

BIOINDICADORES NA AVALIAÇÃO DO USO DOS POLÍMEROS ORGÂNICOS NAS COBERTURAS DO SOLO: ALTERNATIVAS INOVADORAS E MAIS SUSTENTÁVEIS AOS PLÁSTICOS AGRÍCOLAS CONVENCIONAIS



FIGURA 1. O "mulch" (cobertura do solo) tornou-se indispensável na atividade agrícola e Portugal usa, atualmente, cerca de 4500 toneladas de polietileno para cobrir 23 000 ha de culturas.

José Cotta, Pablo Pereira, M^a Lurdes Inácio,
Paula Fareleira, Corina Carranca
Instituto Nacional de Investigação Agrária e
Veterinária

1. INTRODUÇÃO

O uso de materiais plásticos na agricultura está amplamente difundido na maior parte dos países da União Europeia. As práticas e metodologias empregues mostram uma clara dependência destes materiais para o bom funcionamento e avanço tecnológico da atividade agrícola. O Pacto Ecológico Europeu (*Green Deal*) (2050) aborda a redução dos impactos negativos dos plásticos no meio ambiente e saúde pública e promove estratégias que enfatizam a importância de investigar alternativas aos plásticos agrícolas convencionais e promover a transição para uma economia circular. Com estes objetivos, os esforços concentram-se no desenvolvimento de novos materiais menos prejudiciais ao ambiente, como os biopolímeros, bem como no aumento da reciclagem e na redução do desperdício. Os materiais usados na cobertura de solo são de origem orgânica ou sinté-

tica. Estes últimos representam a quase totalidade e são plásticos convencionais derivados do petróleo.

Os polímeros mais usados são o polietileno (PE) para a cobertura do solo e o polipropileno (PP), mais resistente, usado em tubagens e telas de culturas perenes. Todos estes materiais apresentam diferentes composições que incluem aditivos (plastificantes) e corantes que alteram e adaptam as suas características a diferentes fins. Ao longo do tempo, estes materiais sofrem degradação mecânica e exposição ao meio ambiente e à radiação ultravioleta, transformando-se em partículas mais pequenas. Os micropolásticos (MP) (≤ 5 mm) e os nanopolásticos (≤ 1 mm) libertam diversos aditivos no ambiente e, devido à sua persistência, podem ser absorvidos pelas plantas e ingeridos pelos organismos, entrando assim na cadeia alimentar humana. Outra fonte não negligenciável são os revestimentos plásticos de adubos e sementes (contendo bioestimulantes) que libertam partículas capazes de alterar a microbiota do solo (fungos e bactérias), reduzindo a sua atividade enzimática e os seus processos metabólicos. Também

afetam a fauna edáfica, podendo bloquear o trato digestivo e comprometer o crescimento e a reprodução destes organismos. Estas alterações conduzem a alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, resultando em perdas de produtividade agrícola. Os nanopolásticos, por serem ainda de menores dimensões que os MP, entram com maior facilidade na cadeia trófica e acumulam-se nos organismos. A sua estrutura pode interferir com funções celulares e, pela elevada capacidade de atrair poluentes, desencadear respostas imunitárias indesejáveis no ser humano.

2. BIOPOLÍMEROS: AS ALTERNATIVAS "VERDES"

O projeto Agri-plast PRR-C05-i-03-I-000167 teve como objetivo organizar e inovar a produção para a redução de Resíduos Plásticos de Uso Agrícola (RPUA), envolvendo os setores frutícolas, hortícolas e vitivinícolas. A sustentabilidade do setor pretende ser reforçada com o desenvolvimento de plásticos de uso agrícola mais recicláveis e biodegradáveis, com maior eficiência na recolha e reciclagem e que permitam a adoção de boas práticas agrícolas, gerando recomendações de âmbito político. A equipa do INIAV testou alternativas sustentáveis ao plástico convencional para a cobertura do solo com dois biofilmes inovadores - o papel Kraft®(celulose) e o Kritifil® de matriz PBAT (polímero biodegradável e compostável) (Figura 2).

