



RISCOS



DE RESÍDUO A RECURSO: UMA ESTRATÉGIA PARA VALORIZAR A BIOMASSA DA INVASORA ACACIA LONGIFOLIA*

FROM WASTE TO RESOURCE: A STRATEGY TO VALUE THE BIOMASS OF THE INVASIVE ACACIA LONGIFOLIA

59

Joana G. Jesus

Universidade de Lisboa, CE3C (Portugal)
Faculdade de Ciências, Departamento de Biologia Vegetal
ORCID 0000-0002-8007-5031 jgjesus@fc.ul.pt

Helena Trindade

Universidade de Lisboa, CE3C (Portugal)
Faculdade de Ciências, Departamento de Biologia Vegetal
ORCID 0000-0002-1209-2622 mhdonato@fc.ul.pt

Cristina Máguas

Universidade de Lisboa, CE3C (Portugal)
Faculdade de Ciências, Departamento de Biologia Vegetal
ORCID 0000-0002-4396-7073 cmhanson@fc.ul.pt

Florian Ulm

Universidade de Lisboa, CE3C (Portugal)
Faculdade de Ciências, Departamento de Biologia Vegetal
ORCID 0000-0002-1137-0651 flulm@fc.ul.pt

RESUMO

Estratégias mais sustentáveis para a recuperação pós-fogo são essenciais, garantindo a conservação da biodiversidade e a resiliência dos ecossistemas. Portugal é um país frequentemente afetado pelos incêndios e com vastas áreas ocupadas por *Acacia longifolia*, uma espécie invasora muito agressiva, que coloniza os ecossistemas nativos, comprometendo a sua funcionalidade e biodiversidade. Esta colonização resulta numa abundante biomassa, que pode ser utilizada para a produção de um composto de resíduos verdes (GWC). O efeito da incorporação de GWC no crescimento de plantas nativas (*Arbutus unedo*, *Pinus pinea* e *Quercus suber*) e nas propriedades do solo (físico-químicas e microbianas), foi estudado numa área ardida no sul de Portugal. O GWC permitiu um maior crescimento vegetal devido ao aumento da humidade do solo, do teor de matéria orgânica e da disponibilidade de nutrientes. As mudanças na composição microbiana sugerem benefícios funcionais para o estabelecimento das plantas e demonstram uma assinatura característica do microbioma da acácia. Este estudo destaca o benefício de incorporar composto de *A. longifolia* em solos degradados, acelerando a recuperação do ecossistema após o fogo.

Palavras-chave: Regeneração do ecossistema, solo, comunidade microbianas.

ABSTRACT

Sustainable strategies for post-fire recovery are essential, ensuring biodiversity conservation and ecosystem resilience. Portugal is a country frequently affected by wildfires and invaded by *Acacia longifolia*, a highly aggressive invasive species that colonizes native ecosystems, compromising their functionality and biodiversity. This colonization results in abundant biomass, which can be used to produce a Green Waste Compost (GWC). The effect of GWC incorporation on the growth of native plants (*Arbutus unedo*, *Pinus pinea*, and *Quercus suber*) and on soil properties (physicochemical and microbial) was studied in a burnt area in the south of Portugal. GWC promoted plant growth due to increased soil moisture, organic matter content, and nutrient availability. Changes in microbial composition suggest functional benefits for plant establishment and demonstrate a characteristic signature of the acacia microbiome. This study highlights the benefits of incorporating *A. longifolia* compost into degraded soils, accelerating ecosystem recovery after fire.

Keywords: Ecosystem regeneration, soil, microbial communities.

* O texto deste artigo corresponde a uma comunicação apresentada ao III Seminário da Rede Incêndios-Solo, tendo sido submetido em 20-03-2025, sujeito a revisão por pares a 24-04-2025 e aceite para publicação em 10-09-2025. Este artigo é parte integrante da Revista *Territorium*, n.º 33 (I), 2026, © Riscos, ISSN: 0872-8941.

Introdução

O cenário das alterações climáticas engloba desafios tanto ao nível das espécies como do ecossistema, alterando os processos de interação e diminuindo a resiliência perante várias pressões (a)bióticas (Kumar *et al.*, 2023). Neste contexto, o solo, enquanto componente fundamental dos ecossistemas, desempenha um papel vital no suporte à vida e na manutenção do equilíbrio ecológico (Johns, 2017), influenciando diretamente a capacidade de resposta dos organismos e comunidades a estas mudanças. Ao estudar os solos, é importante considerar o seu papel no ciclo de nutrientes essenciais [azoto (N), fósforo (P) e potássio (K)], alojando uma enorme diversidade microbiana (nomeadamente bactérias e fungos), que assegura a reciclagem de nutrientes e a sua estrutura (Mukhtar *et al.*, 2023). Estratégias de regeneração de solos que se centrem nas componentes química e biológica aumentam a fertilidade do solo, tornando todo o ecossistema mais resiliente e multifuncional (Morrissey *et al.*, 2004; Burkhard e Maes, 2017). Estes processos são maioritariamente mediados por microrganismos e pela sua inerente redundância funcional (Wagg *et al.*, 2014; Fierer, 2017), que são particularmente determinantes no ambiente rizosférico, sendo a interface solo-planta a mais importante neste contexto (Vezzani *et al.*, 2018; Blagodataskaya *et al.*, 2021).

Os ecossistemas mediterrânicos são caracterizados como *hotspots* de biodiversidade (Allen *et al.*, 2010; Gauquelin *et al.*, 2018), mas as previsões climáticas apresentam-se desfavoráveis, tanto pelo aumento da aridez como pela imprevisibilidade dos incêndios florestais (Pörtner *et al.*, 2022). É fundamental construir resiliência através de estratégias que permitam a adaptação dos ecossistemas, promovendo solos menos suscetíveis à degradação, especialmente quando possuem baixo teor de matéria orgânica (Zdruli *et al.*, 2004; Woetzel *et al.*, 2020; Ferreira *et al.*, 2022). Paralelamente, outra pressão que contribui para esta fragilidade é a presença de plantas invasoras, com um impacto significativo ao nível do ecossistema e representando uma das principais preocupações na conservação da biodiversidade (IPBES, 2023). Neste sentido, as invasoras competem com a vegetação nativa, desencadeando alterações profundas na composição do solo, no ciclo de nutrientes e na disponibilidade de água (Hejda *et al.*, 2009; Michelin *et al.*, 2018). O género *Acacia*, leguminosa proveniente da Austrália, é um exemplo com distribuição global, representando uma ameaça significativa em áreas mediterrânicas (Lorenzo *et al.*, 2010; Souza-Alonso *et al.*, 2017). Embora apreciadas pelo seu valor ornamental e pela capacidade de fixar azoto no solo, como parte da família *Fabaceae*, as acácias invadem particularmente áreas costeiras e ecossistemas perturbados. Em Portugal, foram introduzidas no século XIX e, atualmente, a espécie *Acacia longifolia* (Andrews) Willd. é considerada uma das invasoras mais agressivas, gerando preocupações devido à extensa

