

Ecologia microbiana do solo em restingas brasileiras: Influência das fitofisionomias e dos atributos edáficos

Soil microbial ecology in brazilian *restingas*: Influence of phytophysionomies and edaphic attributes

Ecología microbiana del suelo en las *restingas* brasileñas: Influencia de las fitofisionomías y de los atributos edáficos

Recebido: 20/03/2026 | Revisado: 24/03/2026 | Aceitado: 24/03/2026 | Publicado: 25/03/2026

Deivson Nacim Teixeira Sousa

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0997-4517>
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Brasil
E-mail: deivsonnacim@gmail.com

Ralph Wendel Oliveira de Araújo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7205-234X>
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Brasil
E-mail: ralpharaujo2015@gmail.com

Raillane Oliveira de Araujo

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5161-512X>
Universidade Estadual de Feira de Santana, Brasil
E-mail: raillaneoa@gmail.com

Davi Ferreira de Amorim

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6787-493X>
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Brasil
E-mail: eng.daviamorim1@gmail.com

Ariston de Lima Cardoso

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0334-5701>
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Brasil
E-mail: ariston@ufrb.edu.br

Emellinne Ingrid de Sousa Costa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1553-4462>
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Brasil
E-mail: emellinneingrid@gmail.com

Ossival Lolato Ribeiro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8275-4954>
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Brasil
E-mail: ossival@ufrb.edu.br

Resumo

As restingas brasileiras constituem ecossistemas costeiros marcados por elevada heterogeneidade fitofisionômica e por fortes restrições edáficas, condições que influenciam diretamente a composição, a diversidade e o funcionamento das comunidades microbianas do solo. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo reunir, organizar e analisar evidências científicas sobre a ecologia microbiana do solo em restingas brasileiras, e evidenciar a influência das fitofisionomias e dos atributos edáficos sobre a microbiota. As evidências reunidas indicam que a heterogeneidade fitofisionômica das restingas, associada a gradientes de drenagem, salinidade, fertilidade, matéria orgânica e regime hídrico, atua como importante eixo organizador da microbiota do solo. Os resultados também mostram que a restinga apresenta composição microbiana própria em comparação com ecossistemas adjacentes, como manguezais e florestas de Mata Atlântica, além de abrigar grupos simbiotes relevantes, especialmente fungos micorrízicos, ainda insuficientemente explorados. Conclui-se que a ecologia microbiana das restingas deve ser interpretada a partir de uma abordagem integrada entre solo, vegetação e microrganismos, sendo esse entendimento fundamental para o avanço do conhecimento ecológico e para subsidiar estratégias de conservação de ambientes costeiros frágeis e ameaçados.

Palavras-chave: Ecossistemas costeiros; Formações vegetacionais; Microbiologia; Microbioma; Rizosfera.

Abstract

Brazilian restingas constitute coastal ecosystems marked by high phytophysionomic heterogeneity and strong edaphic restrictions—conditions that directly influence the composition, diversity, and functioning of soil microbial communities. In this context, the present study aimed to gather, organize, and analyze scientific evidence on soil

microbial ecology in Brazilian restingas, highlighting the influence of phytophysiognomies and edaphic attributes on the microbiota. The gathered evidence indicates that the phytophysiognomic heterogeneity of restingas, associated with gradients of drainage, salinity, fertility, organic matter, and water regime, acts as an important organizing axis for the soil microbiota. The results also show that the restinga presents a distinct microbial composition compared to adjacent ecosystems, such as mangroves and Atlantic Forest, in addition to harboring relevant symbiotic groups, especially mycorrhizal fungi, which remain insufficiently explored. It is concluded that the microbial ecology of restingas must be interpreted through an integrated approach between soil, vegetation, and microorganisms, an understanding that is fundamental for advancing ecological knowledge and supporting conservation strategies for fragile and threatened coastal environments.

Keywords: Coastal ecosystems; Vegetation formations; Microbiology; Microbiome; Rhizosphere.