Estas "alternativas verdes" são produzidas com materiais de origem vegetal como o amido, a celulose, o glúten de trigo, o cardo, o ouriço, a casca da noz, da castanha e da fibra da casca da castanha, entre outros, recorrendo,



FIGURA 2. Campo de ensaio do projeto Agri-Plast onde foram testadas as diferentes coberturas do solo ("mulch"), na cultura de mirtilo cv. Centra Blue. Localidade Polo de Inovação INIAV da Fataca, Odemira (sul de Portugal). **A** – Cobertura do solo com geotêxtil (polímero plástico convencional derivado do Polipropileno). **B** – Cobertura do solo com biofilme inovador papel Kraft® (polímero orgânico derivado da celulose).

preferencialmente aos subprodutos da indústria agroflorestal, promovendo a bioeconomia circular. Estes biofilmes sofrem, na sua produção, solubilização dos produtos em água, etanol ou ácidos orgânicos e são depois transformados em filme com a ajuda de aditivos plastificantes. No solo, sofrem uma biodegradação superior a 90% (num período máximo de 24 meses), não restando resíduos após algum tempo. Além dos biofilmes atrás referidos, foi também testado um material de origem orgânica (casca de pinheiro) e dois plásticos convencionais derivados do PE e do PP (Figura 3). As parcelas com os cinco tratamentos de cobertura do solo foram cultivadas com mirtilos (*Vaccinium virgatum* Aston cv. Centra Blue) no polo de inovação do INIAV, na Fataca, em Odemira (sul de Portugal). Paralelamente, foi efetuada a monitorização da presença de MP no solo, na água de rega e nos frutos. Os testes efetuados ao solo incluíram parâmetros físicos, químicos e biológicos, tendo sido efetuadas amostragens nos dois anos em que decorreu o projeto. Para a monitorização dos parâmetros biológicos, são aqui apresentados os resultados da avaliação dos microrganismos benéficos, designadamente das micorrizas, e dos nemátodes, como bioindicadores dos efeitos de diferentes *mulches* na saúde do solo.

COBERTURA DO SOLO	POLÍMERO
Casca de pinheiro	CELULOSE
Papel Kraft	CELULOSE
Geotêxtil preto	POLIPROPILENO
Plástico preto	POLIETILENO
kritifil	COPOLÍMERO PBAT

FIGURA 3. Desenho experimental do ensaio, com as cinco modalidades de cobertura do solo (*mulches*) testadas no projeto Agri-Plast.

3. NEMÁTODES BIOINDICADORES DA SAÚDE DO SOLO

O solo é um dos biomas mais complexos conhecidos, e a sua qualidade depende da sua capacidade de resistir a perturbações e de recuperar a integridade estrutural e funcional. Esta resiliência pode ser avaliada através de alterações nas comunidades biológicas e nos substratos que sustentam a vida (abundância, atividade, fisiologia, etc.). A seleção de organismos indicadores baseia-se na sensibilidade ao

stress, relevância ecológica, ampla distribuição e facilidade de amostragem. As comunidades de nemátodes são essenciais ao funcionamento dos ecossistemas terrestres, desempenhando papéis nos ciclos biogeoquímicos, na dinâmica do carbono, na reciclagem de nutrientes e na regulação da biota do solo. Os nemátodes do solo estão representados em todos os níveis tróficos da teia alimentar e podem ser divididos, conforme o seu comportamento alimentar, em fitoparasitas, bacteriófagos, fungívoros, omnívoros e predadores, sendo relativamente fáceis de extrair e identificar (Figura 4).