área ocupada (Marchante *et al.*, 2008; Colaço *et al.*, 2023; Marchante *et al.*, 2023). O seu rápido crescimento e folhagem densa conduzem à formação de áreas monoespecíficas, perturbando os *habitats* naturais e alterando o regime de fogos. Estas pressões multidimensionais resultam do efeito combinado das alterações climáticas e das invasões biológicas, levantando preocupações sobre o seu impacto na ecologia e estabilidade do solo (Raison *et al.*, 1985; Kulmatiski e Kardol, 2008). Neste sentido, estratégias sustentáveis direcionadas para a manutenção e regeneração do solo são essenciais, incluindo as comunidades microbianas presentes no solo, não sendo ainda claro o efeito nas mesmas (Jansson e Hofmockel, 2020).

O composto obtido pela compostagem de resíduos verdes (*Green-waste compost*, GWC) tem vindo a ser utilizado para recuperar solos degradados (Brito *et al.*, 2013; 2015; Ulm *et al.*, 2019). A compostagem envolve a transformação de materiais orgânicos em húmus, rico em nutrientes, útil para melhorar a qualidade do solo e o crescimento da vegetação nativa (Maheshwari, 2014). Como o GWC é um substrato rico, irá i) aumentar a matéria orgânica do solo (OM), ii) garantir a retenção de água e a estrutura do solo, iii) aumentar a disponibilidade de nutrientes para as plantas e iv) ter um efeito benéfico sobre as comunidades microbianas do solo (Khaleel *et al.*, 1981; Perucci *et al.*, 2000). Estas propriedades já foram avaliadas num GWC produzido a partir de uma mistura de *A. longifolia* com *A. melanoxylon* por Brito *et al.* (2013; 2015), e um modelo de biomassa para *A. longifolia* confirmou a sua qualidade, considerando o elevado teor de carbono e de azoto e a sua abundante fonte de biomassa (Ulm *et al.*, 2022).

Considerando os potenciais efeitos benéficos da incorporação de GWC de *A. longifolia* no solo, é importante avaliar de que forma as propriedades do mesmo são alteradas, tanto do ponto de vista físico-químico como biológico. Neste contexto, as comunidades microbianas são bons indicadores ecológicos das alterações no solo a curto prazo, uma vez que apresentam flutuações na sua abundância e respondem rapidamente às condições ambientais (Ma *et al.*, 2022). *Acacia longifolia* tem sido descrita como uma engenheira de ecossistemas (Stock *et al.*, 1995; Marchante *et al.*, 2004, 2008, 2009; Yelenik *et al.*, 2007), alterando as propriedades químicas do solo e a composição das comunidades microbianas, com impactos específicos a nível local (Carvalho *et al.*, 2018; Keet *et al.*, 2021). Assim, será interessante compreender se esta capacidade de alterar os solos também se mantém no GWC, conferindo utilidade ao mesmo. A possibilidade de utilizar este composto está também associada à facilidade e ao baixo custo de produção e incorporação de GWC, podendo ser utilizado pelos proprietários e gestores florestais. Esta estratégia contribui ainda para uma boa gestão desta espécie invasora, resultando numa situação de benefício mútuo.

No presente estudo, testámos a incorporação de GWC de *A. longifolia* em solos ardidos identificando de que forma esta incorporação altera as propriedades do solo, através da avaliação de parâmetros físico-químicos e microbiológicos. Pretendemos avaliar ainda o efeito deste GWC no crescimento de três espécies vegetais após uma ação de reflorestação biodiversa. Deste estudo resulta a evidência da aplicabilidade do GWC como recurso para a melhoria do solo e promoção do desenvolvimento vegetal com efeito a curto prazo.

Material e Métodos

Descrição do local e do composto

Os dados foram recolhidos num campo experimental em Barão de São João, Lagos, no sul de Portugal (37.151415, -8.812831, virado a Este com uma elevação de 180 m), numa área ardida em junho de 2020; esta área está localizada num ecossistema com um clima mediterrânico (Csa, classificação climática de Köppen), caracterizado por verões quentes e secos e invernos amenos e húmidos (FAO, 2015). Em novembro de 2020, foram delimitadas parcelas de 10 x 10 m com valas criadas mecanicamente (20 cm de profundidade), onde foram implementados dois tratamentos: o controlo (C) e a incorporação do composto de resíduos verdes (GWC), no qual as valas foram preenchidas com composto de *Acacia longifolia*. Este composto foi produzido por compostagem de biomassa triturada, utilizando material vegetal (incluindo troncos, ramos e folhas) proveniente de uma área monoespecífica de *A. longifolia* com cerca de 1 ha (Ulm *et al.*, 2022). A biomassa foi empilhada, deixada no local e exposta às

condições ambientais, durante um ano para facilitar o processo de compostagem. A pilha de composto foi regada intensamente uma vez durante o verão para manter a humidade necessária ao processo de degradação. Durante este período, foram realizados testes de germinação de sementes de *A. longifolia* para garantir que as mesmas não se mantinham viáveis. As sementes foram enterradas em sacos de *nylon* (50 sementes/saco) a diferentes profundidades e locais da pilha de composto (10 cm e 30 cm), totalizando 80 sacos (20 para cada tempo de recolha x 4 tempos de recolha). Quinzenalmente, os sacos foram recolhidos e as sementes postas a germinar em laboratório. Não foi observada qualquer germinação em qualquer um dos tempos de acompanhamento.

Em cada tratamento, em fevereiro de 2021, foram plantadas três espécies vegetais, nomeadamente *Arbutus unedo* L., *Pinus pinea* L. e *Quercus suber* L., espécies estas que foram selecionadas para acompanhamento ao longo deste estudo (fig. 1).