Resumen

Las restingas brasileñas constituyen ecosistemas costeros marcados por una elevada heterogeneidad fitofisionómica y por fuertes restricciones edáficas, condiciones que influyen directamente en la composición, diversidad y funcionamiento de las comunidades microbianas del suelo. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo reunir, organizar y analizar evidencias científicas sobre la ecología microbiana del suelo en las restingas brasileñas, y evidenciar la influencia de las fitofisionomías y de los atributos edáficos sobre la microbiota. Las evidencias reunidas indican que la heterogeneidad fitofisionómica de las restingas, asociada a gradientes de drenaje, salinidad, fertilidad, materia orgánica y régimen hídrico, actúa como un importante eje organizador de la microbiota del suelo. Los resultados también muestran que la restinga presenta una composición microbiana propia en comparación con ecosistemas adyacentes, como manglares y bosques de Mata Atlántica, además de albergar grupos simbioses relevantes, especialmente hongos micorrízicos, aún insuficientemente explorados. Se concluye que la ecología microbiana de las restingas debe ser interpretada a partir de un enfoque integrado entre suelo, vegetación y microorganismos, siendo este entendimiento fundamental para el avance del conocimiento ecológico y para subsidiar estrategias de conservación de ambientes costeros frágiles y amenazados.

Palabras clave: Ecosistemas costeros; Formaciones vegetales; Microbiología; Microbioma; Rizosfera.

1. Introdução

Os microrganismos do solo exercem funções essenciais no funcionamento dos ecossistemas terrestres, atuando na decomposição da matéria orgânica, na ciclagem de carbono e nitrogênio, na mineralização e aquisição de nutrientes e na regulação da diversidade biológica subterrânea e da produtividade vegetal (McGuire & Treseder, 2010; Van der Heijden et al., 2008; Bardgett & Van der Putten, 2014).

Na ecologia microbiana, um dos principais desafios consiste em compreender quais fatores ambientais determinam a estrutura, a distribuição e o potencial funcional dessas comunidades, especialmente diante da influência de fatores como pH, umidade, matéria orgânica, clima e tipo de vegetação (Brockett et al., 2012; Fierer & Jackson, 2006; Lauber et al., 2009; Fierer et al., 2012). Em ambientes costeiros, essa discussão se torna ainda mais relevante, pois as condições edáficas, hídricas e vegetacionais variam intensamente em curtas distâncias espaciais, gerando filtros ecológicos marcantes sobre a biota do solo (Correia et al., 2020; Pinto et al., 2020).

As restingas constituem uma zona de transição entre o oceano e a floresta e se distribuem ao longo de extensas faixas do litoral brasileiro, cobrindo cerca de 80% da costa do país (Furtado et al., 2023; Correia et al., 2020). Esse ecossistema é formado por áreas arenosas costeiras organizadas em mosaicos fitofisionômicos e submetidas a condições de aridez, oligotrofia e salinidade, o que caracteriza um ambiente dinâmico e ambientalmente severo (Furtado et al., 2023; Brito et al., 2018). Além de funcionarem como habitat e refúgio para numerosas espécies, as restingas prestam serviços ecossistêmicos relevantes, como armazenamento de água da chuva, regulação hídrica e proteção da zona costeira contra ondas, tempestades e elevação do nível do mar, o que torna sua conservação estratégica em escala territorial (Furtado et al., 2023; Santos et al., 2023).

A diversidade das restingas varia ao longo do litoral brasileiro em resposta à complexidade geomorfológica da costa e à heterogeneidade ambiental desses ecossistemas (Correia et al., 2020; Furtado et al., 2023). Essa variação faz com que as restingas se organizem em mosaicos fitofisionômicos distintos, associados a gradientes ambientais que ampliam a diversidade de condições ecológicas e de nichos disponíveis para a microbiota do solo (Correia et al., 2020; Lourenço Jr. et al., 2021; Pinto

et al., 2020). Assim, a fitofisionomia expressa não apenas a cobertura vegetal, mas a combinação entre regime hídrico, substrato e condições ecológicas de estabelecimento da biota subterrânea (Pinto et al., 2020; Lourenço Jr. et al., 2021).

Do ponto de vista edáfico, a restinga é caracterizada por solos submetidos à rápida lixiviação e à forte influência marinha, o que contribui para a formação de ambientes pobres em nutrientes, com deficiência hídrica, elevada salinização, baixa retenção de água e baixa fertilidade natural (Furtado et al., 2023; Brito et al., 2018; Lourenço Jr. et al., 2021). Em áreas florestais de restinga, a fertilidade foi descrita como baixa, com saturação por bases inferior a 16% e predomínio de alumínio nos sítios de troca, evidenciando forte limitação química do substrato (Bonilha et al., 2012). Essas condições repercutem diretamente sobre a microbiota, uma vez que o microbioma do solo é moldado por propriedades edáficas e apresenta composição e atividade distintas em relação a outros ecossistemas costeiros e florestais (Mendes & Tsai, 2018; Pupin & Nahas, 2014).

