenute prioritarie in determinati settori, oltre che fornire un adeguato supporto a specifiche iniziative concorrenti al progresso dell'agricoltura, l'Accademia dei Georgofili tradizionalmente si avvale di Comitati consultivi, Centri Studi e Gruppi di lavoro, i cui membri sono accademici o comunque personalità scientifiche e tecniche di consolidata e specifica competenza. Gli elaborati predisposti da tali strutture vengono prontamente segnalati e divulgati attraverso il portale istituzionale ad accesso libero (<https://www.georgofili.it>), nel pieno rispetto dello storico motto dell'Accademia, «*Prosperitati Publicae Augendae*».

Nel 2021, il Consiglio Accademico ha ritenuto opportuno raccogliere i documenti prodotti nell'anno dalle diverse strutture di supporto scientifico e dare vita a una nuova iniziativa editoriale in formato digitale, denominata *I focus dei Georgofili*, da pubblicare come supplemento agli «Atti» e rendere liberamente accessibile attraverso il portale istituzionale.

L'iniziativa prosegue con il presente volume de *I focus*, supplemento agli «Atti dell'Accademia dei Georgofili» 2024, che intende richiamare l'attenzione sull'importante ruolo svolto dagli organismi vegetali (piante e funghi) nella sfida ai cambiamenti climatici in atto, attraverso strategie di adattamento, contribuendo alla transizione ecologica.

A tutti gli Autori degli elaborati qui presenti un sincero ringraziamento.

MASSIMO VINCENZINI

CRISTINA NALI¹, GIACOMO LORENZINI¹, ELISA PELLEGRINI¹,
GEMMA BIANCHI¹, SAMUELE RISOLI¹ E LORENZO COTROZZI¹

Piante, cambiamento climatico e stress ossidativo

¹ Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Agro-ambientali dell'Università di Pisa

Durante il loro ciclo, gli organismi vegetali si trovano frequentemente a fronteggiare condizioni di natura chimica o fisica non ottimali, complessivamente denominate “stress abiotici”. Più precisamente, i nuovi scenari ambientali dovuti ai noti fenomeni legati al riscaldamento globale sono responsabili dell’induzione di importanti stati di sofferenza in tutti i viventi. E sono soprattutto le piante, che – essendo sessili e radicate a terra – non possono riposizionarsi per gestire al meglio le situazioni avverse e devono affrontarle con meccanismi endogeni (enzimatici e non), per non incorrere in effetti negativi di ordine fisiologico e produttivo. Uno squilibrio a livello cellulare tra ossidanti e antiossidanti (in favore dei primi) e, più in generale, una alterazione nelle vie *redox* di segnalazione e controllo sono le conseguenze più comuni in queste circostanze; esse danno vita al fenomeno noto come “stress ossidativo”, la cui principale causa è una eccessiva produzione di specie chimiche ossidanti altamente reattive, in particolare i radicali liberi. Questi sono essenziali per il corretto funzionamento dell’organismo, ma la loro presenza deve essere sempre mantenuta entro una certa soglia considerata fisiologica. Se le difese antiossidanti sono insufficienti a mantenere lo stato di ossidoriduzione in equilibrio e la situazione di stress è prolungata, possono generarsi alterazioni vitali che, a lungo andare, diventano irreversibili.

LO STRESS OSSIDATIVO: COME, QUANDO E PERCHÉ

Tutti gli organismi viventi terrestri nascono e crescono in presenza di una atmosfera ossidante, composta per 20,9 % da ossigeno molecolare (nell’aria secca a livello del mare). Diversi sottoprodotti del metabolismo dell’ossigeno, caratterizzati da notevole ubiquità e potenzialità tossica, sono dotati di uno o

più elettroni spaiati nell'orbitale più esterno (quindi sono "radicali liberi"), da cui deriva una spiccata reattività nei confronti di tutte le classi di biomolecole; essi sono definiti dall'acronimo 'ROS' (per *Reactive Oxygen Species*, specie reattive dell'ossigeno) e svolgono ruoli fondamentali nel metabolismo, sia della cellula sana, che in quella afflitta da un agente esterno di varia natura. Le ROS sono rappresentate da radicali liberi centrati sull'ossigeno (ossiradicali), come il radicale idrossilico $\bullet\text{OH}$ e l'anione superossido $\bullet\text{O}_2^-$; inoltre comprendono altre specie non radicaliche, quali il perossido di idrogeno (acqua ossigenata, H_2O_2) e l'ossigeno singoletto ($^1\text{O}_2$). Quest'ultimo è uno stato eccitato dell'ossigeno molecolare che si forma quando sufficiente energia viene assorbita dalla molecola in modo da attuare una inversione di *spin* di uno degli elettroni spaiati accompagnata da uno spostamento in un diverso orbitale.

In particolare, la riduzione univalente dell'ossigeno con l'aggiunta di un elettrone per volta nell'orbitale esterno produce ROS, secondo la seguente catena di eventi (fig. 1):

1. Partendo da una molecola di ossigeno e aggiungendo un elettrone nell'orbitale di valenza otteniamo il $\bullet\text{O}_2^-$, che è quindi il primo prodotto della riduzione univalente dell'ossigeno. Tale radicale può essere prodotto accidentalmente, a livello della catena di trasporto elettronico mitocondriale e microsomiale per trasferimento di un elettrone dai trasportatori di elettroni direttamente all'ossigeno, che pertanto viene ridotto a $\bullet\text{O}_2^-$ (Reazione 1). Esso reagisce con proteine, lipidi, polisaccaridi e acidi nucleici, ma la sua reattività è piuttosto bassa. L'azione tossica dipende in larga misura dalla produzione di H_2O_2 .
2. Nelle cellule il radicale superossido viene, appunto, rapidamente trasformato ("dismutato") in H_2O_2 e ossigeno, attraverso una reazione nella quale una molecola di superossido si ossida, diventando ossigeno, e l'altra molecola si riduce e si protona, diventando H_2O_2 (Reazione 2).
3. In base alla reazione di Haber-Weiss, il superossido reagisce con acqua ossigenata e dà luogo alla formazione di idrossile, che è una specie estremamente reattiva nei confronti di specifici bersagli biomolecolari (lipidi, acidi nucleici e proteine); con una emivita dell'ordine di microsecondi, esso rappresenta la minaccia maggiore, essendo capace anche di proprietà mutagene (Reazione 3).
4. Essendo un anione altamente reattivo, il superossido tende a reagire con l'ambiente biologico circostante e può essere convertito, mediante diverse tipologie di reazioni, in varie specie chimiche. Ad esempio, può interagire con lo ione ferrico Fe^{3+} ed essere ossidato in ossigeno molecolare, con la parallela riduzione di Fe^{3+} in ione ferroso Fe^{2+} (Reazione 4).
5. L'acqua ossigenata può essere dissociata tramite il metodo Fenton, il quale rientra nelle tecniche di ossidazione avanzata. Dal punto di vista chimico,

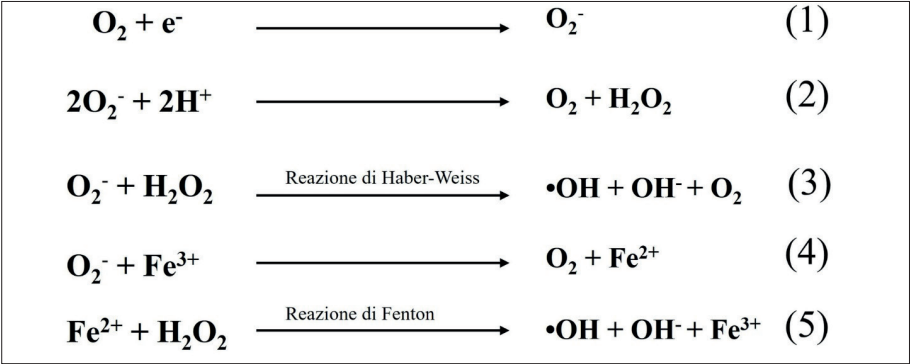


Fig. 1 Schematizzazione delle reazioni chimiche alla base della formazione delle «Reactive Oxygen Species» (da: M. Reverberi, M. Ruocco, L. Covarelli, L. Sella, 2022, «Patologia vegetale molecolare», Piccin, Padova, pp. 448-452). Abbreviazioni: e⁻, elettrone; Fe²⁺, ferro bivalente; Fe³⁺, ferro trivalente; H⁺, idrogeno; H₂O₂, acqua ossigenata; O₂, ossigeno; OH⁻, idrossido

il perossido di idrogeno viene scisso in idrossile e ione idrossido e tale reazione è promossa dalla presenza di sali di metalli di transizione (ad esempio di ferro) (Reazione 5).

La tabella 1 riassume le principali caratteristiche delle ROS.

ROS	T _{1/2}	DISTANZA MIGRATORIA	REAZIONE	SITO DI PRODUZIONE	SISTEMA SCAVENGER
Anione superossido (O ₂ ⁻)	1-4 μs	30 nm	Reagisce con proteine Fe-S Dismutato con H ₂ O ₂	Apoplasto, cloroplasto, mitocondrio, perossisoma	SOD, flavonoidi, ascorbato
Radicale idrossilico (•OH)	1 ns	1 nm	Estremamente reattivo con tutte le biomolecole inclusi DNA, RNA, lipidi e proteine	Ferro e H ₂ O ₂ (Reazione di Fenton)	Flavonoidi, prolina, zuccheri, ascorbato
Perossido d'idrogeno (H ₂ O ₂)	>1 ms	>1 μm	Reagisce con proteine legate ai residui di cisteina e metionina	Perossisoma, cloroplasto, mitocondrio, citosol, apoplasto	APX, CAT, GPX, PER, PRX, ascorbato, glutazione
Ossigeno singoletto (¹ O ₂)	1-4 μs	30 nm	Ossida lipidi, proteine (residui di Trp, His, Tyr, Met e Cys) e residui G di DNA	Membrane, cloroplasti, nuclei	Carotenoidi e α-tocoferoli

Tab. 1 Proprietà e reattività di alcune «Reactive Oxygen Species» (ROS). Abbreviazioni: APX, ascorbato perossidasi; CAT, catalasi; GPX, glutazione perossidasi; PER, perossidasi; PRX, perossiredossina; RBOH, NADPH ossidasi; SOD, superossido dismutasi; t_{1/2}, tempo di dimezzamento (modificato da R. Mittler, 2017; <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.08.002>)

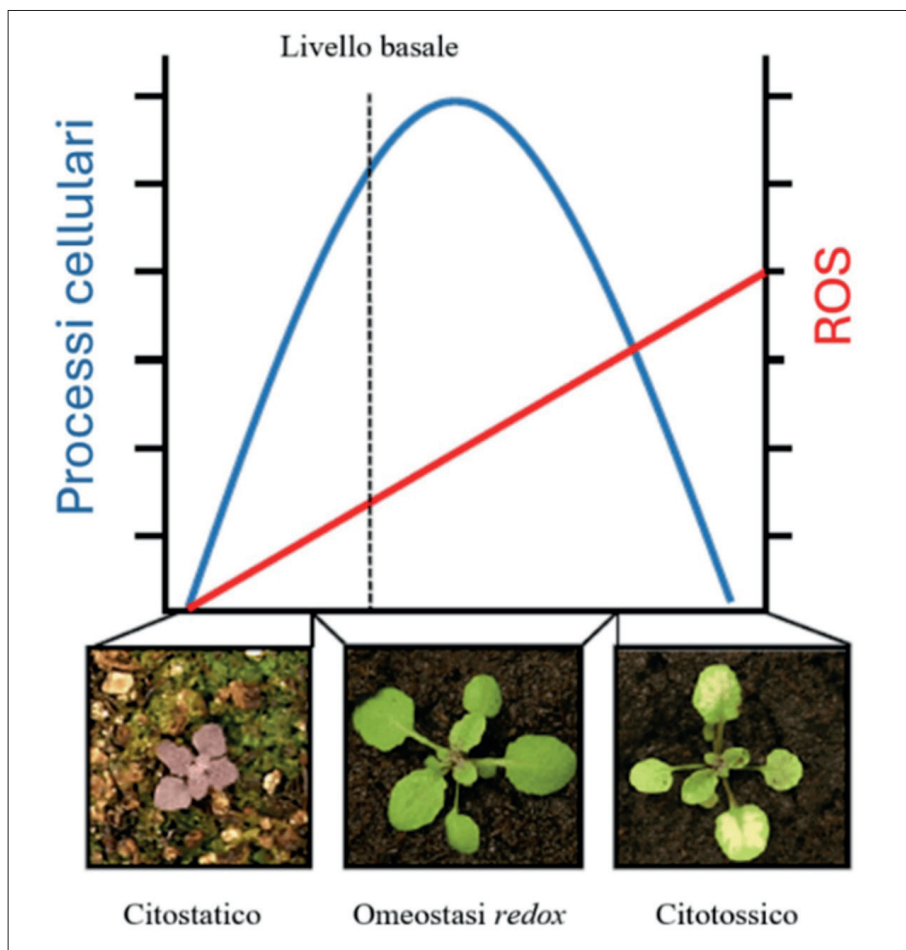


Fig. 2 Schematizzazione grafica della dipendenza dei processi cellulari dalle concentrazioni delle «Reactive Oxygen Species» (ROS). La curva a campana rappresenta la dipendenza dal mantenimento di processi cellulari adeguati per l'aumento delle concentrazioni di ROS (linea retta). Il normale metabolismo delle piante richiede quindi una gamma ottimale di livelli di queste specie che consentono di raggiungere il massimo potenziale di crescita e sviluppo (modificato da R. Mittler, 2017; <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.08.002>)

Il normale metabolismo prevede che si possano formare ROS anche in assenza di condizioni di stress: è questo il caso del mitocondrio, allorquando le reazioni di trasferimento di elettroni non sono perfettamente coordinate con la formazione di ATP e pertanto gli elettroni possono “sfuggire” e reagire

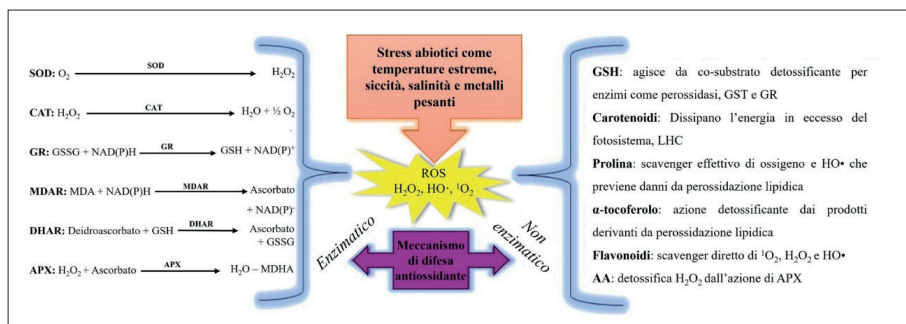


Fig. 3 Meccanismi di difesa antiossidante enzimatici e non-enzimatici delle piante.

Abbreviazioni: AA, acido ascorbico; APX, ascorbato perossidasi; CAT, catalasi; DHAR, deidroascorbato riduttasi; GR, glutazione riduttasi; GSH, glutatione; GSSG, glutatione ossidato; GST, glutatione S-transferasi; $HO\bullet$, radicale idrossilico; H_2O , acqua; H_2O_2 , perossido di idrogeno; LHC, «light harvesting complex»; $NAD(P)^+$, nicotinammide adenina dinucleotide fosfato ossidato; $NAD(P)H$, nicotinammide adenina dinucleotide fosfato; MDA, malondialdeide; MDAR, monodeidroascorbato; MDHA, monodeidroascorbato; $O_2\bullet^-$, ossigeno; SOD, superossido dismutasi

con ossigeno molecolare. Più in generale, non vi è dubbio che le ROS siano presenti anche nella cellula “sana”: da tempo si è dimostrato come esse siano essenziali per garantire un corretto sviluppo dei processi cellulari di piante e animali. Ad esempio, il superossido è prodotto nel cloroplasto quando gli elettroni sono trasferiti direttamente dal fotosistema I (PSI) all' O_2 ; esso (insieme a H_2O_2) è anche necessario per la lignificazione e funziona da segnale nella risposta di difesa contro le aggressioni da patogeni. Altre azioni fisiologiche note sono la stimolazione della divisione e la differenziazione cellulare. La dipendenza delle funzioni vitali dalle ROS può essere illustrata da una tipica curva “a campana” (fig. 2): l'*optimum* dipende da parametri ambientali, tipologia di cellula e infiniti altri fattori che influenzano l'intero individuo. Un eccesso, ma anche un difetto, di ROS sono condizioni ostili per la salute della pianta, la quale deve cercare di mantenere un adeguato equilibrio *redox*, tra i livelli citostatici e quelli citotossici.

In realtà la pianta dispone di appropriati meccanismi per prevenire l'ossidazione dei propri componenti cellulari (fig. 3). Tra i sistemi difensivi di natura catalitica, troviamo le superossido dismutasi (SOD), che convertono il superossido in H_2O_2 (anch'esso citotossico), il quale, a sua volta, è decomposto dalle catalasi a H_2O e O_2 ; le perossidasi riducono H_2O_2 a H_2O , utilizzando una gamma di donatori di elettroni presenti nella cellula. Radicali liberi sono neutralizzati anche mediante reazione diretta (reversibile o meno) con antiossidanti (molecole che fungono da accettori di elettroni), quali acido ascorbico

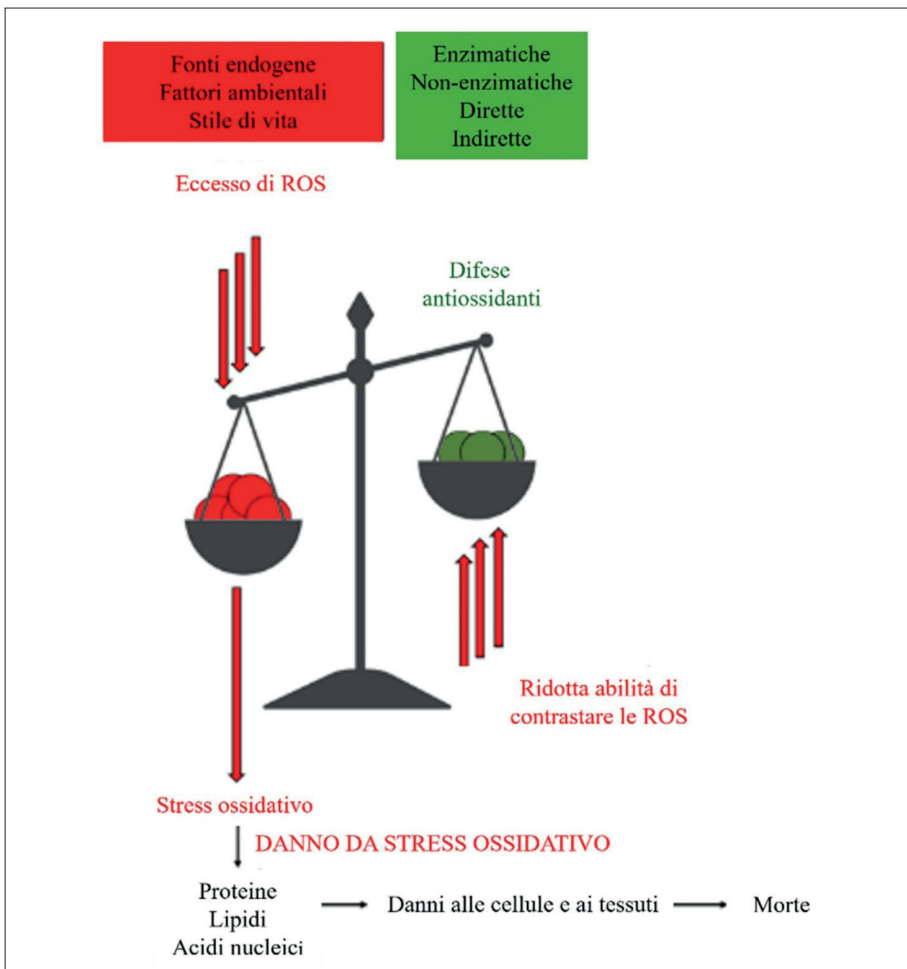


Fig. 4 Schematizzazione grafica dell'equilibrio omeostatico tra produzione e riduzione delle «Reactive Oxygen Species» (ROS)

(vitamina C), glutazione (un tripeptide composto da glicina, acido glutammico e cisteina), α -tocoferolo, β -carotene, carotenoidi (che rendono innocuo il singoletto di ossigeno) e i flavonoidi (che neutralizzano i radicali idrossilici, altrimenti non attivabili per via enzimatica). Queste sostanze sono variamente localizzate a livello subcellulare. Il tasso di rigenerazione e quello di risintesi di questi *scavenger* condizionano l'esito della risposta all'attacco ossidante. Pertanto, è fondamentale che si instauri un equilibrio dinamico (omeostatico) tra produzione e riduzione di ROS; nel caso di prevalenza dell'accumulo di radicali liberi la cellula entra in sofferenza (fig. 4).

Lo stress ossidativo ha attirato l'attenzione di numerosi specialisti nel campo della Biologia: così, in Medicina umana troviamo come le ROS risultino coinvolte in numerosi stati patologici, cronici o acuti, dall'infarto al miocardio ai tumori, all'ictus, alla riduzione della longevità, ai morbi di Parkinson e di Alzheimer, all'aterosclerosi e ai processi infiammatori in genere. Una semplice ricerca per campi basata sulle parole chiave "*oxidative stress*" su una importante banca dati citazionale (Scopus, Elsevier, Amsterdam, Netherlands) individua in oltre 30.000 i lavori intercettati ogni anno al giorno d'oggi; erano circa 4.000 all'inizio di questo secolo. Per "*plants and oxidative stress*" i dati sono, rispettivamente, 4.000 e 300. Anche l'opinione pubblica è ormai consapevole dell'importanza della gestione dello stress ossidativo per il mantenimento di una buona condizione di salute. Non sorprende il successo commerciale di una serie di "integratori antiossidanti" per una supplementazione mirata della dieta.

CAMBIAMENTO CLIMATICO, PIANTE E STRESS OSSIDATIVO

Il cambiamento climatico consiste in una modificazione multidimensionale e simultanea nella intensità, frequenza e durata di numerosi parametri (a cominciare dalla temperatura) che influenza tutti gli organismi (animali, vegetali e microbici), imponendo loro condizioni di stress che modificano le prestazioni fisiologiche e produttive delle piante e gli equilibri tra specie nei sistemi complessi. I cambiamenti climatici ci sono sempre stati, nella storia del Pianeta, ma i fenomeni ai quali abbiamo assistito negli ultimi 150 anni, primo tra tutti il riscaldamento climatico, sono anomali e conseguenza delle attività antropiche. A partire dalla rivoluzione industriale l'uomo ha emesso in atmosfera milioni di tonnellate di gas serra, primo tra tutti il diossido di carbonio, o anidride carbonica (CO₂). Tra le principali conseguenze di questo fenomeno possiamo citare l'aumento della temperatura media del Pianeta di 0,98 °C in media, che ha portato a una diminuzione dei ghiacciai di circa il 12,8% per decennio, mentre i registri delle maree costiere mostrano un aumento medio annuo di 3,3 mm del livello del mare dal 1870. Lo stress ossidativo è una condizione a cui vanno incontro gli organismi quando sono esposti a queste nuove situazioni. L'ottimizzazione della risposta fisiologica a questo stress sarà probabilmente la chiave per la sopravvivenza.