Amostragem de campo e Análises

Após 18 meses de crescimento, em novembro de 2022, a amostragem foi realizada através da seleção aleatória de cinco indivíduos de cada espécie vegetal (i.e., *A. unedo*, *P. pinea* e *Q. suber*) dentro de cada parcela, representando cada tratamento (GWC e C) (15 no total por tratamento). Para cada indivíduo, mediu-se a altura, a humidade do solo (sensor Theta Probe, Delta-T services) e foi recolhida uma amostra composta de solo rizosférico (três subamostras ao redor de cada indivíduo) a ca. 10 cm de profundidade. Após crivagem, as amostras de solo foram divididas em subamostras: uma parte foi ultracongelada a -80°C para ser

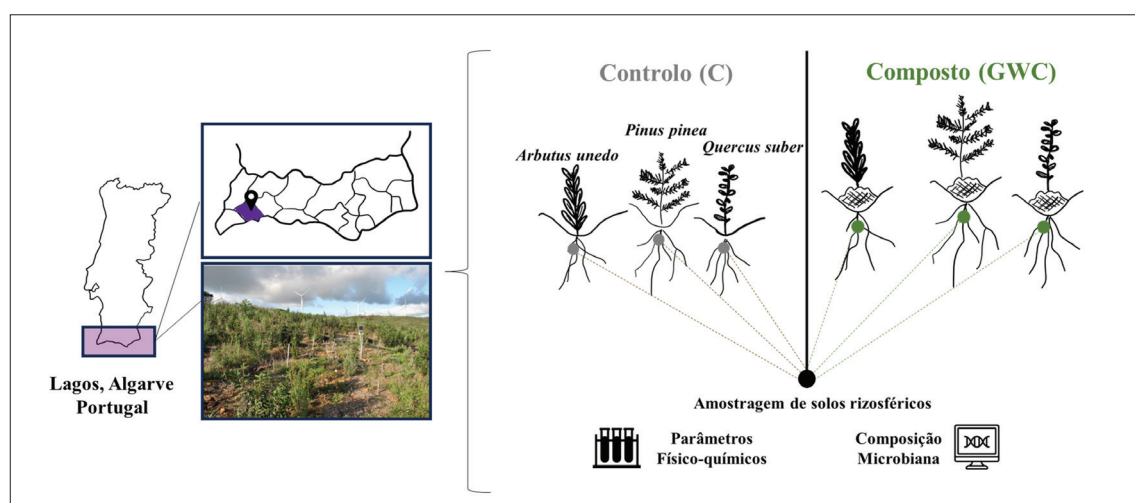


Fig. 1 - Localização do campo experimental em Lagos, Algarve (Portugal) e representação do desenho experimental incluindo as espécies vegetais estudadas em cada um dos tratamentos (Controlo - C e Adição de composto - GWC) e análises realizadas aos solos recolhidos, nomeadamente parâmetros físico-químicos e composição microbiana.

Fig. 1 - Experimental field location in Lagos, Algarve (Portugal) and experimental setup representation including plant species studied in each treatment (Control - C and Incorporation of compost - GWC) and analysis performed in the collected soils, such as physicochemical parameters and microbial composition.

enviada para sequenciação de nova geração e outra foi seca à temperatura ambiente para análise química, incluindo pH, matéria orgânica do solo (OM), óxido de potássio (K), fósforo solúvel (P) e azoto total (N). Estas análises químicas foram realizadas no Laboratório de Plantas e Solos da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD), Portugal. A sequenciação de nova geração foi realizada no BiolSI Genomics através da tecnologia *Oxford Nanopore*. As amostras de solo rizosférico foram combinadas em amostras compostas por espécie de planta e tratamento, totalizando 6 amostras, que foram utilizadas para extração de DNA. Após a sequenciação, os dados foram cuidadosamente processados e analisados através de uma série de etapas críticas para garantir a precisão e fiabilidade dos resultados. A classificação das sequências obtidas permitiu identificar a origem taxonómica (OTU - *Operational Taxonomic Units*) fornecendo a composição microbiana das amostras (identificação e ocorrências). Para esta classificação, foi utilizada uma base de dados de referência abrangente, incluindo genomas de referência do *NCBI RefSeq* e sequências de referência do *NCBI GenBank* de bactérias e fungos.

Tratamento de dados

A análise comparativa dos parâmetros químicos do solo (pH, OM, K, P e N) e da altura das diferentes plantas (*A. unedo*, *P. pinea* e *Q. suber*) entre o controlo e após incorporação de composto foi feita através do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney ($\alpha < 0.05$), utilizando a *package stats* do *software R studio* (v3.6.1).

A composição das comunidades bacterianas e fúngicas foi utilizada para gerar *heatmaps* tendo por base dados de abundância dos 15 principais géneros identificados em cada situação. Os dados de abundância foram normalizados usando o *z-score* para melhorar comparação. As amostras que correspondem às plantas (colunas) e as OTUs (linhas) foram agrupadas hierarquicamente com base nos perfis de abundância relativa, utilizando o *Bray-Curtis* como método de distância e o método de *Ward* como algoritmo de agrupamento.

Resultados

A incorporação de composto de *Acacia longifolia* no solo aumenta significativamente a humidade (0.29 ± 0.07 comparado com $0.25 \pm 0.04 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), a matéria orgânica (6.85 ± 2.5 comparado com $5.26 \pm 1.34 \%$), o fósforo solúvel (6.34 ± 3.1 comparado com $4.31 \pm 1.65 \text{ mg/kg}$) e o óxido de potássio (182 ± 25.2 comparado com $144 \pm 21.5 \text{ mg/kg}$) no solo quando comparado com a situação controlo (fig. 2). Apesar das diferenças não serem significativas, também se verifica um aumento tendencial do azoto total.

Quanto às espécies vegetais estudadas, verificou-se que, aquando incorporação do composto no solo, tanto o medronheiro (*Arbutus unedo*) como o pinheiro (*Pinus pinea*) apresentaram maiores alturas, 58.6 ± 7.7 e $44.2 \pm 8.07 \text{ cm}$, respetivamente, comparativamente a 37.0 ± 12 e $34.2 \pm 2.77 \text{ cm}$, na situação controlo (fig. 3). Para o sobreiro (*Quercus suber*) não foram verificadas diferenças no crescimento entre tratamentos.

Relativamente ao microbioma do solo, foram encontradas diferenças entre as comunidades bacterianas e fúngicas no controlo e após incorporação de composto (fig. 4 e 5). Nas comunidades bacterianas, verifica-se que, com a incorporação de composto, há uma maior abundância na rizosfera de todas as plantas dos géneros *Mucilaginibacter*, *Paraburkholderia*, *Singulisphaera* e *Caballeronia*, comparando com a situação controlo (fig. 4). Neste caso, há uma maior abundância dos géneros *Stenotrophomonas*, *Candidatus Koribacter*, *Humisphaera*, *Ktedonosporobacter*, *Paludibaculum*, *Escherichia* e *Conexibacter*. Comparando as diferenças nas comunidades bacterianas encontradas nas três plantas estudadas, é de salientar que há maiores diferenças de abundância após incorporação de composto nos géneros *Bacillus*, *Bradyrhizobium*, *Arthrobacter* e *Pseudomonas* associados ao medronheiro (*A. unedo*).