Análises comparativas em restingas do sul do Brasil demonstraram diferenças na estrutura de comunidades bacterianas e fúngicas entre formações vegetacionais, indicando que a composição microbiana acompanha a diferenciação fitofisionômica e ambiental do ecossistema (Pinto et al., 2020). A relação entre vegetação e microbiota também se evidencia pela presença de fungos simbiotes com papel relevante na organização e no funcionamento dessas comunidades vegetais e subterrâneas, com destaque para a simbiose ectomicorrízica, cuja importância ecológica vem sendo reconhecida, embora ainda permaneça subestimada e pouco explorada nesse ecossistema (Furtado et al., 2023; Duarte et al., 2019).

A compreensão da ecologia microbiana em restingas exige abordagem integrada, capaz de relacionar fitofisionomia, solo e interações biológicas subterrâneas em uma mesma interpretação ecológica (Furtado et al., 2023; Mendes & Tsai, 2018; Pinto et al., 2020). Desta forma o presente estudo teve como objetivo reunir, organizar e analisar evidências científicas sobre a ecologia microbiana do solo em restingas brasileiras, e evidenciar a influência das fitofisionomias e dos atributos edáficos sobre a microbiota.

2. Metodologia

O presente estudo caracteriza-se como uma Revisão de Literatura (Snyder, 2019), com abordagem qualitativa (Pereira et al., 2018; Risemberg et al., 2026), numa revisão narrativa da literatura (Fernandes, Vieira & Castelhana, 2023; Rother, 2007) e, conduzida para reunir, organizar e analisar evidências científicas sobre a ecologia microbiana do solo em restingas brasileiras, com ênfase na influência das fitofisionomias e dos atributos edáficos sobre a composição, a diversidade e o funcionamento das comunidades microbianas. Buscando assim integrar diferentes tipos de evidência, incluindo artigos originais, revisões e documentos técnico-científicos, favorecendo uma compreensão ampla e crítica de um tema multifatorial que envolve variações geomorfológicas, regime hídrico, propriedades físico-químicas do solo, estrutura da vegetação e interações entre microrganismos, plantas e ambiente costeiro.

A construção da revisão foi orientada pela seguinte questão norteadora: quais evidências científicas sustentam a influência das fitofisionomias e dos atributos edáficos sobre a ecologia microbiana do solo em restingas brasileiras, considerando a composição e a atividade das comunidades microbianas, a ocorrência de fungos simbiotes, os gradientes ambientais e as interações entre solo, vegetação e microbiota?

As buscas bibliográficas foram realizadas nas bases Scopus, Web of Science, SciELO, PubMed, Google Acadêmico e Portal de Periódicos CAPES, utilizando combinações de descritores em português e inglês, como: restinga, restinga brasileira, ecologia microbiana do solo, microbiota do solo, soil microbial ecology, soil microbiome, soil microbial community, edaphic attributes, soil properties, phytophysiognomy, vegetation gradient, arbuscular mycorrhizal fungi, ectomycorrhizae, coastal sandy plain, Atlantic Forest restinga e microbial diversity.

Complementarmente, foram consultados documentos institucionais e publicações técnico-científicas quando relevantes para contextualizar a formação ecológica das restingas, a heterogeneidade ambiental desses ecossistemas e sua importância para a conservação da biodiversidade e dos processos ecológicos costeiros.

Foram priorizados estudos publicados entre 2016 e 2026, com inclusão complementar de trabalhos anteriores quando considerados fundacionais para a compreensão da formação das restingas, das características edáficas desses ambientes, da ecologia de fungos micorrízicos e da estruturação das comunidades microbianas do solo em gradientes costeiros tropicais.