Squilibri termici e stress ossidativo

La temperatura superficiale del pianeta (sia delle terre emerse che dei corpi d'acqua) sta aumentando rispetto ai dati di riferimento relativi all'era prein-

dustriale (fine XVIII secolo). Non è questa la sede per discutere le cause del fenomeno, ma la comunità scientifica è concorde nell'individuare nelle attività antropiche e, in particolare nell'utilizzo di combustibili da fonti fossili (solidi, liquidi o gassosi) e nella conseguente liberazione in atmosfera di ingenti quantità di CO₂ la (quasi) totale responsabilità del fenomeno, che viene comunemente descritto come "effetto serra". Oggi la concentrazione media di CO₂ in troposfera si aggira intorno a 420 ppm (era molto meno di 300 ppm due secoli fa), e la temperatura è aumentata di almeno 1,5 °C rispetto al periodo di riferimento. Le variazioni termiche interessano tutti i periodi dell'anno, in termini sia di valori minimi che massimi, oltre – ovviamente – alle medie.

Tutte le funzioni vitali sono termo-dipendenti: dalla cinetica di un enzima, alla dinamica di popolazione di ecosistema. Anche per quanto riguarda il mondo vegetale, tra i fattori ambientali, la temperatura è quello che influenza notevolmente la crescita delle piante. Infatti, da essa sono strettamente dipendenti sia il processo fotosintetico, che la respirazione cellulare. I tessuti vegetali disidratati possono sopravvivere a temperature molto più alte rispetto a quelli in attivo accrescimento vegetativo. Ad esempio, i granuli pollinici del pino rosso tollerano picchi di temperatura di 70 °C e i semi dell'erba medica possono sopportare addirittura i 120 °C.

Le conseguenze degli squilibri termici sugli organismi vegetali possono essere distinte tra quelle a medio-lungo e breve termine. Ogni vegetale presenta proprie specificità nei confronti delle due temperature critiche ("cardinali"), la minima e la massima, al di sotto o al di sopra delle quali le funzioni vitali si arrestano, per riprendersi (eventualmente) con valori più idonei. Più in dettaglio, nella stessa pianta le diverse funzioni fisiologiche mostrano limiti ed esigenze termiche diverse. Questi parametri determinano la localizzazione degli areali di distribuzione geografica delle specie e la loro capacità competitiva nei confronti degli altri *taxa*. È inevitabile che i mutati scenari ambientali comportino, nel tempo, variazioni negli equilibri biologici, anche in relazione a eventuali interazioni complesse, come il ruolo degli impollinatori o quello degli organismi nocivi.

Ma è nelle situazioni di tipo acuto (alta intensità, breve durata) che si riscontrano gli effetti più eclatanti dell'impatto sulla vita vegetale. A livello biochimico e molecolare, le alte temperature inducono modifiche a carico della composizione delle membrane cellulari e tilacoidali, con alterazione del passaggio di ioni, disaccoppiamento dei meccanismi di assorbimento della luce (a causa della riduzione della quantità di pigmenti fotosintetici) e del trasporto elettronico (dovuto all'inibizione dell'attività del fotosistema II, PSII). Inoltre, lo *shock* termico può danneggiare la frazione proteica di membrana con conseguente precipitazione delle proteine cellulari. Nell'ambito degli stress

da bassa temperatura, è possibile distinguere tra freddo (*chilling*, tra 0 e +10 °C) e gelo (*freezing*, valori al di sotto del punto di congelamento dei tessuti). Nel primo caso, viene osservata una riduzione della crescita vegetativa con la progressiva formazione di lesioni fogliari e il contemporaneo blocco della funzionalità del sistema radicale. Invece, il *freezing* provoca la generazione di cristalli di ghiaccio negli spazi intercellulari (ghiaccio extracellulare) portando a un abbassamento della tensione di vapore in grado di richiamare attivamente l'acqua dall'interno delle cellule.

Un effetto del cambiamento climatico è rappresentato dall'occorrenza delle "ondate di calore", condizioni meteo estreme, caratterizzate da episodi di caldo intenso e prolungato. La responsabilità è attribuita ai variati equilibri atmosferici, con significative modifiche alla circolazione delle masse d'aria, cosicché l'anticiclone africano è libero di effettuare incursioni sempre più frequenti sull'area mediterranea, a seguito di un indebolimento dell'anticiclone delle Azzorre. Secondo la *World Meteorological Organization* un'ondata di calore si ha quando si verificano almeno sei giorni consecutivi in cui la temperatura massima è superiore al 90° percentile di quel determinato giorno rispetto al periodo climatologico di riferimento (1981-2010, o se disponibile 1991-2020). Tali condizioni rappresentano un rischio, di natura cardiaca e non solo, per la salute della popolazione, soprattutto anziana e fragile, a causa dello stress a cui viene sottoposto l'organismo. In Europa, sono stati stimati in oltre 60.000 i decessi attribuibili alle temperature estreme dell'estate 2022 (18.000 in Italia).

Nella valutazione degli effetti delle ondate di calore sulla vita vegetale occorre considerare che, spesso, le elevate temperature sono accompagnate da analoghi periodi di siccità. In funzione di regime termico (in particolare delle massime), durata dell'esposizione, periodo dell'anno, capacità adattative della pianta e disponibilità idrica, gli effetti negativi sulle prestazioni fisiologiche sono molto variabili. In realtà il ruolo dell'acqua è strategico: il raffrescamento evaporativo attraverso il *Soil-Plant-Atmosphere-Continuum* può aiutare a ritardare e ridurre i danni. La figura 5 riassume le principali risposte di una specie arborea durante un'ondata di calore, al variare della disponibilità idrica. Andando più nello specifico, una prima strategia di difesa alle alte temperature è legata all'aumento dei livelli di saturazione di acidi grassi dei lipidi di membrana allo scopo di ridurre e/o impedire il progressivo incremento di fluidità. Un'altra via di riparazione è rappresentata dall'accumulo intracellulare di soluti compatibili e dall'attivazione del sistema antiossidante. Infine, le cellule vegetali possono reagire allo *shock* termico attraverso la sintesi di specifiche proteine, denominate *Heat Shock Proteins* (HSP), che riconoscendo e legandosi a proteine denaturate o in uno stato instabile, sono in grado di

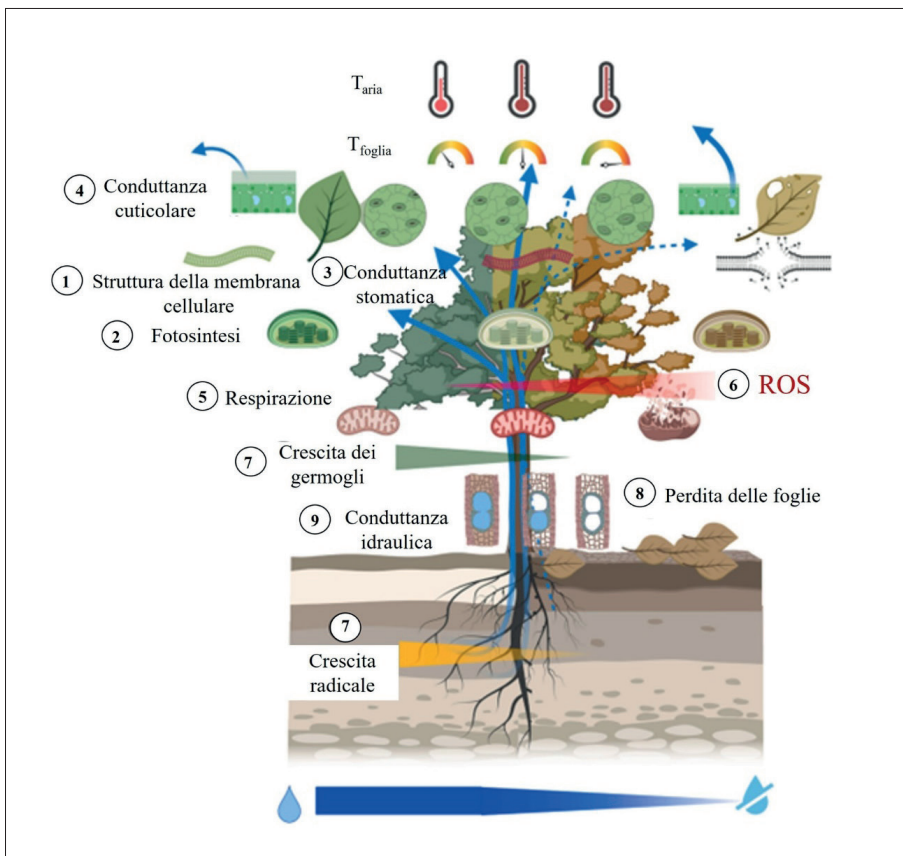


Fig. 5 Schematizzazione grafica delle principali risposte di una specie arborea durante un'ondata di caldo quando la disponibilità di acqua diminuisce. Abbreviazioni: T_{aria} temperatura dell'aria; T_{foglia} temperatura delle foglie (modificato da R. López et al., 2022; <https://doi.org/10.1016/j.flora.2022.152148>)

stabilizzarle e ripararle. Riguardo allo stress da freddo/gelo, i meccanismi di difesa attivati dalle piante sono molto simili a quelli messi in atto in condizioni di stress idrico e salino. Per stabilizzare proteine e membrane durante la disidratazione indotta dalle basse temperature, le cellule possono rispondere incrementando la sintesi di osmoliti compatibili che in tal caso sono definiti “crioprotettivi”, come saccarosio, raffiniosio, fruttani e sorbitolo. In più, la criostabilità delle membrane può essere favorita dall'aumento dei livelli di desaturazione degli acidi grassi. Infine, la regolazione stomatica controllata dall'ABA è un'ulteriore strategia di difesa attuata dalla pianta per tollerare le basse temperature, così come avviene in condizioni di *deficit* idrico.

Carenza idrica (o, meglio, siccità) e stress ossidativo

Il termine “siccità” indica una condizione naturale e temporanea in cui si manifesta una severa diminuzione della disponibilità idrica di norma a seguito di carenza di precipitazioni. I nuovi scenari climatici sono caratterizzati anche da una irregolarità di regimi e modelli pluviometrici, che spesso intervallano lunghi/lunghissimi periodi di asciutta a nubifragi e altri eventi catastrofici, come le “alluvioni lampo”. L'aumento delle temperature, poi, comporta un incremento dei fenomeni di evapotraspirazione, con conseguente ulteriore ridotta disponibilità di acqua per le radici.

Nelle nostre regioni stiamo assistendo a un aumento significativo delle superfici di terreno agrario interessate da situazioni di estrema aridità. L'acqua costituisce l'80-85% del peso fresco di una pianta e svolge ruoli strategici: (i) è reagente nella fotosintesi e partecipa a tutti i processi idrolitici, (ii) consente il trasporto a distanza dei soluti, (iii) regola la temperatura mediante i processi di traspirazione, (iv) assicura il turgore cellulare che è una condizione necessaria per il rigonfiamento e la crescita cellulare, e così via. È inevitabile che la carenza idrica rappresenti di gran lunga la principale manifestazione di stress abiotico nel mondo vegetale, fattore limitante le prestazioni produttive e responsabile primario della distribuzione naturale delle specie. Di norma, esso si abbina ad altre condizioni ostili, come l'eccesso di temperatura e la salinizzazione del substrato. La successione di sintomi che caratterizzano lo stress idrico inizia con l'epinastia (anomalo allargamento dell'angolo di inserzione del picciolo fogliare sul ramo che provoca una curvatura verso il basso della lamina), che precede appassimento (la temporanea perdita di turgore da parte delle cellule; fenomeno elastico, cioè reversibile), clorosi e necrosi fogliare, e, infine, avvizzimento (con plasmolisi, ovvero riduzione del volume cellulare e successivo distacco della membrana plasmatica dalla parete cellulare; plastico, definitivo). Segue la morte dell'individuo se non si ristabiliscono condizioni minime di disponibilità di acqua.

Le piante hanno evoluto strategie di resistenza e adattamento per sopravvivere ed espletare le proprie prestazioni fisiologiche in ambienti asciutti (figg. 6-7): si va da *escape* (raccorciamento del ciclo per evitare i periodi più ostili), ad *avoidance* (riduzione delle perdite per traspirazione attraverso la regolazione delle aperture stomatiche e l'aumento dell'attività radicale), a *tolerance* (diminuzione di biomassa, aggiustamento osmotico attraverso l'accumulo di soluti osmoticamente attivi, difesa antiossidante).

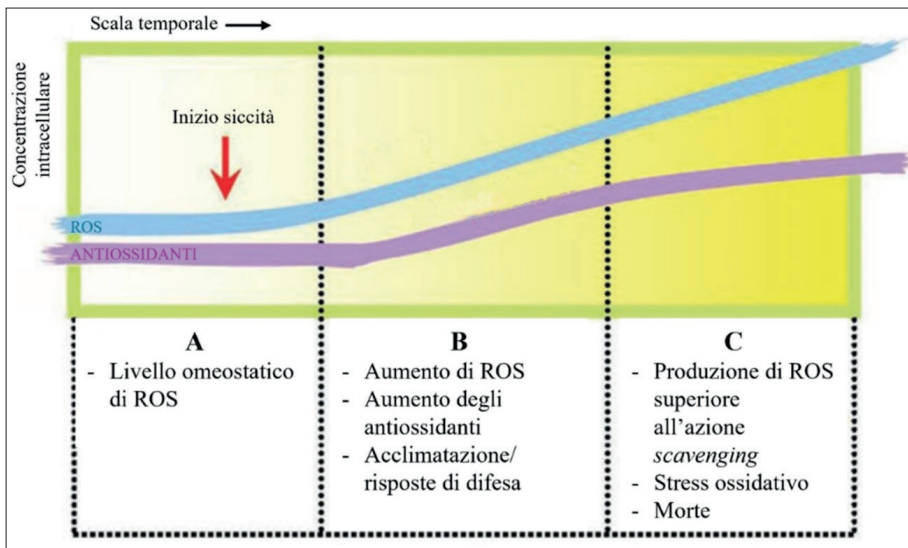


Fig. 6 Schematizzazione grafica del livello omeostatico di ROS alterato dalla siccità (A); l'aumento della produzione di «Reactive Oxygen Species» (ROS) a causa della chiusura stomatica cambia l'equilibrio attivando così le risposte di difesa (B); se prolungato, lo stress da siccità comporta una produzione elevata di ROS che non può essere bilanciata dal sistema antiossidante, portando a eventi ossidativi dannosi che provocano la morte cellulare (C) (modificato da M.H. Cruz de Carvalho, 2008; <https://doi.org/10.4161/psb.3.3.5536>)

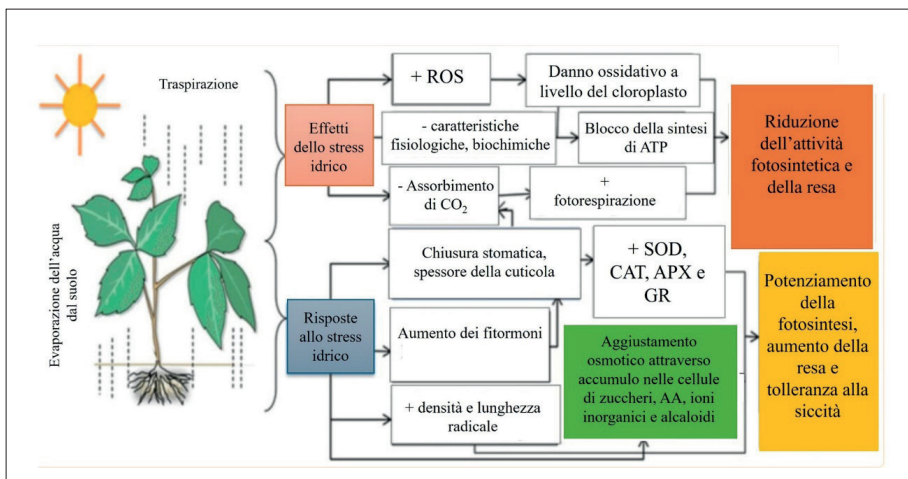


Fig. 7 Schematizzazione grafica di effetti avversi e adattamenti delle piante alla siccità (modificato da M. Seleiman et al., 2021; <https://doi.org/10.3390/plants10020259>). Abbreviazioni: SOD, superossido dismutasi; CAT, catalasi; APX, ascorbato perossidasi; GR, glutathione reduttasi; ATP, adenosina trifosfato; CO_2 , diossido di carbonio; AA, aminoacidi

Salinizzazione della falda e stress ossidativo

Le nuove condizioni climatiche e, in particolare l'irregolarità delle precipitazioni, contribuiscono all'accumulo di sali solubili nel terreno, con implicazioni sulla fisiologia (e produttività) delle piante e sulla struttura stessa del substrato. La salinizzazione della falda assume particolare importanza anche in agricoltura, causando una minore resa. Per questa ragione, spesso si ricorre all'uso di fertilizzanti per reintegrare i composti carenti. Tuttavia, l'uso intensivo di tale pratica, insieme all'avanzamento del cuneo salino nelle aree costiere, contribuisce all'aumento dei sali nel terreno. Questo fenomeno porta a gravi conseguenze sull'agricoltura e sull'ambiente, compromettendo la produzione alimentare (diminuzione di fertilità del suolo e disponibilità di terreni coltivabili) e la sostenibilità delle risorse idriche. Nelle aree costiere, il fenomeno è anche attribuibile all'intrusione di acqua salmastra, in relazione anche all'innalzamento del livello marino a seguito della fusione dei ghiacciai e dell'aumento di volume correlato con le nuove condizioni termiche. Sono in particolare quattro i cationi principali (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+}) e cinque gli anioni (HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} e CO_3^{2-}) che contribuiscono alla salinità, così come misurata in termini di conducibilità elettrica di un estratto saturo.

La salinizzazione dei suoli può causare nelle piante almeno due tipi di stress: il primo riguarda l'alterazione dello stato idrico, dovuto una riduzione dell'approvvigionamento di acqua provocato dalla diminuzione della capacità dei tessuti radicali di assorbirla nel terreno poiché il suo potenziale idrico (Ψ_w) diventa più negativo man mano che cresce la concentrazione di ioni in soluzione (con conseguente stress osmotico; fig. 8). Il secondo è dovuto alla tossicità indotta nei tessuti vegetali dall'alta concentrazione di alcuni ioni (quali Na^+ e Cl^-). In merito a questo, è importante sottolineare che qualsiasi elemento è in grado di risultare letale oltre una determinata soglia; tuttavia, ci sono alcuni elementi, nello specifico Na^+ , B^- e Cl^- , che possono raggiungere livelli di tossicità estrema a concentrazioni realmente e facilmente riscontrabili. In linea generale, l'impatto della salinità è abbastanza diretto, per questo viene definito "shock salino", e alcune delle conseguenze di questo stress sulla vegetazione sono danni a processi fotosintetici, respirazione e metabolismo proteico, causati dalla perdita di permeabilità delle membrane, e la produzione di ROS, con seguenti effetti dannosi su lipidi di membrana, organuli, enzimi e acidi nucleici. Per quanto riguarda la tossicità ionica, l'alterazione del pH e dell'equilibrio osmotico, la competizione con altri elementi essenziali, l'incremento consistente della produzione di ROS, l'interferenza con i potenziali di membrana e, quindi, la compromissione delle attività delle pompe

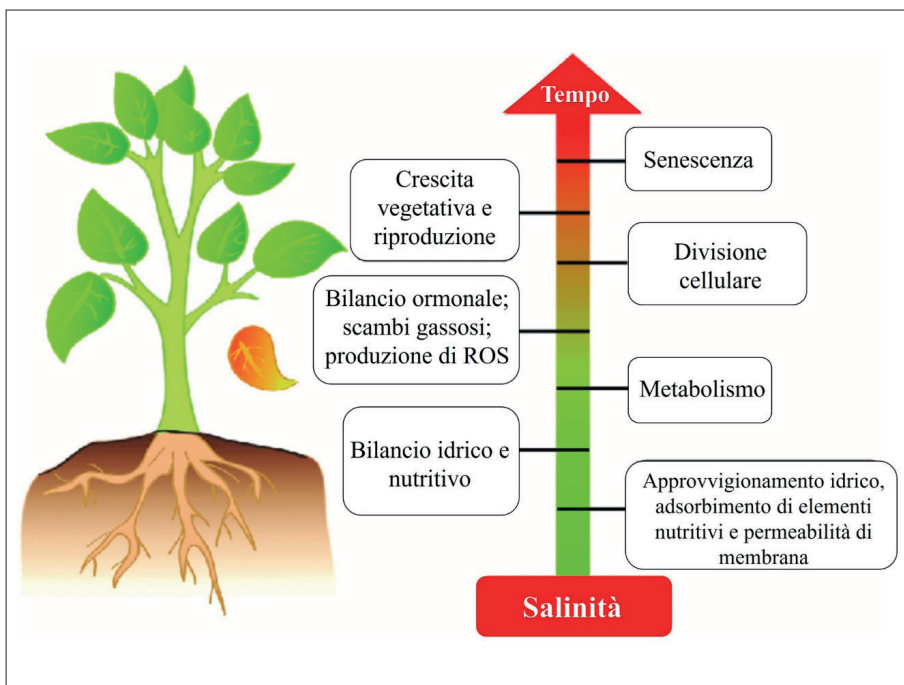


Fig. 8 Schematizzazione grafica di ipotetici cambiamenti nella fisiologia di piante in condizioni di stress salino. Abbreviazioni: ROS, «Reactive Oxygen Species»

protoniche con tutte le conseguenze che ne derivano (una per tutte la perdita di turgore cellulare), sono solo alcuni degli aspetti su cui influisce l'iper-bio-disponibilità salina.

Nelle piante suscettibili, la resistenza a livelli moderati di salinità nel terreno dipende in parte dalla capacità delle radici di prevenire il raggiungimento dei germogli, da parte di ioni potenzialmente dannosi. Come succede anche in presenza di carenza d'acqua, le cellule vegetali possono regolare il loro Ψ_w in risposta allo stress salino abbassando il loro potenziale osmotico. Due processi intracellulari che contribuiscono alla diminuzione di quest'ultimo sono: accumulo di ioni nel vacuolo e sintesi di soluti compatibili nel citosol. Questa compartimentazione, che può avvenire a sia livello epigeo, che ipogeo, viene definita *avoidance* cito-istologica. Inoltre, le piante possono tollerare questi stress avvalendosi di: esclusione (chiusura stomatica, sopra descritta), assorbimento selettivo, compartimentazione ed espulsione (per guttazione o attraverso essudati radicali), riducendo la superficie fogliare e/o lasciando cadere direttamente le foglie tramite l'abscissione.

Squilibri luminosi e stress ossidativo

La luce ha un ruolo chiave nella vita delle piante, non solo perché rappresenta una fonte insostituibile di energia, ma anche per la sua influenza sulle attività di crescita, sviluppo e riproduzione. Lo spettro della radiazione solare può essere suddiviso in “sezioni”, che giocano ruoli diversi e più o meno importanti nella vita delle piante, tre delle quali sono: ultravioletto (100-400 nm), visibile (400-700 nm) e infrarosso vicino (700-1300 nm). La radiazione nel visibile viene utilizzata dalle piante per il processo fotosintetico, mentre la luce nella prima e nella terza regione viene impiegata per processi quali la fotomorfogenesi (regolazione della crescita e dello sviluppo della pianta da parte della luce) e il fototropismo (orientamento della pianta, o parti di essa, rispetto alla luce). Ne deriva che l'intensità della luce è un fattore fondamentale che controlla più funzioni vegetali come crescita delle foglie, germinazione dei semi, divisione cellulare, fotosintesi, fioritura ed espansione delle gemme.