« O solo é um dos biomas mais complexos conhecidos, e a sua qualidade depende da sua capacidade de resistir a perturbações e de recuperar a integridade estrutural e funcional. »

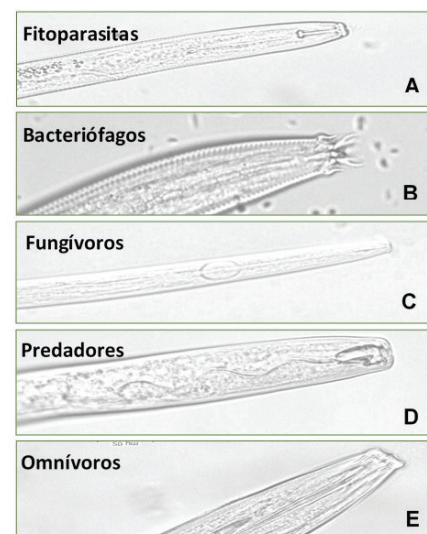


FIGURA 4. Grupos tróficos dos nemátodes usados como bioindicadores.

A abundância dos diferentes grupos de nemátodes varia conforme as fontes alimentares, podendo os seus ciclos de vida ser correlacionados com a presença de outros organismos e com características químicas do solo. A proporção relativa desses grupos numa comunidade fornece indicação da qualidade do habitat, tornando os nemátodes os bioindicadores por excelência da saúde do solo (Figura 5).



FIGURA 5. As proporções entre os grupos tróficos de nemátodes fitoparasitas e de vida livre refletem o estado ecológico do solo.

Os nemátodes fitoparasitas têm vindo a ser alvo de maior atenção devido ao seu impacto direto nos sistemas agroflorestais. Os nemátodes de vida livre como os bacteriófagos e fungívoros desempenham papéis fundamentais na decomposição da matéria orgânica, por isso, alterações nas suas proporções refletem mudanças nas vias de decomposição. Já os omnívoros e predadores têm um papel regulador na cadeia alimentar do solo e podem reduzir as populações de nemátodes fitoparasitas.

A dominância de bacteriófagos e fungívoros indica elevada atividade biológica, estando presentes em solos ativos e bem estruturados; predadores e omnívoros, embora menos abundantes, indicam maturidade e estabilidade ecológica; já a predominância de fitoparasitas pode revelar situações de desequilíbrio ou degradação.

De cada um dos cinco tratamentos foram colhidas três amostras de solo, a uma profundidade de 0-20 cm. As amostragens foram efetuadas nos dois anos do projeto em duas datas diferentes. Antes da instalação do ensaio, foram colhidas seis amostras de solo sem intervenção há vários anos, ou seja, um solo não perturbado (testemunha). Os nemátodes de vida livre foram classificados nos diversos grupos tróficos. Foram estimados dois índices ecológicos: o *Nematode Channel Ratio* (NCR) e o *Wasilewska Index* (WI).

As coberturas orgânicas, como a casca de pinheiro e o papel kraft, promoveram comunidades de nemátodes mais ricas e equilibradas, dominadas por bacteriófagos e fungívoros, e ainda omnívoros, indicadores de intensa atividade de decomposição e solo biologicamente ativo. Em contraste,

os solos cobertos com plásticos convencionais (PE 40 µm e polipropileno) apresentaram menor abundância e diversidade, sugerindo condições menos favoráveis à fauna edáfica. Os resultados evidenciam que os *mulches* orgânicos favorecem a fertilidade biológica e a sustentabilidade ecológica do solo, em oposição às coberturas sintéticas (Figuras 6 e 7).

Os valores do NCR são maioritariamente intermédios a elevados em todas as coberturas, indicando domínio de processos bacterianos e decomposição equilibrada. Coberturas como casca de pinheiro, papel kraft, PP e Kritifil mostram estabilidade ao longo do tempo, sugerindo ausência de alterações relevantes na estrutura trófica. Já o PE 40 µm apresenta valores ligeiramente mais baixos, possivelmente associados a menor atividade bacteriana e maior participação de fungívoros, refletindo alterações microambientais criadas por este material.

O WI distingue mais claramente os tipos de cobertura: a casca de pinheiro apresenta os valores mais elevados, evidenciando um solo biologicamente

ativo e rico em nemátodes benéficos, como seria esperado para uma cobertura orgânica que estimula a atividade microbiana. O papel kraft mostra um efeito intermédio, enquanto as coberturas sintéticas (PP e PE 40 µm) revelam valores baixos e constantes, característicos de ambientes mais inertes e com menor diversidade funcional.