Como critérios de inclusão, foram considerados: artigos originais, artigos de revisão e documentos técnico-científicos publicados em fontes reconhecidas; estudos disponíveis integralmente; publicações em português ou inglês; trabalhos diretamente relacionados à ecologia microbiana do solo em restingas brasileiras ou em ecossistemas costeiros comparáveis; estudos que abordassem composição, atividade ou diversidade microbiana; pesquisas sobre fungos micorrízicos, bactérias e fungos edáficos; trabalhos voltados aos atributos físico-químicos do solo, regime hídrico, salinidade, fertilidade, matéria orgânica, textura e drenagem; e estudos que relacionassem esses fatores às fitofisionomias e aos gradientes ambientais da restinga.

Como critérios de exclusão, foram descartados: estudos sem relação direta com restingas ou com ecossistemas costeiros arenosos comparáveis; trabalhos sem conexão com a microbiota do solo, os atributos edáficos ou a estrutura da vegetação; duplicatas recuperadas em mais de uma base; documentos sem texto completo disponível; publicações sem respaldo técnico-científico suficiente para sustentar a análise proposta; e estudos exclusivamente laboratoriais ou experimentais sem interface interpretativa com os processos ecológicos abordados na revisão.

Após a triagem por títulos e resumos, os trabalhos potencialmente pertinentes foram lidos integralmente e organizados por eixos temáticos, permitindo a construção de uma discussão integrativa sobre heterogeneidade fitofisionômica das restingas, características edáficas e hidrológicas, composição e funcionamento da microbiota do solo, ocorrência de fungos simbioses, influência de gradientes ambientais sobre comunidades microbianas e implicações ecológicas da interação entre solo, vegetação e microrganismos em ecossistemas costeiros brasileiros.

3. Resultados e Discussões

Heterogeneidade fitofisionômica das restingas e implicações ecológicas para a microbiota do solo

A heterogeneidade fitofisionômica das restingas brasileiras constitui um traço estrutural do ecossistema e resulta da combinação entre geomorfologia costeira, dinâmica sedimentar, variação hídrica e diferenças florísticas ao longo da paisagem (Pereira & Assis, 2000; Correia et al., 2020). Nesse sentido, a restinga não deve ser tratada como uma unidade homogênea, mas como um mosaico ecológico em que diferentes combinações de substrato, umidade e cobertura vegetal produzem cenários contrastantes para o solo e para a biota subterrânea (Pereira & Assis, 2000; Correia et al., 2020).

A existência de gradientes fitofisionômico-edáficos em formações florestais de restinga no sudeste do Brasil demonstra que mudanças no regime hídrico e nas características pedológicas acompanham mudanças na estrutura da vegetação, indicando forte acoplamento entre ambiente físico e expressão fitofisionômica (Magnago et al., 2010). Em outra escala, a heterogeneidade florística entre fitocenoses de restingas do Rio de Janeiro e do Espírito Santo confirma que a variação regional da flora é suficientemente marcada para diferenciar conjuntos vegetacionais dentro do próprio domínio de restinga (Magnago et al., 2011).

A drenagem e a inundação periódica também exercem papel importante na organização dessas formações, uma vez que, em florestas mal drenadas, o gradiente hídrico local se mostra determinante para a composição e a distribuição das espécies lenhosas (Menezes et al., 2010). De forma complementar, a composição florística de restingas sobre dunas pode variar de acordo com os ecossistemas circundantes, inclusive sob influência de florestas de tabuleiro, reforçando que a fitofisionomia expressa

não apenas o tipo de vegetação, mas a interação entre posição na paisagem, umidade e contexto biogeográfico (Giaretta et al., 2013).

Do ponto de vista ecológico, essas evidências têm implicações diretas para a microbiota do solo, porque a heterogeneidade fitofisionômica altera o aporte e a qualidade da serapilheira, a arquitetura radicular, a aeração do solo, o regime de umidade e a disponibilidade de recursos orgânicos (Lourenço Jr. et al., 2021; Pinto et al., 2020). Isso é coerente com a identificação de fortes gradientes ambientais em comunidades florestais costeiras e com as diferenças verificadas na estrutura de comunidades bacterianas e fúngicas entre restinga arbórea sujeita a alagamento, restinga arbórea seca e restinga herbácea sob influência marinha (Lourenço Jr. et al., 2021; Pinto et al., 2020).

