

Manual pràctic sobre l'ús de micorrices per a l'agricultura ecològica



Manual pràctic sobre l'ús de micorrices per a l'agricultura ecològica



Generalitat de Catalunya
Departament d'Acció Climàtica,
Alimentació i Agenda Rural



Fons Europeu Agrícola
de Desenvolupament Rural:
Europa inverteix en les zones rurals

Aquesta guia s'ha desenvolupat basant-se en els conceptes presentats a "Teaming with Fungi: The Organic Grower's Guide to Mycorrhizae" per Jeff Lowenfels, publicat l'any 2017. S'han utilitzat aquests conceptes com a fonament per al contingut exposat aquí, tot i que tota la informació ha estat adaptada i explicada de manera que reflecteix una interpretació pròpia i està dirigida específicament als agricultors ecològics catalans"

Breu Introducció als Fongs

Els fongs constitueixen un regne extraordinàriament divers i fascinant d'organismes que tenen un paper crucial en l'ecosistema de la Terra. Com a éssers eucariotes, posseeixen cèl·lules amb nuclis envoltats per membranes, al igual que les plantes i els animals. No obstant això, a diferència de les plantes, els fongs no tenen clorofil·la i, per tant, són incapaços de realitzar la fotosíntesi. Aquesta característica els classifica com a heteròtrofs, necessitant la ingesta de compostos orgànics per a obtenir energia, de manera similar als animals.

Una de les seves característiques més distintives és la seva capacitat per obtenir nutrients a través de l'absorció externa. Mitjançant l'ús d'enzims, els fongs descomponen complexos orgànics fora del seu cos, permetent-los així desfer-se de materials resistents com la lignina i la cel·lulosa presents en els arbres morts. Aquesta habilitat els converteix en agents de descomposició claus dins dels seus hàbitats naturals, facilitant la recirculació de nutrients i contribuint a mantenir l'equilibri ecològic.

Els fongs es poden presentar en formes tant unicel·lulars, com el llevat, com en formes multicel·lulars, caracteritzades per complexos conjunts de hifes que conformen xarxes de micelis. Aquestes estructures tenen la capacitat de penetrar diversos substrats, incloent sòl i matèria orgànica en descomposició, jugant un paper vital en la degradació i el cicle de nutrients en nombrosos ecosistemes.

Pel que fa a la seva morfologia, els coneguts bolets representen només els cossos fructífers de certes espècies d'aquest regne, mentre que la part majoritàriament oculta, el miceli o cos vegetatiu, està format per una xarxa de filaments denominats hifes. Aquestes estructures són responsables de les funcions alimentàries, respiratòries i reproductives dels fongs, estenent-se formant una extensa xarxa sota la superfície terrestre. La reproducció dels fongs pot ser tant sexual com asexual, depenent de l'espècie, però sempre es realitza a través d'espores.

En el món de la micologia, la classificació dels fongs ofereix un marc essencial per comprendre la diversitat i el rol ecològic d'aquests organismes en l'agricultura i els ecosistemes naturals. Els fongs es classifiquen dins del regne Fungi, que es troba entre els grups més antics i grans d'organismes vivents al planeta. Aquest regne es subdivideix en diversos filums basats en característiques genètiques i reproductives.

PRINCIPALS FILUMS DE FONGS:

1. Ascomycota: També coneguts com a fongs sac, aquest filum és molt divers i inclou més de 60,000 espècies. Els ascomicets desenvolupen una estructura reproductiva denominada asc, que conté espores diminutes anomenades ascospores. Aquest grup inclou des de patògens vegetals i animals fins a fongs comestibles. Són importants tant en la medicina (p.ex., *Penicillium*) com en la degradació de materials resistents com la cel·lulosa.

2. Basidiomycota: Aquest filum inclou aproximadament 40,000 espècies de fongs filamentosos que es reproduïxen a través d'una estructura reproductiva anomenada basidi. Aquest grup és fonamental per a la descomposició de la lignina i la cel·lulosa i inclou bolets ben coneguts com els rovellons i els rossinyols.

3. Glomeromycota: Aquest filum conté menys espècies que els altres, però són especialment abundants i formen relacions micorríziques amb les arrels de la majoria de les plantes herbàcies i molts arbres. Aquestes associacions són vitals per a l'absorció de nutrients i aigua per les plantes, jugant un paper clau en l'agricultura sostenible i la regeneració del sòl.

IMPORTÀNCIA DE LA NOMENCLATURA ACTUALITZADA

Entendre la nomenclatura i les reclasseficacions en el món dels fongs és vital per als agricultors, ja que els ajuda a mantenir-se actualitzats amb les investigacions científiques més recents i a utilitzar de manera eficaç els fongs en pràctiques agrícoles. Un exemple destacat d'aquesta necessitat de comprensió nomenclatural es troba en els canvis de noms dels fongs *Glomus intraradices* i *Glomus mosseae*, que ara són coneguts com *Rhizophagus intraradices* (o *Rhizophagus irregularis*) i *Funneliformis mosseae*, respectivament.

Aquests canvis són importants perquè tant *Rhizophagus intraradices* com *Funneliformis mosseae* són tipus de fongs micorrízics arbusculars, claus per a l'agricultura. Colonitzen una àmplia varietat de cultius. De fet, pràcticament tots els cultius agrícoles importants formen associacions simbiòtiques amb aquests fongs, que els ajuden a absorbir nutrients de manera més eficient, essencial en sòls de baixa fertilitat. Per tant, és recomanable que els agricultors busquin ambdós noms — tant els antics com els nous — en les etiquetes dels productes comercials fins que la comunitat científica i comercial s'ajusti completament a la nova terminologia.



Els Fongs Micorrízics

Els fongs micorrízics són socis essencials de les plantes des de l'aparició dels primers vegetals terrestres fa més de 450 milions d'anys. Aquestes associacions micorríziques es consideren un dels elements que van permetre a les plantes adaptar-se i prosperar en els ambients terrestres inicials. Curiosament, les estructures micorríziques identificades en registres fòssils antics són sorprenentment similars a les que trobem en sòls contemporanis.

Ara entenem millor la dinàmica i la importància d'aquestes relacions: el fong micorrízc colonitza les arrels de les plantes, millorant significativament la seva eficàcia en l'absorció d'aigua i nutrients. Paral·lelament, la planta proporciona al fong els compostos de carboni que aquest no pot obtenir per si mateix. Aquesta interacció beneficia ambdues parts, permetent un creixement òptim i una major resistència ambiental.

Les hifes dels fongs micorrízics, que tenen un diàmetre d'entre 2 i 10 micròmetres — més fins que els pèls radicals de les plantes— poden estendre's més enllà de les arrels, penetrant en porus microscòpics del sòl que serien inaccessibles per a les arrels. Això els permet accedir a recursos distants i, així, proveir a les plantes de nutrients que d'altra manera no podrien obtenir.

Encara que actualment sabem que entre el 80% i el 95% de totes les espècies de plantes terrestres alberguen fongs micorrízics en les seves arrels, fins fa poc es coneixia relativament poc sobre aquests organismes. Històricament, la seva funció essencial en l'ecosistema era sovint subestimada, i la seva presència en alguns casos fins i tot es considerava dubtosa o potencialment perjudicial per a les plantes.

El coneixement sobre les micorrizes va avançar notablement quan, el 1885, el botànic alemany Albert Bernhard Frank va publicar un estudi pioner que definia aquestes interaccions com a mutualistes, no parasitàries. Van passar més de 50 anys fins que les observacions de Frank van ser àmpliament acceptades, reconeixent finalment la naturalesa beneficiosa d'aquesta simbiosi entre fongs i plantes hostes. En aquella època, mentre que la indústria de fungicides comercials estava en auge, els descobriments de Frank van ser inicialment menystinguts.

NOMENCLATURA CORRECTA

Sovint les nomenclatures referents a fongs micorrízc i micorrizes s'utilitzen indistintivament de manera incorrecta. És vital utilitzar la terminologia correcta quan parlem de micorrizes:

Micorrízc

Aquest adjectiu descriu el fong o fongs involucrats, com en "fong micorrízc". No té res a veure amb les arrels ni amb la relació del fong amb elles.

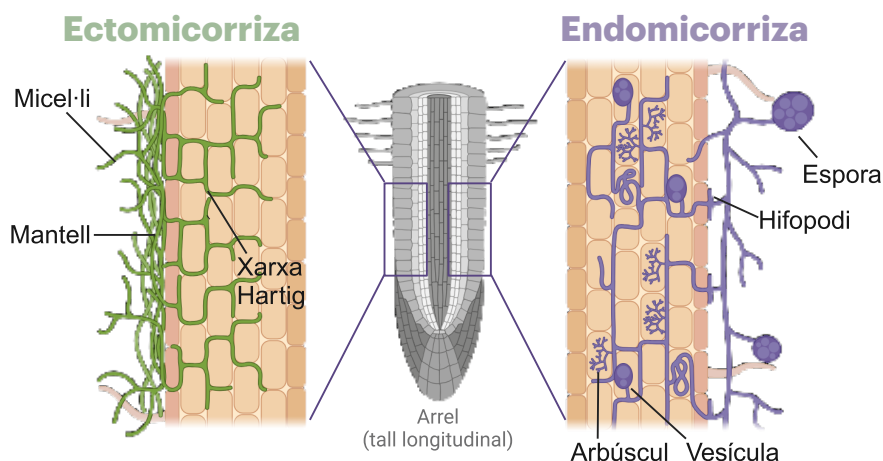
Micorriza

Substantiu que descriu la relació simbiòtica entre l'arrel i el fong. Sempre es refereix a la unió de l'arrel i el fong (del grec *mycos*, que significa fong i *rhiza*, que significa arrel).

TIPUS DE FONGS MICORRÍZICS

Els fongs micorrízics es classifiquen principalment en dos grans grups segons la seva interacció amb les arrels de les plantes hostes: els endomicorrízics i els ectomicorrízics. Els fongs ectomicorrízics no penetren les cèl·lules del còrtex de l'arrel, sinó que creixen al voltant d'elles formant una xarxa coneguda com a xarxa de Hartig. Aquests fongs formen sovint una densa capa al voltant de les puntes de les arrels, anomenada mantell hifal, i són comuns en arbres com les coníferes i alguns arbres caducifolis,

com els roures. En canvi, els fongs endomicorrízics sí que penetren les cèl·lules de les arrels de les plantes hostes. Dins d'aquest grup, trobem tres subtipus: els fongs micorrízics arbusculars, els ericoides i els de les orquídiades. D'entre aquests, els fongs arbusculars són, amb diferència, els més comuns i els de major importància en l'agricultura, sent així el focus principal d'aquesta guia.