Quanto às comunidades fúngicas, verifica-se também a presença de uma comunidade distinta na presença

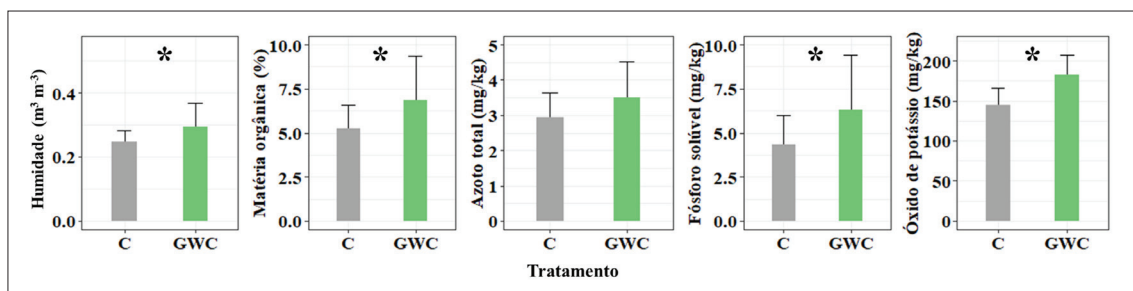


Fig. 2 - Parâmetros de solo avaliados (média $\pm$ desvio padrão), incluindo humidade ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), matéria orgânica (%), azoto total (mg/kg), fósforo solúvel (mg/kg) e óxido de potássio (mg/kg). Diferenças estatisticamente significativas entre controlo (C) e composto (GWC) estão assinaladas com (*).

Fig. 2 - Soil parameters measured (mean $\pm$ SD), including humidity ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), organic matter (%), total nitrogen (mg/kg), soluble phosphorus (mg/kg) and potassium oxide (mg/kg). Statistically significant differences between control (C) and compost (GWC) are marked with (*).

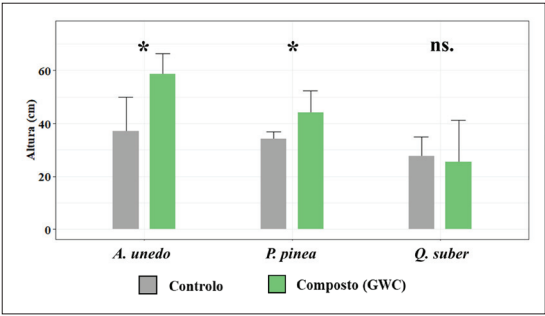


Fig. 3 - Altura (média $\pm$ desvio padrão, cm) das plantas estudadas, *Arbutus unedo* (*A. unedo*), *Pinus pinea* (*P. pinea*) and *Quercus suber* (*Q. suber*) para cada um dos tratamentos, Controlo (C, a cinzento) e Composto (GWC, a verde). Diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos estão assinaladas com (*).

Fig. 3 - Height (mean $\pm$ SD, cm) of the studied plants, *Arbutus unedo* (*A. unedo*), *Pinus pinea* (*P. pinea*) and *Quercus suber* (*Q. suber*) for each treatment, Control (C, in grey) and Compost (GWC, in green). Statistically significant differences between treatments are marked with (*).

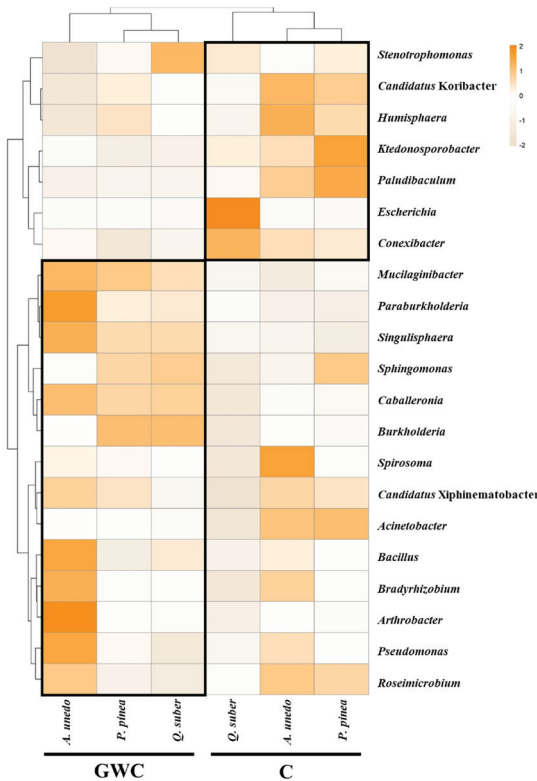


Fig. 4 - Heatmap representando a abundância relativa do top 15 de comunidades bacterianas (ao nível do género) no solo associado às espécies vegetais estudadas (*Arbutus unedo*, *Pinus pinea* e *Quercus suber*), tanto para o controlo (C) como para o composto (GWC).

Fig. 4 - Heatmap representing the relative abundance of the top 15 bacterial communities (genus level) in the soil associated with the studied plant species (*Arbutus unedo*, *Pinus pinea* and *Quercus suber*), for control (C) and compost (GWC).

de composto com uma maior abundância dos géneros *Coniochaeta*, *Russula*, *Penicillium* e *Phialophora*, enquanto na situação controlo dominam os géneros *Solicoccozyma*, *Fusarium*, *Sclerotiophoma* e *Saitozyma* (fig. 5). Neste caso, quando comparadas as três plantas, verifica-se uma maior semelhança de abundância na situação controlo, comparada com um microbioma mais variável na presença de composto, destacando-se a maior abundância de *Russula* e *Umbelopsis* associados ao medronheiro (*A. unedo*), *Talaromyces*, *Curvularia* e *Trichoglossum* associados ao pinheiro (*P. pinea*), e *Delphinella* ao sobreiro (*Q. suber*).