No conjunto, os resultados indicam que coberturas orgânicas - sobretudo a casca de pinheiro - promovem melhor qualidade biológica do solo, enquanto coberturas plásticas tendem a reduzir o dinamismo microbiano e a proporção de nemátodes benéficos.

« No conjunto, os resultados indicam que coberturas orgânicas - sobretudo a casca de pinheiro - promovem melhor qualidade biológica do solo, enquanto coberturas plásticas tendem a reduzir o dinamismo microbiano e a proporção de nemátodes benéficos. »

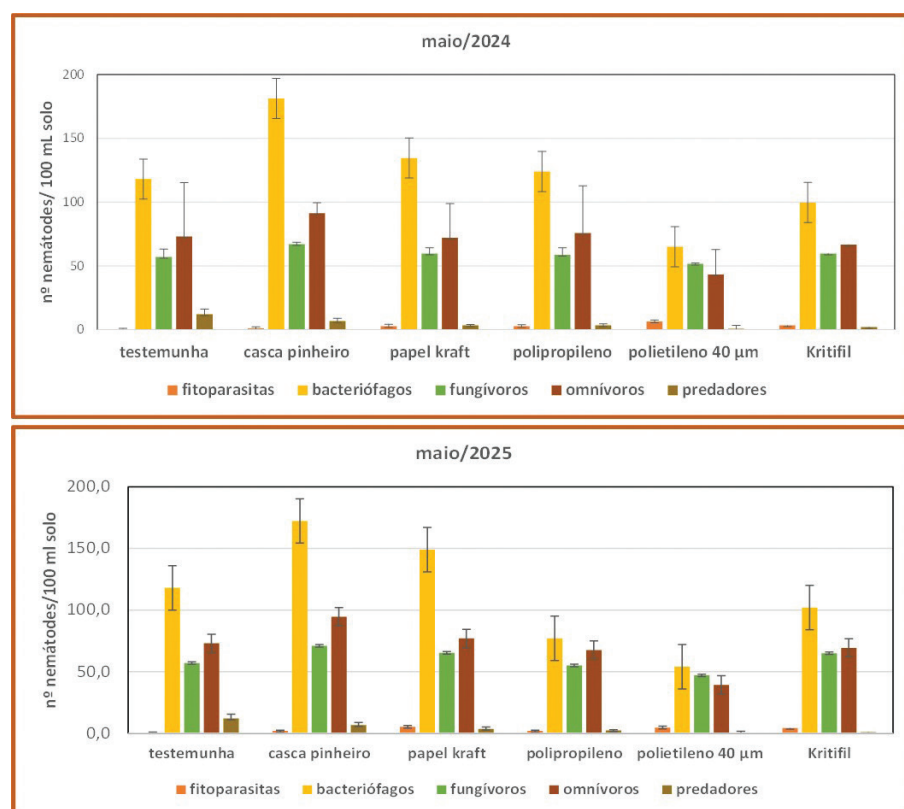


FIGURA 6. Resultados obtidos em duas datas de amostragem: maio/2024 e maio/2025 para cada grupo trófico de nemátodes, nas diversas coberturas de solo testadas.