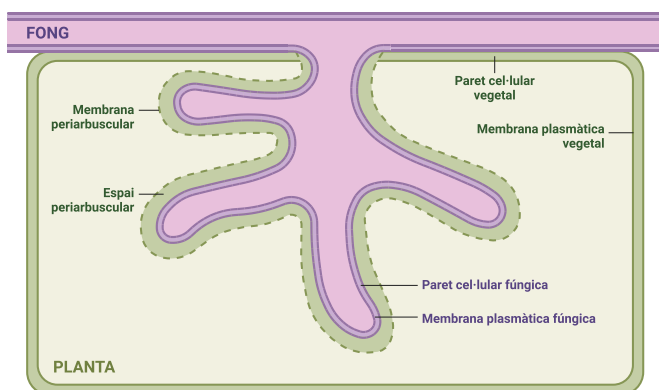


Secció longitudinal d'una ectomicorriza (verd, imatge esquerra) i una Endomicorriza (micorriza arbuscular (lila) (Font: Sonia Campo, Fundació Miquel Agustí; creat amb BioRender.com).

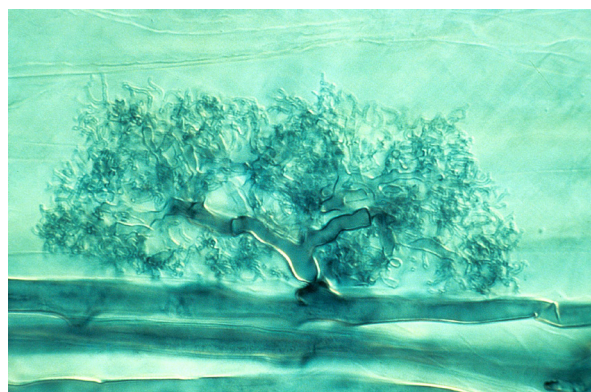
LES MICORRICES ARBUSCULARS

Un notable 80% de les plantes terrestres estableixen simbiosis amb micorrizes arbusculars. Aquest tipus de micorrizes, que es troba en els registres fòssils datats fa uns 420 milions d'anys, suggereix que han estat un component crucial en l'evolució de les plantes terrestres. Tots els fongs micorrízics arbusculars pertanyen al filum Glomeromycota i representen el grup més abundant de micorrizes, amb uns 230 tipus de glomeromicets que interaccionen amb més de 400.000 espècies de plantes diferents.

Els fongs micorrízics arbusculars penetren la paret cel·lular de les arrels de les plantes, però mai travessen la membrana plasmàtica vegetal. En lloc d'això, la membrana de la planta invagina l'entorn del fong, formant una membrana especial anomenada membrana periarbuscular, plena de transportadors nutricionals. Aquesta configuració deixa un espai de contacte íntim conegut com l'espai periarbuscular, que és on es realitza l'intercanvi de nutrients entre la planta i el fong. L'estructura que es forma dins de la cèl·lula vegetal es denomina **arbuscle**, una xarxa finament ramificada d'hifes que s'assembla a un petit arbre (del llatí *arbusculum*, petit arbre), i és lloc per excel·lència on es realitza l'intercanvi de nutrients entre la planta i el fong, facilitant l'aportació de nutrients essencials com el fòsfor i el nitrogen, que sovint són inaccessibles per a les arrels de la planta per si soles.



Dibuix esquemàtic d'un arbuscle dins d'una cèl·lula vegetal (creat amb BioRender.com).

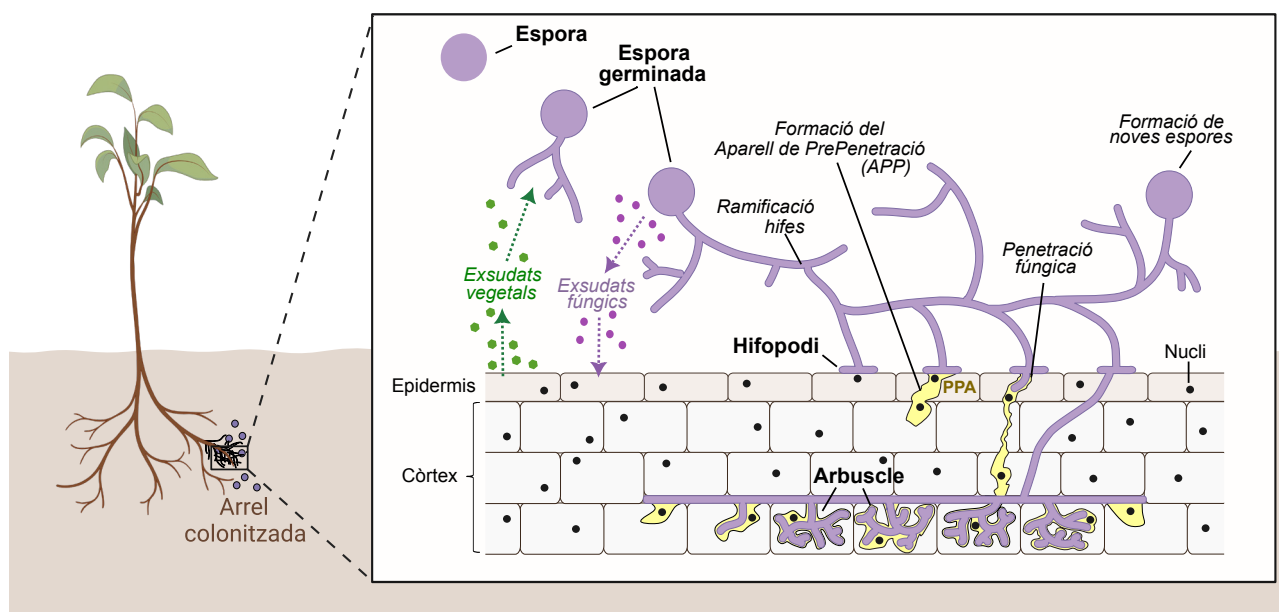


Arbuscle de Glomus. Imatge de Mark Brundrett, © 2008 (utilitzada amb permís).

COM ES FORMEN LES MICORRIZES ARBUSCULARS

El procés de formació de les micorrizes arbusculars s'inicia en condicions de baixa disponibilitat de nutrients al sòl, especialment quan hi ha una deficiència de fòsfor. En aquest context, les arrels de les plantes secreten uns exsudats químics coneguts com estrigolactones, que actuen com a senyals químics per atraure als fongs micorrízics presents al sòl. Aquests fongs es troben en estat de latència en forma d'espores, les quals són resistents i capaces de sobreviure en condicions adverses fins que localitzen un entorn òptim per al seu creixement. La detecció d'estrigolactones per part de les espores desencadena la seva germinació, iniciant així el desenvolupament d'una xarxa fúngica incipient que comença a explorar el sòl. Una vegada germinades, és crucial que les espores estableixin ràpidament una connexió amb les arrels d'una planta hoste, ja que només poden romandre actives un temps limitat, normalment entre 7 i 10 dies, perquè necessiten carboni per continuar vius una vegada s'acaben les seves reserves energètiques. Els exsudats vegetals percebuts pel fong provoquen que les xarxes fúngiques es ramifiquin molt més, incrementant així les possibilitats que fong i planta es trobin i connectin directament. Aquesta comunicació és bidireccional; els fongs també secreten substàncies o exsudats fúngics que les plantes poden detectar, els factors Myc, estimulants la formació d'arrels laterals i desencadenant una reacció en cadena que prepara les cèl·lules per col·laborar amb el fong. El contacte inicial entre la planta i la hifa del fong condueix a la formació i adhesió de l'hifopodi a la superfície de l'arrel, l'estructura de contacte i de penetració. Aquesta unió activa un procés en les cèl·lules de l'arrel que crea un espai especial, anomenat 'aparell de prepenetració' (PPA), que actua com una sala de benvinguda per al fong.

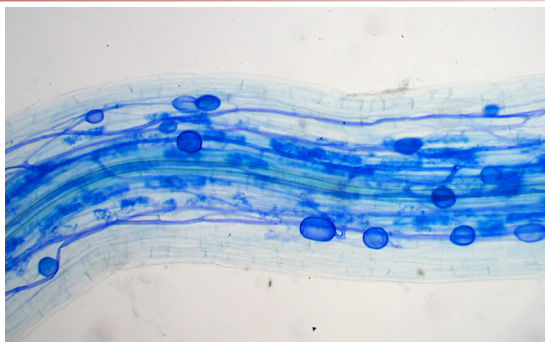
A mesura que el fong avança des de la superfície cap a l'interior de l'arrel, segueix un camí molt definit preparat per la planta, garantint una integració harmònica sense causar dany a les cèl·lules interiors del còrtex de l'arrel. Així es desenvolupa una hifa intercel·lular que recorre al llarg de les arrels, i es replica un mecanisme similar al PPA en les cèl·lules corticals internes amb les quals entra en contacte. Finalment, en aquest procés, el fong forma una estructura altament ramificada anomenada arbuscle dins de les cèl·lules de l'arrel, ocupant gairebé tot l'espai disponible i facilitant un intercanvi eficient de nutrients entre la planta i el fong.



*Pasos en el desenvolupament de les micorrizes arbusculars
(Font: Sonia Campo, Fundació Miquel Agustí; creat parcialment amb BioRender.com).*



Arrel colonitzada amb micorrizes arbusculars. S'observen les espores fúngiques a l'exterior de l'arrel,, i les hifes emergents (Font: Arthur Schüßler ©, utilitzada amb permís)



Tinció microscòpica d'una arrel colonitzada per micorrizes arbusculars (Font: Arthur Schüßler ©, utilitzada amb permís)

SABIES QUE...

Els exsudats fúngics dels fongs micorrízics, anomenats factors Myc, són de la mateixa família química que els exsudats bacterians produïts per les rizòbies, les quals participen en la formació de nòduls fixadors de nitrogen en les arrels de les plantes lleguminoses. En el procés de formació d'aquests nòduls, les bacteries utilitzen gens Nod, que també estan involucrats en la detecció i resposta als factors Myc per a la formació de micorrizes. És fascinant observar com aquests dos processos tant diferents utilitzen compostos químics similars per induir respostes en les plantes, les quals poden compartir vies comunes. Aquest coneixement pot ajudar-nos a entendre millor com interactuen les plantes amb els seus socis simbiòtics del sòl, optimitzant així les pràctiques agrícoles per a un millor creixement vegetal.