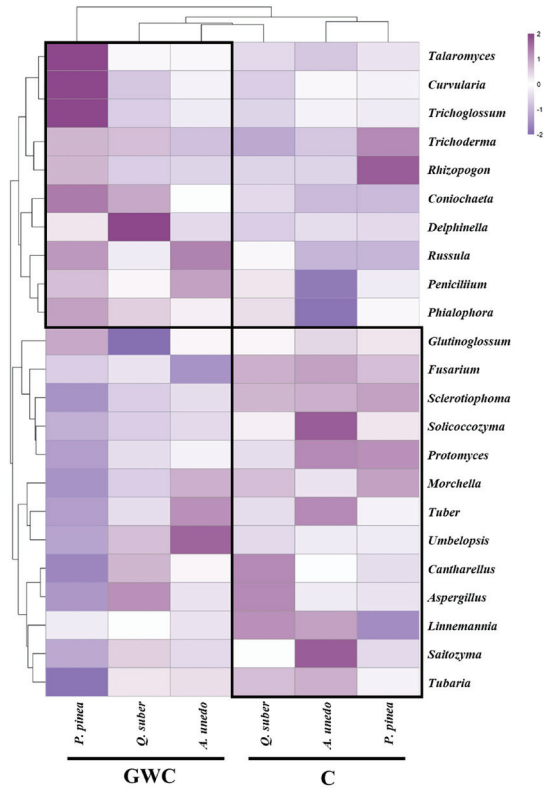


Fig. 5 - Heatmap representando a abundância relativa do top 15 de comunidades fúngicas (ao nível do género) no solo associado às espécies vegetais estudadas (*Arbutus unedo*, *Pinus pinea* e *Quercus suber*), tanto para o controlo (C) como para o composto (GWC).

Fig. 5 - Heatmap representing the relative abundance of the top 15 fungal communities (genus level) in the soil associated with the studied plant species (*Arbutus unedo*, *Pinus pinea* and *Quercus suber*), for control (C) and compost (GWC).

Discussão

Este estudo demonstra a possibilidade de utilizar o composto de resíduos verdes (GWC) proveniente de *Acacia longifolia* para recuperação de solos após a ocorrência de fogos florestais. A incorporação de compostos orgânicos no solo acelera a reabilitação do

solo, aumentando a sua humidade conduzindo, não só a uma melhor estrutura, como também a um aumento das taxas de decomposição e melhor funcionamento dos ciclos de nutrientes (Khaleel *et al.*, 1981; Pérez-Piqueres *et al.*, 2017). Como resultado, há um maior teor em matéria orgânica e conteúdo em macronutrientes entre os quais, o azoto, o fósforo e o potássio (i.e., NPK), que são considerados fundamentais para o desenvolvimento das comunidades vegetais (e.g., Khan *et al.*, 2012; Shah *et al.*, 2024). Todos estes parâmetros benéficos foram validados para o GWC proveniente de *Acacia longifolia* verificando-se uma melhoria da estrutura e composição dos solos nos quais o composto foi incorporado, com efeito a curto prazo (i.e., 18 meses após incorporação). Como resultado destas condições melhoradas, as plantas estudadas apresentaram maior sobrevivência e maiores crescimentos, maximizando o sucesso das estratégias de reflorestação. De facto, o processo de compostagem implica ciclos de temperatura e humidade que garantem a decomposição dos resíduos verdes (i.e., troncos, ramos e folhas), permitindo que o produto final tenha um conteúdo em carbono e azoto que, quando aplicado no solo, possibilita um efeito imediato/a curto prazo. Além disso, a necessidade de regenerar os solos após os fogos florestais que conduzem à disrupção da componente físico-química e biológica do mesmo, é cada vez mais relevante considerando as previsões de aumento da sua frequência (Pellegrini *et al.*, 2018). Assim, e considerando a vasta área ocupada por acácias, a possibilidade de utilizar a biomassa proveniente desta espécie, torna-se uma opção duplamente útil: por um lado, reduz-se a área ocupada por esta espécie invasora, e por outro, cria-se valor para um resíduo, constituindo um potencial fertilizante.

Os resultados do nosso estudo permitem ainda integrar o conceito de fertilidade com a vitalidade do solo, uma vez que, além da melhoria significativa das componentes químicas, verificaram-se também mudanças nas comunidades microbianas, que compõem uma parte importante da componente biológica do solo (Johns, 2017). Observou-se uma comunidade microbiana característica na presença de composto, mais evidente para as comunidades bacterianas. Destacam-se, na sua maioria, géneros de bactérias que integram o grupo das Bactérias Promotoras do Crescimento das Plantas (BPCP), nomeadamente, *Paraburkholderia*, *Bradyrhizobium*, *Arthrobacter*, *Caballeronia*, *Pseudomonas* e *Bacillus*. As bactérias que integram o BPCP estão associadas a i) um aumento de sobrevivência das plantas, ii) disponibilização de nutrientes, iii) melhoria da estrutura do solo e iv) supressão de patogénicos no solo (Hakim *et al.*, 2021). Este bacterioma parece corroborar os maiores crescimentos observados na presença de composto, especialmente para as duas espécies vegetais de crescimento mais rápido, o medronheiro e

o pinheiro. No caso das comunidades fúngicas, verificou-se também um microbioma característico na presença de composto, no qual se destacam os géneros *Talaromyces*, *Curvularia*, *Trichoglossum*, *Coniochaeta*, *Delphinella*, *Russula* e *Penicillium*. Estes géneros pertencem aos Filos Ascomycota e Basidiomycota, filos estes que, não só são os mais abundantes na rizosfera (Grinhut *et al.*, 2007), como têm vindo a ser descritos como indicadores do ciclo do carbono, devido aos grupos funcionais que os integram, nomeadamente os fungos saprófitos e os ectomicorrízicos (Bailey *et al.*, 2002; Mehar e Sundaramoorthy, 2018; Manici *et al.*, 2024). Estes grupos funcionais são fundamentais para o bom funcionamento dos solos, uma vez que, por um lado degradam matéria orgânica devido à sua plasticidade metabólica, funcionando como biotransformadores (Várnai *et al.*, 2014) e, por outro permitem uma troca eficiente de nutrientes por associação às raízes das plantas potenciando o seu crescimento (Johnson e Gehring, 2007). Desta forma, apesar da resiliência das comunidades microbianas, os fogos florestais também as afetam largamente (Reazin *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2020; Smith *et al.*, 2021), por isso, a incorporação de composto de *A. longifolia* permite a sua recuperação evidente e rápida permitindo restabelecer a funcionalidade do solo e garantir o desenvolvimento da cobertura vegetal.