In condizioni ordinarie, la fotosintesi è direttamente proporzionale alla quantità di radiazione assorbita (*Photosynthetic Photon Flux Density*), fino al raggiungimento di uno stato stazionario denominato “punto di saturazione”. Quando, però, la radiazione che raggiunge la pianta supera la capacità di fissazione, si attivano dei meccanismi che dissipano termicamente l'energia in eccesso. Nelle condizioni in cui l'intensità luminosa e i tempi di esposizione non rispecchiano le necessità delle piante, si verificano condizioni di stress. In caso di irradianza elevata per un periodo d'esposizione prolungato, l'apparato fotosintetico può essere danneggiato, con conseguenze deleterie in termini di capacità assimilativa della pianta (fotoinibizione). Dall'altro lato, lo stress da scarsa illuminazione ostacola la circolazione di acqua, sostanze nutritive e prodotti fotosintetici che causano importanti perdite nella resa. L'ombreggiamento porta anche a modifiche morfo-anatomiche e fisiologiche. Per esempio, piante cresciute in ombra spesso manifestano la cosiddetta *Shade Avoidance Syndrome* e sono caratterizzate da steli allungati, internodi molto pronunciati e lamina fogliare più ampia, sottile e con un maggior contenuto di clorofilla, atta a massimizzare l'assorbimento della (scarsa) luce incidente. Ovviamente, come per qualsiasi altro tipo di stress, la risposta all'eccesso luminoso è influenzata dalle modalità di esposizione: se graduale permette di contenere gli effetti negativi, non solo attivando meccanismi di difesa, ma anche mettendo in opera cambiamenti morfologici. Si deve inoltre considerare lo stato di benessere complessivo della pianta e la presenza concomitante di ulteriori stress; ad esempio, carenza idrica, alte temperature e presenza di inquinanti rendono la pianta più sensibile anche a irradianze normalmente non dannose.

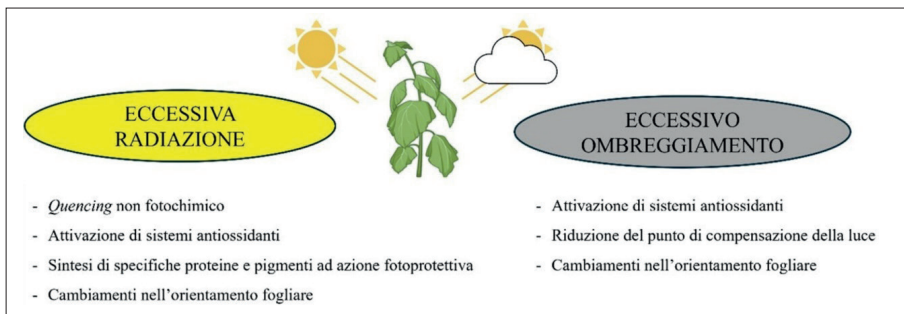


Fig. 9 Schematizzazione grafica di adattamenti delle piante agli squilibri luminosi

A livello biochimico, le principali strategie di difesa messe a punto dalle piante sono il *quenching* non fotochimico (che vede protagonisti i carotenoidi) e l'attivazione di sistemi antiossidanti in grado di contrastare le ROS, la riparazione del danno fotochimico e la sintesi di specifiche proteine (ad esempio la famiglia delle *Early light-induced proteins*) e pigmenti ad azione fotoprotettiva, come antociani e flavonoidi in senso lato. Nei casi, invece, di scarsa illuminazione la pianta si adatta ad assorbire quanta più energia luminosa possibile per ottimizzare il processo fotosintetico; generalmente, in questi casi la pianta tende a ridurre il suo punto di compensazione della luce e di saturazione (fig. 9).

Inquinamento da ozono e stress ossidativo

Le aumentate temperature, specie nella stagione estiva, nonché la prevedibile maggiore intensità della radiazione solare (conseguenza, ad esempio, della minore presenza di nuvole), costituiscono fattori favorevoli alle reazioni fotochimiche che portano alla formazione di ozono (O_3) nella troposfera. In breve, l'elevato calore che accompagna molti processi di combustione (ad esempio traffico veicolare e riscaldamento domestico) rompe l'inerzia chimica caratteristica della molecola di azoto a condizioni ordinarie e consente la sintesi di monossido di azoto (NO), la cui ossidazione spontanea genera biossido di azoto (NO_2), destinato a subire velocemente una fotolisi da parte della radiazione ultravioletta. Il singoletto di ossigeno così prodotto si combina con una molecola biatomica e dà luogo a O_3 , che tende ad accumularsi (fig. 10). In realtà sono numerose le sostanze che partecipano allo "smog fotochimico", tra le quali anche i composti organici volatili di origine bio-

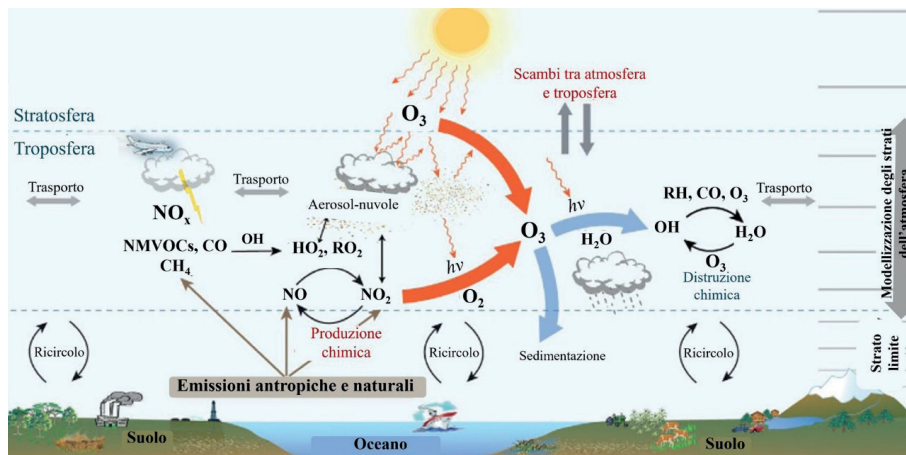


Fig. 10 Schematizzazione grafica dei processi chimici e fisici che si verificano normalmente portando alla formazione dell'ozono troposferico (modificato da P.J. Young et al., 2018; DOI: <https://doi.org/10.1525/elementa.265>). Abbreviazioni: CH₄, metano; CO, monossido di carbonio; HO₂, idroperossido; H₂O, acqua; NMVOCs, composti organici volatili non metanici; NO_x, ossidi di azoto; NO, monossido di azoto; NO₂, diossido di azoto; O₂, ossigeno; O₃, ozono; OH, idrossido; RH, radicale peridrossile; RO₂, radicali perossido

genica (BVOCs). I nuovi scenari climatici comportano un'aumentata emissione di BVOCs e una maggiore liberazione di ossidi di azoto da parte della microflora tellurica.

La tossicità di O₃ nei confronti di tutti gli organismi è nota da tempo e le piante rappresentano un bersaglio particolarmente sensibile. Il processo fitotossico dell'O₃ non è ancora del tutto chiaro: il gas entra nella foglia attraverso le aperture stomatiche e mediante una serie di passaggi arriva nella soluzione acquosa dell'apoplasto, dove rapidamente degrada in diversi derivati dell'O₂, responsabili dello stress ossidativo (ROS). I sintomi che le piante presentano a seguito di esposizioni croniche consistono in una riduzione della crescita e dell'attività fotosintetica, così come una senescenza anticipata; invece, quelli derivanti da esposizioni acute sono caratterizzati nelle specie sensibili da morte cellulare con danni visibili. In generale, gli effetti macroscopici visibili sulle piante esposte a O₃ sono una iniziale aspecifica clorosi fogliare diffusa, seguita da fenomeni di "bronzatura" o da comparsa di necrosi puntiformi (*stippling*) o localizzate (*flecking*). I sintomi sopra descritti si manifestano in maniera anche molto diversa tra loro in base alla specie colpita; tuttavia, quello più diffuso è l'induzione prematura della senescenza, non sempre rilevabile in campo. A questi effetti si aggiungono anche quelli che coinvolgono aspetti biochimici e fisiologici (danni "subliminali") responsabili della riduzione della crescita e dei

livelli quali-quantitativi della produzione. Nell'insieme, tali processi possono essere definiti "sindrome da stress da O_3 ".

Le piante possono adottare due linee di difesa nei confronti di questo inquinante: la prima è rappresentata dalla chiusura stomatica indotta dall'ABA, mentre la seconda è basata sulla degradazione della molecola in ROS quali H_2O_2 , O_2^- e OH e la loro successiva detossificazione (ciclo di Halliwell-Asada).

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Gli stress ambientali influiscono negativamente sulla crescita e sullo sviluppo di tutti gli organismi. Tali condizioni avverse alterano il metabolismo delle ROS; infatti, se le concentrazioni di tali specie superano i meccanismi difensivi, si ha un'alterazione dell'omeostasi *redox*, danneggiando così le macromolecole biologiche e risultando in uno stress ossidativo e morte delle cellule. Tuttavia, se il livello delle ROS è mantenuto al di sopra di quello citostatico e al di sotto di quello citotossico, esse possono giocare anche un ruolo "positivo", regolando non solo proliferazione e differenziazione cellulare, ma anche il generale metabolismo sia degli organismi animali che vegetali.

Tuttavia, le attività antropogeniche stanno inducendo dei rapidi cambiamenti nella composizione dell'atmosfera, alterando non solo i globali flussi energetici, ma anche i tassi di precipitazione e di temperatura. Tutto ciò inasprisce gli eventi climatici estremi, come le ondate di calore, fenomeni di siccità estrema e inondazioni. Gli organismi possono fronteggiare le sfide del cambiamento climatico attraverso due meccanismi biologici, la migrazione e la plasticità. Le piante di domani dovranno essere necessariamente diverse da quelle di ieri, perlomeno per quanto riguarda la capacità di adattarsi alle condizioni climatiche estreme e di rispondere dal punto di vista molecolare e biochimico al generale aumento delle ROS legato ai futuri (e più frequenti) stress ossidativi indotti dal cambiamento climatico.

BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

- ADAMS III W.W., ZARTER C.R., MUEH K.E., AMIARD V., DEMMIG-ADAMS B. (2008): *Energy dissipation and photoinhibition: A continuum of photoprotection*, in DEMMIG-ADAMS B., ADAMS W.W., MATTOO A.K. (Eds.), *Photoprotection, Photoinhibition, Gene Regulation, and Environment, Advances in Photosynthesis and Respiration*, vol. 21, Springer, Dordrecht.
- AHAMMED G.J., YU J.Q. (2016): *Plant hormones under challenging environmental factors*, Springer Dordrecht.

- BECHTOLD U., FIELD B. (2018): *Molecular mechanisms controlling plant growth during abiotic stress*, «Journal of Experimental Botany», 69, pp. 2753-2758.
- BELLI G. (2012): *Elementi di Patologia vegetale*, Piccin Nuova Libreria.
- FENG G.Q., LI Y., CHENG Z.-M. (2014): *Plant molecular and genomic responses to stresses in projected future CO₂ environment*, «Critical Reviews in Plant Sciences», 33, pp. 238-249.
- FOYER C. (2018): *Reactive oxygen species, oxidative signaling and the regulation of photosynthesis*, «Environmental and Experimental Botany», 154, pp. 134-142.
- GUPTA D.K., PALMA J.M., CORPAS F.J. (2015): *Reactive oxygen species and oxidative damage in plants under stress*, Springer International Publishing Switzerland.
- HASANUZZAMAN M., HAKEEM K.R., NAHAR K., ALHARBY H.F. (2019): *Plant abiotic stress tolerance*, Springer Nature Switzerland.
- KANGASJÄRVI J., JASPERS P., KOLLIST H. (2005): *Signalling and cell death in ozone-exposed plants*, «Plant, Cell and Environment», 28, pp. 1021-1036.
- LANDI M., ARANITI F., FLAMINI G., LO PICCOLO E., TRIVELLINI A., ABENAVOLI M., GUIDI L. (2020): *“Help is in the air”: volatiles from salt-stressed plants increase the reproductive success of receivers under salinity*, «Planta», 251, 48.
- LANDI M., ZIVCAK M., SYTAR O., BRESTIC M., ALLAKHVERDIEV S.I. (2020): *Plasticity of photosynthetic processes and the accumulation of secondary metabolites in plants in response to monochromatic light environments: A review*, «Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Bioenergetics», 1861, 148131.
- MITTLER R. (2017): *ROS are good*, «Trends in Plant Science», 22, pp. 11-19.
- NOCTOR G., REICHHELD J.P., FOYER C. (2018): *ROS-related redox regulation and signaling in plants*, «Seminars in Cell and Developmental Biology», 80, pp. 3-12.
- PÉREZ-CLEMENTE R.M., VIVES V., ZANDALINAS S.I., LÓPEZ-CLIMENT M.F., MUÑOZ V., GÓMEZ-CADENAS A. (2013): *Biotechnological approaches to study plant responses to stress*, «BioMed Research International», 13, pp. 1-10.
- SHARAD V. (2018): *Biotic and abiotic stress tolerance in plants*, Springer Verlag, Singapore.
- TAKAHASHI S., BADGER M.R. (2011): *Photoprotection in plants: a new light on photosystem II damage*, «Trends in Plant Science», 16, pp. 53-60.
- VAINONEN J.P., KANGASJÄRVI J. (2015): *Plant signalling in acute ozone exposure*, «Plant, Cell and Environment», 38, pp. 240-252.

I funghi questi sconosciuti.

Parte 1: il lato oscuro

¹ Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Agro-ambientali, Università di Pisa

² Dipartimento di Scienze Agroalimentari, Ambientali e Animali, Università di Udine

³ Accademia dei Georgofili, Comitato Consultivo sulla difesa delle piante

I. INTRODUZIONE

Alcuni anni fa è apparso sulla stampa inglese (Connor S., 2008, «The Independent», 28 novembre, fig. 1) un articolo il cui titolo era *Fungal scientists are endangered species*. Ovviamente faceva riferimento alla situazione in Gran Bretagna e si lamentava del fatto che gli scienziati che si occupavano di fare ricerche sui funghi stavano inesorabilmente diminuendo. L'articolo colpì chi scrive questo *focus* perché, come si suol dire, se Atene, allora, piangeva, Sparta, oggi, non ride. In Italia, oggi, la situazione non è certo migliore di quella descritta nel 2008 in Gran Bretagna. Forse perché quando si parla di funghi, la prima cosa che viene in mente al lettore di quotidiani sono quelli commestibili, *Boletus* e simili, o, tutt'al più, quelli velenosi che, ogni anno, qualche vittima la mietono. Se proprio ci si sforza, si può pensare alle muffe che causano il marciume dei frutti sulla credenza in cucina. Ma questi rappresentano solo una minima frazione dei funghi esistenti al mondo: i micologi si occupano di organismi che costituiscono un Regno che, per numeri, complessità e impatto sulla vita del pianeta, nulla ha da invidiare al regno delle piante o a quello degli animali.

In fin dei conti si parla di un Regno che, secondo recenti stime (Baldrian et al., 2022) include circa 6,2 milioni di specie (di cui solo 150.000 circa descritte), contro le circa 450.000 specie di piante stimate (Joppa e Pimm, 2015).

Questo *focus* non intende affrontare il tema dell'importanza che i funghi hanno in natura, del loro ruolo nel ciclo del carbonio o nei processi geologici fondamentali (Geomycologia-Gadd, 2007) ma solamente quello di richiamare l'attenzione su alcune delle interazioni, positive e negative, che i funghi hanno, direttamente o indirettamente, con gli esseri umani, nella speranza

THE INDEPENDENT FRIDAY 28 NOVEMBER 2008

NEWS

21

Facts about fungi The basics of life

■ LIFE-SAVING FUNGI

Most people living in the UK owe their lives to a fungus, *Penicillium chrysogenum*, right, the original source of the penicillin antibiotics. Also, *Tolypocladium inflatum* is the source of cyclosporin, the drug that is used to prevent rejection in organ transplants.

■ RECYCLING FUNGUS

Fungi are the ultimate recyclers, and are the only organisms capable of recycling wood because of their ability to break down lignin and cellulose. If it were not for species such as *Ganoderma applanatum*, centre right, our woodlands could not exist

■ VALUABLE FUNGI

One of most valuable fungi is *Ophiocordyceps sinensis*, the Himalayan caterpillar fungus which sells for up to £20,000 a kilo and is highly prized in Chinese traditional medicine. But white truffles - edible fruiting bodies of underground tuber fungi - can cost even more

■ DRUG-PRODUCING FUNGUS

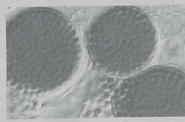
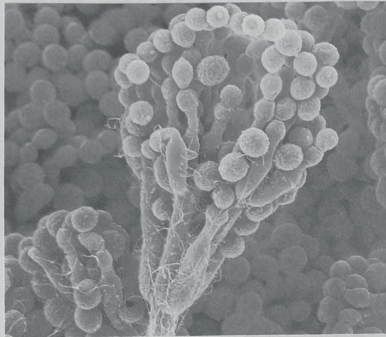
The fungus *Monascus ruber* is one of the principal sources of statin drugs, used for lowering cholesterol levels. It also causes food spoilage, and close relatives are used to make Oriental fermented foods

■ ROOT FUNGUS

Technically known as a *mycorrhiza*, 85 per cent of plants have fungus growing on their roots, without which they would be unable to thrive. The fungus actually helps the plant absorb water and nutrients from the soil and the fungus benefits from direct access to the sugars glucose and sucrose produced by the plant

■ FREEZING FUNGI

Fungal species known as ex-



Clockwise, from top left, *penicillium chrysogenum*, *monascus ruber*, *mycorrhiza*, *ophiocordyceps sinensis* and *ganoderma applanatum*

tremophiles - due to the adverse and extreme conditions they live in - have been found in Antarctica at temperatures well below 0C. On a re-

cent trip to the Antarctic, more than 450 strains of fungi were collected by the British Antarctic Survey. Steve Connor

Fungi scientists are endangered species

► Budget cuts threaten research into basics that propagate life on Earth

By Steve Connor
SCIENCE EDITOR

THEY GIVE us our daily bread and beer, provide us with life-saving medicines and recycle our waste, yet the study of fungi - life forms that include everything from penicillin to truffles - could end within the next 10 years in Britain.

Experts have warned that the science of identifying and classifying the many different species of fungi faces extinction in the UK, with less than a handful of qualified mycologists left in full-time employment by 2011 and none at all by 2018. Mycology - the study of fungi - is no longer taught as a distinct subject in British universities and budget cuts have led to fewer scientists engaged in taxonomy and systematics, the scientific classification of species.

From Kelley, head of mycology at

the Centre for Agricultural Bioscience International (Cabi) in Oxfordshire, said there is now no formal training in fungal systematics and taxonomy in the UK at any level within the education system, and this could lead to a complete lack of mycologists in 10 years. Cabi has one of the most important collections of fungi in Britain but even this is at risk of being destroyed unless the Government can provide the funding as well as the training needed to keep the science of mycology alive, Dr Kelley said.

"There does seem to be an 'out of sight, out of mind' approach to funding. But without fungi, life as we know it would not be possible. Assessing ecosystems without taking into account the fungi is like taking into account the computer boxes but not the chips inside," Dr Kelley said.

"Yet major pieces of work continue to be published considering ecology and climate change without any mention of fungi."

Fungi perform two vital roles for life on Earth. They rot down the tough lignin and cellulose of fallen

trees and they form close relationships with the roots of plants in a mutual symbiosis that allows vegetation to survive. They also provide important sources of food - from expensive truffles to the filamentous fungi used in Quorn, the meat substitute - as well as medicines such as the antibiotic penicillin and the cholesterol-lowering statins.

"We still don't have a complete checklist of fungi in Britain and we don't know what's out there," said Peter Roberts, a senior mycologist at the Royal Botanic Gardens Kew, who retires next year. "We're still finding species in Britain that are new to science, but there is a decreasing number of increasingly elderly mycologists in the UK. Systematics and taxonomy are not seen as cutting-edge science. Many young people think that the classification of fungi has been done years ago. I know botanists and zoologists are finding the same kinds of problem and it's not seen as easily reversed."

Some of the most damaging diseases of important food crops are caused by fungi.

Fig. 1 I micologi sono una specie in via di estinzione

di stimolare l'interesse per questo gruppo di organismi. Ovviamente gli argomenti affrontati non sono esaustivi del tema, né possono essere particolarmente approfonditi, ma confidiamo che con l'aiuto dei riferimenti bibliografici e dei siti internet indicati i più curiosi possano essere invogliati ad ulteriori approfondimenti.

2. MA CHE ORIGINE HANNO AVUTO I FUNGHI?

I funghi non sono né animali né piante ma costituiscono un regno a parte (fig. 2). In prima approssimazione possono essere definiti come organismi eucarioti miceliari con pareti ricche di chitina che si accrescono apicalmente, che si nutrono per assorbimento e che si riproducono, sessualmente e asessualmente, mediante spore.

Mary Berbee e i suoi collaboratori hanno recentemente fatto il punto, con un contributo pubblicato su «Nature Reviews» (Berbee et al., 2020), su quanto si sa circa l'origine dei funghi (fig. 2). La filogenesi molecolare suggerisce che i funghi abbiano avuto origine nel Precambriano, probabilmente a partire da 1030 milioni di anni fa (Ma) (Neo-proterozoico, circa 3000 Ma dopo l'origine dei viventi e 300 Ma dopo l'origine delle piante), da un progenitore della linea evolutiva che avrebbe portato anche agli animali. Funghi e animali sono stati, infatti, riuniti nel gruppo degli opistoconti (dal greco *opisthios*, dietro, posteriore, e *kontós*, palo, da cui flagello) caratterizzati dalla presenza di un unico flagello disposto posteriormente che imprime il movimento, come è tutt'ora negli spermatozoi o nelle zoospore fungine. Questo progenitore comune era, presumibilmente, una piccola ameba aerobica unicellulare (di cui, però, non esistono prove fossili) dotata di movimento grazie al flagello, che si nutriva per fagocitosi e che viveva nelle acque dolci. I primi organismi che avrebbero dato origine ai funghi erano, quindi, privi di parete e si nutrivano fagocitando e digerendo materiale organico. L'ambiente in cui vivevano era profondamente diverso da quello che noi conosciamo. Le terre emerse erano riunite in un supercontinente (Rodinia) che si sarebbe di nuovo frammentato all'incirca 250/300 Ma anni dopo ed erano ancora distese di terre nude, prive di animali e piante, un po' come appare la superficie di Marte nelle fotografie della sonda Curiosity.