Avantatges dels Fongs Micorrízics Arbusculars en l'Agricultura

Des de l'origen de l'agricultura, passant dels caçadors-recol·lectors fins als agricultors actuals, les micorrizes han estat fonamentals per la salut dels cultius. Les pràctiques agrícoles inicials, menys invasives, permetien la prosperitat d'aquestes simbiosis fúngiques essencials. Però, amb l'arribada de l'agricultura intensiva, l'ús de maquinària pesada i productes químics es va començar a perjudicar seriosament aquestes associacions. Des dels anys 90, el desenvolupament de d'inoculants comercials basats en fongs micorrízics arbusculars ha possibilitat la inoculació a gran escala dels cultius, oferint una alternativa sostenible als tractaments químics. Estudis recents indiquen que les plantes amb micorrizes són més resistents a sequeres i malalties, i aquestes simbiosis no només resolen problemes del sòl, sinó que també protegeixen contra patògens aeris. Tanmateix, és essencial adaptar els estudis de micorrizes a cada entorn específic per maximitzar els seus beneficis, ja que la seva efectivitat pot variar.

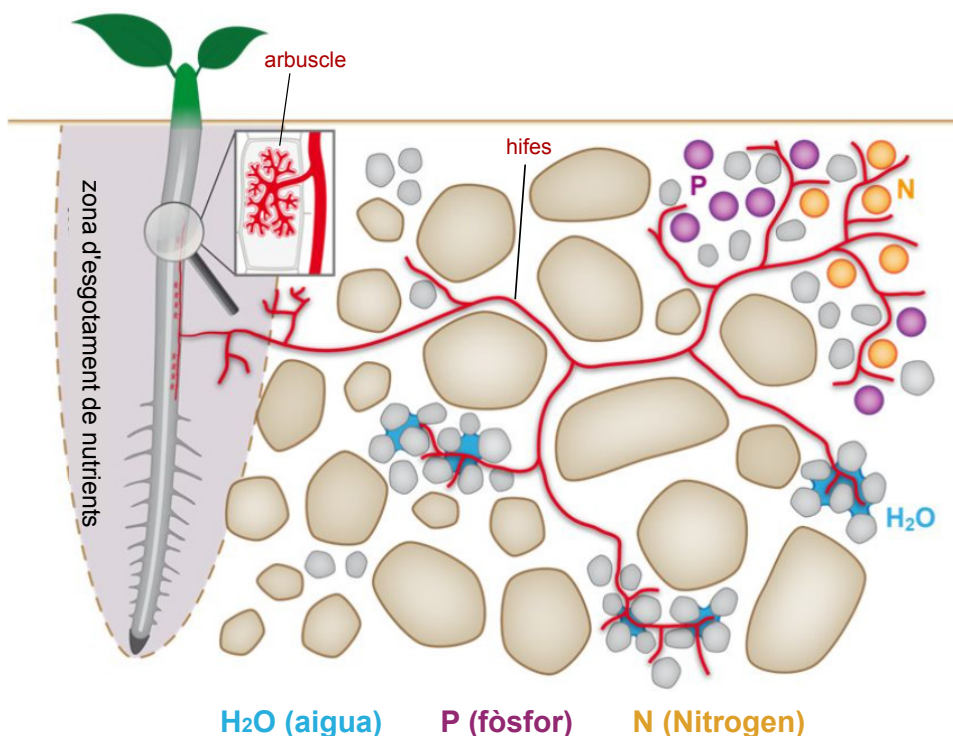
Augment del Subministrament de Nutrients: Quan les plantes creixen, les seves arrels absorbeixen nutrients del sòl. Amb el temps, aquesta zona pot quedar escassa de nutrients, formant-se una zona al voltant de les arrels on ja no hi ha suficients nutrients, el que pot limitar el creixement de la planta. Per fer front a aquest problema, moltes plantes s'associen amb els fongs micorrízics, que els ajuden a absorbir més nutrients del sòl. Aquests fongs desenvolupen hifes, uns filaments finíssims que s'estenen més enllà de les zones habituals d'absorció de les arrels, accedint així a nutrients que d'una altra manera serien inabastables. Com uns veritables miners microscòpics, aquests fongs no només amplien la superfície per absorbir més nutrients essencials sinó que també els transforma en formes que les plantes poden utilitzar, gràcies a enzims especialitzats.

Entre els nutrients que aquests fongs ajuden a obtenir, el **fòsfor** ocupa un lloc destacat. És essencial perquè forma part de l'ATP, la molècula que les plantes utilitzen per emmagatzemar i transferir energia. Aconseguir suficient fòsfor pot ser una tasca difícil, ja que sovint queda atrapat al sòl, lligat a elements com el ferro, el calci i l'alumini, especialment en terres argiloses. A més, una gran part del fòsfor que s'aplica en forma de fertilitzants no és eficaçment absorbit per les plantes, el que pot portar a deficiències nutricionals. Des dels anys cinquanta, els estudis han mostrat que els fongs micorrízics poden augmentar significativament l'absorció de fòsfor, especialment en sòls amb recursos limitats d'aquest mineral. Però, com en tot, massa fòsfor també pot ser contraproductiu i interferir amb la formació de les micorrices.

Gràcies als avenços científics recents, hem descobert que els fongs micorrízics juguen un paper clau més enllà de l'absorció de fòsfor; també faciliten l'accés al **nitrogen**, així com a altres elements vitals com el coure, ferro, manganès i zinc. Aquests nutrients són crucials per al creixement vegetal, però moltes vegades les plantes tenen dificultats per assimilar-los directament del sòl. Particularment en les lleguminoses, aquesta relació simbiòtica no només millora l'absorció de nitrogen, sinó que també augmenta la quantitat de bacteris que fixen aquest element en les arrels de les plantes. Això enriqueix notablement la capacitat de creixement de les plantes, proporcionant-los un accés continu a nitrogen fixat de forma natural. De fet, quan les lleguminoses estableixen aquest tipus de simbiosi micorrízica, es produeix un augment significatiu en el nombre de nòduls en les seves arrels que són capaços de fixar nitrogen, potenciant així de manera extraordinària el seu desenvolupament i estat sanitari.

També contribueixen a estabilitzar l'estructura del sòl, prevenint la pèrdua de nutrients per lixiviació i escorrentia superficial, i funcionen com a reserves de nutrients, emmagatzemant-los durant períodes d'abundància i alliberant-los quan són més necessaris.

Aquesta interacció no és un carrer de sentit únic. A canvi dels seus serveis, les plantes proporcionen als fongs fins al 20% del carboni que fixen durant la fotosíntesi, en forma de sucres i lípids. Aquest intercanvi, encara que suposa un cost energètic per a la planta, té beneficis significatius per a la seva salut, creixement i productivitat, especialment en sòls pobres o en entorns on és crucial fer un ús eficient dels recursos. A més, aquesta relació contribueix a un major emmagatzematge de CO₂, un element rellevant en la lluita contra el canvi climàtic.



Els fongs micorrízics arbusculars (en vermell) amplien el volum de sòl accessible per a les plantes, permetent una absorció més eficient de nutrients i aigua. (Font: Arthur Schüßler ©, utilitzada amb permís)

EL FÒSFOR I EL MEDI AMBIENT: REPTES I SOLUCIONS FUTURES

El fòsfor, un element clau per a l'agricultura, es troba en una situació crítica com a recurs no renovable. S'estima que les reserves mundials de roca fosfòrica de qualitat podrien esgotar-se dins de 50 a 100 anys. Es preveu que el pic global de fòsfor (el moment en què la producció comença a disminuir per esgotament del recurs) es produirà entre 2040 i 2050. Això és alarmant, ja que no existeixen alternatives per substituir l'ús massiu de fòsfor com a fertilitzant a gran escala en l'agricultura.

L'ús massiu de fertilitzants fosforats en sistemes agrícoles intensius genera una gran ineficiència, amb més del 60% del fòsfor aplicat que no és absorbit per les plantes. Aquest fòsfor roman químicament inactiu dins del sòl, particularment en els sòls argilosos, on les molècules de fòsfor són atrapades per càrregues iòniques i no es poden mobilitzar per l'absorció de les arrels. Aquest excedent de nutrients freqüentment és arrossegat cap als sistemes aquàtics a través de les aigües de pluja i regadiu, en un procés conegut com a lixiviació així com també per escorrentia superficial. Això provoca una contaminació considerable que pot deteriorar de manera severa la salut dels rius i llacs, afectant negativament la biodiversitat i els ecosistemes aquàtics en general.

En aquest context de degradació ambiental i esgotament de recursos, els fongs micorrízics emergeixen com una solució potent. Aquests microorganismes simbiòtics tenen la capacitat d'ajudar les plantes a absorbir fòsfor de manera més eficient. Això no només pot reduir la dependència en fertilitzants fosforats, sinó també minimitzar la contaminació i millorar la sostenibilitat de l'agricultura. Implementar pràctiques que fomentin la salut micorrízica dels sòls podria ser clau per afrontar els reptes propers, assegurant així la seguretat alimentària futura sense comprometre els recursos naturals ni els ecosistemes.



Escorrentia superficial després d'un període fort de pluja (Font: Ruralcat, 2023)



Diferència entre plantes de patata no tractades (esquerra) i tractades (dreta) amb l'inoculant micorrícic AGTIV® REACH™.

Font: Premier Tech Growers and Consumers (utilitzada amb permís).

Tolerància a la Sequera: Les micorrices poden ser claus en augmentar la resistència de les plantes als períodes de sequera. Segons diversos estudis, entre un 50% i un 100% de les plantes que formen associacions amb micorrices mostren una major capacitat per resistir la manca d'aigua. Aquesta millora es deu a diversos factors essencials. Primerament, les micorrices expandeixen el sistema radicular de les plantes a través de les hifes, uns filaments llargs i fins que no només augmenten l'àrea d'absorció d'aigua i nutrients, sinó que també arriben a zones més profundes del sòl on l'aigua pot ser més abundant. A més, els fongs afecten positivament l'estructura del sòl, incrementant la seva porositat i la seva capacitat de retenir aigua, el que és vital en temps de sequera. Els fongs també juguen un paper important en la regulació de l'emmagatzematge i el flux d'aigua dins les plantes, i faciliten l'absorció de nutrients essencials com el fòsfor, que es torna encara més crucial durant períodes de poca disponibilitat d'aigua. A més, modulen les respostes bioquímiques i fisiològiques de les plantes a l'estrès hídric, ajudant-les a adaptar-se millor a condicions adverses. Amb tots aquests beneficis, les plantes associades amb micorrices resulten ser més robustes i estan millor equipades per sobreviure en condicions de sequera. Això representa una estratègia prometedora per enfrontar els desafiaments associats al canvi climàtic, fent de les micorrices una eina valuosa en la gestió sostenible dels recursos hídrics en l'agricultura.