De facto, a incorporação de composto como estratégia de regeneração do solo após um fogo, permite um maior sucesso no estabelecimento das plântulas estudadas e, mesmo a curto prazo, cerca de 18 meses após o estabelecimento, os efeitos são significativos tanto no crescimento como nos parâmetros do solo. Esta eficiente resposta resultante da incorporação do composto permite um paralelismo interessante associado a uma das características mais valorizadas para a *A. longifolia* como invasora, que é o facto de ser uma engenheira-de-ecossistemas (Stock *et al.*, 1995; Marchante *et al.*, 2004; 2008; 2009; Yelenik *et al.*, 2007). Esta engenharia-de-ecossistemas prende-se com profundas alterações nos solos, modificando tanto propriedades químicas ao nível dos ciclos de nutrientes e água como também ao nível das comunidades microbianas (Carvalho *et al.*, 2018; Keet *et al.*, 2021). As alterações microbiológicas estão altamente associadas à sua capacidade de fixar azoto e albergar uma comunidade microbiana nos nódulos radiculares (Brockwell *et al.*, 2005), permitindo criar uma assinatura muito característica que afeta amplamente as comunidades vegetais nativas. Efetivamente, o microbioma que surge nos solos no qual o composto foi incorporado, reflete uma maior abundância de géneros que integram o microbioma da acácia nomeadamente *Bradyrhizobium* e *Coniochaeta* (Jesus *et al.*, 2020; 2023). Ambos os géneros estão associados à promoção de desenvolvimento das plantas, sendo *Bradyrhizobium* um dos principais parceiros simbióticos da acácia fixando eficientemente azoto atmosférico (Birnbaum *et al.*, 2012; Jesus *et al.*, 2020) e

Coniochaeta, uma levedura endófitas de plantas, associada à facilitação de interações simbióticas (Challacombe *et al.*, 2019). Desta forma, esta assinatura característica da presença de *A. longifolia* parece conferir uma influência bastante positiva, tanto na rizosfera das diferentes plantas estudadas como nas propriedades dos solos, contribuindo para um maior sucesso nas estratégias de reflorestação.

Conclusão

Este estudo confirma o valor do composto de *Acacia longifolia* como recurso para acelerar a regeneração de solos após fogo. A sua incorporação influencia positivamente as propriedades físico-químicas e o microbioma do solo, bem como o estabelecimento de *Arbutus unedo*, *Pinus pinea*, e *Quercus suber*, demonstrando a vantagem da aplicação do composto mesmo a curto-prazo. A avaliação do microbioma do solo, juntamente com os parâmetros físico-químicos, permitiu uma abordagem mais integrada, consolidando as melhorias observadas. Após a incorporação do GWC, verificou-se um microbioma mais rico e diversificado, que melhorou a fertilidade do solo, considerando maior humidade, matéria orgânica e disponibilidade de nutrientes. Estas propriedades terão um impacto positivo na recuperação funcional do solo, maximizando o crescimento das plantas. A capacidade intrínseca de *A. longifolia* de alterar a composição do microbioma do solo circundante pode representar uma oportunidade do ponto de vista do composto, já que esta engenharia do solo, que persiste após a compostagem e incorporação, é vantajosa para o estabelecimento inicial das espécies vegetais estudadas. Dada a ampla disponibilidade de biomassa e a facilidade de aplicação deste composto, é possível criar sinergias entre a manutenção de práticas agrícolas e florestais que defendem o ambiente ao mesmo tempo que potenciam o esforço comum de aumentar a disponibilidade de nutrientes no solo.

Referências bibliográficas

Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lin, J.-H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A., & Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660-684.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>

Bailey, V. L., Smith, J. L., & Bolton, H. (2002). Fungal-to-bacterial ratios in soils investigated for enhanced C sequestration. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(7), 997-1007.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00033-0](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00033-0)

Birnbaum, C., Barrett, L. G., Thrall, P. H., & Leishman, M. R. (2012). Mutualisms are not constraining cross-continental invasion success of *Acacia* species within Australia. *Diversity and Distributions*, 18(10), 962-976.
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2012.00920.x>

Blagodatskaya, E., Tarkka, M., Knief, C., Koller, R., Peth, S., Schmidt, V., Spielvogel, S., Uteau, D., Weber, M., & Razavi, B. S. (2021). Bridging microbial functional traits with localized process rates at soil interfaces. *Frontiers in Microbiology*, 12, 625697.
DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.625697>

Brito, L. M., Saldanha, J., Mourão, I., & Nestler, H. (2013). Composting of *Acacia longifolia* and *Acacia melanoxylon* invasive species. *Acta Horticulturae*, 1013(24), 211-216.
DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1013.24>

Brito, L. M., Reis, M., Mourão, I., & Coutinho, J. (2015). Use of *Acacia* waste compost as an alternative component for horticultural substrates. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 46(15), 1814-1826.
DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1059843>

Brockwell, J., Searle, S. D., Jeavons, S. D., & Waayers, M. (2005). Nitrogen fixation in *Acacias*: An untapped resource for sustainable plantations, farm forestry and land reclamation (Monograph No. 115). Australian Centre for International Agricultural Research.

Burkhard, B., & Maes, J. (Eds.). Mapping ecosystem services. (2017) Pensoft Publishers.

Carvalho, P., Martins, R., Portugal, A., & Gonçalves, M. T. (2018). Do mycorrhizal fungi create below-ground links between native plants and *Acacia longifolia*? A case study in a coastal maritime pine forest in Portugal. *Web Ecology*, 18(1), 105-118.
DOI: <https://doi.org/10.5194/we-18-105-2018>

Challacombe, J. F., Hesse, C. N., Bramer, L. M., McCue, L. A., Lipton, M., Purvine, S., Nicora, C., Gallegos-Graves, L. V., Porras-Alfaro, A., & Kuske, C. R. (2019). Genomes and secretomes of Ascomycota fungi reveal diverse functions in plant biomass decomposition and pathogenesis. *BMC Genomics*, 20, 976.
DOI: <https://doi.org/10.1186/s12864-019-6358-x>

Colaço, M. C., Sequeira, A. C., & Skulska, I. (2023). Genus *Acacia* in Mainland Portugal: Knowledge and experience of stakeholders in their management. *Land*, 12(11), 2026.
DOI: <https://doi.org/10.3390/land12112026>

FAO. 2015. FAO/UNESCO Soil Map of the World | FAO SOILS PORTAL | Food and Agriculture Organization of the United Nations. URL: <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/faunesco-soil-map-of-the-world/en/>