Questi primi organismi disposti lungo la linea evolutiva che avrebbe portato ai funghi attuali si sono evoluti perdendo la capacità di fagocitare i nutrienti, o a favore del parassitismo obbligato, come in *Rozella* o nei Microsporidi, oppure a favore dell'utilizzo di nutrienti in grado di diffondere attraverso la parete e la membrana cellulare. Questo processo, detto osmo-

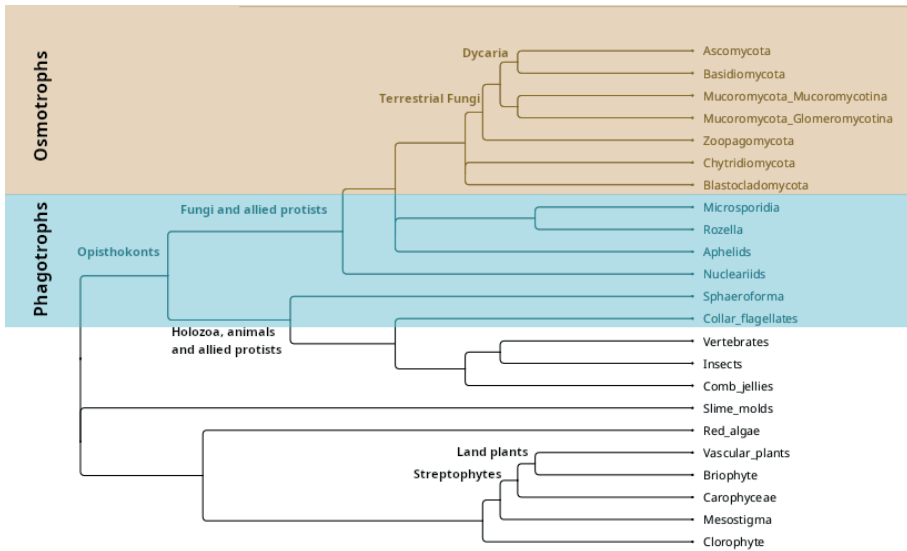


Fig. 2 Albero filogenetico degli eucarioti (modificato da: Berbee et al., 2020)

trofia, è, spesso, accompagnato dalla secrezione di enzimi litici che hanno lo scopo di digerire, all'esterno dell'organismo, sostanze complesse liberando da esse i nutrienti. I funghi sono, in grandissima parte, organismi aerobi obbligati o anaerobi facoltativi, vale a dire richiedono ossigeno per completare il loro ciclo vitale. Esistono, tuttavia, alcuni funghi anaerobi obbligati, i Microsporidi e i funghi del rumine. Essi si sono adattati a compiere l'intero ciclo vitale in assenza di ossigeno o evolvendosi come parassiti intracellulari, compensando la perdita dei mitocondri con l'assorbimento di nutrienti e ATP direttamente dalla cellula ospite (Microsporidi), oppure ottenendo per trasferimento orizzontale dai batteri del rumine i geni necessari alla vita in assenza di ossigeno (funghi del rumine). Si può, quindi, ipotizzare che la diversificazione dei primi funghi sia avvenuta in un ambiente ricco di ossigeno. L'analisi filogenetica dei genomi fungini e l'analisi comparativa di genomi condotta su piante e alghe verdi ha, ragionevolmente, consentito anche di ipotizzare che i funghi abbiano aiutato le piante a conquistare le terre emerse (ipotesi supportata anche dall'evoluzione del trasporto dei lipidi dalle piante ai funghi, Bouwmeester, 2021) cambiando completamente non solo il loro aspetto, ma anche la successiva evoluzione fino a portarle così come le vediamo oggi.

È anche stato ipotizzato che i funghi abbiano avuto un ruolo importante nell'affermarsi dei mammiferi a discapito dei rettili come forme dominanti delle terre emerse dopo la transizione Cretaceo-Terziario, circa 66 milioni di anni fa (Smith e Casadevall, 2023). La fine del Cretaceo coincise con lo schianto, sulla Terra, di un asteroide di diversi chilometri di diametro vicino a quella che oggi è la penisola dello Yucatan. Gli eventi disastrosi e l'abbassamento delle temperature che seguirono l'impatto causarono la scomparsa del 75% della vita sulla Terra, ma misero a disposizione dei microrganismi sopravvissuti enormi quantità di sostanza organica, gran parte costituita da cellulosa, che portò ad una fioritura di organismi fungini (Vajda e McLoughlin, 2004). Come mai, dopo l'impatto dell'asteroide, i rettili non hanno ripreso il sopravvento ma hanno lasciato che i mammiferi divenissero dominanti? Sempre Smith e Casadevall (*l.c.*) ipotizzano che i funghi patogeni abbiano operato una selezione a favore degli organismi a sangue caldo, resistenti ai funghi, contribuendo a contrastare il riemergere di una seconda era dei rettili.

3. IL LATO OSCURO

3.1 *Funghi e piante*

I funghi, in natura, hanno un ruolo ben definito ed estremamente importante che è quello di decomporre la sostanza organica prodotta principalmente dalle piante rimettendo a disposizione dei viventi i componenti di questa materia organica, in modo che possa essere nuovamente utilizzata. Sembrerebbe l'inferno di Ezra Pound quando, nel XIV Cantos, dice «e Invidia, corruzione, foetor, fungus, animali liquidi, ossificazioni sciolte, putridire lento, fetida combustione» se non fosse per quell'atmosfera gotica che mal si adatta ai cicli naturali. Peraltro, i funghi sono in grado di procurarsi la materia organica necessaria alla loro vita anche a partire da organismi viventi, portandoli, spesso, alla morte. Il principale bersaglio dei funghi sono, ancora una volta, le piante. I funghi fitopatogeni (e gli organismi ad essi assimilati) sono, tra i patogeni che aggrediscono le piante, quelli che causano le maggiori perdite di produzione nelle colture agrarie. Una valutazione basata sull'opinione di scienziati che si occupano di malattie delle piante ha permesso di stilare una lista (tab. 1) dei patogeni ritenuti più importanti da un punto di vista scientifico/economico (Dean et al., 2012).

FUNGO	MALATTIA
<i>Magnaporthe oryzae</i>	Brusone del riso
<i>Botrytis cinerea</i>	Muffa grigia di numerose piante in pre- e post- raccolta
<i>Puccinia</i> spp.	Ruggini di numerose piante
<i>Fusarium graminearum</i>	Componente principale del complesso causa della fusariosi della spiga e del marciume del piede dei cereali e di altre colture
<i>Fusarium oxysporum</i>	Tracheomicosi di numerosissime colture
<i>Blumeria graminis</i>	Oidio dei cereali
<i>Mycosphaerella graminicola</i>	Septoriosi del frumento
<i>Colletotrichum</i> spp.	Antracnosi e marciumi di numerose colture
<i>Ustilago maydis</i>	Carbone del mais
<i>Melampsora lini</i>	Ruggine del lino

Tab. 1 *Lista dei patogeni delle piante ritenuti più importanti dal punto di vista scientifico/ economico (da: Dean et al., 2012, modificato)*

Stime recenti ci informano che le perdite di produzione vanno dal 10 al 23% in pre-raccolta più un ulteriore 10-20% in post-raccolta (Steinberg and Gurr, 2020). Per il frumento, ad esempio, queste perdite possono arrivare al 50% per la septoriosi (causata da *Zymoseptoria tritici*.) e al 70% per la ruggine nera (causata da *Puccinia graminis*). Le perdite che subiscono le cinque colture più importanti su scala mondiale (riso, frumento, mais, soia e patata) potrebbero sfamare, su una base di 2000 calorie per giorno, da 600 milioni a 4 miliardi di persone per un anno (Stukenbrock and Gurr, 2023), ma la sola dimensione quantitativa non rende conto dell'impatto destabilizzante del complesso economico e sociale che è potenzialmente associato alle malattie delle piante. Molti Paesi in via di sviluppo basano la loro economia su uno o pochi prodotti agricoli. Nei Paesi sviluppati il danno che le malattie causano alle piante è limitato e sostanzialmente di tipo economico, ma per l'economia dei Paesi in via di sviluppo le malattie delle piante possono causare crisi devastanti che si riflettono in un incremento dell'instabilità sociale (Vurro et al., 2010), nell'abbandono delle aree rurali in favore dell'inurbamento in condizioni critiche e nell'aumento del numero dei migranti economici, con ricadute negative anche sul resto del mondo. A solo titolo di esempio, la Panama disease, o fusariosi della banana, causata da *Fusarium oxysporum f.sp. cubense* sta allargando, con la sua razza TR4, l'areale di distribuzione distruggendo le coltivazioni in alcuni di questi Paesi, tanto che la Colombia ha dovuto dichiarare lo stato di emergenza (Galvis, 2019). Purtroppo, il danno che i funghi causano non è limitato alle sole perdite di produzione. Diversi funghi in grado di crescere a spese di piante coltivate possono produrre metaboliti dannosi per la salute dell'uomo e degli animali, detti

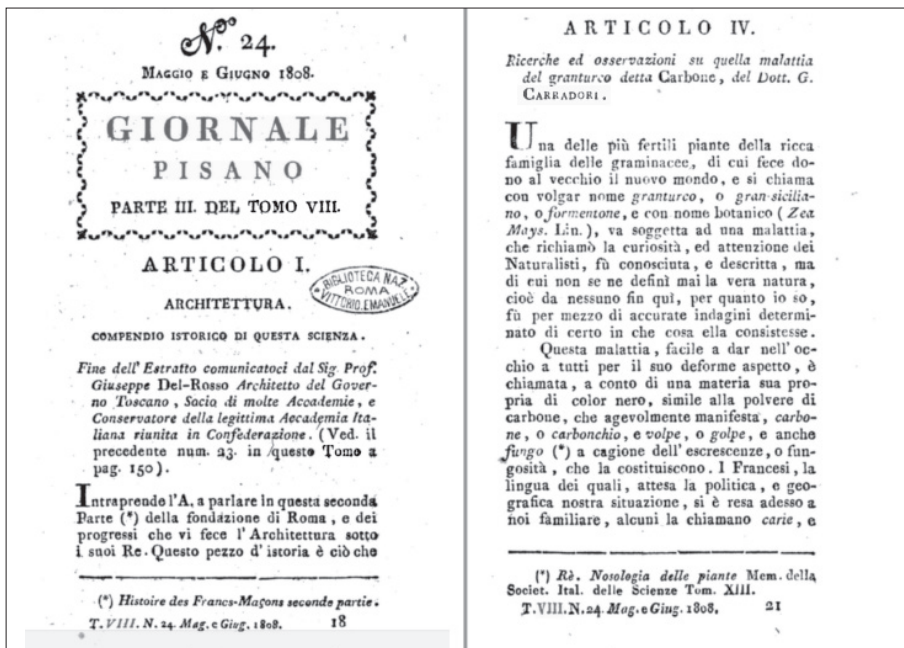


Fig. 3 Prima segnalazione in Italia, da parte di Carradori nel 1808, del carbone del mais causato da «*Ustilago maydis*»

micotossine, che si possono ritrovare in alimenti o mangimi prodotti a partire dai vegetali attaccati. Delle centinaia di micotossine descritte, una dozzina ha attratto particolarmente l'attenzione sociosanitaria per i drammatici effetti sulla salute e per la diffusa presenza nelle derrate alimentari. Tra queste possiamo ricordare le aflatossine, la patulina, l'ocratossina A e le fusariotossine (DON, NIV, T-2 e HT-2, ZEN e fumonisine). Anche a causa della gravità dei disturbi che causano, l'Unione Europea ha stabilito i limiti massimi tollerati negli alimenti per diverse micotossine. E ancora non si potrà evitare di annoverare tra i danni provocati dai fitopatogeni fungini, oltre a quelli quantitativi e a quelli qualitativi, quelli indiretti: per mantenere le perdite di produzione ai livelli sopra citati vengono impiegate grandi quantità di fungicidi, molti a singolo sito di azione, con aumento dei costi di produzione, con ripercussioni sull'ambiente e sulla salute umana e con il gravame dell'insorgenza di ceppi patogeni resistenti, le cui conseguenze sono facilmente intuibili.

Tra i casi più temuti dal sistema agricolo vi è l'arrivo di funghi patogeni esotici (non presenti nell'areale considerato) che, trovando nel nuovo ambiente le condizioni idonee al loro sviluppo, possono causare epidemie e danni molto gravi. Limitando il discorso alle Americhe, il primo importante patogeno importato in Europa (fig. 3), e in Italia, è stato *Ustilago maydis* (Carradori,

1808) a cui hanno fatto seguito, solo per citarne alcuni, *Phytophthora infestans* (peronospora della patata) e *Plasmopara viticola* (peronospora della vite) – che non sono funghi ma, tradizionalmente, sono studiati dai patologi vegetali assieme ai funghi –, *Uncinula necator* (oidio della vite), *Seiridium cardinale* (cancro del cipresso), *Ceratocystis fimbriata* (cancro colorato del platano) e molti altri (Orsini et al., 1991).

Nel mondo, considerando l'incremento esponenziale del volume delle merci trasportate e dei viaggi e il trasporto su lunga distanza di spore particolarmente adattate alla diffusione per via aerea, il problema è oggi molto sentito (ad es. per le ruggini vedi: Hovmøller et al., 2023). La gran parte dei Paesi del mondo, inclusa l'Unione Europea (<https://eur-lex.europa.eu/IT/legal-content/summary/protection-against-plant-pests.html>), si sono dotati di specifiche norme tese a impedire o, quantomeno, a limitare l'introduzione di patogeni esotici attraverso le attività dell'uomo.

3.2 Funghi e animali (incluso l'essere umano)

Chi ci legge avrà visto, o sentito parlare, della serie televisiva *The last of us*. In questa serie di grande successo, in un futuro post apocalittico e distopico, buona parte dell'umanità è vittima dell'infezione causata da un fungo che rende gli esseri umani degli zombi. Pura fantasia, ma gli autori hanno preso lo spunto da quanto succede nella realtà a danno di *Camponotus leonardi* e altre specie di formiche. Alcune specie di *Ophiocordyceps* invadono il corpo della formica, ne prendono il controllo e inducono l'insetto a salire in un punto della vegetazione dove temperatura e umidità sono più favorevoli allo sviluppo del parassita. Qui giunto, l'insetto serra con le mandibole il tessuto vegetale e muore. A questo punto il fungo emerge come conidi da tutto il corpo dell'insetto e come fruttificazioni sessuate dalla parte basale del capo. Queste strutture rilasciano conidi e ascospore che vanno a infettare altre formiche (Evans et al., 2011). Non è un fenomeno particolarmente raro, diverse specie di *Cordycipitales* parassitizzano insetti diversi ma, per il momento, nessuno, a parte gli ideatori di *The last of us*, ha segnalato un salto di specie. Altri funghi sono ben più preoccupanti per noi esseri umani (<https://gaffi.org/>). Nel 2022 la WHO ha pubblicato una lista di funghi patogeni per l'uomo (tab. 2), per indirizzare le attività di ricerca in questo settore (WHO, 2022).

<i>Cryptococcus neoformans</i>	La criptococcosi in soggetti immunocompromessi può causare una polmonite bilaterale gravissima (spesso fatale) seguita dall'invasione dei linfonodi ilari e poi del torrente ematico che sfocia in quadri drammatici di meningite ed encefalite.
<i>Candida auris</i>	<i>C. auris</i> è stato isolato da una serie di siti corporei, tra cui la pelle (molto comune), il tratto urogenitale (comune) e il tratto respiratorio (occasionale), e provoca più raramente infezioni invasive, come candidemia, pericardite, infezioni del tratto urinario e polmonite.
<i>Aspergillus fumigatus</i>	Nei pazienti non immunocompromessi causa generalmente forme lievi di asma bronchiale. Nei pazienti immunocompromessi causa l'aspergillosi conseguente lo sviluppo, nei polmoni, delle spore inalate. Il fungo può, successivamente, disseminarsi in tutto il corpo attraverso il flusso ematico fino a raggiungere il sistema nervoso centrale con esiti spesso letali
<i>Candida albicans</i> , <i>Nakaseomyces glabratus</i> (<i>Candida glabrata</i>), <i>C. tropicalis</i> , <i>C. parapsilosis</i> e <i>Pichia kudriavzevii</i> (<i>Candida krusei</i>)	Le specie di <i>Candida</i> indicate causano la candidosi (o candidiasi o moniliasi). Questi funghi sono ubiquitari e si ritrovano normalmente, senza dare sintomi o lesioni rilevanti, sulla pelle, nel cavo orale e nella porzione terminale dell'intestino e della vagina. In condizioni che portano ad alterazione del microambiente delle mucose, <i>Candida</i> può crescere in maniera incontrollata, dando luogo ad infiammazione dei tessuti (ad es. irritazione del cavo orale - Mugghetto), o a sintomi intestinali (gonfiore e disturbi della digestione). Nelle forme di grave immunodeficienza, incluso l'AIDS, o di grave malnutrizione, <i>Candida</i> può dare infezioni sistemiche che si possono estendere all'esofago, allo stomaco, all'intestino e al tratto uro-genitale con possibile diffusione nel sangue (Candidemia).
<i>Agenti causali di eumicetoma</i>	L'eumicetoma (o micetoma) è una patologia infettiva caratterizzata dalla presenza di un granuloma ad evoluzione molto lenta, conseguente alla penetrazione dei miceti nel tessuto, solitamente mediata da oggetti puntuti e penetranti. Gli agenti causali possono essere <i>Madurella mycetomatis</i> , <i>M. grisea</i> e <i>Scedosporium apiospermum</i> . Meno frequentemente altri funghi dematiacei, qual <i>Pyrenochaeta romeroi</i> , <i>Phialophora verrucosa</i> e <i>Leptosphaeria senegalensis</i> ; più raramente anche <i>Curvularia</i> spp., <i>Exophiala jeanselmei</i> , <i>Cylindrocarpon cyanescens</i> e <i>C. destructans</i> , <i>Scytalidium dimidiatum</i> , <i>Neotestudina rosatii</i> , <i>Corynespora</i> spp e <i>Polycyrtella</i> spp. Raramente l'eumicetoma viene causato da funghi ialini quali <i>Acremonium falciforme</i> , <i>A. kiliense</i> , <i>A. recifei</i> , <i>Aspergillus nidulans</i> , <i>Fusarium solani</i> . Gli eumicetomi sono stati osservati praticamente ovunque, ma le maggiori incidenze sono state rilevate nelle regioni tropicali e subtropicali del mondo, in particolare nel subcontinente indiano, in Africa ed in Sud America
<i>Mucorales</i>	Per mucormicosi si intende l'infezione causata da diversi organismi fungini nell'ordine dei Mucorales, incluse specie di <i>Rhizopus</i> , <i>Rhizomucor</i> e <i>Mucor</i> . I sintomi dell'infezione rinocerebrale più frequentemente derivano dalle lesioni necrotiche invasive del naso e del palato, che causano dolore, febbre, cellulite orbitaria, proptosi, e secrezione nasale purulenta. Possono seguire sintomi del sistema nervoso centrale. I sintomi polmonari sono gravi e comprendono tosse produttiva, febbre elevata e dispnea. Un'infezione disseminata può verificarsi in pazienti gravemente immunocompromessi.
<i>Fusarium</i> spp.	La fusariosi è un'infezione superficiale disseminata, invasiva a livello locale, dovuta a diverse specie di funghi appartenenti al gen. <i>Fusarium</i> , spesso presenti nel terreno e nell'acqua. Si trasmette all'uomo essenzialmente mediante l'inoculazione traumatica e si presenta con cheratite, onicomicosi e, meno spesso, peritonite e cellulite. Nelle persone immunocompromesse, la fusariosi disseminata è più comune e si manifesta con febbre refrattaria, lesioni cutanee, mialgia grave e infezioni sinopolmonari

<i>Scedosporium</i> spp. incluso <i>Lomentospora</i> (<i>Scedosporium</i>) <i>prolificans</i>	La scedosporiosi è una micosi rara caratterizzata da diversi quadri clinici, che comprendono la polmonite, l'infezione della cute e dei tessuti molli, il micetoma e le infezioni diffuse. Sono stati descritti casi di infezione del sistema nervoso centrale. Sono più frequenti in pazienti immunocompromessi o affetti da fibrosi cistica, ma possono svilupparsi, sebbene più raramente, anche in individui immunocompetenti
<i>Coccidioides</i> spp.	La coccidioidomicosi è causata dai funghi <i>Coccidioides immitis</i> e <i>C. posadasii</i> ; solitamente si manifesta come infezione asintomatica acuta benigna o infezione respiratoria autolimitante. Lo spettro della malattia varia dalla polmonite acuta alla malattia extrapolmonare disseminata (compresa la meningite)
<i>Cryptococcus gattii</i> , <i>Cryptococcus</i> <i>neoformans</i>	La criptococcosi è un'infezione polmonare o disseminata acquisita per inalazione di terreni contaminati dai funghi capsulati <i>Cryptococcus neoformans</i> o <i>C. gattii</i> . I sintomi sono quelli della polmonite, della meningite fino al coinvolgimento di pelle, ossa, o visceri
<i>Talaromyces marneffei</i>	La talaromicosi è una infezione sistemica caratterizzata da febbre e anemia simili alla criptococcosi disseminata. Clinicamente, i pazienti presentano comunemente sintomi e segni di infezione del sistema reticoloendoteliale. Anche il sistema respiratorio è comunemente interessato con tosse, febbre, dispnea e dolore toracico. Pochi pazienti possono presentare sintomi gastrointestinali.
<i>Pneumocystis jirovecii</i>	È una causa diffusa di polmonite nei pazienti immunodepressi, specialmente nei soggetti infetti da HIV e in quelli in terapia con corticosteroidi sistemici. I sintomi comprendono febbre, dispnea e tosse secca
<i>Paracoccidioides</i> spp.	La paracoccidioidomicosi è una micosi progressiva dei polmoni, della pelle, delle mucose, dei linfonodi, e degli organi interni principalmente causata da <i>Paracoccidioides brasiliensis</i> . I sintomi sono ulcere cutanee, adenite, e dolore per coinvolgimento di un organo addominale

Tab. 2 Lista dei funghi patogeni per l'uomo (da: WHO, 2022, modificata) e malattie da essi causate

Statistiche recenti (Denning, 2024) indicano che più di 6,5 milioni di persone sono, ogni anno, affette da infezioni fungine gravi, con 3,8 milioni di morti di cui 2,5 milioni attribuibili direttamente alle stesse infezioni, superando la mortalità dovuta a tubercolosi, malaria, epatite e polmonite. Per quanto esistano sicuramente agenti di malattia che causano più decessi dei funghi, un'eventuale epidemia causata da un fungo desterebbe grande preoccupazione: al momento sono disponibili solamente 4 classi di farmaci antifungini sistemici (azoli, echinocandine, pirimidine e polieni), e il loro uso è, spesso, accompagnato da effetti collaterali negativi. D'altra parte, funghi e mammiferi sono, evolutivamente, relativamente vicini ed è difficile interferire con il metabolismo del patogeno senza alterare anche il metabolismo dell'ospite. Ad aggravare la situazione, sono sempre più diffusi i ceppi resistenti a farmaci appartenenti a una o più di queste classi. A causa delle infezioni causate da ceppi di *Aspergillus* resistenti al principio attivo, che portano a un alto tasso di

mortalità, recentemente i farmaci antifungini a base di azoli stanno diventando inefficaci (Sen et al., 2022). Verosimilmente la causa di questo fenomeno è da ricercare nell'intenso uso di questi ultimi in agricoltura. Infine, anche la carenza di strumenti diagnostici adeguati rende la lotta contro le micosi umane (e animali) estremamente difficoltosa (Schmidt, 2024).