Protecció Contra Patògens: Els fongs micorrízics són essencials per enfortir la resistència de les plantes contra els patògens, tant del sòl com foliars, gràcies a múltiples mecanismes ben coordinats. Aquests fongs formen barreres físiques al voltant de les arrels, les quals actuen com un escut que bloqueja l'accés a microorganismes nocius. A més d'aquesta protecció física, els fongs micorrízics també enriqueixen la planta en nutrients, cosa que resulta en un sistema vegetal més sa i més capaç de repel·lir els atacs de patògens. En augmentar la quantitat de nutrients absorbits, es fortifica la estructura cel·lular de la planta, la qual es torna menys susceptible a les infeccions. A nivell químic, els fongs alteren l'ambient de la rizosfera (la zona de sòl influïda per les arrels) produint substàncies que són tòxiques per als patògens, com enzims que poden degradar les parets cel·lulars dels patògens o inhibir el seu creixement. Aquestes interaccions també provoquen un fenomen anomenat resistència sistèmica induïda, un tipus de sistema immunitari on la planta activa preventivament els seus mecanismes de defensa, preparant-se per a possibles invasions patogèniques futures. El fet de competir eficaçment pels recursos del sòl també significa que els patògens troben menys aliments i aigua disponibles per al seu creixement, limitant així la seva proliferació. Addicionalment, la presència de micorrízics pot ajudar a les plantes a produir més metabòlits secundaris, com els compostos fenòlics, coneguts per les seves propie-

tats fungicides i bactericides. Aquests compostos no només protegeixen directament contra els patògens, sinó que també poden atraure altres organismes beneficiaris que contribueixen a la defensa de la planta. Per tant, la simbiosi entre les plantes i els fongs micorrízics ofereix una robusta defensa integrada que millora la salut global de les plantes i la seva capacitat de resistir a un ampli espectre de patògens, tant aeris com del sòl. Això no només redueix la dependència de pesticides sinó que també promou un maneig més sostenible i ecològic dels cultius.

Millora de l'Estructura del Sòl i Emmagatzematge de Carboni: Els fongs micorrízics són essencials per millorar l'estructura del sòl i incrementar l'emmagatzematge de carboni, gràcies a les seves capacitats úniques de formar xarxes de hifes que uneixen les partícules de sòl. Aquestes xarxes no només milloren la porositat del sòl, permetent un millor flux d'aire i aigua, sinó que també redueixen l'erosió del sòl en estabilitzar-lo i evitar que la terra fèrtil sigui arrossegada per l'aigua o el vent. A més, els fongs micorrízics produeixen una substància anomenada glomalina, que actua com un adhesiu natural, lligant les partícules de sòl en aglomerats estables i facilitant així la retenció de carboni durant llargs períodes. Aquesta glomalina ajuda a capturar i emmagatzemar carboni, contribuint a la lluita contra el canvi climàtic. La presència dels fongs també fomenta un cicle més eficient dels nutrients, descomposant la matèria orgànica complexa i convertint-la en nutrients més accessibles per a les plantes. Aquesta activitat enriqueix el sòl, millorant la seva fertilitat i la salut general de l'ecosistema del sòl, el que resulta en una base més sana i productiva per al cultiu.

Impediment del Creixement de Plantes Competidores: Els fongs micorrízics poden limitar el creixement de plantes competidores al millorar l'accés dels seus hostes a recursos com l'aigua i els nutrients, establint una extensa xarxa de hifes sota terra que absorbeixen recursos abans que les plantes veïnes puguin fer-ho. Aquesta competitivitat es veu augmentada per la capacitat dels fongs de modificar químicament el sòl, produint substàncies que inhibeixen la germinació i el creixement de les arrels d'altres plantes. A més, les densitats altes de hifes poden formar barreres físiques que dificulten l'expansió de les arrels de plantes rivals en zones dominades per micorrízics. Els fongs també poden induir a les plantes hostes a produir compostos herbicides naturals que suprimeixen el creixement d'altres espècies vegetals properes. Així mateix, influeixen la comunitat microbiana del sòl, afavorint microorganismes beneficiaris i suprimint aquells que podrien ajudar a les plantes competidores. Aquest conjunt d'estratègies fa que les plantes associades amb fongs micorrízics tinguin un avantatge competitiu substancial.

EL MICELI EXTRARADICAL: L'INTERNET NATURAL DE LA TERRA

En el món ocult sota els nostres peus, s'estén una xarxa de comunicació tant avançada i interconnectada que el renombrat micòleg Paul Stamets la va denominar 'l'Internet natural de la Terra' durant una TED Talk el 2008. Aquesta xarxa no és altra que el miceli extraradical, una estructura de fongs que s'estén més enllà de les arrels de les plantes, formant una complexa i vasta xarxa de filaments. Aquests filaments, o hifes, no només ajuden a les plantes a absorbir nutrients i aigua de maneres que serien impossibles per elles soles, sinó que també serveixen com a canals de comunicació entre diferents plantes.

Des de fa temps és sabut que els fongs micorrízics i les plantes amb les quals s'associen intercanvien nutrients i una varietat d'altres compostos beneficiaris. No obstant això, investigacions recents indiquen l'existència de xarxes encara més complexes, profunditzant en una connexió extraordinàriament íntima entre el miceli i el seu entorn vegetal. Al llarg de milions d'anys, les plantes han desenvolupat un arsenal de defenses i adaptacions que les ajuden a sobreviure i a reproduir-se, incloent la secreció de substàncies que atrauen insectes pol·linitzadors i la producció de repel·lents i toxines que descoratgen els herbívors.

S'ha demostrat que els fongs micorrícics poden transmetre senyals a distàncies impressionants a través de la xarxa de miceli extraradical. Aquest sistema de comunicació subterrani permet als fongs advertir a les plantes associades sobre els atacs imminents de paràsits, desencadenant respostes defensives coordinades davant d'invasions de plagues. A més, les xarxes de miceli utilitzen toxines que inhibeixen el creixement de plantes competidores, assegurant així un accés privilegiat als recursos limitats disponibles. La capacitat de comunicació d'aquestes xarxes de miceli fúngic és veritablement sorprenent.



La xarxa micorrícica (Font: BBC News a bbc.co.uk/news, utilitzada amb permís)

Pràctiques Agrícoles i Micorrizes

Moltes de les tècniques que fem servir en l'agricultura moderna poden ser bastant dures per als fongs micorrízics arbusculars, uns petits herois del subsòl. Quan movem o tractem el terra, com en fer llaurada o aplicar calor per esterilitzar el sòl (solarització), aquestes accions poden acabar amb les delicades poblacions d'aquests fongs. Els fongs micorrízics, que majoritàriament viuen en els primers 15 a 40 centímetres del sòl, juguen un paper clau en ajudar les plantes a estar sanes i fortes. Però, si alterem el seu hàbitat amb pràctiques com la rotació de cultius mal dissenyada, deixar el terreny en guaret, llaurar massa profund, fer una fertilització excessiva o aplicar tècniques de solarització, podem estar fent més mal que bé. Aquestes accions poden afectar greument la formació d'una relació simbiòtica entre les plantes i els fongs micorrízics, que és vital per al benestar dels nostres cultius.

ROTACIÓ DE CULTIUS

La rotació de cultius és una pràctica agrícola clàssica, molt estimada per la seva capacitat de millorar i mantenir la qualitat del sòl. Aquesta estratègia no només ajuda a gestionar la fertilitat, sinó que també pot influir significativament en la supervivència dels fongs micorrízics arbusculars. Si en la rotació s'inclouen plantes que formen simbiosis amb aquests fongs es beneficia enormement el sòl, potenciant la creació i el manteniment de les xarxes micorríziques. En canvi, la manca de plantes hostes adequades pot deixar als fongs sense els recursos necessaris per la seva supervivència, com el carboni. En terres on no es planten cultius compatibles amb els fongs micorrízics, pot passar entre dos a tres mesos abans que la simbiosi es restableixi completament, un retard que pot ser crític en zones amb estacions de cultiu breus. Els agricultors en

aquestes regions, que no es poden permetre esperar aquests períodes d'inactivitat, es troben davant d'un repte considerable.

És fonamental comprendre que no totes les plantes necessiten de la mateixa manera aquests fongs. Cultius com el tomàquet, l'enciam, les patates i les llegums obtenen grans beneficis d'aquesta associació, mentre que el blat, l'avena i l'ordi, encara que se'n beneficien, ho fan en menor mesura. Per contra, les plantes de la família de les Brassicàcies, com la col, la coliflor, el bròquil i la mostassa, així com les remolatxes, no formen micorrices arbusculars. De fet, algunes d'aquestes plantes, com la mostassa i la colza, quan es descomponen, alliberen substàncies químiques que poden inhibir la formació i propagació de les espores de fongs micorrízics. Aquests compostos químics poden persistir en el sòl fins i tot després que les plantes hagin estat eliminades del camp, complicant encara més la situació per a futurs cultius. Aquesta complexa interacció subratlla la importància de seleccionar amb cura els cultius en la rotació per assegurar un suport eficaç a les xarxes de fongs micorrízics.