A influência da fitofisionomia também alcança os fungos simbiotes, uma vez que a restinga abriga diversidade expressiva de microbiota ectomicorrízica e essa simbiose tem relevância para o funcionamento ecológico de um ecossistema ainda pouco conhecido (Furtado et al., 2023). De modo complementar, fungos micorrízicos arbusculares exercem papel importante na produtividade e na estrutura das comunidades vegetais em diferentes fitofisionomias da Mata Atlântica, incluindo floresta de restinga (Duarte et al., 2019).

Assim, a heterogeneidade fitofisionômica das restingas deve ser compreendida como um eixo central para explicar a organização da microbiota do solo, pois a variação florística e estrutural observada em escala local e regional se traduz em diferenças na composição e no potencial funcional das comunidades subterrâneas (Magnago et al., 2011; Menezes et al., 2010; Mendes & Tsai, 2018; Pinto et al., 2020).

Influência dos atributos edáficos na estruturação das comunidades microbianas

Os atributos edáficos constituem um dos principais eixos de organização da microbiota do solo em ambientes de restinga, porque esses ecossistemas se desenvolvem sobre substratos arenosos, altamente drenados, pobres em nutrientes e submetidos à ação simultânea de lixiviação intensa, deficiência hídrica e influência marinha (Furtado et al., 2023; Brito et al., 2018). Nessas condições, o solo passa a funcionar como filtro ecológico decisivo para o estabelecimento e a persistência das comunidades microbianas, uma vez que restringe a disponibilidade de água, nutrientes e sítios favoráveis à atividade biológica (Furtado et al., 2023; Brito et al., 2018).

A textura arenosa e a drenagem acentuada aparecem de forma recorrente como características estruturantes das restingas, pois condicionam baixa retenção de água, reduzida capacidade de troca de cátions e forte sensibilidade às variações do lençol freático (Lourenço Jr. et al., 2021). Em comunidades florestais costeiras, verificou-se que mudanças na profundidade do lençol freático se associam a alterações em areia grossa, matéria orgânica, retenção de água e capacidade de troca de cátions, evidenciando que o componente hidráulico do solo influencia diretamente o ambiente radicular e, por extensão, o habitat microbiano (Lourenço Jr. et al., 2021). Assim, a estruturação microbiana em restingas deve ser interpretada também a partir do regime hídrico do solo, e não apenas da composição química isolada (Lourenço Jr. et al., 2021).

Do ponto de vista químico, a baixa fertilidade natural das restingas representa outro fator central na seleção das comunidades subterrâneas. Em áreas florestais de restinga, a fertilidade foi descrita como baixa, com saturação por bases inferior a 16% e predominância de alumínio nos sítios de troca, o que evidencia um substrato quimicamente restritivo para organismos dependentes de maior disponibilidade nutricional (Bonilha et al., 2012). Esse conjunto de condições reforça a ideia de que pH, saturação por bases, alumínio e nutrientes disponíveis não são apenas descritores do solo, mas variáveis com potencial seletivo sobre a microbiota, favorecendo grupos mais tolerantes à oligotrofia, à acidez e à limitação de recursos (Bonilha et al., 2012).

As evidências microbiológicas confirmam esse papel estruturador dos atributos edáficos. Em gradiente envolvendo floresta atlântica, restinga e manguezal no sudeste do Brasil, observou-se que a estrutura taxonômica e o potencial funcional do

microbioma do solo variaram entre os ambientes e que a comunidade microbiana foi moldada por propriedades do solo, com correlações significativas envolvendo pH, saturação por bases, boro e ferro, entre outros elementos (Mendes & Tsai, 2018).

De modo convergente, análises comparativas em solos de manguezal, restinga e floresta atlântica mostraram diferenças na frequência de grupos microbianos e nas atividades metabólicas de bactérias e fungos, além de variações associadas à profundidade e à estação do ano (Pupin & Nahas, 2014). Desse modo, textura, drenagem, salinidade, matéria orgânica, pH, alumínio e saturação por bases devem ser compreendidos como componentes de um sistema ambiental interdependente que regula simultaneamente a composição, a atividade e o potencial funcional das comunidades microbianas do solo (Bonilha et al., 2012; Lourenço Jr. et al., 2021; Mendes & Tsai, 2018).