Come per i fitopatogeni descritti nel capitolo precedente, anche tra i funghi di interesse medico emergente se ne annoverano diversi comparsi sulla scena in tempi relativamente recenti. Per esempio, *Candida auris*, un lievito isolato, e descritto per la prima volta, nel 2009 in Giappone dall'orecchio di una donna, è oggi presente in oltre 40 Paesi in tutto il mondo. Alcuni focolai sono stati segnalati in regioni del Nord Italia e divenuti oggetto di attenzione per stampa e televisioni nazionali. Questo lievito è particolarmente pericoloso per soggetti a rischio (con problemi di salute preesistenti, ospedalizzati, che utilizzano dispositivi medici invasivi, immunocompromessi) nei quali può causare infezioni invasive spesso con esito fatale. Alcune caratteristiche lo rendono particolarmente insidioso: *C. auris* è in grado di sopravvivere sulla pelle per un lungo periodo di tempo, è facilmente trasmissibile per semplice contatto e sopravvive, grazie alla formazione di biofilm, anche su superfici trattate con diversi disinfettanti. Ad aggravare la situazione, gran parte degli isolati sono resistenti agli antimicotici più comuni (Azoli e Amfotericina B) e alcuni anche alle echinocandine (Chowdhary et al., 2023).

I funghi possono avere effetti avversi sulla salute dell'uomo anche senza causare infezioni. Essi possono causare allergie IgE-mediate, ipersensibilità non IgE-mediata e tossicità/irritazione. L'incidenza delle malattie fungine è aumentata rapidamente negli ultimi decenni e l'allergia ai funghi è una delle problematiche mediche più comuni a livello globale (Yuma and Masami, 2015). Sempre maggiore attenzione viene prestata alla componente fungina tra le cause della “*sindrome dell'edificio malato* (Sick Building Syndrome – SBS)”, un insieme di sintomi che includono irritazione della mucosa degli occhi, naso, gola e pelle e sintomi generali non specifici come mal di testa e affaticamento. Presenza di umidità e oscillazioni nella temperatura favoriscono la formazione di condensa e, quindi, forniscono le condizioni ottimali per lo sviluppo di muffe. *Cladosporium*, *Penicillium* e *Aspergillus* sono stati descritti come i generi maggiormente responsabili di eventi allergici in ambienti chiusi anche se, in questo contesto, particolare attenzione è rivolta a *Stachybotrys chartarum*, colloquialmente conosciuta come “muffa nera”, capace di proliferare su quelli che sono i più comuni materiali edilizi.

In funzione del tipo di individuo fungino (chemiotipo), l'inalazione di spore può dare origine a malattie più o meno gravi: per le loro ridotte dimensioni, frammenti di micelio e spore possono raggiungere le porzioni più pro-

fonde dei bronchi dando luogo a importanti risposte sistemiche. Alcuni specie e/o chemiotipi, infatti, sono caratterizzati dalla capacità di produrre molecole bioattive, alcune delle quali pericolose per l'uomo. Tra le specie più pericolose rientra, appunto, *S. chartarum*, riconosciuta come potenziale rischio sanitario se presente in ambienti chiusi a causa dei (1→3)-β-D-glucani, che inducono processi infiammatori nei vertebrati, e per la produzione di tricoteceni, potenti micotossine che interferiscono con le attività dei ribosomi negli eucarioti (Petska et al., 2008).

Come ricordato all'inizio del capitolo, non sono solo gli esseri umani a essere colpiti da devastanti infezioni fungine. Basterà qui ricordare la panzoozia causata da due chitridiomyceti: *Batrachochytrium dendrobatidis* (scoperto nel 1998) e *B. salamandrivorans* (scoperto nel 2013, attacca i soli Urodeli). La chitridiomicosi degli anfibii ha causato il declino di 501 specie (il 6,5% delle specie di anfibii descritte), di cui 90 sono presumibilmente estinte mentre altre 124 hanno subito una riduzione maggiore del 90% (Scheele et al., 2019). *B. dendrobatidis* è ritenuta una delle specie invasive più dannose, agli stessi livelli dei topi e dei gatti che, rispettivamente, mettono a rischio 420 e 430 specie (Doherty et al., 2016). La diffusione di questi funghi su scala mondiale è principalmente dovuta al commercio di anfibii esotici.

Negli ultimi anni, altre esiziali malattie infettive emergenti causate da funghi sono state registrate in tutti gli ecosistemi, contribuendo così a una conseguente perdita di biodiversità. Possiamo ricordare le ofidiomicosi descritte nei serpenti – con infezioni locali e sistemiche – causate da *Ophidiomyces ophidiicola* (Di Nicola et al., 2022), che rappresenta una minaccia per la salvaguardia di questi animali o la fusariosi delle uova di tartaruga marina (meglio conosciuta con l'acronimo STEF, Gleason et al., 2020) che può causare una significativa mortalità nei nidi di *Caretta caretta* infettati principalmente da funghi appartenenti al *Fusarium Solani* Species Complex (Risoli et al., 2023) mettendo a rischio la sopravvivenza di una specie classificata dalla IUCN come vulnerabile (<https://www.iucnredlist.org/species/3897/119333622>).

Anche i mammiferi possono essere oggetto di devastanti epidemie. La sindrome del naso bianco (WNS), il cui agente causale è il fungo *Pseudogymnoascus destructans*, ha contribuito ad aumentare la mortalità in molte comunità di pipistrelli ibernanti, causando la decimazione di alcune specie (Langwig et al., 2016). È necessario ricordare che i pipistrelli, durante la fase di vita attiva, hanno una temperatura corporea ben superiore alla nostra (anche sopra i 40°C durante il volo) decisamente inospitale per i funghi, mentre nella fase di ibernazione la temperatura corporea può variare dai 3° ai 15°C con molte funzioni fisiologiche ridotte, per risparmiare energia. *P. destructans* ha una temperatura ottimale di crescita di 13°-15°C (con un minimo di 0°C), che è all'interno

dell'intervallo di temperature di ibernazione dei pipistrelli, così il fungo può proliferare nei tessuti dell'ospite durante questa fase (Meteyer e Verant, 2019). La WNS prende il nome dalla crescita di micelio bianco sul naso, muso, orecchie e/o membrana alare degli individui colpiti. Il fungo, non patogeno per l'uomo, negli Stati Uniti ha già causato la morte di milioni di esemplari. La malattia è stata segnalata in Europa nel 2010 e in Italia nel 2019 (Garzoli et al., 2019), ma potrebbe essere presente da molto più tempo (Oskolkov et al., 2024), pur senza aver raggiunto la gravità registrata negli USA.

3.3 *Cambiamenti climatici e malattie delle piante e degli animali*

La sicurezza alimentare e la sostenibilità ambientale sono costantemente minacciate, a livello globale, da epidemie che colpiscono le principali colture di interesse agrario e che comportano la perdita di produttività e biodiversità con un impatto socio-economico e ambientale negativo nelle regioni colpite. Il rischio di nuove epidemie è aumentato dai cambiamenti climatici (CC) che, alterando gli equilibri ambientali e gli habitat fungini, hanno un'influenza sull'evoluzione dei patogeni e sulle interazioni con i loro ospiti che favorisce l'emergere di ceppi nuovi e più aggressivi. Purtroppo, prevedere l'impatto che i CC possono avere sulle malattie delle piante è complesso in virtù del coinvolgimento di molteplici aspetti relativi ai patogeni, agli ospiti e all'ambiente, tra cui, per ricordare i principali, la distribuzione e l'abbondanza dei diversi funghi agenti causali di malattie, la loro virulenza e la biologia dell'ospite (<https://www.cdc.gov/fungal/climate.html>).

Il riscaldamento globale gioca un ruolo fondamentale nelle dinamiche di popolazione dei patogeni, influenzando lo svernamento, la sopravvivenza, la velocità di crescita e il numero di generazioni nelle specie policicliche. Ad esempio, un innalzamento della media delle temperature minime in zone dove la ruggine del caffè non causava gravi danni, ne ha spostato l'areale di distribuzione ad altezze più elevate (Tadesse et al., 2021) con un conseguente danno a livello socio-economico per molti dei Paesi per i quali il caffè rappresenta la principale fonte di reddito. In generale, la variazione delle condizioni climatiche può provocare un allargamento o uno spostamento dell'areale di distribuzione di funghi dannosi, con conseguenze difficili da prevedere, ma sicuramente negative. La problematica della contaminazione da aflatossine del mais, storicamente sentita al di sotto dei 45° di latitudine Nord per le caratteristiche di crescita di *A. flavus*, interessa territori sempre più ampi a latitudini più elevate e le simulazioni con modelli consentono di prevedere per l'Europa, in uno scenario di aumento di 2°C della temperatura media, un sensibile

aumento della contaminazione di aflatossina nel mais in quantità superiori al limite legale principalmente nelle aree dell'Europa orientale, della penisola balcanica e delle regioni del Mediterraneo (Battilani et al., 2016).

Molti sistemi ospite-patogeno di estrema importanza per la sicurezza alimentare sono influenzati dai CC. Nel frumento, uno tra i principali cereali coltivati nel mondo e considerato un alimento base in molti Paesi, l'aumento delle temperature ha causato lo sviluppo di nuovi isolati fungini patogeni meglio adattati e più virulenti. Ad esempio, la gravità della fusariosi della spiga di frumento (o Fusarium Head Blight - FHB) - importante malattia causata da un complesso di specie fungine appartenenti al genere *Fusarium* che colpisce molti cereali tra cui frumento, orzo e avena - ha subito un aumento dovuto ad una maggiore diffusione del più aggressivo *Fusarium graminearum*, meglio adattato al caldo e all'umidità, a discapito di una minore incidenza di *Fusarium culmorum* che predilige temperature più basse e provoca danni meno gravi (Singh et al., 2023).

Nei confronti degli animali, i CC giocano un ruolo fondamentale nella comparsa di agenti patogeni emergenti in nuovi ambienti e aree geografiche. Sono responsabili di un aumento delle condizioni di stress ambientale e sono direttamente correlati con un incremento delle infezioni fungine in molti ecosistemi, quali ad esempio quello marino, la cui biodiversità è continuamente minacciata (Gleason et al., l.c.; Harvell et al., 2009). Oltre ad essere percepiti dagli organismi viventi come fonti di stress, questi fattori possono alterare le interazioni ospite-patogeno in termini sia di modifica della virulenza dei patogeni che di compromissione del sistema immunitario dell'ospite, come descritto per diverse specie marine (Burge et al., 2014).

Anche i funghi patogeni per l'uomo possono espandere i loro areali a seguito dei CC, particolarmente in presenza di temperature più elevate e aumento delle precipitazioni. Ne sono un esempio *Coccidioides immitis* e *C. posadasii*, gli agenti causali della "Febbre della Valle", diffusa negli stati sud-occidentali degli USA e in alcune zone del Messico ma che, dal 2015, è stata più volte segnalata nello stato di Washington. Anche per *Cryptococcus gattii* (che causa una grave infezione polmonare e del sistema nervoso centrale), solitamente ritrovato in zone caratterizzate da climi tropicali o subtropicali, si registra un aumento negli ultimi quattro decenni in Europa e nell'area mediterranea (Cogliati, 2021).

3.4 *Funghi e manufatti*

In Italia siamo abituati, sin dalla nascita, a convivere con la bellezza. Quadri, sculture, palazzi, arazzi, biblioteche, per citarne solo alcuni, rappresentano

l'eredità culturale che ci è stata lasciata da chi ci ha preceduto e che arricchisce la nostra vita attuale. Ma questa eredità culturale deve essere preservata in quanto è costantemente sotto attacco da parte di fattori diversi, sia biotici che abiotici. Tra i fattori biotici, i funghi giocano un ruolo importante come agenti di biodeterioramento (Gadd et al., 2024).

D'altra parte, che le muffe fossero in grado di crescere su manufatti, fossero vesti di tessuto o di pelle (Levitico 13:47-59) o pietre con cui erano costruite le case (Levitico, 14, 33-48), è già riportato nella Bibbia, ma è nozione comune che anche nelle nostre case moderne, negli angoli del soffitto in cucina o in bagno o dietro i mobili, o sugli stessi arredi in pelle, se lasciati per un certo periodo di tempo in presenza di umidità, si ritrovino frequentemente efflorescenze costituite dal micelio e dalle spore di funghi diversi. Nelle nostre case i funghi crescono sulle pareti, in presenza di condensa, a spese di alcuni componenti delle vernici, ma esistono anche funghi che degradano, ad esempio, il marmo o altre pietre. Sono un gruppo di funghi particolari (Sterflinger, 2006) chiamati funghi (o lieviti) neri, ma anche funghi meristemati o funghi microcoloniali. Alcuni di questi sono in grado di crescere in ambienti estremi in condizioni oligotrofiche, quali le superfici di rocce nude in deserti o in regioni semi-aride come si possono trovare nell'area mediterranea, e se ne trovano anche di patogeni per l'uomo (ad es. *Cryptococcus neoformans*). Possono ospitare questi organismi anche nicchie ecologiche inusuali, quali elettrodomestici e altre apparecchiature casalinghe di uso quotidiano (Babič et al., 2017). I funghi neri possono danneggiare importanti opere d'arte, come, a solo titolo di esempio, i marmi della facciata della chiesa di Santa Maria del Fiore a Firenze (Santo et al., 2021). Essi sono spesso in grado di crescere all'interno delle pietre (endolitici) formando fori anche di 2 cm di diametro e profondità e raramente fanno parte di complesse comunità microbiche. Al contrario, in ambienti moderatamente umidi si sviluppano comunità microbiche complesse che comprendono funghi mitosporici quali *Alternaria*, *Cladosporium*, *Epicoccum*, *Aureobasidium* e *Phoma* che crescono principalmente sulla superficie e formano croste scure o nerastre. Altri substrati sono più facilmente aggrediti dai funghi in quanto la loro composizione chimica include sia sostanze di natura organica che minerali, ed in questo caso il fattore più importante limitante la crescita dei funghi, è la disponibilità di acqua. I manufatti lignei possono essere aggrediti dagli agenti di carie legno (carie bianca, bruna e soffice) che spesso sono gli stessi che attaccano essenze arboree ancora in vita (patogeni del legno) o il legname da opera.

Oggi la tecnologia e i materiali di sintesi hanno contribuito sensibilmente a ridurre i danni o addirittura le tragedie che il biodeterioramento fungino abitualmente provocava quando i materiali da costruzione erano prevalentemente lignei. Ricordiamo per esempio che nel 1782 la Royal George af-

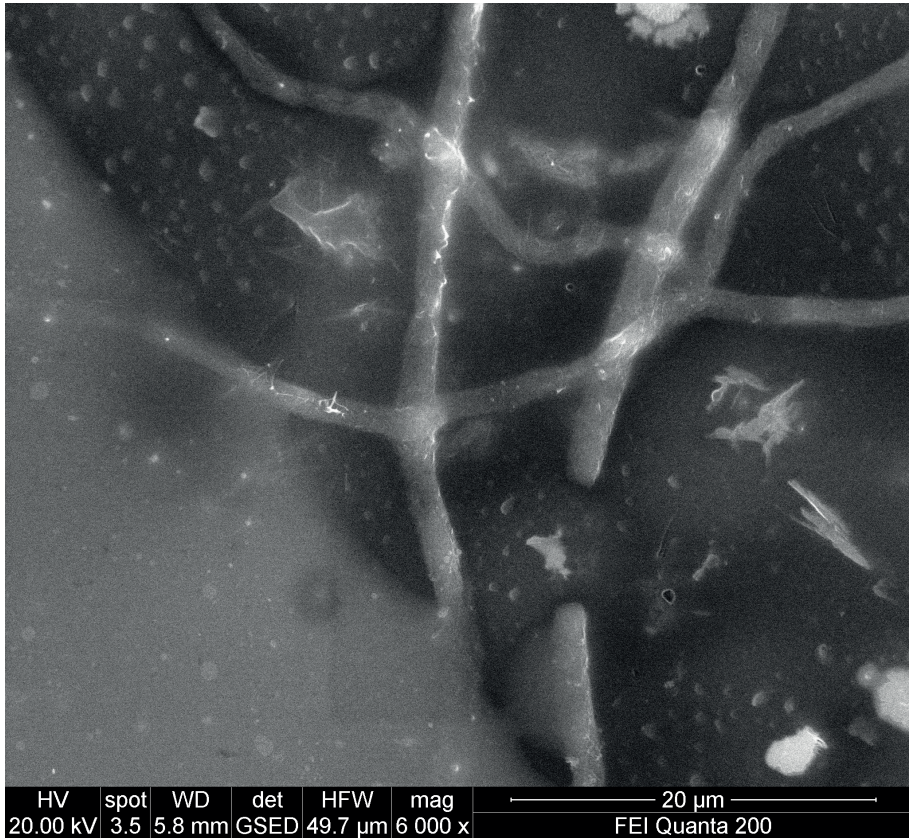


Fig. 4 *Ife fungine cresciute sulla pelle del polpaccio di Heruimen, una mummia tebana del VII secolo a.C. (Gabinetto di storia naturale, Liceo Classico N. Machiavelli, Lucca)*

fondò all'ancora, portando con sé 1200 vite umane, durante operazioni di manutenzione ordinaria che prevedevano l'allagamento di parte della nave; la corte marziale inglese assolse l'equipaggio da qualsiasi colpa, convenendo che l'affondamento non fosse dovuto ad imperizia ma allo stato di degrado del fasciame, indebolito dai funghi e rivelatosi incapace di sostenere la pressione dell'acqua (Rubinstein, 2020).

Oggi i danni sono meno tragici, ma ugualmente rilevanti perché molti materiali preziosi sono oggetto di degrado da parte dei funghi, da soli o in comunità con procarioti, quali dipinti, pergamene e carta, parti metalliche, film fotografici, solo per citarne alcuni (fig. 4). La composizione della comunità fungina che si ritrova su questo insieme di materiali eterogenei dipende molto, tra l'altro, dal materiale stesso, dall'ambiente in cui si trova e dall'umidità a cui è esposto.

Frequentemente vengono ricordati funghi quali *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium* e molti altri comunemente reperibili nell'atmosfera, ma l'utilizzo di tecniche molecolari sta ampliando il numero di generi e specie di funghi che formano complesse comunità e che, in gran parte, non possono essere isolati utilizzando i comuni substrati di accrescimento. Tra i funghi dannosi non al patrimonio materiale ma a quello culturale dell'Uomo merita ricordare *Eurotium halophilicum*, organismo psicotollerante, alofilo e tra i più estremi xerofili della biosfera. Esso può crescere fino a 0°C, su soluzioni sature di cloruro di sodio e fino ad un valore di attività dell'acqua (A_w) di 0,651 (il limite inferiore per la divisione cellulare si ritiene sia 0,605, record detenuto da un altro fungo, *Xeromyces bisporus*). *E. halophilicum* è, oggi, presente su migliaia di volumi delle biblioteche italiane sui quali non causa danni di tipo meccanico ma sviluppa colonie biancastre che, comunque, danneggiano i volumi. È in grado di crescere su substrati secchi, quali la superficie delle copertine di libri in una biblioteca o su alimenti secchi, grazie ad un complesso meccanismo. Le sue ife sono coperte da microfilamenti (pochi nanometri di diametro) che riescono a captare le poche molecole di acqua che le circondano creando in prossimità dell'ifa un'atmosfera leggermente più ricca di vapore acqueo rispetto alla restante atmosfera. Grazie alla deliquescenza di cristalli di sali diversi che si trovino in prossimità delle ife (ad esempio insieme alla polvere che si deposita sulle superfici), il fungo rimane idratato anche in condizioni ambientali di estrema secchezza (Micheluz et al., 2022). Curiosamente, *E. halophilicum* è di grande interesse anche per gli astrobiologi (<https://www.inverse.com/science/extreme-fungus-aliens>) in quanto dimostra che organismi viventi possono sviluppare in ambienti apparentemente inadatti a sostenere la vita.

I pazienti lettori che siano arrivati fino qui penseranno, giustamente, che aveva ragione Ezra Pound e che i funghi sono organismi dai quali è bene stare lontani. Non è così, la dualità e la complementarità degli opposti sono essenziali per comprendere l'equilibrio nel mondo, così nella seconda parte di questo *focus* mostreremo come i funghi possano essere di grande utilità per l'umanità e che al lato oscuro si contrappone un lato luminoso, una sorta di Thanatos ed Eros visto in chiave micologica.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- BABIČ M.N., ZUPANČIČ J., GUNDE-CIMERMAN N., ZALAR P. (2017): *Yeast in Anthropogenic and Polluted Environments*, in BUZZINI P., LACHANCE M.A., YURKOV A. (eds), *Yeasts in Natural Ecosystems: Diversity*, Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62683-3>

- BALDRIAN P., VĚTROVSKÝ T., LEPINAY C., KOHOUT P. (2022): *High-throughput sequencing view on the magnitude of global fungal diversity*, «Fungal Diversity», 114, pp. 539-547, <https://doi.org/10.1007/s13225-021-00472-y>
- BATTILANI P., TOSCANO P., VAN DER FELS-KLERX H.J., MORETTI A., CAMARDO LEGGIERI M., BRERA C., RORTAIS A., GOUMPERIS T., ROBINSON T. (2016): *Aflatoxin B1 contamination in maize in Europe increases due to climate change*, «Sci Rep.», 6, 24328, <https://doi.org/10.1038/srep24328>
- BERBEE M.L., STRULLU-DERRIEN C., DELAUX P.-M., STROTHER P.K., KENRIK P., SELOSSE M.-A., TAYLOR J.W. (2020): *Genomic and fossil windows into the secret lives of the most ancient fungi*, «Nature Reviews Microbiology», 18, pp. 717-730
- BOUWMEESTER H.J. (2021): *Plant lipids enticed fungi to mutualism: evolution of lipid transfer from plants to fungi allowed plants to colonize land*, «Science», 372 (6544), pp. 789-790, <https://doi.org/10.1126/science.abi8016>
- BURGE C.A., EAKIN C.M., FRIEDMAN C.S., FROELICH B., HERSHBERGER P.K., HOFMANN E.E., PETES L.E., PRAGER K.C., WEIL E., WILLIS B.L., FORD S.E., HARVELL C.D. (2014): *Climate change influences on marine infectious diseases: implications for management and society*, «Ann. Rev. Marine Sc», 6 (1), 249e277.
- CARRADORI G. (1808): *Ricerche e osservazioni su quella malattia del granturco detta carbone*, «Giornale Pisano di Letteratura Scienza ed Arti», tomo VIII, parte III, n. 24 maggio-giugno, articolo IV, pp. 301-321.
- COGLIATI M. (2021): *Global warming impact on the expansion of fundamental niche of Cryptococcus gattii VGI in Europe*, «Environmental Microbiology Reports», 13 (3), pp. 375-383.
- CHOWDHARY A., JAIN K., CHAUHAN N. (2023): *Candida auris genetics and emergence*, «Annual Review Microbiology», 77, pp. 583-602, <https://www.epicentro.iss.it/candida-auris/>
- DEAN R., VAN KAN J.A.L., PRETORIUS Z.A., HAMMOND-KOSACK K.E., DI PIETRO A., SPANU P.D., RUDD J.J., DICKMAN M., KAHMANN R., ELLIS J., FOSTER G.D. (2012): *The Top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology*, «Molecular Plant Pathology», 13, pp. 414-430, <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00783.x>.
- DENNING D.W. (2024): *Global incidence and mortality of severe fungal disease*, «Lancet Infectious Diseases», published online, January 12, [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(23\)00692-8](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(23)00692-8)
- DI NICOLA M.R., COPPARI L., NOTOMISTA T., MARTINI D. (2022): *Ophiidiomyces ophiidiicola detection and infection: a global review on a potential threat to the world's snake populations*, «Eur J Wild Res», 68, p. 64, <https://doi.org/10.1007/s10344-022-01612-8>
- DOHERTY T.S., GLEN A.S., NIMMO D.G., RITCHIE E.G., DICKMAN C.R. (2016): *Invasive predators and global biodiversity loss*, «Proc. Natl. Acad. Sci.», U.S.A., 113, pp. 11261-11265.
- EVANS H.C., ELLIOT S.L., HUGHES D. (2011): *Hidden Diversity Behind the Zombie-Ant Fungus Ophiocordyceps unilateralis: Four New Species Described from Carpenter Ants in Minas Gerais, Brazil*, «PLoS ONE», 6(3), e17024. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017024>
- GADD G.M. (2007): *Geomycology: biogeochemical transformations of rocks, minerals, metals and radionuclides by fungi, bioweathering and bioremediation*, «Mycol Res.», 111 (1), pp. 3-49, <https://doi.org/10.1016/j.mycres.2006.12.001>
- GADD G.M., FOMINA M., PINZARI F. (2024): *Fungal biodeterioration and preservation of cultural heritage, artwork, and historical artifacts: extremophily and adaptation*, «Microbiology and Molecular Biology Reviews», 88, 1.