Família	Gènere	Espècie	Nom comú
Brassicaceae	Brassica	B. oleracea	Col, bròquil, Bócoli, Col de Brusel·les, Col arissada, Col de cabdell, Col Paperina, Kale, Espigall, Colrave, Berza, Col xinesa (Kai land)
Brassicaceae	Brassica	B. rapa	Nap, Nap farratger, Grelós, Col xinesa, Bleda xinesa (pac choi), Mostassa de Menorca
Brassicaceae	Brassica	B. napus	Colza, Napicol o Colinap o Rutabaga
Brassicaceae	Brassica	B. nigra	Mostassa negra
Brassicaceae	Brassica	B. juncea	Mostassa de la xina, Mostassa índia
Brassicaceae	Raphanus	R. sativus	Rave, Rave de bestiar, Rave d'hort, Ravenera, Ravenet
Brassicaceae	Armoracia	A. rusticana	Rave picant o Rave rusticà
Brassicaceae	Sinapis	S. alba	Mostassa de camp, Ravenissa borda, Ravenissa groga
Brassicaceae	Eruca	E. sativa	Rúcula o Ruca
Brassicaceae	Camelina	C. sativa	Camelina o False Flax
Brassicaceae	Eutrema	E. wasabi	Wasabi o Rave Japonés
Brassicaceae	Lobularia	L. maritima	Lobularia
Amaranthaceae	Beta	B. vulgaris	Bleda, Remolatxa, Remolatxa sucrera
Amaranthaceae	Chenopodium	C. quinoa	Quinoa
Amaranthaceae	Spinacea	S. oleracea	Espinacs

Espècies vegetals d'interès en agricultura no formadores de micorrices arbusculars

GUARET

Deixar un camp en guaret, o en repòs, és una pràctica tradicional en l'agricultura que busca donar un respir al sòl entre cultius. Però, què passa sota terra durant aquest període? Sense les plantes hostes, els fongs micorrízics arbusculars, que depenen del carboni que les plantes els proporcionen, poden trobar-se en dificultats per subsistir. Aquesta manca de suport vital redueix no només la seva població sinó també la seva capacitat de formar xarxes beneficioses per als futurs cultius. A més, és comú que durant aquest període de descans el sòl sigui llaurat una o més vegades, amb l'objectiu de preparar-lo per la propera temporada de sembra. Aquesta acció, encara que pot semblar beneficiosa, de fet pot ser contraproduent: el llaurat destrueix les xarxes micorríziques existents i desplaça les espores fúngiques, traient-les de les zones on podrien ser més útils.

Si un camp ha de romandre en guaret, una estratègia òptima seria plantar un cultiu de coberta amb plantes hoste de micorrices arbusculars. Aquestes plantes no només protegeixen el sòl contra l'erosió sinó que també poden ajudar a mantenir o fins i tot augmentar la biodiversitat del sòl, incloent les poblacions de fongs micorrízics. En casos on plantar un cultiu de coberta no sigui viable, una bona pràctica seria inocular el sòl amb fongs micorrízics abans d'iniciar la nova temporada de cultiu. Això ajudaria a assegurar que, quan es replantin cultius, ja existeixin en el sòl espores o propàguls fúngics preparats per a associar-se amb les noves plantes i ajudar-les a créixer saludablement.



*Cultiu cobertor de veça i avena
(Font: Dani Fenero, Fundació
Miquel Agustí)*

PERTORBACIÓ DEL SÒL

Les pertorbacions del sòl, com el llaurat intensiu, poden tenir efectes adversos significatius en l'entorn subterrani, especialment en les delicades xarxes de fongs micorrízics arbusculars. Aquestes pràctiques, mentre preparen el sòl per a nous cultius, també poden provocar dany a les plantes limitant la disponibilitat de carboni necessari per aquests fongs, arribant a inhibir o fins i tot destruir les seves xarxes.



*Camp llaurat amb xisel (Font: Dani
Fenero, Fundació Miquel Agustí)*

A causa que les espores dels fongs micorrízics arbusculars predominen en les capes superiors del sòl, qualsevol pertorbació com el llaurat pot dispersar aquestes espores a profunditats on les arrels de les plantes o els seus exsudats no podran arribar mai. Això pot endarrerir significativament la germinació i el creixement dels fongs, ja que les condicions a profunditats majors no són les idònies per al seu desenvolupament. A més, les hifes, que són els filaments que formen les xarxes micorríziques, es poden

trencar, especialment durant la tardor, quan més es llaura el sòl. Si aquesta estructura es danya greument, no estarà disponible per interaccionar amb cultius cobertors o amb els següents cultius planificats.

Pel que fa als fongs endofítics, que són aquells que viuen dins dels teixits de les plantes sense causar-los dany aparent, s'ha observat que poden ser alliberats durant les perturbacions del sòl. Tot i ser generalment inofensius i fins i tot beneficiosos per a les plantes, en situacions de estrès o dany, aquests fongs poden passar a formes més reactives i nocives. Aquest canvi podria potencialment afectar les poblacions de fongs micorrízics si les condicions alteren la dinàmica habitual entre aquests organismes simbiòtics. Tot i això, la investigació encara està en curs per determinar l'ample exacte d'aquest impacte.

APLICACIÓ DE PRODUCTES QUÍMICS

En l'agricultura moderna, l'ús de productes químics com fungicides, fumigants, herbicides i fertilitzants rics en fòsfor és comú, però aquesta pràctica pot tenir efectes adversos sobre els delicats ecosistemes subterranis, especialment les micorrizes arbusculars.

Els fungicides, encara que són essencials per controlar malalties fúngiques, freqüentment no distingeixen entre fongs patògens i beneficiosos. Aquests productes químics poden atacar components cel·lulars vitals dels fongs micorrízics, com les parets cel·lulars o els sistemes metabòlics, disminuint així les seves poblacions. És fonamental considerar el moment i el mètode d'aplicació: tractaments directes al sòl durant la formació de les micorrices poden ser particularment nocius, mentre que aplicacions foliars tendeixen a tenir un impacte menor. Curiosament, alguns fungicides específics poden promoure indirectament les micorrizes eliminant fongs competidors, encara que aquests casos requereixen una gestió curosa i són la excepció més que la regla.

Els herbicides i pesticides, malgrat no ser inherentment tòxics pels fongs micorrízics, tenen un efecte col·lateral per la seva acció no selectiva. Poden alterar tot l'ecosistema del sòl, i si aquests productes provoquen la mort de les plantes hostes, la conseqüent falta de carboni orgànic disponible pot reduir dràsticament les poblacions de fongs micorrízics. A més, la substitució de plantes receptives per espècies resistentes als herbicides pot limitar encara més la reconstitució de les xarxes micorríziques.



*Aplicació de productes químics
(Font: Xavier Petit, utilitzada amb permís)*

L'optimització de l'ús de productes químics en l'agricultura passa per escollir opcions que respectin i fomentin la salut dels fongs micorrízics. Aquest enfocament no només és crucial per mantenir un sòl sa i fèrtil sinó també per assegurar una agricultura sostenible i respectuosa amb el medi ambient. Reduir la dependència en productes químics agressius i potenciar l'ús de mètodes alternatius com el control biològic o fertilitzants orgànics pot ajudar a preservar i fins i tot augmentar la biodiversitat micorrízica, clau per al futur de l'agricultura resilient. Aquesta perspectiva integrada no solament protegeix els recursos naturals sinó que també promou un rendiment agrícola sostenible a llarg termini.

ALERTA: COM ELS QUÍMICS AFECTEN LA VIDA DEL SÒL

En l'article *Healthy Soil Microbes, Healthy People* (2013), publicat a *The Atlantic*, Mike Amaranthus destaca la similitud entre els efectes nocius dels químics en la microbiota del sòl i els aliments processats en la nostra digestió. Adverteix sobre l'ús excessiu de fertilitzants, fungicides, herbicides, i pesticides, així com el llaurat intensiu, que esquincen l'equilibri natural del sòl. Proposa una solució inspirada en la medicina: reintroduir bacteris i fongs beneficiosos al sòl per recuperar un ecosistema saludable, comparant-ho amb consumir iogurt per equilibrar la microbiota intestinal. Aquesta metàfora serveix per subratllar la importància de cuidar la salut del sòl de manera tan atenta com cuidem la nostra pròpia salut.

APLICACIÓ DE FERTILITZANTS

L'aplicació de fertilitzants en l'agricultura moderna és una pràctica comú per millorar la productivitat dels cultius, però l'equilibri de nutrients com el fòsfor i el nitrogen és crucial per al desenvolupament sostenible del sòl i la supervivència de les xarxes micorríziques. Un excés d'aquests nutrients pot interrompre el procés natural de germinació i creixement dels fongs micorrízics arbusculars, essencials per a la salut del sòl i l'eficàcia dels cultius.

En molts casos, per intentar compensar la falta de disponibilitat de fòsfor, els agricultors poden recórrer a l'ús intensiu de fertilitzants químics fosfatats. Aquests fertilitzants omplen els llocs d'intercanvi iònic del sòl amb ions de fòsfor, incrementant la seva disponibilitat immediata per a les plantes. No obstant això, aquesta pràctica pot portar a una sobresaturació de fòsfor, una sobredosi, la qual pot inhibir activament la formació de micorrizes durant dècades fins que els nivells del nutrient es redueixin a concentracions més favorables.

L'ús de fems d'animals com a fertilitzant és una pràctica tradicional en l'agricultura ecològica. Tot i això, els fems poden contenir quantitats elevades de sals de fosfat, sovint superant les 1000 parts per milió de fòsfor. Aquestes altes concentracions poden causar que els sòls amendats amb fems tinguin un excés de fòsfor que persisteix fins a 100 anys després de la seva aplicació, creant un cicle llarg de desequilibri nutritiu que pot afectar molts cicles de cultius.

La gestió responsable dels fertilitzants fosfatats i l'ús equilibrat de compost i fems són essencials per evitar l'impacte negatiu sobre les micorrizes. Encara que l'addició de nutrients pot semblar beneficiosa a curt termini, és vital considerar els efectes a llarg termini sobre la biodiversitat del sòl i la salut de les plantes. Optar per estratègies que suporten la vida micorrízica no només beneficia la estructura i fertilitat del sòl, sinó que també pot millorar la resiliència dels cultius davant de desafiaments ambientals.



*Aplicació de compost i Fems
(Font: Dani Fenero, Fundació
Miquel Agustí)*

Amb l'augment dels costos dels fertilitzants, especialment el fòsfor, degut a restriccions de subministrament, es torna encara més important optimitzar el seu ús. Estudis han demostrat que les plantes amb micorrices arbusculars ben desenvolupades poden créixer més amb menys fertilitzant, i està totalment demostrat que les plantes incrementen l'absorció de fòsfor i nitrogen quan aquestes tenen micorrices. Això no només és una victòria per la sostenibilitat ambiental sinó també per l'eficiència econòmica, permetent als agricultors reduir costos mentre mantenint o fins i tot millorant els rendiments de cultiu.

CREMA DE RESIDUS VEGETALS

Encara que les espores de fongs micorrízics arbusculars mostren una certa resistència a temperatures elevades, el procés d'incineració dels residus vegetals en el camp pot arribar a temperatures que superen els 50°C, una condició que pot resultar fatal per aquests microorganismes. Especialment després de la collita, quan els residus són cremats per netejar el terreny, les altes temperatures poden eliminar efectivament les poblacions de fongs que sobreviuen durant l'hivern.