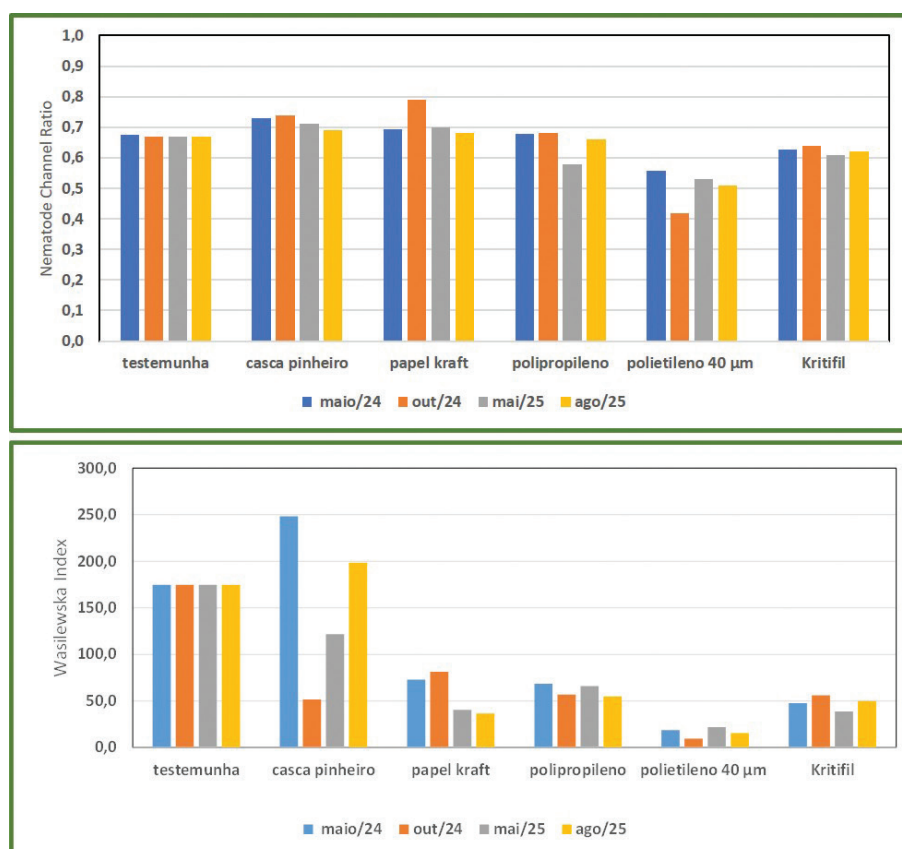


FIGURA 7. Resultados dos índices *Nematode Channel Ratio* ($NCR = \text{Bacteriófagos} / \text{Bacteriófagos} + \text{Fungívoros}$) – A e do *Wasilewska Index* ($WI = \text{Bacteriófagos} + \text{Fungívoros} / \text{Fitoparasitas}$) – B, para as quatro datas de amostragem.

4 – INDICADORES MICROBIOLÓGICOS: EFEITO DOS MULCHES NA MICORRIZAÇÃO ERICÓIDE DAS PLANTAS DE MIRTILO

As plantas da família das Ericáceas – como o mirtilo (*Vaccinium* sp. e híbridos) – formam uma associação simbiótica com fungos ericóides (ericoid mycorrhizal fungi, ErMF), que colonizam as raízes finas, formando redes microscópicas no interior do córtex das raízes. Esta associação, permite à planta aceder a formas de azoto, fósforo e água que, de outro modo, estariam pouco disponíveis em solos ácidos e pobres, e aumenta a absorção de micronutrientes e a tolerância a *stress*, como a seca ou baixa fertilidade. Por isso, o grau de micorrização ericóide – a percentagem de raízes colonizadas por fungos simbióticos – é considerado um bom indicador da saúde biológica do solo, refletindo o equilíbrio entre a planta e a comunidade microbiana que a sustenta. A utilização de “mul-

ch” cria uma superfície do solo que altera o microclima à volta das raízes: regula a temperatura, conserva a humidade e limita a germinação de infestantes. Estas alterações têm impacto direto ou indireto na atividade microbiana do solo e no grau de colonização simbiótica das raízes. Os “mulches” orgânicos – como a casca de pinheiro, coberturas de derivadas da celulose, tendem a favorecer a vida do solo: aumentam a matéria orgânica, estabilizam a humidade e mantêm um pH ácido, condições ideais para o desenvolvimento dos fungos ericóides. Em plantações de mirtilo, observou-se que a ausência de *mulch* ou o uso de materiais pouco compatíveis com o ambiente ácido típico das Ericáceas se associa a níveis mais baixos de micorrização. Além disso, à medida que se decompõem, os *mulches* orgânicos libertam nutrientes de forma gradual e estimulam a atividade de fungos benéficos e outros microrganismos do solo. Os “mulches” plásticos, como os filmes