- GALVIS S. (2019): *Colombia confirms that dreaded fungus has hit its banana plantations*, «Science», 12 Agosto 2019, <https://doi.org/10.1126/science.aaz1033>
- GARZOLI L., RICCUCCI M., PATRIARCA E., DEBERNARDI P., BOGGERO A., PECORARO I., PICCO A.M. (2019): *First Isolation of Pseudogymnoascus destructans, the Fungal Causative Agent of White-Nose Disease, in Bats from Italy*, «Mycopathologia», 184, pp. 637-644, <https://doi.org/10.1007/s11046-019-00371-6>
- GLEASON F.H., ALLERSTORFER M., LILJE O. (2020): *Newly emerging diseases of marine turtles, especially sea turtle egg fusariosis (STEF), caused by species in the Fusarium solani complex (FSSC)*, «Mycology», 11 (3), pp. 184E194.
- HARVELL D., ALTIZER S., CATTADORI I.M., HARRINGTON L., WEIL E. (2009): *Climate change and wildlife diseases: when does the host matter the most?*, «Ecology», 90, pp. 912E920.
- HOVMØLLER M.S., THACH T., JUSTESEN A.F. (2023): *Global dispersal and diversity of rust fungi in the context of plant health*, «Current Opinion in Microbiology», 71, 102243.
- YUMA F., MASAMI T. (2015): *Sensitization to fungal allergens: Resolved and unresolved issues*, «Allergology International», 64 (4), pp. 321-331, <https://doi.org/10.1016/j.alit.2015.05.007>
- LANGWIG K.E., FRICK W.F., HOYT J.R., PARISE K.L., DREES K.P., KUNZ T.H., FOSTER J.T., KILPATRICK A.M. (2016): *Drivers of variation in species impacts for a multi-host fungal disease of bats*, «Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.», 5, 371 (1709), 20150456, <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0456>
- MICHELUZ A., PINZARI F., RIVERA-VALENTÍ E.G., MANENTE S., HALLSWORTH J.E. (2022): *Biophysical Manipulation of the Extracellular Environment by Eurotium halophilicum*, «Pathogens», 11, 1462, <https://doi.org/10.3390/pathogens11121462>
- METEYER C.U., VERANT M.L. (2019): *White-Nose Syndrome: Cutaneous Invasive Ascomycosis in Hibernating Bats*, in *Fowler's Zoo and Wild Animal Medicine Current Therapy*, Miller R.E., Lamberski N., Calle P.P., Eds., Elsevier: St. Louis, MO, USA, Volume 9, pp. 507-513.
- ORSINI L.C., DORIA G., DORIA G. (1991): *1492-1992 - Animali e Piante dalle Americhe all'Europa*, Sagep editrice, Genova, 323 pp.
- OSKOLKOV N., SANDIONIGI A., GÖTERSTRÖM A., CANINI F., TURCHETTI B., ZUCCONI L., MIMMO T., BUZZINI P., BORRUSO L. (2024): *Unravelling the ancient fungal DNA from the Iceman's gut*, «bioRxiv», 2024.01.24.576930, <https://doi.org/10.1101/2024.01.24.576930>
- PESTKA J.J., YIKE I., DEARBORN D.G., WARD M.D.W., HARKEMA J.R. (2008): *Stachybotrys chartarum, Trichothecene Mycotoxins, and Damp Building-Related Illness: New Insights into a Public Health Enigma*, «Toxicological Sciences», 104 (1), pp. 4-26, <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfm284>
- PIMM S.L., JOPPA L.N. (2015): *How many plant species are there, where they are, and at what rate are they going extinct?*, «Annals of the Missouri Botanical Garden», 100 (3), pp. 170-176.
- RISOLI S., SARROCCO S., TERRACCIANO G., PAPETTI L., BARONCELLI R., NALI C. (2023): *Isolation and characterization of Fusarium spp. From unhatched eggs of Caretta caretta in Tuscany (Italy)*, «Fungal Biology», 127 (10-11), pp. 1321-1327, <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2023.08.005>
- RUBINSTEIN H.L. (2020): *Catastrophe at Spithead: The sinking of the Royal George*, Seaforth Books: Barnsley, 288 pp., ISBN-10: 1526764997.
- SANTO A.P., CUZMAN O.A., PETROCCHI D., PINNA D., SALVATICI T., PERITO B. (2021):

- Black on White: Microbial Growth Darkens the External Marble of Florence Cathedral*, «Appl. Sci.», 11, 6163. <https://doi.org/10.3390/app11136163>
- SCHEELE B.C., PASMANS F., SKERRATT L.F., BERGER L., MARTEL A., BEUKEMA W., ACEVEDO A.A., BURROWES P.A., CARVALHO T., CATENAZZI A., DE LA RIVA I., FISHER M.C., FLECHAS S.V., FOSTER C.N., FRÍAS-ÁLVAREZ P., GARNER T.W.J., GRATWICKE B., GUAYASAMIN J.M., HIRSCHFELD M., KOLBY J.E., KOSCH T.A., LA MARCA E., LINDENMAYER D.B., LIPS K.R., LONGO A.V., MANEYRO R., McDONALD C.A., MENDELSON III J., PALACIOS-RODRIGUEZ P., PARRA-OLEA G., RICHARDS-ZAWACKI C.L., RÖDEL M.O., ROVITO S.M., SOTO-AZAT C., TOLEDO L.F., VOYLES J., WELDON C., WHITFIELD S.M., WILKINSON M., ZAMUDIO K.R., CANESSA S. (2019): *Amphibian fungal panzootic causes catastrophic and ongoing loss of biodiversity*, «Science», 363 (6434), pp. 1459-1463.
- SCHMIDT C. (2024): *Fungal diseases are spreading undetected*, «Nature Outlook», 14 marzo 2024, <https://www.nature.com/articles/d41586-024-00751-z>
- SEN P., VIJAY M., SINGH S., HAMEED S., VIJAYARAGHVAN P. (2022): *Understanding the environmental drivers of clinical azole resistance in Aspergillus species*, «Drug Target Insights», 16 (1), pp. 25-35. <https://doi.org/10.33393/dti.2022.2476>
- SINGH B.K., DELGADO-BAQUERIZO M., EGIDI E., GUIRADO E., LEACH J.E., LIU H., TRIVEDI P. (2023): *Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward*, «Nat Rev Microbiol», 21, pp. 640-656, <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00900-7>
- SMITH D.F.Q., CASADEVALL A. (2023): *Disaster mycology*, «Biomedica», 43 (1), pp. 267-277. <https://doi.org/10.7705/biomedica.6943>.
- STEINBERG G. AND GURR S.J. (2020): *Fungi, fungicide discovery and global food security*, «Fungal genetics and Biology», 144, 103476, <https://doi.org/fgb.2020.103476>.
- STERFLINGER K. (2006): *Black Yeasts and Meristematic Fungi: Ecology, Diversity and Identification*, in Péter G., Rosa C. (eds), *Biodiversity and Ecophysiology of Yeasts*, The Yeast Handbook. Springer: Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-30985-3_20
- STUKENBROCK E. AND GURR S. (2023): *Address the growing urgency of fungal disease in crops*, «Nature», 617, pp. 31-34.
- TADESSE Y., AMARE D. & KESHO A. (2021): *Coffee leaf rust disease and climate change*, «World Journal of Agricultural Science», 17 (5), pp. 418-429.
- VAJDA V., MCLOUGHLIN S. (2004): *Fungal proliferation at the Cretaceous-Tertiary boundary*, «Science», 303, 1489.
- VURRO M., BONCIANI B., VANNACCI G. (2010): *Emerging infectious diseases of crop plants in developing countries: impact on agriculture and socio-economic consequences*, «Food Security», 2, pp. 113-132.
- WHO (2022): *WHO fungal priority pathogens list to guide research, development and public health action*. Geneva: World Health Organization. ISBN: 978-92-4-006024-1

I funghi questi sconosciuti.

Parte 2: come i funghi ci possono aiutare a salvare il mondo

¹ Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Agro-ambientali, Università di Pisa

² Dipartimento di Scienze Agroalimentari, Ambientali e Animali, Università di Udine

³ Accademia dei Georgofili, Comitato Consultivo sulla difesa delle piante

Forse il titolo di questa seconda parte è un po' enfatico, ma vuole solamente riprendere il titolo di un interessante libro di Paul Stamets (2005), sottolineando, al contempo, come i funghi siano, e potrebbero essere ancor di più, di grande utilità per uomo. È innegabile la potenzialità dei funghi nel contribuire alla transizione ecologica nella produzione di cibo, farmaci e agrofarmaci, prodotti chimici, combustibili, tessili e materiali per l'edilizia, per l'industria elettronica, automobilistica, navale e aerospaziale e dei trasporti (Meyer et al., 2020).

I. I FUNGHI E L'INDUSTRIA CHIMICA

In coerenza con la loro peculiare modalità di crescita i funghi possono secernere numerosi enzimi quali cellulasi, amilasi, pectinasi, inulasi, proteasi e lipasi, e sono in grado di scomporre – idrolizzandoli – i polisaccaridi (cellulosa, amido, pectina, inulina), le proteine e i lipidi presenti nel substrato, ottenendo sostanze direttamente assorbibili dalle ife mediante specifici trasportatori di membrana. La loro versatilità nel colonizzare le biomasse, combinata con l'ampio arsenale enzimatico, ha reso i funghi, e particolarmente alcuni ascomiceti, come *Aspergillus niger*, *A. oryzae*, *Trichoderma reesei* e *Thermothelomyces thermophilus*, delle vere e proprie fabbriche di enzimi ad alte prestazioni, favorendo il loro utilizzo intensivo nell'industria alimentare e dei mangimi, dei detergenti, della pasta di legno e della carta, dei combustibili, nonché per scopi farmaceutici e chimici.

Come risulta dalla tabella 1, dove si presenta una selezione di prodotti industriali ottenuti grazie alle capacità metaboliche dei funghi, l'offerta industriale non solo è diversificata, ma anche economicamente rilevante.

Come nelle migliori industrie, anche i funghi filamentosi possono vantare un portfolio di prodotti "a catalogo" che non si limita agli enzimi e all'acido citrico, di elevata importanza economica e ampiamente utilizzato nell'industria delle bevande, alimentare, dei detergenti, dei cosmetici e farmaci per la cui produzione *A. niger* è il cavallo di battaglia (Behera, 2020), ma anche a diversi acidi organici, antibiotici e altri farmaci, proteine ed enzimi, alternative alla carne, vitamine, acidi grassi polinsaturi (Moore et al., 2020) e persino materiali compositi e pelli vegane (<https://www.mycoworks.com/>). Sicuramente potremo contare sul contributo dei funghi anche nel tentativo di limitare la dipendenza dell'industria dai materiali fossili. Un esempio: *A. niger* è un ottimo produttore anche di acidi organici come l'itaconato (per il quale concorre anche *A. terreus*) e il galattarato che potrebbero sostituire rispettivamente l'acido poliacrilico e il polietilene tereftalato (PET) utilizzato per la produzione di plastica, per la cui sintesi si utilizza il petrolio.

CATEGORIA	PRODOTTO	FUNGHI / GENERI FUNGINI INTERESSATI	VALORE DEL MERCATO*	ANNO DI RIFERIMENTO
Cosmetici	β -(1-3)-D-glucano	<i>Agaricus subrufescens</i> , <i>Lentinula edodes</i> , <i>Ganoderma lucidum</i> , <i>Antrodia cinnamomea</i> , <i>Cordyceps sinensis</i> , <i>Grifola frondosa</i> , <i>Inonotus obliquus</i> , <i>Schizophyllum commune</i>	400	2020
	L-ergotioneina	<i>A. bisporus</i> , <i>Boletus edulis</i> , <i>Flammulina velutipes</i> , <i>Pleurotus eryngii</i> , <i>P. ostreatus</i> , <i>L. edodes</i>	15	2021
	Acido kojico	<i>Aspergillus oryzae</i>	36	2022
Fungicidi	Strobilurine	<i>Mucidula</i> , <i>Oudemansiella</i> , <i>Strobilurus</i>	4600	2022
Agrofarmaci microbici per la difesa		<i>Aureobasidium pullulans</i> , <i>Trichoderma</i> spp, <i>Ampelomyces quisqualis</i> , <i>Beauveria bassiana</i> , <i>Candida oleophila</i> , <i>Conyothirium minitans</i> , <i>Metarhizium brunneum</i> , <i>Metshnikowia fructicola</i> , <i>Paecilomyces fumosoroseus</i> , <i>Purpureocillium lilacinum</i> , <i>Pythium oligandrum</i> , <i>Saccharomyces cerevisiae</i> , ...	4870	2021

CATEGORIA	PRODOTTO	FUNGHI / GENERI FUNGINI INTERESSATI	VALORE DEL MERCATO*	ANNO DI RIFERIMENTO
Biofertilizzanti a base di micorrize		<i>Pisolithus tinctorius</i> , <i>Rhizophagus</i> , <i>Sebacinales</i> ,	270	2021
Enzimi fungini	Laccasi	<i>Aspergillus</i>	3	2021
	Invertasi	<i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Rhizopus</i> , <i>Saccharomyces</i>	58	2022
	Amilasi	<i>Aspergillus awamori</i> , <i>A. niger</i> , <i>A.</i> <i>oryzae</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Rhizopus</i>	280	2018
	Proteasi	<i>Aspergillus</i> , <i>Humicola</i> , <i>Mucor</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Rhizopus</i> , <i>Thermoascus</i> , <i>Thermomyces</i>	1300	2021
	Cellulasi	<i>Trichoderma reesei</i>	1620	2022
	Pectinasi	<i>Aspergillus niger</i> , <i>A. awamori</i> , <i>Mucor piriformis</i> , <i>Penicillium</i> <i>restrictum</i> , <i>Trichoderma viride</i> , <i>Yarrowia lipolytica</i>	1400	2020
	Lipasi	<i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Fusarium</i>	690	2022
	Galattosidasi	<i>Aspergillus</i> , <i>Kluyveromyces lactis</i> , <i>Guehomyces pullulans</i>	1500	2021
	Lattasi	<i>Aspergillus</i> , <i>Kluyveromyces</i> , <i>Trichoderma</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Rhizopus</i> , <i>Fusarium</i>	180	2019
Acidi organici	Acido citrico	<i>A. niger</i>	281	2021
	Acido fumarico	<i>Rhizopus spp.</i>	650	2020
	Acido gluconico	<i>A. niger</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Scopulariopsis</i> , <i>Gonatobotrys</i> , <i>Gliocladium</i>	50	2017
	Acido itaconico	<i>A. itaconicus</i> , <i>A. terreus</i>	980	2022
	Acido lattico	<i>Rhizopus</i>	1100	2020
* milioni di dollari				

Tab. 1 *Prodotti industriali di rilevante interesse economico ottenuti dai funghi (da: Niego et al., 2023, modificata; per la stima del mercato dei presidi fitosanitari biologici il riferimento è <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/biopesticides-market>; per gli agrofarmaci microbici per la difesa il riferimento è: <https://www.sian.it/biofito/>.)*

Ma la ricerca offre ulteriori spunti per liberarci dalla dipendenza dal petrolio. I funghi possono giocare un ruolo cruciale nello sviluppo di biocarburanti pronti all'uso mediante fermentazione di scarti cellulosici (Sen et al., 2024) o di biodiesel (Abdelhamid et al., 2022).

2. I FUNGHI E LA MEDICINA UMANA

Non è questa la sede per riassumere l'enorme quantità di informazioni relative all'argomento di questo capitolo. Nell'ampia letteratura disponibile, si rimanda qui per un approfondimento agli ottimi contributi di Aly et al. (2011) e Dutta et al. (2022). Piace, tuttavia, ricordare che prima di Fleming, a cui viene riconosciuta la scoperta della penicillina e che valse a lui, assieme a Howard Florey e a Ernst Boris Chain, il Premio Nobel nel 1945, un italiano, il medico molisano Vincenzo Tiberio, aveva scoperto e valutato *in vitro* e *in vivo*, più di 30 anni prima di Fleming, l'effetto antibiotico di filtrati colturali di alcuni funghi contro diversi batteri patogeni per l'uomo (Tamburello e Villone, 2017) ma la pubblicazione dei suoi risultati (Tiberio, 1895) non era stata giustamente apprezzata. Tiberio non è stato il solo italiano a legare il suo nome agli antibiotici di origine fungina prima ancora di Fleming. Bartolomeo Gosio, medico piemontese (Aimassi, 2008), aveva isolato e cristallizzato, a partire da una coltura di *Penicillium glaucum* (o, forse, *P. brevicompactum*), una sostanza che chiamò, nel 1913, acido micofenolico e che risulta essere il primo antibiotico a essere stato purificato e caratterizzato. Gosio, per questa e altre scoperte in campo medico, fu anche candidato al Premio Nobel per la medicina o la fisiologia nel 1922. Ma, evidentemente, i tempi non erano ancora maturi e dovettero passare quasi venti anni prima che *Penicillium* venisse riscoperto come produttore di sostanze utili per la salute umana. Altri italiani hanno legato il loro nome agli antibiotici fungini. Se la storia della scoperta della penicillina è nota a tutti, forse sono in numero minore quelli che conoscono il contributo dell'igienista italiano Giuseppe Brotzu dell'Università degli Studi di Cagliari, e del suo allievo Antonio Spanedda, che nel 1945 scoprirono un altro importante antibiotico β -lattamico, la cefalosporina, metabolita secondario prodotto dal fungo *Cephalosporium acremonium*. Dall'archivio storico dell'Università di Cagliari sappiamo che Brotzu richiese finanziamenti a diversi enti italiani per poter purificare il principio attivo prodotto da *C. acremonium* e poter produrre un farmaco, ma non avendo avuto successo si rivolse a Florey (lo stesso della penicillina) e tramite lui fece arrivare una coltura del fungo a F.P. Abraham (biochimico a Oxford) e collaboratori che estrassero, purificarono e studiarono, negli anni dal 1951 e il 1961, dif-

ferenti sostanze ad attività antibiotica, tra cui la cefalosporina C, capostipite di questa classe di antibiotici. Si sa che Abraham brevettò a suo nome la cefalosporina C e, nel 1964, vendette il brevetto alla Eli Lilly. La paternità dello scienziato cagliaritano venne riconosciuta solo negli anni '70.

Le penicilline da quasi 100 anni (il nome penicillina fu conferito a questo antibiotico dal suo scopritore Alexander Fleming il 7 marzo 1929) si ottengono dal loro produttore naturale *Penicillium chrysogenum*. Ma i funghi producono anche molti altri composti utili in medicina umana diversi dagli antibiotici. A solo titolo di esempio possiamo ricordare farmaci impiegati per ridurre la ipercolesterolemia (statine, *Aspergillus terreus* e *Monascus purpureus*) e farmaci immunosoppressivi (ciclosporina, *Tolypocladium inflatum*). Già da molto tempo prima che le tecniche microbiologiche permettessero l'isolamento in coltura pura di isolati fungini esisteva una lunga storia d'impiego dei corpi fruttiferi dei funghi (macroscopici) per scopi medicinali; chi non ricorda *Padiglione cancro* di Alexander Solzhenitsyn dove l'autore narra della sua guarigione dal cancro grazie all'impiego di decotti di Chaga – *Inonotus obliquus* – dopo il fallimento delle terapie ufficiali? Per migliaia di anni le popolazioni indigene di Asia, Africa e Sud America hanno fatto ampio uso della biodiversità degli ecosistemi naturali come fonte di principi attivi da impiegare in quella che noi oggi conosciamo come medicina tradizionale, nella cui categoria più preziosa ritroviamo i funghi medicinali. Di fatto all'interno dei corpi fruttiferi dei funghi sono stati ritrovati più di cento composti (polisaccaridi, lectine, triterpeni, statine, composti fenolici...) ad azione antitumorale, antiossidante, cardiovascolare, antivirale, antibatterica e antifungina, epatoprotettiva, antidiabetica e immunomodulatrice, quest'ultima di particolare interesse per i pazienti immunodepressi e immunodeficienti (Semwal et al., 2023).

Negli ultimi anni la produzione globale di funghi (tra cui quella dei funghi eduli e medicinali, rispettivamente corrispondente al 50% e al 34% del mercato) ha sfiorato i 50 milioni di tonnellate, con la Cina considerato il maggior produttore. La quasi totalità della produzione include *Lentinula* (*Lentinula edodes* meglio conosciuta con il nome Shiitake), *Pleurotus* (principalmente *P. ostreatus*, oltre a *P. eryngii*, *P. djamon*, *P. pulmonarius* e *P. citrinopileatus*), *Auricularia*, *Agaricus* (principalmente *A. bisporus* e *A. brasiliensis*) e *Flammulina* (Arshadi et al., 2023) tra i primi cinque generi, ma non dobbiamo scordare *Ganoderma lucidum* (nome comune Reishi), *Grifola frondosa* (maitake), *Trametes versicolor* (fungo delle nuvole o coda di tacchino, per la particolare forma), o *Cordyceps militaris*. Molti dei suddetti funghi, o meglio dei loro polisaccaridi e di altre sostanze da loro estraibili, sono attualmente in vendita come integratori alimentari e utilizzati come coadiuvanti nel trattamento di pazienti affetti da importanti patologie, tra cui il cancro, l'insufficienza renale e il diabete.

Ovviamente sono di interesse medico non solo i componenti strutturali, ma anche i metaboliti secondari, tra cui, ad esempio la psilocibina e la psilocina, metaboliti a effetto psichedelico prodotti da più di 200 specie di funghi, soprattutto appartenenti al genere *Psilocibe*, più popolari con il nome di funghi allucinogeni (funghi magici) e utilizzati da secoli nelle cerimonie religiose e nei rituali sacri (ad esempio, durante i riti sciamanici in America latina sono utilizzati nella preparazione delle bevande rituali).