- Ferreira, C. S. S., Seifollahi-Aghmiuni, S., Destouni, G., Ghajarnia, N., & Kalantari, Z. (2022). Soil degradation in the European Mediterranean region: Processes, status, and consequences. *Science of the Total Environment*, 805, 150106.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150106>
- Fierer, N. (2017). Embracing the unknown: Disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 15(10), 579-590.
DOI: <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.87>
- Gauquelin, T., Michon, G., Joffre, R., Duponnois, R., Génin, D., Fady, B., Bou Dagher-Kharat, M., Derridj, A., Slimani, S., Badri, W., Alifriqui, M., Auclair, L., Siminel, R., Aderghal, M., Baudoin, E., Galiana, A., Prin, Y., Sanguin, H., Fernandez, C., & Baldy, V. (2018). Mediterranean forests, land use, and climate change: A social-ecological perspective. *Regional Environmental Change*, 18(3), 623-636. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-016-0994-3>
- Grinhut, T., Hadar, Y. & Chen, Y. (2007). Degradation and transformation of humic substances by saprotrophic fungi: processes and mechanisms. *Fungal Biology Reviews*, 21, 179-189.
DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FBR.2007.09.003>
- Hakim, S., Naqqash, T., Nawaz, M. S., Laraib, I., Siddique, M. J., Zia, R., Mirza, M. S., & Imran, A. (2021). Rhizosphere engineering with plant growth-promoting microorganisms for agriculture and ecological sustainability. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 617157.
DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.617157>
- Hejda, M., Pyšek, P., & Jarošík, V. (2009). Impact of invasive plants on the species richness, diversity, and composition of invaded communities. *Journal of Ecology*, 97(3), 393-403.
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01480.x>
- IPBES. (2023). *Thematic assessment report on invasive alien species and their control*. H. E. Roy, A. Pauchard, P. Stoett, & T. R. Truong (Eds.). IPBES Secretariat. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7430682>
- Jansson, J. K., & Hofmockel, K. S. (2020). Soil microbiomes and climate change. *Nature Reviews Microbiology*, 18(1), 35-46.
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0265-7>
- Jesus, J. G. d., Tenreiro, R., Máguas, C., & Trindade, H. (2020). *Acacia longifolia*: A host of many guests even after fire. *Diversity*, 12(6), 250.
DOI: <https://doi.org/10.3390/d12060250>
- Jesus, J. G., Máguas, C., Dias, R., Nunes, M., Pascoal, P., Pereira, M., & Trindade, H. (2023). What if root nodules are a guesthouse for a microbiome? The case study of *Acacia longifolia*. *Biology*, 12(9), 1168.
DOI: <https://doi.org/10.3390/biology12091168>
- Johns, C. (2017). Living soils: The role of microorganisms in soil health. In *Independent Strategic Analysis of Australia's Global Interests*; Future Directions International: Dalkeith, Australia, 1-7.
- Johnson, N. C., & Gehring, C. A. (2007). Mycorrhizas: Symbiotic mediators of rhizosphere and ecosystem processes. *Rhizosphere*, 73-100.
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012088775-0/50006-9>
- Keet, J.-H., Ellis, A.G., Hui, C., Novoa, A. & Le Roux, J. J. (2021). Impacts of Invasive Australian Acacias on Soil Bacterial Community Composition, Microbial Enzymatic Activities, and Nutrient Availability in Fynbos Soils. *Microbial Ecology*, 82: 704-721.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00248-021-01683-1>
- Keet, J.-H., Ellis, A. G., Hui, C., & Le Roux, J. J. (2023). Responses of soil bacterial communities to invasive Australian *Acacia* species over large spatial scales. In D. M. Richardson, J. J. Le Roux, & E. Marchante (Eds.), *Wattles: Australian Acacia species around the world*. CABI.
DOI: <https://doi.org/10.1079/9781800622197.0024>
- Khaleel, R., Reddy, K. R., & Overcash, M. R. (1981). Changes in soil physical properties due to organic waste applications: A review. *Journal of Environmental Quality*, 10(2), 133-141. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq1981.00472425001000020002x>
- Khan, M. B., Rafiq, R., Hussain, M., Farooq, M., & Jabran, K. (2012). Ridge sowing improves root system, phosphorus uptake, growth, and yield of maize (*Zea mays* L.) hybrids. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 22, 309-317.
- Kulmatiski, A., & Kardol, P. (2008). Getting plant-soil feedbacks out of the greenhouse: Experimental and conceptual approaches. *Progress in Botany*, 69, 449-472.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-72954-9_18
- Kumar, A., Rithesh, L., Kumar, V., Raghuvanshi, N., Chaudhary, K., Abhineet, Pandey, A.K., 2023. Stenotrophomonas in diversified cropping systems: friend or foe? *Front. Microbiol.*, 14, 1214680.
DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1214680>
- Lorenzo, P., González, L.L., Reigosa, M., 2010. The genus *Acacia* as invader: The characteristic case of *Acacia dealbata* Link in Europe. *Ann. For. Sci.*, 67, 101.
DOI: <https://doi.org/10.1051/forest/2009082>
- Ma, F., Wang, C., Zhang, Y., Chen, J., Xie, R., Sun, Z., 2022. Development of Microbial Indicators in Ecological Systems. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 19, 13888.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph192113888>
- Maheshwari, D.K. (Ed), 2014. Composting for sustainable agriculture. Springer, Cham Heidelberg New York.