de PE ou PP, podem reduzir o teor de matéria orgânica, a atividade microbiana e a abundância de propágulos fúngicos, alterando as condições para a micorrização. Em ensaios realizados em Portugal, por exemplo, coberturas plásticas de alta densidade usadas durante vários anos em plantações de mirtilo mostraram uma redução significativa do azoto total, do carbono orgânico e da atividade microbiana, quando comparadas com solos descobertos. Um dos problemas emergentes associados ao uso prolongado de *mulches* plásticos é a libertação de MP no solo. Estudos recentes sugerem que os MP podem afetar negativamente os fungos micorrízicos, interferindo com o crescimento das hifas e com a comunicação química entre fungos e raízes. No caso dos fungos ericóides, que vivem intimamente ligados às células radiculares do mirtilo, a presença de MP no solo pode perturbar este contacto, reduzindo o grau de micorrização e afetando a absorção de nutrientes. Mesmo os chamados “biofilmes biodegradáveis” podem libertar micropartículas durante o processo de degradação do material, dependendo das condições de humidade, temperatura e da sua composição química. Assim, embora representem uma alternativa mais ecológica, é importante avaliar cuidadosamente o seu comportamento a longo prazo.

No projeto Agri-Plast, após a recolha e o transporte para o laboratório, as raízes foram inicialmente lavadas e fixadas em etanol a 50%, solução na qual permaneceram armazenadas por um período máximo de quatro meses (Figura 8). Foram posteriormente coradas com “Tripán Blue”, passaram pela etapa de descoloração e foram observadas ao microscópio (Figura 9).

Como se observa na Figura 10, a percentagem de micorrização aumentou de forma gradual ao longo dos três períodos de amostragem (27/05/2024; 12/03/2025; 05/08/2025), independentemente da cobertura do solo utilizada. Os biofilmes biodegradáveis empregues, papel Kraft® e matriz PBAT (Kritifil®), foram os materiais que promoveram os níveis mais elevados de micorrização.



FIGURA 8. Raízes de mirtilo em fixador (etanol 50%).

Os resultados indicam que o tipo de cobertura influencia claramente a colonização micorrízica. As coberturas orgânicas (casca de pinheiro e papel kraft) mostram um aumento consistente da micorrização ao longo do tempo, sugerindo que criam um ambiente radicular mais estável e biologicamente ativo, favorável à simbiose planta-fungo. Entre os materiais biodegradáveis comerciais, o Kritifil apresenta os valores mais elevados, revelando elevado potencial para promover a atividade micorrízica. Já as coberturas plásticas (polipropileno e PE 40 μ m) mantêm níveis de micorrização mais baixos e pouco variáveis, o que pode

refletir condições menos propícias à interação entre raízes e microrganismos benéficos. Assim, as coberturas biodegradáveis e orgânicas destacam-se por apoiar a saúde biológica do solo, enquanto os plásticos, embora funcionais, tendem a limitar parcialmente o desenvolvimento micorrízico.

As coberturas biodegradáveis evidenciam um elevado potencial para favorecer a interação planta-fungo micorrízico e apoiar práticas agrícolas mais sustentáveis. Comparativamente, os *mulches* orgânicos tendem a criar um ambiente radicular mais estável, com maior teor de humidade e biologicamente ativo, condições que promovem a micorrização e fortalecem a resiliência das plantas. Em contraste, os materiais plásticos podem aquecer excessivamente o solo e reduzir o contacto entre as raízes e os microrganismos benéficos, o que se traduz numa diminuição da simbiose micorrízica e numa maior dependência de fertilização.