Composição, diversidade e distribuição da microbiota do solo em restingas

A microbiota do solo em restingas apresenta composição e distribuição espacial heterogêneas, compatíveis com a diversidade ambiental desse ecossistema. Em gradiente ecológico envolvendo floresta atlântica, restinga e manguezal, verificou-se que cada ambiente abriga comunidades microbianas taxonômica e funcionalmente distintas, o que demonstra que a restinga possui identidade microbiológica própria dentro do contínuo costeiro (Mendes & Tsai, 2018). No mesmo estudo, a restinga não apareceu como ambiente equivalente nem à floresta nem ao manguezal, reforçando a necessidade de tratá-la como compartimento microbiológico singular, ainda que inserido em gradientes mais amplos de vegetação e solo (Mendes & Tsai, 2018).

Quanto à diversidade, os resultados disponíveis sugerem que a microbiota em restingas não é uniforme e responde ao tipo de ambiente com o qual ela é comparada. No gradiente floresta-restinga-manguezal, o manguezal apresentou a maior diversidade taxonômica e funcional, enquanto a restinga ocupou posição distinta e intermediária em relação aos demais ecossistemas, evidenciando que sua diversidade microbiana se organiza sob filtros ecológicos específicos (Mendes & Tsai, 2018). Esses dados mostram que a restinga não deve ser descrita apenas por sua menor fertilidade ou por seu estresse ambiental, mas também por uma composição comunitária particular, cuja interpretação depende do contexto comparativo em que o ecossistema é analisado (Mendes & Tsai, 2018).

Em escala interna ao próprio ecossistema, a distribuição da microbiota também varia entre fitofisionomias de restinga. Em áreas do sul do Brasil, observou-se diferença na estrutura das comunidades bacterianas e fúngicas entre restinga arbórea sujeita a alagamento, restinga arbórea seca e restinga herbácea sob influência marinha, indicando que a composição microbiana acompanha a diferenciação ambiental e fisionômica da paisagem (Pinto et al., 2020).

Além das diferenças entre fitofisionomias, a composição e a atividade microbiana em restingas também variam ao longo do perfil do solo e entre estações do ano (Pupin & Nahas, 2014). Em comparação com manguezal e floresta atlântica, solos de restinga apresentaram frequências específicas de grupos bacterianos e fúngicos, e as atividades metabólicas microbianas também mudaram com a profundidade e com a sazonalidade, mostrando que a distribuição dessas comunidades é dinâmica no tempo e no espaço (Pupin & Nahas, 2014).

A composição da microbiota de restinga inclui ainda grupos mutualistas com relevância ecológica, especialmente fungos micorrízicos. A diversidade expressiva de fungos ectomicorrízicos associados a plantas nativas de restinga indica, ao mesmo tempo, que a biologia micorrízica desse ecossistema permanece pouco explorada (Furtado et al., 2023).

De modo complementar, comunidades de fungos micorrízicos arbusculares variaram em estrutura e diversidade entre diferentes fitofisionomias preservadas da Mata Atlântica, incluindo floresta de restinga, o que reforça que a distribuição da microbiota fúngica mutualista acompanha a heterogeneidade ambiental e vegetal desses ambientes (Duarte et al., 2019). Portanto, a composição, a diversidade e a distribuição da microbiota do solo em restingas abrangem tanto microrganismos de vida livre

quanto grupos simbiotes, respondendo a gradientes ambientais, fitofisionômicos e ecológicos em múltiplas escalas (Furtado et al., 2023; Duarte et al., 2019).

Integração entre solo, vegetação e microrganismos em ambientes de restinga

A dinâmica ecológica das restingas deve ser interpretada a partir da integração entre solo, vegetação e microrganismos, e não pela análise isolada de cada componente (Lourenço Jr. et al., 2021; Mendes & Tsai, 2018). Nessas formações costeiras, a vegetação responde fortemente às condições do substrato, enquanto a microbiota do solo também é moldada por propriedades edáficas e pela estrutura da cobertura vegetal, o que configura um sistema de interdependência ecológica em múltiplas escalas (Lourenço Jr. et al., 2021; Mendes & Tsai, 2018). Isso significa que mudanças em drenagem, fertilidade, textura, regime hídrico e composição vegetal repercutem simultaneamente sobre o ambiente radicular e sobre a organização das comunidades microbianas (Bonilha et al., 2012; Lourenço Jr. et al., 2021; Mendes & Tsai, 2018).