No obstant això, la crema de residus vegetals no només té efectes negatius. Aquesta pràctica, que ha estat utilitzada des de temps antics, pot contribuir a la creació de terres extremadament fèrtils. La crema pot ajudar a reduir la presència de plagues i malalties acumulades en els residus de la collita, a més de convertir la matèria orgànica en cendra, que subministra nutrients com potassi a la terra de manera ràpida i eficient. Mentre que la crema de residus vegetals pot semblar una solució ràpida per a preparar terreny per a noves plantacions, els agricultors han de considerar l'impacte a llarg termini sobre la microbiologia del sòl i la salut global de l'agrosistema.

PRÀCTIQUES AGRÍCOLES BENEFICIOSES

Tot i que pràctiques comuns en l'agricultura, tals com el llaurat intensiu i la fertilització fosfatada, poden tenir impactes adversos sobre els fongs micorrízics arbusculars, hi ha alternatives sostenibles que poden reforçar aquestes poblacions fúngiques tan necessàries. Sòls que han estat gestionats intensivament al llarg dels anys encara poden recuperar i fomentar la presència de fongs micorrízics amb l'ús de mètodes respectuosos amb el medi ambient. Aquestes tècniques inclouen la introducció d'esmenes orgàniques, l'aplicació de mulching orgànic, la realització de rotacions de cultius planificades, l'ús de cultius de cobertura o adob verd, i el cultiu de plantes que estableixen simbiosis amb fongs micorrízics.

MULCHING I ESMENES ORGÀNIQUES

El mulching és una pràctica agrícola senzilla però poderosa. Consisteix en cobrir el sòl amb materials orgànics com restes de plantes, palla de cereals, fulles seques, compost, substrat orgànic, o fins i tot estelles de fusta. Aquesta tècnica no solament enriqueix el sòl amb nutrients essencials sinó que també ajuda a conservar la humitat, essencial per a la salut de les plantes. En definitiva, el mulching crea un microclima ideal per al creixement de fongs beneficiosos, reforçant la robustesa del sòl contra les perturbacions. Les investigacions han mostrat que aplicar mulching orgànic, utilitzant materials com la palla i restes de poda triturat, pot millorar la colonització de les arrels de les plantes per part dels fongs micorrízics.

Afegir esmenes orgàniques com compostos i adobs animals compostats afegeixen un extra de riquesa nutricional, però requereixen una gestió atenta per evitar l'acumulació excessiva de nutrients com el fòsfor. Quan s'utilitzen correctament, aquests materials contribueixen a una xarxa alimentària sòlida en el sòl, descomposant la matèria orgànica i facilitant que els fongs micorrízics maximitzin la mineralització dels nutrients disponibles. Aquest procés no només alimenta les plantes sinó que també revitalitza el sòl, fent-lo més fèrtil i productiu any rere any.

IMPLEMENTACIÓ I AVALUACIÓ DE FONGS MICORRÍZICS EN L'AGRICULTURA

La incorporació de fongs micorrízics en l'agricultura transcendeix la simple millora de la fertilitat del sòl; es tracta també de reduir costos i elevar els rendiments dels cultius. Un agricultor innovador, al igual que un empresari astut, assessora les inversions basant-se en els guanys futurs. Tot i que l'adopció de fongs micorrízics pot augmentar de manera gradual, els avantatges que aporten s'acumulen any rere any, proporcionant proves convincentes que avalen la seva utilització. Això motiva a molts agricultors a substituir o complementar l'ús de fertilitzants químics amb fongs micorrízics arbusculars, buscant així no només un estalvi econòmic sinó també un augment en la sostenibilitat dels seus camps.

La capacitat per determinar la presència o potencial micorrícic del sòl es pot aconseguir mitjançant tècniques de laboratori. Aquestes anàlisis no solament revelen la presència d'espores i propàguls micorrízics sinó que també avaluen les condicions del sòl que afavoreixen la simbiosi micorrízica. Analitzant mostres d'arrels fines, les quals són netejades, aclarides i tenyides, els investigadors poden quantificar el percentatge d'estructures micorríziques presents. Aquesta informació és vital per als agricultors, ja que els proporciona dades clau per optimitzar la gestió del sòl i maximitzar la salut dels cultius. Si es detecta una baixa activitat micorrízica, es poden introduir mètodes correctius, ja sigui mitjançant una gestió de la fertilització així com la inoculació dels fongs micorrízics, garantint així que els cultius puguin beneficiar-se plenament de les interaccions simbiòtiques amb els fongs.

COM APLICAR INOCULANTS MICORRÍZICS

No hi ha un mètode universal per aplicar les espores de fongs micorrízics arbusculars. La diversitat d'experiments amb diferents condicions de cultiu, espècies vegetals i tipus de fongs micorrízics ha portat a una varietat de protocols d'inoculació. L'objectiu principal és assegurar que el procés sigui el més eficient possible, aconseguint establir micorrizes arbusculars amb la mínima quantitat d'inòcul, per tal de mantenir la viabilitat econòmica.

Els productes micorrízics comercials venen acompanyats d'instruccions específiques que han de ser seguides amb precisió. Aquests protocols poden variar lleugerament, però tots tenen un objectiu essencial en comú: situar l'inòcul a una distància adequada de la planta perquè pugui rebre els senyals químics que aquesta emet. Aquesta interacció inicial és vital perquè promou la germinació i la posterior ramificació de les espores, permetent així establir un vincle simbiòtic amb la planta. La relació és tan delicada que no només depèn de la proximitat de l'inòcul; la planta mateixa ha d'estar en condicions que li permetin emetre els senyals químics necessaris, com ara estar sota condicions de baixa disponibilitat de nutrients, particularment de fòsfor. Aquesta dinàmica destaca per què és tan crític no sols aplicar l'inòcul correctament sinó també preparar el sòl i la planta de manera que puguin interactuar eficaçment. Si aquests se-

nyals no es produeixen per part de la planta, les espores fúngiques podrien germinar, però mai connectaran amb la planta, i la seva supervivència quedarà compromesa. Crear un entorn favorable perquè la planta pugui enviar aquests missatges químics és doncs fonamental.

Els inoculants micorrízics que es comercialitzen solen incloure **propàguls**, una combinació eficaç d'espores fúngiques i fragments d'arrels micorrizades que contenen arbuscles, els quals actuen efectivament com a espores. Tot i que existeixen inoculants basats en espores purificades, aquests tendeixen a ser significativament més costosos i s'empren principalment en contextos de recerca científica. Per a un ús més general, els inoculants amb propàguls són ideals gràcies a la seva versatilitat i eficàcia, i es poden aplicar de diverses maneres:

- **Propàguls barrejats amb substàncies granulars:** Es pot escampar aquesta mescla directament sobre el terreny o incorporar-la en altres substrats de cultiu. Aquesta forma permet una aplicació flexible que s'adapta fàcilment a diferents mètodes de cultiu, podent ser aplicada directament sobre o al voltant de les arrels.
- **Propàguls barrejats amb sòl:** Aquest mètode consisteix en barrejar propàguls amb terra que ja conté fongs micorrízics. Això permet als agricultors crear la seva pròpia mescla de sòl enriquit amb fongs, utilitzant rizomes de plantes com a base, una opció perfecta per a qui prefereix una aproximació més personalitzada i controlada.
- **Propàguls en formulació líquida:** Aquesta presentació innovadora facilita l'ús de les espores mitjançant sistemes d'irrigació per degoteig i aspersió. És una solució pràctica per a l'aplicació directa a les plantes existents, permetent una integració suau dels fongs en el sistema radicular ja establert.



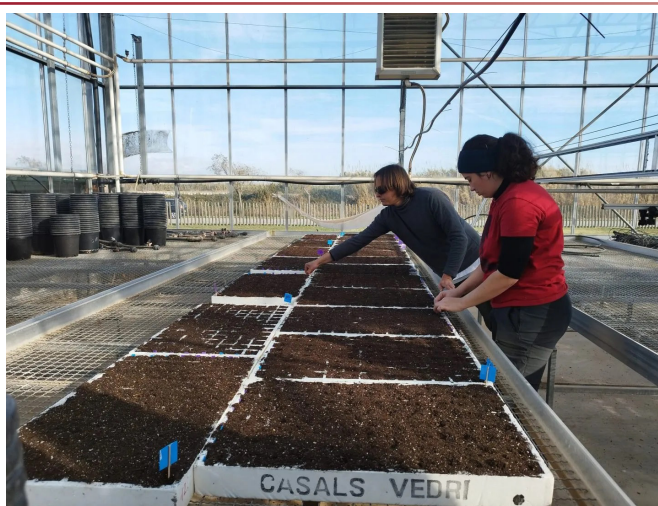
Diferències entre espores i propàguls micorrízics (Font: Mycorrhizal Applications, LLC, 2024, utilitzada amb permís)

La diversitat de formulacions en els inoculants micorrízics reflecteix l'àmpli espectre de gèneres i espècies de fongs que es poden incloure. És fonamental revisar minuciosament les etiquetes d'aquests productes abans de la seva aplicació, per garantir que s'escull la varietat de fong més adequada per a la planta hoste i per confirmar que el producte és efectivament viable. Realitzar experiments amb diferents composicions i dosificacions és aconsellable per determinar l'aplicació més efectiva segons cada mètode de cultiu i tipus de planta. Aquest procés d'assaig i error pot ajudar a maximitzar els beneficis de la simbiosi micorrízica.

Per a establir micorrices arbusculars en contextos agrícoles de manera òptima, la inoculació de la llavor abans de la seva plantació és la estratègia més eficaç. Aquest mètode assegura que els propàguls estan ben posicionats per rebre senyals químics de les plantes en creixement, incentivar la germinació de les espores i afavorir el desenvolupament de la relació simbiòtica des de l'inici. Les tècniques d'inoculació poden variar depenent de les necessitats específiques de cada cultiu i de les condicions ambientals, proporcionant flexibilitat i adaptabilitat en la gestió agrícola.

1. Inoculació directa de llavors: Les llavors poden ser recobertes amb fórmules granulades o ruixades amb solucions líquides. Per garantir que la granulació s'adhereixi bé, primer s'humitegen les llavors. Aquest tractament col·loca els propàguls micorrízics just al costat de les arrels quan les llavors comencen a germinar, proporcionant un accés immediat a aquests fongs beneficiaris.