A sustentabilidade das coberturas orgânicas é ainda reforçada pela sua biodegradabilidade e pelo contributo que oferecem à saúde do solo, enquanto os plásticos exigem monitorização contínua e gestão cuidada dos resíduos. Embora o uso de *mulches* seja uma prática essencial na cultura do mirtilo, o seu impacto ultrapassa o simples controlo de infestantes ou a conservação da água: interfere diretamente com a biologia do solo e com a simbiose entre raízes e fungos micorrízicos ericóides. Assim, en-

quanto os *mulches* orgânicos promovem uma micorrização mais eficiente e um ecossistema radicular mais saudável, os plásticos – apesar da sua utilidade imediata – podem contribuir para a formação de microplásticos, reduzir a colonização fúngica e comprometer a vitalidade do sistema radicular a longo prazo.

« As coberturas biodegradáveis evidenciam um elevado potencial para favorecer a interação planta-fungo micorrízico e apoiar práticas agrícolas mais sustentáveis. »

5. BOAS PRÁTICAS PARA A SAÚDE DO SOLO

As recomendações gerais para uma gestão sustentável do solo apontam para a adoção de práticas que promovam a estabilidade biológica e a funcionalidade ecológica dos ecossistemas agrícolas. No que respeita aos **nemátodes**, a mobilização mínima do solo é uma estratégia particularmente relevante, uma vez que favorece grupos omnívoros e predadores, indicadores de solos equilibrados e com cadeias tróficas mais completas. A aplicação de *mulches* orgânicos e de culturas de cobertura tende igualmente a estimular a atividade microbiana, refletindo-se num aumento rápido dos nemátodes bacteriófagos e numa maior eficiência dos processos de decomposição.

No que respeita aos microrganismos do solo, designadamente à formação de micorrizas, recomenda-se privilegiar *mulches* orgânicos, como casca de pinheiro ou compostos vegetais estabilizados, que contribuem para melhorar a estrutura do solo, aumentar o teor de matéria orgânica e criar um ambiente favorável ao desenvolvimento dos fungos micorrízicos ericóides. A manutenção de um pH ácido e de níveis adequados de matéria orgânica constitui um pré-requisito essencial para a formação desta simbiose. A monitorização regular da saúde do solo – incluindo a atividade microbiana, o teor de carbono e, quando possível, o grau de micorrização – permite aferir a vitalidade biológica do sistema radicular e ajustar práticas de cultura.

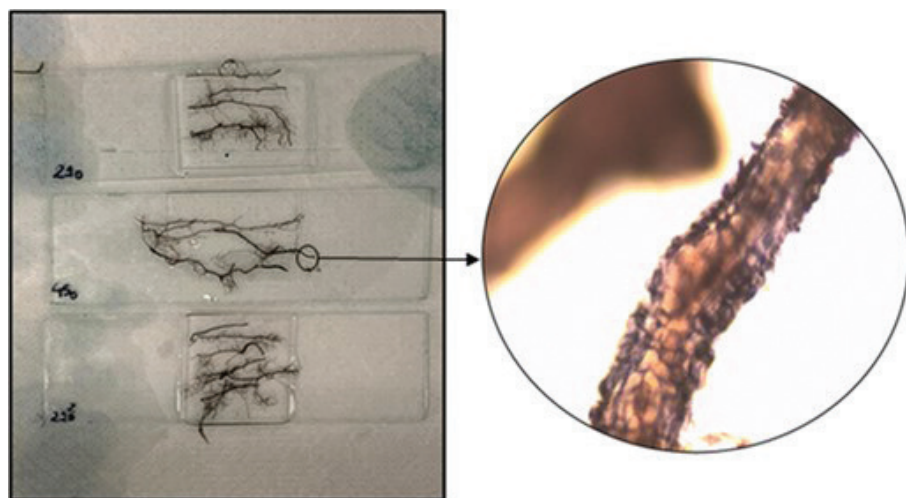


FIGURA 9. Preparações de raízes de mirtilos fixadas para observação microscópica, e pormenor de raiz de mirtilo com estruturas internas do fungo micorrízico.