Essa integração é visível quando se observam os gradientes ambientais das restingas florestais. Em comunidades costeiras da Mata Atlântica, a fisionomia e a composição funcional da vegetação responderam a variáveis ambientais, hidráulicas e edáficas, com destaque para profundidade do lençol freático, areia grossa, matéria orgânica, retenção de água e capacidade de troca de cátions (Lourenço Jr. et al., 2021). Como esses mesmos fatores definem a disponibilidade de água, nutrientes e oxigênio no solo, eles também condicionam o ambiente em que a microbiota se estabelece, demonstrando que a vegetação funciona como expressão ecológica dos filtros edáficos e hidráulicos que atuam sobre o sistema subterrâneo (Lourenço Jr. et al., 2021; Mendes & Tsai, 2018).

A própria composição da vegetação interfere diretamente na qualidade do habitat microbiano. Em restingas oligotróficas do sudeste brasileiro, diferenças entre formações florestais e formações abertas associadas a *Clusia hilariana* repercutiram na produção de serapilheira, na ciclagem de carbono e nitrogênio e na atividade biológica do solo, indicando que alterações na cobertura vegetal modificam a oferta de matéria orgânica e a intensidade da atividade microbiana e da fauna edáfica (Brito et al., 2018).

As propriedades químicas e físicas do solo também se conectam à vegetação por meio da resposta das plantas ao ambiente edáfico. Em florestas de restinga, a baixa fertilidade, a saturação por bases inferior a 16% e a predominância de alumínio nos sítios de troca foram associadas a modificações fisiológicas e morfológicas das plantas, incluindo alterações na arquitetura do sistema radicular (Bonilha et al., 2012). Como a arquitetura das raízes influencia diretamente a rizosfera, o padrão de exsudação e o espaço de colonização microbiana, a relação entre solo e microbiota é mediada, em parte, pela resposta da vegetação às restrições do substrato (Bonilha et al., 2012; Mendes & Tsai, 2018).

Ao longo do gradiente floresta-restinga-manguezal no sudeste do Brasil, verificou-se que a composição taxonômica e funcional do microbioma do solo variou entre os ambientes e que a comunidade microbiana foi moldada por propriedades do solo (Mendes & Tsai, 2018). Como esses ambientes também diferem quanto à vegetação e à dinâmica hídrica, os resultados indicam que a microbiota emerge da ação conjunta de filtros edáficos e fitofisionômicos, e não apenas de um único fator ambiental (Mendes & Tsai, 2018; Pinto et al., 2020). Em escala local, diferenças na estrutura de comunidades bacterianas e fúngicas entre fitofisionomias de restinga reforçam que a microbiota do solo acompanha a diferenciação ecológica da paisagem e responde à combinação entre solo e fitofisionomia (Pinto et al., 2020; Lourenço Jr. et al., 2021).

A integração também se torna evidente quando se consideram os fungos simbiotes. A revisão sobre ectomicorrizas em restinga mostrou diversidade significativa da microbiota ectomicorrízica e destacou a importância dessa simbiose para o funcionamento ecológico desse ecossistema (Furtado et al., 2023). Estudos com fungos micorrízicos arbusculares em diferentes fitofisionomias da Mata Atlântica, incluindo floresta de restinga, mostraram variação na estrutura e diversidade dessas comunidades em associação com as fitofisionomias e com variáveis físicas e químicas do solo (Duarte et al., 2019). Assim, as

associações mutualistas funcionam como elo biológico entre as restrições do solo e o desempenho da vegetação, integrando aquisição de nutrientes, tolerância ao estresse e organização das comunidades vegetais (Furtado et al., 2023; Duarte et al., 2019).

Desse modo, a ecologia microbiana em restingas deve ser compreendida como resultado de um sistema integrado, no qual o solo atua como filtro físico, químico e hidráulico, a vegetação expressa a resposta ecológica a esses filtros e os microrganismos mediam processos fundamentais de ciclagem, decomposição e simbiose (Bonilha et al., 2012; Lourenço Jr. et al., 2021; Mendes & Tsai, 2018; Furtado et al., 2023).