2. Inoculació de llavors durant la germinació en sòl o substrat: La inoculació de llavors durant la seva germinació en sòl o altres substrats és una etapa ideal per establir una bona base micorrízica. Tant les fórmules granulades com les líquides són útils i es poden aplicar directament al medi o substrat on les llavors comencen a brotar. Això es fa sovint en alvèols de planter o en cubs dissenyats per a hidroponia, garantint que cada unitat de creixement rep la quantitat precisa de fongs necessària per a un desenvolupament saludable. És fonamental una bona barreja dels propàguls en el substrat, especialment quan s'apliquen petites quantitats, com ara 1-2 propàguls per alvèol. Això assegura una distribució uniforme i evita que algunes zones quedin sense la simbiosi beneficiosa dels fongs. El pH del substrat és un altre aspecte clau per a l'èxit de la inoculació. Els fongs micorrízics arbusculars prosperen en un rang de pH de 5.5 a 7.0. Mantenir el substrat dins d'aquest interval és crucial per preservar la viabilitat dels inoculants i maximitzar la seva eficàcia. D'altra banda, durant les etapes inicials de la inoculació, és important evitar un reg abundant que pugui provocar el rentat de les espores i els propàguls abans que aquests hagin establert la simbiosi. El més aconsellable és humitejar adequadament el sòl inicialment i, si és possible, reduir o evitar el reg durant els primers dies. Aquest maneig cautelós del reg facilita una millor adhesió dels propàguls al substrat i promou una simbiosi efectiva i duradora.



Inoculació de micorríces arbusculars en el moment de la germinació de llavors de tomàquet a les instal·lacions d'Agropolis-UPC (Font: Fundació Miquel Agustí)

3. Inoculació de plantes amb arrels nues: la inoculació de plantes amb arrels nues és una tècnica directa i eficaç que garanteix una excel·lent colonització micorrízica des del començament. Aquest procediment consisteix en aplicar formulacions micorríziques, tant líquides com granulades, directament sobre les arrels nues. Aquestes es poden ruixar o submergir totalment en la solució o el granulat per assegurar una cobertura completa amb l'inoculant. Les plantes amb arrels nues es poden preparar de diverses maneres: bé a partir de llavors germinades sobre paper humit que ja hagin desenvolupat arrels robustes, o bé a partir de plàntules cultivades que s'hagin deslliurat de la major part del sòl mitjançant un aclarit suau amb aigua. Un cop les arrels estan adequadament impregnades amb l'inoculant, les plantes estan llestes per ser transplantades, ja sigui a un planter o directament al camp.

4. Inoculació en el moment del transplant: la inoculació en el moment del transplant és una tècnica que, tot i ser semblant a la d'arrels nues, no requereix que les arrels estiguin completament exposades. Durant el procés de transplantament, prenem el bloc o taco que conté les arrels i el substrat, i l'apliquem directament recobrint-lo en l'inoculant granular o submergint-lo en l'inoculant líquid. Aquest mètode garanteix

que els propàguls queden en contacte directe amb les arrels. Tot i això, pot ser necessari utilitzar una quantitat més gran d'inoculant per assegurar que tot el bloc quedi ben impregnat, cosa que podria incrementar el cost total de producció. És important considerar aquest factor en l'avaluació dels costos de producció i ma d'obra i determinar si aquest mètode és l'opció més rendible per a les necessitats específiques de cada cultiu.



Plàntules en hivernacle tractades (bloc dret) i no tractades (bloc esquerra) amb fongs micorrízics (Font: Mycorrhizal Applications, LLC, 2024, utilitzada amb permís)

5. Inoculació de les arrels en el camp: L'inoculació de les arrels en el camp és un procés essencial per a plantes que creixen a l'aire lliure. En aquest cas, els propàguls es poden distribuir directament sobre la superfície del sòl o incorporar-los al voltant de les arrels. L'ús de formulacions líquides és particularment efectiu per a aquest fi, ja que poden ser aplicades a través de sistemes d'irrigació per degoteig o aspersió, assegurant que l'inoculant arribi directament a les arrels. Per a plantes amb arrels superficials, és especialment útil barrejar els propàguls directament en el sòl, creant així canals que faciliten l'expansió de les arrels. Aquesta tècnica, però, pot ser menys eficient quan s'utilitza aïlladament, donat que les condicions del camp són variables i pot requerir quantitats majors d'inoculant. A més, les aplicacions de camp tendeixen a dispersar-se més, incrementant el consum de material. Tot i així, aquesta estratègia és altament recomanable, especialment quan es combina amb altres tècniques d'inoculació que poden actuar com a reforç durant el cicle de creixement de la planta. Aquesta combinació de mètodes pot maximitzar l'efectivitat de la simbiosi micorrízica i millorar significativament la salut i la productivitat de les plantes en un entorn agrícola.

SUBSTRATS AMB ELS QUALS LES MICORRIZES FUNCIONEN MILLOR

Els fongs micorrízics són compatibles amb una àmplia varietat de substrats, però tendeixen a funcionar millor en aquells que contenen una barreja de components orgànics i inorgànics. Els materials orgànics com la torba, l'escorça i la fibra de coco proporcionen la matèria orgànica natural i l'estructura que els fongs micorrízics necessiten per prosperar. Els materials inorgànics com la perlita i la vermiculita afegixen porositat i ajuden a retenir l'aigua i l'aire, essencials per al creixement dels fongs.

Els fongs micorrízics són particularment efectius en substrats que han estat esterilitzats (si és possible) per eliminar qualsevol patògen existent i que contenen una font de fòsfor insoluble, com roca fosfòrica. Aquesta configuració sovint condueix a un augment significatiu del creixement de les plantes, ja que els fongs micorrízics són hàbils en accedir al fòsfor que les plantes no poden utilitzar fàcilment per si soles.

A més, els fongs micorrízics funcionen òptimament quan el contingut de fòsfor (P) en el medi és baix, generalment recomanat per estar per sota de 90-100 parts per milió (ppm). Nivells alts de fòsfor poden inhibir la formació d'associacions micorríziques, ja

que les plantes no buscaran ni beneficiaran de la simbiosi fúngica quan el fòsfor està fàcilment disponible. Així, controlar els nivells de fòsfor en el medi de cultiu és clau per promoure relacions micorríziques beneficioses.

Espècies de fongs formadors de micorizes arbusculars

Dins el món ocult del sòl, els fongs micorrízics arbusculars han estat col·laboradors silenciosos de les plantes des de l'aparició dels primers vegetals terrestres. Tot i la vasta història d'aquesta simbiosi, les espècies de fongs que la formen són relativament poques, però dues d'elles, *Rhizophagus irregularis* i *Funneliformis mosseae*, destaquen per la seva àmplia distribució i eficàcia.

Rhizophagus irregularis (o *Rhizophagus intraradices*), abans conegut com *Glomus intraradices*, és famós per formar densos cúmuls d'espores i arbuscles a les arrels de les plantes, facilitant així un ric intercanvi de nutrients. D'altra banda, *Funneliformis mosseae*, precedentment anomenat *Glomus mosseae*, té hifes en forma d'embut que optimitzen l'absorció de nutrients en diversos tipus de sòls.

L'aplicació d'aquests fongs mitjançant inoculants comercials no només pot millorar la salut i productivitat de les plantes, sinó que també promou una gestió de cultius més sostenible. No és sorprenent que els agricultors moderns recorrin a aquests petits herois subterranis per enriquir el seu sòl, ja que els inoculants ofereixen una manera ràpida i eficaç d'establir aquestes associacions beneficioses. A més, l'ecosistema subterrani de les plantes es beneficia enormement de la diversitat de fongs micorrízics. La investigació ha demostrat que diferents espècies de fongs micorrízics aporten diversos beneficis a les plantes, depenent de les condicions ambientals i les necessitats específiques al llarg de les estacions. Algunes espècies són excel·lents en l'absorció de nutrients, mentre que altres ajuden més amb l'eficiència hídrica o en mitigar toxines i sals que podrien danyar el sistema vascular de les plantes. Per tant, és essencial seleccionar productes micorrízics que ofereixin una àmplia diversitat d'espècies per maximitzar els beneficis durant tot el cicle de vida de la planta.

Recorda aquestes regles micorríziques

Els fongs micorrízics són eines inestimables per als agricultors, proporcionant avantatges significatius en molts tipus d'entorns agrícoles. Tot i això, cada camp és un món a part, i les associacions simbiòtiques poden ser imprevisibles. A vegades, el que funciona bé en un hivernacle pot no ser eficaç en camp obert, i el que és útil per a un agricultor pot no ser-ho per al seu veí. Aquesta variabilitat subratlla la necessitat d'experimentació per descobrir les millors pràctiques adaptades a cada situació particular.

ADAPTA EL FONG A LA PLANTA

Cada espècie i varietat vegetal té les seves preferències quan es tracta de formar associacions micorríziques. No tots els duets de planta i fong tindran el mateix èxit; de fet, algunes combinacions poden ser excepcionalment efectives, creant una simbiosi par-

ticularment robusta. És fonamental triar la combinació planta-fong que millor s'adapti a les necessitats específiques de cada cultiu per aprofitar al màxim els avantatges de les micorrices. Emprar una barreja de diferents espècies de fongs micorrízics pot potenciar encara més aquests beneficis, obrint la porta a més possibilitats d'una simbiosi efectiva entre les plantes i els fongs. Aquesta aproximació pot ajudar a que la implantació micorrízica sigui més forta i flexible, capaç d'adaptar-se a una àmplia gamma de condicions ambientals. Cal tenir present que l'èxit de la simbiosi depèn tant de les particularitats biològiques de les plantes i els fongs com de les condicions ambientals en què es troben.

UTILITZA PROPÀGULS VIABLES

Per a assegurar-te que utilitzes propàguls viables en les teves pràctiques agrícoles, és essencial comprendre els diferents tipus de propàguls i la seva durada de vida. Els propàguls, que inclouen espores, hifes fúngiques i fragments d'arrels micorrízics amb arbuscles i vesícules, tenen períodes de viabilitat específics. Generalment, les espores comercials tenen una vida útil d'aproximadament dos anys, mentre que els fragments d'arrels micorrízics solen ser viables durant aproximadament un any. Com el iogurt, els propàguls no expiren de manera abrupta; en canvi, la seva viabilitat es redueix gradualment. Això significa que després del període de caducitat, la quantitat de propàguls efectivament viables disminueix, reduint la possibilitat d'obtenir els resultats desitjats si s'utilitza la mateixa quantitat d'inòcul com abans de la caducitat. Per tant, és crucial seguir les recomanacions del fabricant respecte a l'emmagatzematge dels propàguls per maximitzar la seva viabilitat i eficàcia. Mantenir les condicions adequades d'emmagatzematge pot ajudar a preservar la qualitat i la funcionalitat dels propàguls, garantint així que els teus cultius puguin beneficiar-se plenament de la simbiosi micorrízica.