- Manici, L., Caputo, F., Fornasier, F., Paletto, A., Ceotto, E., De Meo, I. (2024) Ascomycota and Basidiomycota fungal phyla as indicators of land use efficiency for soil organic carbon accrual with woody plantations. *Ecological Indicators*, 160, 111796.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111796>
- Marchante, H., Marchante, E., Buscardo, E., Maia, J. & Freitas, H. (2004) Recovery potential of dune ecosystems invaded by an exotic *Acacia* species (*Acacia longifolia*). *Weed Technology*, 18, 1427-1433.
DOI: [https://doi.org/10.1614/0890-037X\(2004\)018](https://doi.org/10.1614/0890-037X(2004)018)
- Marchante, E., Kjøller, A., Struwe, S. & Freitas, H. (2008). Short- and long-term impacts of *Acacia longifolia* invasion on the belowground processes of a Mediterranean coastal dune ecosystem. *Applied Soil Ecology*, 40, 210-217.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.04.004>
- Marchante, E., Kjøller, A., Struwe, S. & Freitas, H. (2009). Soil recovery after removal of the N₂-fixing invasive *Acacia longifolia*: consequences for ecosystem restoration. *Biological Invasions*, 11, 813-823.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10530-008-9295-1>
- Marchante, E., Gouveia, A.C., Brundu, G. & Marchante H. (2023). Australian *Acacia* species in Europe. In Richardson, D.M., Le Roux, J.J. & Marchante, E. (Eds.) *Wattles. Australian Acacia Species Around the World*. CABI, USA.
DOI: <https://doi.org/10.1079/9781800622197.0010>
- Mehar, S. K. & Sundaramoorthy, S. (2018). Carbon sequestration and the significance of soil fungi in the process. In: *Fungi and Their Role in Sustainable Development: Current Perspective*. Springer Singapore, 467-482.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-0393-7_26/COVER
- Michelan, T. S., Thomaz, S. M., Bando, F. M. & Bini, L. M. (2018). Competitive effects hinder the recolonization of native species in environments densely occupied by one invasive exotic species. *Frontiers in Plant Science*, 9.
DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01261>
- Morrissey, J., Dow, J., Mark, G. & O'Gara, F. (2004). Are microbes at the root of a solution to world food production? *EMBO reports*, 5, 922-926.
DOI: <https://doi.org/10.1038/sj.embor.7400263>
- Mukhtar, H., Wunderlich, R. F., Muzaffar, A., Ansari, A., Shipin, O. V., Cao, T. N-D. & Lin, Y. P. (2023). Soil microbiome feedback to climate change and options for mitigation. *Science of The Total Environment*, 882, 163412.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163412>
- Pellegrini, A., Ahlström, A., Hobbie, S., Reich, P. B., Nieradzik, L. P., Staver, A. C., Scharenbroch, B. C., Jumpponen, A., Anderegg, W. R. L., Randerson, J. T. & Jackson, R. B. (2018). Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity. *Nature*, 553, 194-198.
DOI: <https://doi.org/10.1038/nature24668>
- Pérez-Piqueres, A., Albiach, R., Domínguez, A. & Canet, R. (2017). Effect of soil preparation techniques on the biochemical properties and microbial communities of a citrus orchard after replanting and conversion into organic management. *Applied Soil Ecology*, 119, 8-17.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.05.015>
- Perucci, P., Dumontet, S., Bufo, S.A., Mazzatura, A. & Casucci, C. (2000). Effects of organic amendment and herbicide treatment on soil microbial biomass. *Biology and Fertility of Soils*, 32, 17-23.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s003740000207>
- Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Tignor, M., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Alegria, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., et al. (Eds.) *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. In Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC); Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2022.
- R Core Team, 2023. *_R: A Language and Environment for Statistical Computing_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
URL: <https://www.R-project.org/>
- Raison, R. J., Khanna, P., Woods, P. (1985). Mechanisms of element transfer to the atmosphere during vegetation fires. *Canadian Journal of Forestry Research*, 15, 132-140. DOI: <https://doi.org/10.1139/x85-022>
- Reazin, C., Morris, S., Smith, J. E., Cowan, A. D. & Jumpponen, A. (2016). Fires of differing intensities rapidly select distinct soil fungal communities in a Northwest US ponderosa pine forest ecosystem. *Forest Ecology Management*, 377, 118-127.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.002>
- Shah, I. H., Jinhui, W., Li, X., Hameed, M. K., Manzoor, M. A., Li, P., Zhang, Y., Niu, Q. & Chang, L. (2024) Exploring the role of nitrogen and potassium in photosynthesis implications for sugar: Accumulation and translocation in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, Volume 327, 112832.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112832>
- Smith, G. R., Edy, L. C., Peay, K. G. (2021). Contrasting fungal responses to wildfire across different ecosystem types. *Molecular Ecology*, 30, 844-854.
DOI: <https://doi.org/10.1111/mec.15767>

- Souza-Alonzo, P., Rodríguez, J., González, L. & Lorenzo, P. (2017). Here to stay. Recent advances and perspectives about *Acacia* invasion in Mediterranean areas. *Annals of Forest Science*, 74, 55. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0651-0>
- Stock, W., Wienand, K. & Baker, A. (1995) Impacts of invading N_2 -fixing *Acacia* species on patterns of nutrient cycling in two Cape ecosystems: evidence from soil incubation studies and ^{15}N natural abundance values. *Oecologia*, 101, 375-382. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00328825>
- Ulm, F., Avelar, D., Hobson, P., Penha-Lopes, G., Dias, T., Máguas, C. & Cruz, C. (2019). Sustainable urban agriculture using compost and an open-pollinated maize variety. *Journal of Cleaner Production*, 212, 622-629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.069>
- Ulm, F., Estorninho, M., de Jesus, J. G., de Sousa Prado, M.G., Cruz, C. & Máguas, C. (2022). From a Lose-Lose to a Win-Win Situation: User-Friendly Biomass Models for *Acacia longifolia* to Aid Research, Management and Valorisation. *Plants*, 11, 2865. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11212865>
- Várnai, A., Mäkelä, M. R., Djajadi, D. T., Rahikainen, J., Hatakka, A. & Viikari, L. (2014). Carbohydrate-binding modules of fungal cellulases: occurrence in nature, function, and relevance in industrial biomass conversion. *Advances in Applied Microbiology*, 88, 103-165. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800260-5.00004-8>
- Vezzani, F., Anderson, C., Meenken, E., Gillespie, R., Peterson, M. & Beare, M. H. (2018). The importance of plants to development and maintenance of soil structure, microbial communities and ecosystem functions. *Soil and Tillage Research*, 175, 139-149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.002>
- Wagg, C., Bendera, S. F., Widmer, F. & van der Heijden, M. G. A. (2014). Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 5266-5270. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1320054111>
- Woetzel, J., Pinner, D., Samandari, H., Engel, H., Krishnan, M., Vasmel, M. & von der Leyen, J. (2020). A Mediterranean basin without a Mediterranean climate? - a case-study. Mc Kinsey Global Institute.
- Yang, T., Tedersoo, L., Lin, X., Fitzpatrick, M. C., Jia, Y., Liu, X., Ni, Y., Shi, Y., Lu, P., Zhu, J. & Chu, H. (2020). Distinct fungal successional trajectories following wildfire between soil horizons in a cold-temperate forest. *New Phytologist*, 227, 572-587. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.16531>
- Yelenik, S., Stock, W. & Richardson, D. (2007). Functional group identity does not predict invader impacts: differential effects of nitrogen-fixing exotic plants on ecosystem function. *Biological Invasions*, 9, 117-125. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10530-006-0008-3>
- Zdruli, P., Jones, R. J. A. & Montanarella, L. (2004). Organic Matter in the Soils of Southern Europe. European Soil Bureau Technical Report, EUR 21083 EN, 16. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.