Questi composti possono indurre effetti psichici e alterazioni nella coscienza e nella cognizione attraverso cambiamenti transitori del senso del tempo, delle proprie emozioni e a livello di percezione del proprio senso di sé. Negli ultimi tempi, tuttavia, la psilocibina ha ricevuto un crescente interesse da parte del pubblico come nuovo farmaco per il trattamento dei disturbi dell'umore e provocati dall'uso di sostanze quali droghe, alcool o farmaci (Substance Use Disorder - SUD), recentemente autorizzata negli Stati Uniti per uso medico e consentita per uso ricreativo (Sharma et al., 2023).

Questo ritrovato interesse nei confronti della psilocibina rientra in quello che oggi definiamo *Rinascimento psichedelico* (Hadar et al., 2023), cioè la rivalutazione delle proprietà psichedeliche di alcune classi di farmaci che nella metà dello scorso secolo furono oggetto di numerosi studi clinici (a scopo terapeutico) e dei quali ne fu proibito l'uso terapeutico e ricreazionale negli anni '70, ma che oggi vengono rivalutati con rinnovato rigore scientifico e metodologico. Tra questi composti rientra appunto la psilocibina, il cui impiego negli ultimi anni è stato studiato somministrando microdosi ad adulti americani per il trattamento di sindromi depressive, al fine di ridurre il disagio psicologico e migliorare il benessere soggettivo, e più recentemente su giovani affetti da depressione farmaco-resistente (in alcuni casi inclusa tra i sintomi del long Covid).

Seppur non strettamente medico, riguarda la salute anche la soddisfazione del desiderio di bellezza degli esseri umani, e anche in questo campo i funghi meritano menzione (Visvanathan et al., 2022). Il mercato di questi prodotti è in crescita (si prevede possa crescere nel periodo 2024-2032 a un CAGR del 5,1%; <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/mushroom-cosmetics>) essendo sempre più sensibile alla necessità di utilizzare prodotti naturali e avere una strategia produttiva più sostenibile. Tra i metaboliti organici che i funghi possono produrre, composti come polifenoli, polisaccaridi, terpenoidi, vitamine mostrano, per esempio, dei tratti utili per la bellezza dei capelli e della pelle. Per questo motivo da alcuni anni molte aziende cosmetiche hanno iniziato a utilizzare questi metaboliti fungini nei loro prodotti sfruttandone le proprietà anti-tan, antirughe e sbiancante per la pelle. Un esempio è il fungo Shiitake (*Lentinula edodes*) che viene utilizzato

come esfoliante stimolando un rapido rinnovo della pelle e aumentandone l'elasticità e la brillantezza. Inoltre, *L. edodes* – così come *Volvariella volvacea* – contiene anche molti antiossidanti che trovano applicazione nell'industria cosmetica. L'uso di micelio fungino nei prodotti di bellezza è ritenuto attraente anche dal punto di vista del marketing, tanto da essere inserito nel nome stesso del prodotto, come in “Mycelium Glow Brightening Serum” di Shroom.

3. I FUNGHI E GLI ALIMENTI

È difficile immaginare alimenti più profondamente e indiscutibilmente legati alla nostra civiltà di pane e vino, risultato della fermentazione di prodotti vegetali da parte del fungo più famoso e diffuso del mondo, il lievito *Saccharomyces cerevisiae*. Lievito che in ogni caso si trova in buona compagnia di funghi miceliari, quale per esempio *Penicillium roqueforti*, protagonista del gusto di apprezzati formaggi erborinati, o di *Aspergillus oryzae* e *A. sojae*, cui si deve la fermentazione della soja nella produzione di quelle salse (*tamari*, *shoyu*, *kecap*, *tianmianjiang*, ecc., a seconda della geografia e del processo), che contraddistinguono la cucina orientale. Probabilmente non meno antico è il consumo diretto, in espansione e in continua diversificazione negli ultimi anni, e che si rivolge ovviamente ai carpofori macroscopici, ma anche al micelio, che viene consumato tradizionalmente nel *tempeh*, favorendo l'inclusione nel novero dei funghi degni di fama culinaria il genere *Rhizopus*. Più di recente si è affacciato sulla scena – o meglio: sui fornelli – addirittura il genere *Fusarium*, nominato nella prima parte di questo contributo per la sua rilevanza distruttiva dei raccolti. Il QuornTM è infatti un prodotto basato sulla “mycoprotein”, secondo la definizione dei produttori “a source of protein that is high in fiber and low in saturated fat”, di fatto un prodotto derivato dal processamento del micelio di *Fusarium venenatum* A3/5, dunque non esclusivamente proteico (fig. 1). Come *Aspergillus oryzae* è tassonomicamente quasi sovrapponibile alla specie produttrice di aflatossine *A. flavus*, tanto da far suggerire a Payne e collaboratori (2006) che *A. oryzae* sia un caso di domesticazione di un fungo, così *F. venenatum* è specie simile a *F. graminearum*, patogeno dei cereali e produttore di diverse micotossine, col quale era stato inizialmente confuso (Yoder and Christianson, 1998), ma da cui invece si differenzia per le ottime caratteristiche nutrizionali e tecnologiche (Wiebe, 2002). Selezionato tra circa 3000 differenti isolati fungini e per 12 anni sottoposto a saggi per la conferma della sua innocuità (Anderson and Solomons, 1984), permette di ottenere un prodotto fibroso con una tessitura simile a quella della carne. Intendiamoci, il Quorn in quanto tale è privo di qualunque sapore che gli viene conferito dalle



Fig. 1 Confezione di “salsicce” a base di Quorn in vendita in UK (assaggiate da uno degli Autori del presente focus!)

aggiunte e dai condimenti quando viene preparato per la vendita e, quindi, la salubrità degli alimenti a base di Quorn dipende dai condimenti usati!

La lunga e accurata ricerca alla base dello sviluppo del Quorn deriva anche dalla complessa e controversa storia dell'utilizzo di funghi per la produzione di proteine, principalmente destinate al settore mangimistico. In Italia, *Candida tropicalis* e il prodotto derivato dalla sua crescita su substrato derivato dalla raffinazione del petrolio (denominato in modo un po' ingenuo bioproteina) è stata protagonista di una vicenda che costituisce una delle pagine più vergognose della storia industriale italiana (Guttardi, 2024).

La realizzazione di impianti, con scelte ambientalmente controverse, e addirittura l'assunzione di personale con inizio della produzione in via sperimentale prima di ottenere i necessari permessi, ignorando la diffusa preoccupazione per i cosiddetti “polli al petrolio” (Chierici, 1974), condusse a un epilogo socialmente ed economicamente drammatico ma certamente istruttivo sulla necessità di utilizzare prudenza e rispetto nei confronti dei consumatori nel percorrere strade lontane dalla tradizione alimentare.

Oggi, in ragione di una tecnologia più avanzata, della crescente richiesta di proteine, dei problemi che l'allevamento animale e la pesca indiscriminata pongono per l'ambiente, assistiamo a un rinnovato interesse dell'industria alimentare per la versatilità dei funghi come materia prima per innovativi pro-

dotti destinati al consumo umano. Ad esempio, il filetto di salmone vegano nel 2023 è diventato il primo prodotto a base di micoproteine stampato in 3D entrato nei supermercati (<https://www.promyc.com/mycotalks/vegan-salmon-filet-becomes-first-3d-printed-mycoprotein-productavailable-in-supermarkets>). Confidiamo che la dolorosa esperienza degli anni '70 non sia dimenticata e permetta di considerare il rispetto per la salute, le legittime perplessità sull'iperprocessamento dei cibi, la cultura culinaria dei consumatori almeno altrettanto importanti dell'apporto proteico e della convenienza tecnico-economica.

Si deve anche sottolineare che non è soltanto con la qualità delle loro proteine che i funghi contribuiscono al completamento della dieta, ma anche grazie alla componente glucidica, i cui effetti immunostimolanti sono già stati discussi. Un recente metastudio svolto presso la Pennsylvania State University (Ba et al., 2021), che ha complessivamente valutato dati relativi a quasi ventimila pazienti, ha dimostrato l'esistenza, nei consumatori abituali di funghi, di una significativa riduzione del rischio di tumore al seno, invero già dagli anni 2000 ben documentata da numerosi studi condotti in Cina e Corea (Hong et al., 2008; Zhang et al., 2009; Shin et al., 2010).

Infine, del fatto che valga la pena mangiare funghi oltre che per la salute anche per il gusto, sembra si siano accorti anche diversi ristoranti stellati a Londra (<https://www.esquire.com/uk/food-drink/restaurants/a30640079/best-restaurants-london/>) e New York che, non paghi del ricercato *Tuber magnatum* – il prezioso tartufo bianco – si impegnano a sfruttare l'enorme diversità dei funghi per esplorare nuovi aromi e sapori. Così mentre c'è chi si attrezza per coltivare inediti funghi nella cantina o addirittura in un apposito frigorifero della cucina (<https://www.thetimes.com/life-style/food-drink/article/the-hottest-new-restaurant-trend-a-mushroom-room-t7mdk3k6d>), dal febbraio scorso è attivo a Manhattan il primo ristorante “fungocentrico” (Mushroom-Centric) che contempla nel menu solo piatti a base di funghi (<https://www.forbes.com/sites/melissakravitz/2024/01/30/manhattans-first-mushroom-centric-restaurant-opens-february-1/>).

Ma l'industria alimentare ha trovato nei funghi un emporio di prodotti di grande utilità per la produzione di cibo: acidulanti, enzimi, aromi, vitamine, coloranti, acidi grassi polinsaturi, acidi organici (Pouris et al., 2024; Barzee et al., 2021), prova ne sia il grande interesse che i venture capital stanno dimostrando finanziando start up che di questo si occupano (<https://www.ecbf.vc/mighty-mycelium>).

È necessario, comunque, stare sempre in guardia. *Penicillium camembertii* e, forse, anche *Penicillium roqueforti*, potrebbero scomparire, secondo il

CNRS francese (<https://news.cnrs.fr/articles/french-cheese-under-threat>) a causa della estremamente ridotta variabilità genetica dei ceppi usati dall'industria alimentare. Chissà, ci dovremo riabituare a mangiare il Camembert o il Brie non più con la loro crosta candida ma con sfumature grigie, verdi o anche arancio, com'erano fino agli anni '50 del secolo scorso. A meno che i micologi non trovino una soluzione!

4. I FUNGHI NELLA DIFESA DALLE MALATTIE DELLE PIANTE

Non è pensabile, in tempi brevi, rinunciare del tutto all'uso degli agrofarmaci di sintesi e ad altri agrofarmaci a pesante impatto ambientale se vogliamo mantenere gli attuali livelli quantitativi delle produzioni agricole, ma è altrettanto vero che quello è l'obiettivo cui dobbiamo tendere, se vogliamo eliminare i negativi effetti collaterali che il loro impiego comporta. La scienza, e non la magia, si sta adoperando in questo senso e i funghi ci possono aiutare.

In un contesto di produzione agraria sostenibile, e alla luce dell'attuale quadro legislativo italiano, europeo e mondiale, la necessità di sostituire o, più probabilmente in tempi brevi, integrare i prodotti fitosanitari di sintesi con approcci/strumenti più eco-compatibili, pone i funghi (quelli definiti benefici) sotto i riflettori nel ruolo di principi attivi di agrofarmaci biologici impiegabili in agricoltura. Se, all'inizio, questi agrofarmaci erano indirizzati principalmente verso l'agricoltura biologica, oggi la tendenza è quella di considerarli uno strumento in più per l'agricoltura, comunque la si voglia aggettivare (Jensen et al., 2016) e la ricerca nel settore è molto attiva (Collinge et al., 2022). Grazie a meccanismi d'azione che agiscono direttamente contro i patogeni coinvolgendo un vero e proprio combattimento (antibiosi, micoparassitismo – figura 2 – e competizione per i siti d'infezione) o, indirettamente, sottraendo risorse nutritive ai patogeni, oppure utilizzando la pianta come mediatore, attraverso un vero e proprio “hackeraggio” dei meccanismi di difesa implicati nelle risposte di difesa (induzione di resistenza), questi organismi benefici riescono a bloccare l'infezione da parte dei patogeni o a ridurre lo sviluppo della malattia.

In tutti i modi di azione appena descritti, il metabolismo secondario funge da protagonista, intervenendo in tutte le relazioni che i funghi benefici instaurano con il patogeno o con la pianta. Infatti, una delle caratteristiche più affascinanti dei funghi è la pletora di metaboliti secondari specializzati che riescono a produrre, di alcuni dei quali si è già accennato in precedenza, tanto intriganti quanto inquietanti come un *Giano bifronte*, poiché includono composti dannosi e altri benefici (Keller, 2019; Vicente et al., 2022). In generale questi metaboliti secondari giocano un ruolo fondamentale nell'ecofisiologia

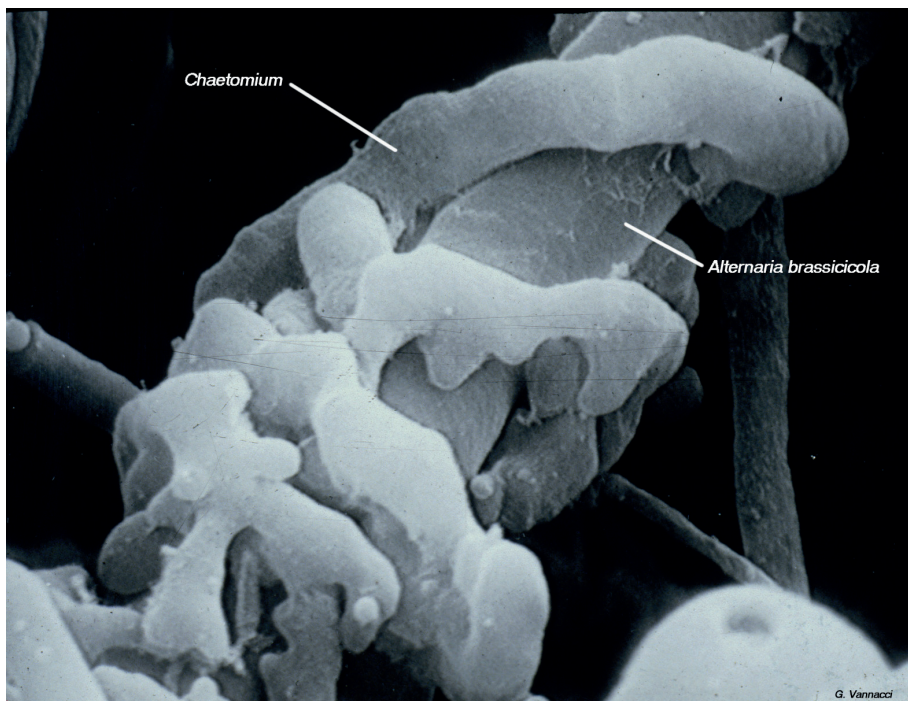


Fig. 2 *Chaetomium globosum* che parassitizza ife di *Alternaria brassicicola*

degli organismi fungini, favorendo anche, nel corso dell'evoluzione, l'adattamento a molteplici ambienti e caratterizzandone la modulazione degli stili di vita. Parlando di agrofarmaci biologici non possiamo non ricordare le diverse specie del genere *Trichoderma* utilizzate come principio attivo di quasi 150 formulazioni presenti ad oggi sul mercato (Woo et al., 2023). L'enorme interesse per questo genere si fa risalire a un lavoro del 1932 (Weindling, 1932), ma il grande successo che isolati di *Trichoderma* hanno avuto come principi attivi di agrofarmaci lo si deve, in gran parte, a Gary E. Harman che, nella metà degli anni '80 ottenne, tramite la fusione di protoplasti di due isolati di *Trichoderma* aventi caratteristiche diverse (Stasz et al., 1988), un ceppo (T22) che sviluppò come principio attivo di agrofarmaci tramite, anche, la creazione di una piccola azienda (TGT, successivamente BioWorks) ottenendo un successo commerciale a livello mondiale che dura tutt'ora (Sarrocco 2023).

Anche altri funghi offrono interessanti opportunità. Nel 1972 Dasa Vesely (Vesely, 1977) isolò da barbabietola da zucchero, in quella che era la Cecoslovacchia (oggi Repubblica Ceca) un isolato di *Pythium oligandrum*, il cui uso per la protezione della barbabietola da zucchero dalla moria delle piantine (dam-

pingoff) fu oggetto di brevetto (<https://patents.justia.com/patent/4259317>), poi ceduto alla Biopreparaty (<https://biopreparaty.eu/>) che, da allora, produce agrofarmaci aventi come principio attivo questo *Pythium*. Anche *Muscodor albus*, ma anche altre specie di *Muscodor*, ha un notevole potenziale, prova ne sia l'elevato numero di brevetti che lo riguardano, e non solo per la difesa delle piante (Saxena et al., 2021). La sua attività biologica è strettamente legata alla capacità di produrre una miscela di sostanze organiche volatili biologicamente attive, caratteristica che condivide con altri funghi di interesse per la difesa, ad esempio, di frutta e ortaggi in post raccolta (Ling, 2024). Ma la ricerca ha individuato altre nicchie ecologiche dove poter cercare funghi da impiegarsi come principi attivi di agrofarmaci. L'interno delle piante, sia erbacee che arboree, nasconde una moltitudine di organismi, inclusi i funghi, che convivono con la pianta anche per lungo tempo senza causare alcun tipo di danno. Questi endofiti sono organismi estremamente interessanti (Gunjal, 2024) in quanto possono produrre metaboliti utili alla fisiologia delle piante stimolandone la crescita, ma anche in grado di limitare (direttamente o indirettamente, tramite i meccanismi propri della pianta) l'attività di organismi patogeni. Sono, quindi, studiati sia come biofertilizzanti che come principi attivi di agrofarmaci. Affinché un fungo (o qualche altro microrganismo o virus) possa raggiungere il mercato diventando un agrofarmaco, il coinvolgimento dell'industria è essenziale e in questi ultimi anni l'industria sta rispondendo con grande interesse. Stime di crescita del mercato degli agrofarmaci a base biologica (nel loro complesso) ci dicono che nel periodo 2022-2030 questo settore crescerà con un CAGR del 15,37%, guidato dal comparto dei fungicidi a base microbica (<https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/biopesticidesmarket>).

Quando, nel 1984, uno degli autori di questo focus partì con una borsa di studio per lavorare con Gary Harman a Geneva (USA) sul biocontrollo di *Alternaria raphani* e *A. brassicicola* su seme (Vannacci e Harman, 1987), le ricerche sull'impiego di funghi in grado di limitare l'attività di organismi patogeni erano considerate, da colleghi e amici patologi vegetali, interessanti da un punto di vista scientifico, ma con poche prospettive di applicazioni pratiche. Di acqua ne è passata sotto i ponti, e ora si può affermare che questo tipo di agrofarmaci per la difesa è entrato di buon diritto nel novero degli strumenti che gli agricoltori hanno per la difesa delle colture.

5. I FUNGHI NEL RISANAMENTO AMBIENTALE

Con l'urgenza dettata dall'aumentata sensibilità verso la protezione dell'ambiente e della sua biodiversità, si vede oggi nel biorisanamento una via efficace

di mitigazione degli effetti dell'inquinamento dovuto al rilascio ambientale di sostanze chimiche. Con il termine biorisanamento si intende un insieme di processi biologici che permettono di degradare, trasformare, sequestrare o rimuovere completamente dall'ecosistema un composto dannoso. Grazie alla varietà dei metaboliti secondari e degli enzimi prodotti, i funghi trovano utile impiego anche in questo settore, praticamente in tutti gli ambienti (acque dolci, salate e terra ferma, Prasad et al., 2021).

A titolo di esempio si possono ricordare gli inquinanti farmaceuticamente attivi (PhAC) come antibiotici, analgesici, ormoni e steroidi. I funghi hanno gli strumenti metabolici necessari per degradare i PhAC in ambienti complessi, come il suolo e l'acqua, così come nei bioreattori. L'impiego di *Fomes fomentarius*, *Hypholoma fasciculare*, *Phyllotopsis nidulans*, *Pleurotus ostreatus* e *Trametes versicolor* è efficace nella rimozione di farmaci citostatici quali la bleomicina e la vincristina, impiegati per curare diverse patologie come il linfoma di Hodgkin (Amobonye et al., 2023). Tra i problemi ambientali più preoccupanti c'è l'accumulo di ioni di metalli pesanti. Per rimuovere questi inquinanti in modo rapido, si stanno studiando materiali bioibridi formati da nanoparticelle magnetiche Fe_3O_4 cresciute su spore di funghi. Questi adsorbenti bioibridi, grazie alla struttura porosa, riescono a catturare efficacemente i metalli pesanti e, se combinati con tecniche microrobotiche magnetiche, migliorano la velocità e capacità di rimozione dei metalli. Inoltre, questi adsorbenti possono essere riutilizzati dopo un semplice trattamento, aprendo nuove possibilità per la bonifica ambientale (Zhang et al., 2018). Ma anche i polimeri plastici sono rifiuti solidi che rappresentano una grave minaccia a livello globale, richiedendo decenni per degradarsi. Tra i vari processi di degradazione, la biodegradazione risulta il metodo più efficace, ecologico ed economico.

Tuttavia, è un processo lento influenzato da fattori ambientali e dall'azione di specie microbiche naturali. I funghi svolgono un ruolo cruciale in questo processo, producendo enzimi degradativi come cutinasi, lipasi, proteasi ed enzimi lignocellulolitici. Questi enzimi, attraverso ossidazione o idrolisi, migliorano l'idrofilicità dei polimeri, frammentandoli in molecole di peso molecolare inferiore, accelerando così la degradazione. Specie fungine come *Aspergillus nidulans*, *Aspergillus flavus*, *Penicillium griseofulvum*, *Phanerochaete chrysosporium*, *Pleurotus ostreatus* e *Agaricus bisporus* hanno dimostrato capacità di degradazione delle plastiche. Inoltre, la combinazione di biodegradazione con fotodegradazione e meccanismi termo-ossidativi rende il processo più rapido ed efficiente (Srikanth et al., 2022). Anche le plastiche presenti negli ecosistemi marini possono essere degradate da funghi, contribuendo a risolvere un problema che assume, sempre più, dimensioni gigantesche mettendo a

rischio interi ecosistemi (Vaksmas, 2024). I funghi, oltre a poter essere usati come agrofarmaci, riescono anche a degradare prodotti di sintesi usati per la difesa delle colture come organoclorurati, organofosfati, piretroidi e carbammati, caratterizzati da una elevata persistenza ambientale e con effetti avversi su organismi non bersaglio. Allo scopo, specie appartenenti ai generi *Trametes*, *Ganoderma*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Pleurotus*, *Cladosporium*, *Rhizopus*, *Penicillium*, *Phlebia* e *Mortierella* (Vaksmas et al., 2023) hanno mostrato interessanti capacità degradative.