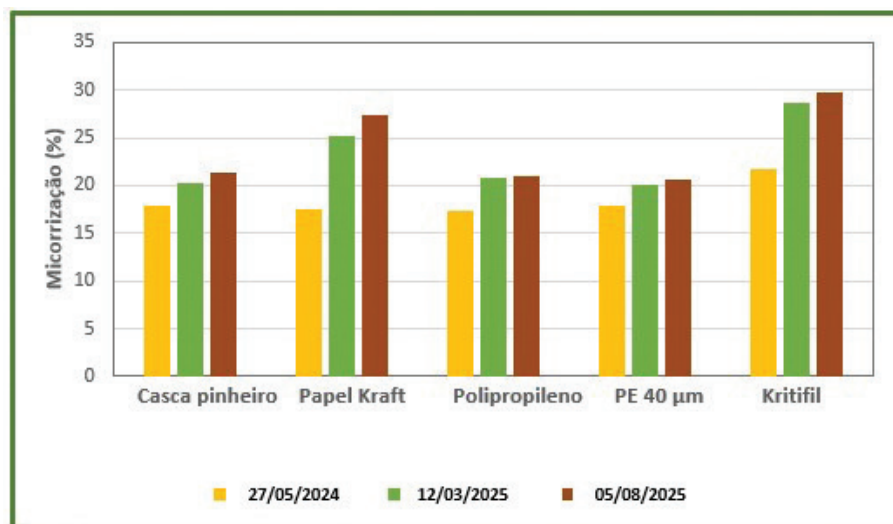


FIGURA 10. Colonização micorrízica ericóide (em %) para em diferentes coberturas do solo (, casca de pinheiro, papel Kraft®, polipropileno, polietileno e Kritifil®).

OBRAS CONSULTADAS:

Bergero, R., Girlanda, M., Bello, F., Luppi, A. M. & Perotto, S. (2003). Soil persistence and biodiversity of ericoid mycorrhizal fungi in the absence of the host plant in a Mediterranean ecosystem. *Mycorrhiza*, 13, 69–75. doi: 10.1007/

s00572-002-0202-9 **Caballos-Burgos F** et al. (2014) Nemátodes como bioindicadores da qualidade do solo, *Agrotec* 53: 66–70 **Camacho, M. J.** et al. (2021) Nemátodes como bioindicadores *Agrotec* n° 40 **Cotta, J.** et al. (2025). Nemátodes como bioindicadores da saúde do solo. *Boletim*

técnico SAFSV-BT-01-2025 INIAV **de Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Kloas, W., Bergmann, J., Bachelier, J. B., Faltin, E. & Rillig, M. C.** (2019). Microplastics can change soil properties and affect plant performance. *Environmental Science & Technology*, 53(10), 6044–6052. doi: 10.1021/acs.est.9b01339 **FAO, ITPS, GSBI, CBD e EC** (2020). State of knowledge of soil biodiversity – Status, challenges and potentialities, Report 2020. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb1928en> **Kim, N.; Zabaloy, M.C.; Guan, K.; Villamil, M.B.** (2020). Do cover crops benefit soil microbiome? A meta-analysis of current research. *Soil Biol. Biochem.*, 142:107701 **Leifheit, E. F., Lehmann, A., & Rillig, M. C.** (2021). Potential Effects of Microplastic on Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *Frontiers in Plant Science*, 12:626709. doi: 10.3389/fpls.2021.626709 **Neher, D.** (2001). Role of nematodes in soil health and their use as indicators. *Journal of Nematology*, 33:161–168 **Read, D. J.** (1996). The structure and function of the ericoid mycorrhizal root. *Annals of Botany*, 77(4), 365–374. doi: 10.1006/anbo.1996.0044 **Rusinque L** et al. (2021) Bioindicadores para avaliar o efeito das práticas culturais na melhoria da fertilidade do solo, *Vida Rural* 11: 52–58 **Stirling, G.** (2014). Biological control of plant-parasitic nematodes: soil ecosystem management in sustainable agriculture, CABI Publishing, UK **Ugarte, C. e Zaborski, E.** (2020). Soil nematodes in Organic Farming Systems. <https://eorganic.org/node/4495>, consultado a 07.07.2021