VIGILA AMB EL FÒSFOR

Vigila el nivell de fòsfor al teu sòl o substrat, ja que un excés d'aquest mineral pot impedir que les plantes estableixin simbiosis amb els fongs micorrízics. Per assegurar una colonització eficaç al llarg del cicle de cultiu, és aconsellable evitar l'ús de fertilitzants rics en fòsfor. Si decideixes enviar una mostra del teu sòl a un laboratori per a anàlisis, comprova que els nivells de fòsfor estiguin controlats i idealment per sota de les 70 parts per milió (ppm). De fet, alguns experts recomanen que aquests nivells siguin encara més baixos, situant-se en un rang òptim d'aproximadament 30 ppm. Mantenir els nivells de fòsfor adequats no només facilitarà la formació de micorrízics, sinó que tindrà un menor impacte mediambiental.

AFEGEIX PROPÀGULS MICORRÍZICS ALS TEUS SUBSTRATS

Afegeix propàguls micorrízics als teus substrats, ja sigui en compostos o altres mescles, especialment durant el transplantament. Encara que les plantes ja hagin estat prèviament colonitzades pels fongs, la recolonització en les etapes inicials del cultiu pot amplificar els beneficis. Els estudis indiquen que, malgrat la colonització inicial sigui efectiva, la capacitat de recolonització al mateix ritme sovint disminueix a mesura que la planta creix. Per això, és aconsellable reintroduir dosis d'inoculant periòdicament. Tot i que és beneficiós tenir una bona quantitat de propàguls, cal ser prudent amb les concentracions altes, especialment en les etapes primerenques del desenvolupament de la planta. Una sobredosi d'inoculant pot tenir efectes contraproductius. És vital equilibrar la quantitat per assegurar que la interacció entre la planta i el fong sigui la més eficaç possible. Recorda que una correcta gestió dels propàguls no només facilita la formació de micorrízics, sinó que també optimitza l'entorn radicular.

INOCULA TAN AVIAT SIGUI POSSIBLE

Inocula tan aviat com puguis per donar a les plantes el millor inici possible, aprofitant els beneficis dels fongs micorrízics des del començament. Això es pot fer afegint propàguls directament a les llavors, incorporant-los al substrat durant la germinació, o, si ja has adquirit les plantes en planter, aplicant-los durant el transplantament. Aquesta pràctica assegura que les plantes comencin a beneficiar-se de la simbiosi micorrízica des de les primeres etapes de creixement, optimitzant l'absorció de nutrients i millorant la resistència a condicions adverses. Afegeix el propàgul de manera que cada planta pugui interaccionar amb els fongs des que les arrels comencin a desenvolupar-se, garantint una associació efectiva i continuada.

ESTIGUES ALERTA AMB L'ÚS DE PRODUCTES QUÍMICS

Estigues alerta amb l'ús de productes químics com pesticides, herbicides i fungicides, ja que poden afectar negativament la salut dels fongs micorrízics i els altres microorganismes del sòl amb els quals interaccionen. Aquests productes poden interferir amb la capacitat dels fongs de formar simbiosis efectives amb les arrels de les plantes, reduint així els beneficis que aporten al creixement i la salut de les plantes. Abans d'utilitzar qualsevol d'aquests productes, és essencial consultar les especificacions i estudis disponibles per determinar el seu potencial impacte sobre les micorrizes. D'aquesta manera, podràs prendre decisions informades per protegir i fomentar la simbiosi.

SIGUES CURÓS

Sigues curós amb les xarxes micorríziques, ja que són força delicades. Evita les pertorbacions intensives del sòl, com ara llaurar profundament, voltejar, o anivellar, ja que aquests processos poden danyar les xarxes de miceli essencials per a la salut del sòl. També és recomanable evitar cremar els camps després de la collita, atès que les temperatures altes poden destruir els arbuscles i les espores micorríziques. Recorda que els fongs necessiten oxigen per sobreviure; per tant, hauries d'evitar les pràctiques que provoquin la compactació del sòl o que impedeixin un drenatge eficaç, com ara el trànsit excessiu de maquinària pesada sobre el terreny.

EMMAGATZEMA ELS PROPÀGULS CORRECTAMENT

Conserva els propàguls adequadament per mantenir la seva viabilitat. Emmagatzema'ls a temperatures suaus, idealment entre 24 i 30°C. Les temperatures altes, per sobre de 50°C, poden destruir-los. Guarda els propàguls en llocs frescos, secs i ben tancats per evitar contaminacions. Si no utilitzes tots els propàguls de seguida, considera transferir-los a un pot de vidre amb tapa hermètica, preferiblement esterilitzat amb calor. Després, col·loca aquest recipient en un lloc fresc i fosc. No t'oblidis de mantenir l'etiqueta ben visible per saber el contingut i poder revisar la data de caducitat i verificar la viabilitat del producte quan el necessitis usar de nou. Aquesta pràctica t'ajudarà a aprofitar al màxim els beneficis dels propàguls en el temps.

EXPLORA, ACTUALITZA'T I EXPERIMENTA

Fa més d'un segle que les micorrizes van ser descobertes, però encara estem lluny de comprendre'n tot el seu potencial. El camp de la recerca en micorríziques és vibrant i ple d'activitat, amb científics d'arreu del món buscant noves aplicacions per a aquests fascinants fongs, especialment en l'augment de la producció agrícola. Universitats i centres de recerca publiquen constantment estudis innovadors, molts dels quals estan disponibles en línia en forma de resums i articles complets.

El procés d'utilitzar propàguls per desenvolupar noves xarxes de micorríziques és un dels avenços més recents en l'agricultura, obrint una finestra a l'exploració científica accessible a tots. Això convida a tots, des dels agricultors fins als aficionats, a experimentar i descobrir quines tècniques optimitzen millor el creixement vegetal i la salut del sòl. Però, és important recordar que els resultats poden variar significativament i en el camp, les estratègies poden diferir. La clau està en experimentar, en no aturar-se mai d'aprendre i compartir els coneixements: experimenta amb diferents mètodes i ajusta les condicions segons les necessitats específiques de les teves plantes .

Bibliografia

Abbott LK, Lumley S. Mycorrhizal Fungi: Use in Sustainable Agriculture and Land Restoration; Springer: Berlin, Germany, 2014; Volum 41, ISBN 978-3-662-45369-8

BBC News (2018). How trees secretly talk to each other (Com els arbres es parlen secretament entre ells) (<https://youtu.be/yWOqeyPIVRo?si=iOXNyB2D4NZxOmik>)

Bonfante P, Genre A (2010). Mechanisms underlying beneficial plant–fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nature Communications* 1, 48. <https://doi.org/10.1038/ncomms1046>

Campo S, Martín-Cardoso H, Olivé M, Pla E, Catala-Forner M, Martínez-Eixarch M, San Segundo B (2020). Effect of Root Colonization by Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Growth, Productivity and Blast Resistance in Rice 13:42. doi: 10.1186/s12284-020-00402-7

Campo S, San Segundo B (2020). Systemic induction of phosphatidylinositol-based signaling in leaves of arbuscular mycorrhizal rice plants. *Sci. Rep.* 10, 15896. doi: 10.1038/s41598-020-72985-6

Ferrol N, Lanfranco L. Arbuscular mycorrhizal fungi: methods and protocols. A: Part de la sèrie de llibres: methods in molecular biology (MIMB, volum 2146). New York Inc: Springer-Verlag; 2020. ISBN10 1071606026.

Honrubia M (2009). Las micorrizas: Una relación planta-hongo que dura más de 400 millones de años. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*. Vol. 66S1:133-134.

Jaizme-Vega MC (2019). *Las micorrizas, una estrategia agroecológica para optimizar la calidad de los cultivos*. MV Phytoma-España.

Lowenfels J (2017). Teaming with Fungi: The Organic Grower's Guide to Mycorrhizae. Timber Press.

Mycorrhizal Applications (2021). Mycorrhizal Spore vs. Propagule: An Attempt to Clarify (<https://mycorrhizae.com/mycorrhizal-spore-vs-propagule-an-attempt-to-clarify/>)

Parniske M (2008). Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. *Nature Reviews Microbiology* 6:763-775. doi: 10.1038/nrmicro1987. PMID: 18794914.

Pozo MJ, Azcón-Aguilar C (2007) Unraveling mycorrhiza-induced resistance. *Curr Opin Plant Biol* 10:393–398 <https://doi.org/10.1016/J.PBI.2007.05.004>

Ruralcat (2023). Escorrentia superficial després d'una pluja: Comprendre el flux d'aigua en superfície (https://ruralcat.gencat.cat/noticia/-/journal_content/2002/20181/10802471/escorrentia-superficial-despres-d-una-pluja-comprendre-el-flux-d-aigua-en-superficie)

Smith SE, Read DJ (2008) Mycorrhizal symbiosis, 3rd edn. Academic Press, New York, London, Burlington, San Diego

Smith SE, Jakobsen I, Grønlund M, Smith FA (2011) Roles of arbuscular mycorrhizas in plant phosphorus nutrition: interactions between pathways of phosphorus uptake in arbuscular mycorrhizal roots have important implications for understanding and manipulating plant phosphorus acquisition. *Plant Physiol* 156:1050–1057 <https://doi.org/10.1104/pp.111.174581>



www.fundaciomiquelagusti.cat



Aquesta actuació forma part del projecte "Millora del rendiment i qualitat de varietats tradicionals de tomàquet a Catalunya en condicions d'agricultura ecològica mitjançant l'aplicació de fongs micorrícic"

Número d'expedient: 56 30034 2021 P4

"Activitat finançada a través de l'Operació 01.02.01 de Transferència Tecnològica del Programa de desenvolupament rural de Catalunya 2014-2022"

Fundació Miquel Agustí

Escola Enginyeria Agroalimentària i de Biosistemes de Barcelona (EEABB) UPC,
Campus del Baix Llobregat Edifici D4 C. Esteve Terrades, 8, 08860 Castelldefels
recerca@fundaciomiquelagusti.cat +34 935521101