6. I FUNGHI E I NUOVI MATERIALI

Negli ultimi decenni è stato registrato un crescente interesse per l'impiego di organismi per la produzione di materiali funzionali a partire da risorse biologiche (Manan et al., 2021), come testimoniato anche dal World Economic Forum (<https://www.weforum.org/agenda/2021/10/how-mushrooms-and-microorganisms-could-transform-food-packaging/>). Poiché i funghi sono in grado di crescere su diverse matrici organiche, spesso scarti di altri processi, in un'ottica di economia circolare questi scarti vengono utilizzati per far crescere i funghi il cui micelio viene impiegato per creare nuovi materiali che trovano impiego nella cosmesi, nell'industria tessile e della moda, nel confezionamento, in edilizia e in medicina (Vandelook et al., 2021) che porta alla creazione di aziende innovative (ad es. Ecovative - <https://www.ecovative.com/> ; Magical Mushrooms - <https://magicalmushroom.com/>). L'industria tessile e della moda oggi risente della ormai diffusa sensibilità per le problematiche ambientale ed etica, ed è pertanto stimolata a cercare soluzioni produttive innovative, sebbene in realtà non del tutto nuove nella storia dell'uomo, che utilizzino materiali naturali quali evidentemente sono i funghi. Il loro impiego nella fabbricazione di tessuti è una pratica antica, come testimonia l'uso secolare del tradizionale feltro tedesco (Amadou) (Gandia et al., 2021), cui si rifà per esempio il "Muskin", prodotto simil-pelle basato sulla trama dei carpofori di *Phellinus ellipsoideus* e sviluppato dal centro ricerche Grado Zero (<https://www.gzespace.com/index.html>) di Montelupo fiorentino, acquisito recentemente da Pangaia (brand di abbigliamento casual con sede a Londra). Materiali che, in una certa misura, possono sostituire la pelle utilizzano micelio puro (pure mycelium materials – PMM) anche di altri funghi, come *Ganoderma*, *Trametes*, *Fomes*, *Pycnoporus* e *Perenniporia*. Se la tradizionale produzione della pelle presenta il problema etico del sacrificio di animali per scopi voluttuari, e d'altra parte le pelli sintetiche dipendono dall'industria petrolchimica causando il rilascio nell'ambiente di

plastiche non degradabili, i tessuti similpelle a base di funghi rappresentano un'alternativa decisamente più sostenibile ed etica per una società sempre più attenta a questi valori. Aziende come la Bolt Threads (<https://boltthreads.com/>), nata nel 2009 e oggi valutata 250 milioni di dollari e che ha nel suo portfolio un prodotto sostitutivo della pelle principalmente a base di micelio fungino, ha stretto accordi commerciali con colossi dell'industria della moda, come Stella McCartney, Lululemon o Adidas, allo scopo di favorire, in tempi stretti, la transizione ecologica mantenendo un'alta qualità dei prodotti.

Infine, un effetto negativo sull'ambiente di tutto il comparto industriale, indipendentemente dal settore, è causato dall'impiego di plastiche per il confezionamento dei prodotti. Per ovviare a questo aspetto l'attenzione verso un "packaging" sostenibile è sempre crescente. Anche in questo caso, i nostri amici funghi offrono delle alternative estremamente interessanti al polistirene, derivato dal petrolio (per la cui produzione viene emesso gas serra in abbondanza) che, in quanto non biodegradabile e difficilmente riciclabile, rappresenta una seria minaccia per l'ambiente. Materiali a base di micelio fungino cresciuti sugli scarti dell'agricoltura (come, ad esempio, la paglia) sono utilizzati per creare confezioni adatte alla spedizione di prodotti derivati dall'industria elettronica, per trasportare oggetti fragili e persino per il confezionamento degli alimenti (vedi, ad es., SMUSH: <https://smushmaterials.com/>).

Ma non è solo il packaging a poter trarre vantaggio dall'impiego dei funghi, la rapida urbanizzazione a cui abbiamo assistito nei decenni appena passati ha avuto come risultato lo sviluppo di una significativa pressione sull'industria edilizia in termini di fornitura di materiali da costruzione quali mattoni, cemento e pannelli isolanti. La produzione di queste forniture convenzionali richiede un elevato consumo energetico e causa inquinamento dell'aria, dell'acqua e del territorio. La possibilità di far crescere un fungo su sottoprodotti dell'agricoltura, così come su materiale di scarto, ha attirato l'attenzione di alcuni ricercatori che hanno intravisto la possibilità di creare materiali per costruzioni con un basso consumo energetico e al contempo allestire un sistema di riciclo dei rifiuti (<https://www.ingenia.org.uk/articles/building-withfungi/>) anche se il costo di produzione, al momento, potrebbe rappresentare un ostacolo alla sua commercializzazione. Nel 2014, presso il MoMa di New York è stato installato l'edificio Hy-Fi, una torre edificata con mattoni costituiti partendo da scarti di una azienda agricola e consistenti nel micelio fungino impacchettato nella matrice di crescita. Inoltre, per una sua proprietà intrinseca, il micelio è un eccezionale isolante acustico, quindi potenzialmente impiegabile in sostituzione dei tradizionali pannelli installati per ridurre l'inquinamento acustico (<https://mogu.bio/>).

7. FUTURI POSSIBILI

Scienziati che pensano al di fuori degli schemi usuali hanno intravisto nei funghi, e più spesso nel micelio fungino, la possibilità di sviluppare tecnologie che potrebbero contribuire a ridefinire il futuro dell'umanità. Nel 2001 Andy Adamatzky ha fondato il Unconventional Computing Laboratory presso l'Università di Bristol (<https://uncomp.uwe.ac.uk/>). Tra le altre cose, il laboratorio, grazie anche a un progetto europeo, mira a sviluppare un substrato vivente integrato, sia strutturale che computazionale, utilizzando il micelio fungino per "far crescere" architetture capaci, autonomamente, di adattarsi a cambiamenti di luce, temperatura e inquinanti ambientali (<https://www.uwe.ac.uk/news/world-first-smartfungal-building-to-be-created-in-2m-living-architecture-project>). Per raggiungere questo obiettivo, è stato formato un consorzio che comprende architetti, informatici, biofisici, micologi, esperti industriali di tecnologie a base di micelio (l'italiana MOGU). Adamatzky è anche molto attivo nell'esplorare le possibilità di impiegare funghi come sensori, come componenti di apparecchiature elettroniche e di futuri potenziali computer (Adamatzky, 2023).

Molti dei lettori che sono arrivati sin qui, si ricorderanno dell'incidente del 1986 di Chernobyl, quando esplose il reattore n. 4 con conseguente rilascio di una enorme quantità di isotopi radioattivi. Già nel 1991 Nelli Zhdanova dello Zabolotny Institute of Microbiology and Virology della National Academy of Sciences of Ukraine dimostrò che un certo numero di funghi, tra cui *Cladosporium cladosporioides* e *Penicillium roseum-purpureum*, provenienti dalle macerie radioattive dell'impianto nucleare e in molti casi con pareti ricche di melanina, era in grado di crescere verso particelle radioattive (radiotropismo) senza subire alcun danno (Zhdanova et al., 1991). In effetti, funghi sono stati ritrovati in molti ambienti fortemente radioattivi (stazioni spaziali, acqua di raffreddamento di reattori nucleari, montagne dell'Antartico) consentendo di avanzare l'ipotesi che le melanine possano funzionare come altri pigmenti in grado di trasformare radiazioni in energia chimica, quali le clorofille (Dachova and Casadevall, 2008). Questa capacità di "nutrirsi di radiazione" (radiotrofismo) consente ai funghi melanizzati di prosperare in ambienti letali per altri organismi e potrebbe rappresentare un importante adattamento evolutivo. Il radiotrofismo offre interessanti prospettive tecnologiche in settori quali lo smaltimento dei rifiuti radioattivi, dove i funghi melanizzati potrebbero essere utilizzati per degradare materiali contaminati accelerando i processi di decomposizione dei radionuclidi, e nell'esplorazione spaziale, poiché nelle missioni di lunga durata questi funghi potrebbero essere coltivati per generare biomassa o molecole complesse sfruttando la radiazione cosmica, integrandosi con le serre tradizionali utilizzate per l'accrescimento delle piante.

8. CONCLUSIONI

Siamo d'accordo, non saranno i funghi a salvare l'uomo, solo l'uomo stesso lo potrà fare, ma i funghi gli potranno dare una mano. Probabilmente di questo era già convinto 5300 anni fa Ötzi the Iceman (Mummia del Similaun) che nel suo bagaglio aveva incluso *Piptoporus betulinus* e *Fomes fomentarius*, ma noi abbiamo pensato di ribadirlo in queste poche pagine mostrando come questi organismi, in campi assai diversi, possano essere utili, o dannosi, sempre importanti, talvolta determinanti. L'inserimento di un insegnamento di Micologia in percorsi formativi a livello universitario (pensiamo, ad es., agli ambiti medici, agrari, biotecnologici, farmacologici...) risulterebbe molto utile per gli studenti in quanto si offrirebbero loro ulteriori sbocchi occupazionali. Le possibilità ci sarebbero: un semplice esame delle declaratorie dei nuovi SSD (Decreto Ministeriale n. 639 del 02.05.2024, All. A) mostra che, in diversi di essi, i termini "Micologia" o "funghi" siano presenti, tout court (ad es. AGRI-05/B) o variamente aggettivati (ad.es. AGRI-02/B) o inseriti in ambiti specifici (ad es. MEDS-03/A), mentre in altri sono ricompresi in ambiti più generali, quali quelli relativi alla microbiologia o alla botanica (curiosamente, non essendo né microrganismi né piante!).

È necessario che alla Micologia venga riconosciuta la stessa dignità riservata a discipline che, per ragioni storiche, sono più accreditate quali, ad es., la Botanica o la Zoologia, in modo che a un aumento delle conoscenze nel campo e di professionalità specificatamente preparate faccia riscontro sia un loro maggior utilizzo a beneficio dell'uomo, ma anche una maggior preparazione dell'essere umano a fronteggiare gli effetti avversi che questi organismi possono causare.

BIBLIOGRAFIA

- ABDELHAMID S., HUSSEIN A., ASKER M. (2022): *Biodiesel dai funghi*, Edizioni Sapienza, 88 pp. ISBN-13: 978- 6204663166.
- ADAMATZKY A. (2023): *Fungal machines. Sensing and computing by fungi*, Springer Cham, IX + 425 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-38336-6>
- AIMASSI G. (2008): *Bartolomeo Gosio. Lo scienziato di Magliano a un passo dal Nobel*, Roero, Terra ritrovata, N.0, pp. 32-39 (https://www.researchgate.net/publication/289245568_Bartolomeo_Gosio_Lo_scientiaco_di_Magliano_a_un_passo_dal_Nobel).
- ALY A.H., DEBBAB A., PROKSCH P. (2011): *Fifty years of drug discovery from fungi*, «Fungal Diversity», 50, pp. 3-19. <https://doi.org/10.1007/s13225-011-0116-y>

- AMOBONYE A., ARUWA C.E., ARANSIOLA S., OMAME J., ALABI T.D., LALUNG J. (2023): *The potential of fungi in the bioremediation of pharmaceutically active compounds: a comprehensive review*, «Front Microbiol.», 14:1207792. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1207792>.
- ARSHADI N., NOURI H., MOGHIMI H. (2023): *Increasing the production of the bioactive compounds in medicinal mushrooms: an omics perspective*, «Microb Cell Fact», 22, 11. <https://doi.org/10.1186/s12934-02202013-x>.
- BA D.M., SSENTONGO P., BEELMAN R.B., MUSCAT J., GAO X., RICHIE J.P. (2021): *Higher mushroom consumption is associated with lower risk of cancer: A systematic review and meta-analysis of observational studies*, «Adv Nutr.», 12 (5), pp. 1691-1704, <https://doi.org/10.1093/advances/nmab015>.
- BARZEE J.T., CIAO L., PAN Z., ZHANG R. (2021): *Fungi for future food*, «Journal of future food», 1 (1), pp. 25-37, <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2021.09.002>.
- BEHERA B.C. (2020): *Citric acid from Aspergillus niger: a comprehensive overview*, «Crit. Rev. Microbiol.», 46, pp. 727-749. <https://doi.org/10.1080/1040841X.2020.1828815>.
- CHIERICI M. (1974): *Polemica sui polli al petrolio*, «Corriere della Sera», 10/12/1974.
- COLLINGE D.B., JENSEN D.F., RABIEY M., SARROCCO S., SHAW M.W., SHAW R.H. ET AL. (2022): *Biological control of plant diseases – what has been achieved and what is the direction?*, «Plant Pathology», 71, pp. 1024-1047.
- DADACHOVA E., CASADEVALL A. (2008): *Ionizing radiation: how fungi cope, adapt, and exploit with the help of melanin*, «Curr Opin Microbiol.», Dec. 11 (6), pp. 525-531. doi: 10.1016/j.mib.2008.09.013.
- DUTTA B., LAHIRI D., NAG M., GHOSH S., DEY A., RAY R.R. (2022): *Fungi in Pharmaceuticals and Production of Antibiotics*, in Shukla AC (eds), *Applied Mycology. Fungal Biology*, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90649-8_11.
- GANDIA A., VAN DEN BRANDHOF J.G., APPELS F.V.W., JONES M.P. (2021): *Flexible Fungal Materials: Shaping the Future*, «Trends in Biotechnology», <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2021.03.002>.
- GUNJAL A. (2024): *Fungal endophytes and their role in sustainable agriculture*, in EGAMBERDIEVA D., PARRAY JA, DAVRANOV K (Eds), *Plant Endophytes and Secondary Metabolites*, Academic Press, New York, pp. 55-63, <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13365-7.00006-3>.
- GUTTARDI P. (2024): *Bioproteine dal petrolio, dal sogno industriale alle biotecnologie*, Draft paper su academia.edu. https://www.academia.edu/78744629/Bioproteine_dal_petrolio_dal_sogno_industriale_al_le_biotecnologie.
- HADAR A., DAVID J., SHALIT N., ROSEMAN L., GROSS R., SESSA B., LEV-RAN S. (2023): *The Psychedelic Renaissance in Clinical Research: A Bibliometric Analysis of Three Decades of Human Studies with Psychedelics*, «J Psychoactive Drugs», 55 (1), pp. 1-10. doi: 10.1080/02791072.2021.2022254.
- HONG S.A., KIM K., NAM S.-J., KONG G., KIM M.K. (2008): *A case-control study on the dietary intake of mushrooms and breast cancer risk among Korean women*, «Int J Cancer», 122 (4), pp. 919-923.
- JENSEN D.F., KARLSSON M., SARROCCO S. & VANNACCI G. (2016): *Biological control using microorganisms as an alternative to disease resistance*, in D.B. Collinge (Ed.), *Plant pathogen resistance biotechnology*, Wiley Blackwell: New York and London, pp. 341-363.
- KELLER N.P. (2019): *Fungal secondary metabolism: regulation, function and drug discovery*, «Nat Rev Microbiol.», 17 (3), pp. 167-180, <https://doi.org/10.1038/s41579-018-0121-1>.

- LING L., FENG L., LI Y., YUE R., WANG Y., ZHOU Y. (2024): *Endophytic Fungi Volatile Organic Compounds as Crucial Biocontrol Agents Used for Controlling Fruit and Vegetable Postharvest Diseases*, «Journal of Fungi», 10 (5), p. 332, <https://doi.org/10.3390/jof10050332>
- MANAN S., ULLAH M.W., UL-ISLAM M., ATTA O.M., YANG G. (2021): *Synthesis and applications of fungal mycelium-based advanced functional materials*, «Journal of Bioresources and Bioproducts», 6 (1), pp. 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.01.001>
- MEYER V., BASENKO E.Y., BENZ J.P., BRAUS G.H., CADDICK M.X., CSUKAI M., DE VRIES R.P., ENDY D., FRISVAD J.C., GUNDE-CIMERMAN N., HAARMANN T., HADAR Y., HANSEN K., JOHNSON R.I., KELLER N.P., KRAŠEVEC N., MORTENSEN U.H., PEREZ R., RAM A.F.J., RECORD E., ROSS P., SHAPAVAL V., STEINIGER C., VAN DEN BRINK H., VAN MUNSTER J., YARDEN O., WÖSTEN H.A.B. (2020): *Growing a circular economy with fungal biotechnology: a white paper*, «Fungal Biol Biotechnol», 7, 5, <https://doi.org/10.1186/s40694-020-00095-z>
- MOORE D., ROBSON G.D., TRINCI A.P.J. (2020): *21st century guidebook to fungi*, Cambridge University Press, Cambridge, UK
- NIEGO A.G.T., LAMBERT C., MORTIMER P., LAMBERT C., MORTIMER P., THONGKLANG N., RAPIOR S., GROSSE M., SCHREY H., CHARRIA-GIRON E., WALKER A., HYDE K.D., STADLER M. (2023): *The contribution of fungi to the global economy*, «Fungal Diversity», 121, pp. 95-137. <https://doi.org/10.1007/s13225-023-00520-9>
- PAYNE G.A., NIERMAN W.C., WORTMAN J.R., PRITCHARD B.L., BROWN D., DEAN R.A., BHATNAGAR D., CLEVELAND T.E., MASAYUKI M., YU J. (2006): *Whole genome comparison of Aspergillus flavus and A. oryzae*, «Medical Mycology», 44 (S1), S9-S11, doi: 10.1080/13693780600835716
- PRASAD R., NAYAK S.C., KARWAR R.N., DUBEY N.K. (eds) (2021): *Mycoremediation and environmental sustainability*, vol. 3 (Fungal Biology), Springer: Cham, 409 pp, ISBN-10: 3030544214.
- POURIS J., KOLYVA F., BRATAKOU S., VOGIATZI C.A., CHANIOTIS D., BELOUKAS A. (2024): *The Role of Fungi in Food Production and Processing*, «Appl. Sci.», 14, 5046, <https://doi.org/10.3390/app14125046>
- SARROCCO S. (2023): *Biological disease control by beneficial (micro)organisms: Selected breakthroughs in the past 50 years*, «Phytopathology», 113, p.p 732-740, <https://doi.org/10.1094/PHYTO-11-22-0405-KD>
- SAXENA S., STROBEL G.A. (2021): *Marvellous Muscodor spp.: Update on Their Biology and Applications*, «Microb Ecol», 82, pp. 5-20, <https://doi.org/10.1007/s00248-020-01644-0>
- SEM WAL K.C., STEPHENSON S.L., HUSEN A. (2023): *Wild Mushrooms and Health Diversity, Phytochemistry, Medicinal Benefits and Cultivation*, CRC Press, Boca Raton, USA, 312 pp, ISBN 9781032372198.
- SEN S., MALAKAR C., BANIK B., DEVI N.B., PAKSHIRAJAN K. (2024): *Drop-In Biofuel Production Using Fungi*, in BRAR, S.K., OSORIO GONZALEZ, C.S., SOCCOL, C.R., SAINI, R. (eds), *The Microbiology of the Drop-in Biofuel Production*, «Biofuel and Biorefinery Technologies», vol 15. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61637-2_7
- SHARMA P., NGUYEN Q.A., MATTHEWS S.J., MATTHEWS S.J., CARPENTER E., MATHEWS D.B., PATTEN C.A., HAMMOND C.J. (2023): *Psilocybin history, action and reaction: A narrative clinical review*, «Journal of Psychopharmacology», 37 (9), pp. 849-865. <https://doi.org/10.1177/02698811231190858>
- SHIN A., KIM J., LIM S.-Y., KIM G., SUNG M.-K., LEE E.-S., RO J. (2010): *Dietary mu-*

- shroom intake and the risk of breast cancer based on hormone receptor status*, «Nutr Cancer.», 62 (4), pp. 476-483.
- SRIKANTH M., SANDEEP T.S.R.S., SUCHARITHA K., GODI S. (2022): *Biodegradation of plastic polymers by fungi: a brief review*, «Bioresour. Bioprocess», 9, 42 (2022), <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00532-4>
- STAMETS P. (2005): *Mycelium running. How mushrooms can help save the World*, Ten Speed Press: New York, 831 pp., ISBN 10: 1580085792.
- STASZ T.E., HARMAN G.E., WEEDEN N.F. (1988): *Protoplast preparation and fusion in two biocontrol strains of Trichoderma harzianum*, «Mycologia», 80, pp. 141-150
- TAMBURELLO M., VILLONE G. (2017): *Vincenzo Tiberio: la prima antibiotico-terapia sperimentale in vivo. Medicina nei secoli*, «Journal of History of Medicine and Medical Humanities», 29, pp. 2533-2552
- TIBERIO V. (1895): *Sugli estratti di alcune muffe*, «Annali d'igiene sperimentale», V, pp. 91-103.
- VAKSMAA A., GUERRERO-CRUZ S., GHOSH P., ZEGHAL E., HERNANDO-MORALES V., NIEMANN H. (2023): *Role of fungi in bioremediation of emerging pollutants*, «Front. Mar. Sci.», 10, 1070905, <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1070905>
- VAKSMAA A., VIELFAURE H., POLERECKY L., KIENHUIS M.V.M., VAN DER MEER M.T.J., PFLÜGER T., EGGER M., NIEMANN H. (2024): *Biodegradation of polyethylene by the marine fungus Parengyodontium album*, «Science of The Total Environment», 934, 172819, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172819>.
- VANDELOOK S., ELSACKER E., VAN WYLYCK A., DE LAET L., PEETERS E. (2021): *Current state and future prospects of pure mycelium materials*, «Fungal Biol Biotechnol», 8, 20, <https://doi.org/10.1186/s40694-021-001281>
- VANNACCI G., HARMAN G.E. (1987): *Biocontrol of seed-borne Alternaria raphani and A. brassicicola*, «Can.J. Microbial.», 33, pp. 850-856.
- VESELY D. (1977): *Potential biological control of damping-off pathogens in emerging sugar beet by Pythium oligandrum Dreschsler*, «J. Phytopathology», 90, pp. 113-115. <https://doi.org/10.1111/j.14390434.1977.tb03225.x>
- VICENTE I., BARONCELLI R., HERMOSA R., MONTE E., VANNACCI G., SARROCCO S. (2022): *Role and genetic basis of specialized secondary metabolites in Trichoderma ecophysiology*, «Fungal Biology Reviews», 39, pp. 83-99, <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2021.12.004>
- VISVANATHAN S., KRISHNAMOORTHY R., SABESAN G.S. (2022): *Fungal Cosmetics: Mushrooms in Beauty Care and the New Age of Natural Cosmetics*, in SHUKLA A.C. (eds), *Applied Mycology. Fungal Biology*, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90649-8_1
- WEINDLING R. (1932): *Trichoderma lignorum as a parasite of other soli fungi*, «Phytopathology», 22, pp. 834 -845.
- WIEBE M. (2002): *Mycoprotein from Fusarium venenatum: a well-established product for human consumption*, «Appl Microbiol Biotechnol», 58, pp. 421-427, doi: 10.1007/s00253-002-0931-x
- WOO S.L., HERMOSA R., LORITO M., MONTE E. (2023): *Trichoderma: a multipurpose, plant-beneficial microorganism for eco-sustainable agriculture*, «Nat Rev Microbiol», 21 (5), pp. 312-326, <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00819-5>.
- YODER W.T., CHRISTIANSON L.M. (1998): *Species-specific primers resolve members of Fusarium section Fusarium. Taxonomic status of the edible "Quorn" fungus reevaluated*, «Fungal Genet Biol.», 23 (1), pp. 68-80, <https://doi.org/10.1006/fgbi.1997.1027>.
- ZHDANOVA N.N., LASHKO T.N., VASILIVSKAYA A.I., BOSISYUK L.G., SINYAVSKAYA O.I.,

- GAVRILYUK V.I., MUZALEV P.N. (1991): *Interaction of soil micromycetes with 'hot' particles in the model system*, «Microbiologichny Zhurnal», 53, pp. 9-17.
- ZHANG M., HUANG J., XIE X., HOLMAN C.D. (2009): *Dietary intakes of mushrooms and green tea combine to reduce the risk of breast cancer in Chinese women*, «Int J Cancer», 124 (6), pp. 1404-8.

Finito di stampare
presso Tipografia Monteserra (Vicopisano - PI)
nel mese di marzo 2025