Singularidade microbiológica das restingas em comparação com outros ecossistemas

A singularidade microbiológica das restingas torna-se mais evidente quando esse ecossistema é analisado em comparação com formações adjacentes, especialmente manguezais e florestas de Mata Atlântica (Mendes & Tsai, 2018; Pupin & Nahas, 2014). Em gradiente ecológico no sudeste do Brasil, verificou-se que floresta, restinga e manguezal abrigam comunidades microbianas taxonomicamente e funcionalmente distintas, demonstrando que a restinga não constitui mera transição microbiológica entre ambientes vizinhos, mas um compartimento ecológico com identidade própria dentro do contínuo costeiro (Mendes & Tsai, 2018). Essa distinção indica que a singularidade da restinga não decorre apenas de sua vegetação ou de seu substrato arenoso, mas também da forma como essas características se refletem na organização do microbioma do solo (Mendes & Tsai, 2018).

Embora o manguezal tenha apresentado a maior diversidade taxonômica e funcional no gradiente comparado, a restinga também exibiu composição própria e não equivalente à observada na floresta atlântica (Mendes & Tsai, 2018). Isso sugere que a singularidade microbiológica da restinga não precisa ser interpretada como maior diversidade absoluta, mas como a presença de um arranjo comunitário particular, moldado por filtros ambientais específicos, como oligotrofia, drenagem elevada, salinização e déficit hídrico (Mendes & Tsai, 2018; Furtado et al., 2023). Assim, a comparação entre ecossistemas mostra que a restinga ocupa posição ecológica singular, com microbiota distinta tanto em composição quanto em potencial funcional (Mendes & Tsai, 2018).

Essa singularidade também aparece em estudos microbiológicos baseados em grupos funcionais e atividades metabólicas. Em solos da Ilha do Cardoso, a frequência média de bactérias e fungos isolados diferiu entre manguezal, restinga e floresta atlântica, e as atividades microbianas variaram com profundidade e estação do ano (Pupin & Nahas, 2014).

Esses resultados mostram que, mesmo quando comparada a ecossistemas costeiros e florestais próximos, a restinga apresenta padrão microbiológico próprio, influenciado por sua condição edáfica e pelo contexto ecológico em que se insere (Pupin & Nahas, 2014). Em escala mais interna, a singularidade da restinga também se manifesta pela forte diferenciação entre suas próprias fitofisionomias, já que foram registradas diferenças na estrutura de comunidades bacterianas e fúngicas entre restinga arbórea sujeita a alagamento, restinga arbórea seca e restinga herbácea sob influência marinha (Pinto et al., 2020). Dessa forma, a restinga deve ser entendida como um sistema microbiologicamente singular e, ao mesmo tempo, internamente heterogêneo (Pinto et al., 2020).

A singularidade microbiológica das restingas também envolve a presença de fungos simbioses pouco documentados em outros contextos costeiros brasileiros. A revisão sobre ectomicorrizas em restinga destacou diversidade significativa da microbiota ectomicorrízica associada a plantas nativas e apontou que a biologia micorrízica desse ecossistema permanece amplamente pouco explorada (Furtado et al., 2023).

Esse ponto amplia a noção de singularidade ao indicar que a restinga não se diferencia apenas pela estrutura do microbioma geral, mas também pela relevância ecológica de associações mutualistas que ainda são subamostradas e subestimadas (Furtado et al., 2023). Portanto, a singularidade microbiológica da restinga resulta da combinação entre filtros

edáficos severos, heterogeneidade fitofisionômica e presença de interações simbióticas características de um ecossistema costeiro ameaçado e ainda insuficientemente conhecido (Furtado et al., 2023; Mendes e Tsai, 2018; Pinto et al., 2020).

4. Conclusão

As evidências reunidas ao longo desta revisão demonstram que a ecologia microbiana do solo em restingas brasileiras é condicionada por um conjunto integrado de fatores ambientais, no qual a heterogeneidade fitofisionômica, os atributos edáficos e o regime hídrico atuam de forma articulada na estruturação das comunidades microbianas. Nesse contexto, a microbiota não pode ser compreendida de maneira homogênea, uma vez que sua composição, diversidade e potencial funcional variam em resposta aos gradientes ecológicos internos das restingas e às diferenças estabelecidas em relação a ecossistemas adjacentes, como manguezais e florestas de Mata Atlântica.

Os estudos analisados indicam que a dinâmica microbiana nesses ambientes ultrapassa interpretações centradas em atributos isolados do solo, como textura, salinidade ou fertilidade, exigindo uma abordagem ecológica integrada que considere simultaneamente drenagem, profundidade do lençol freático, matéria orgânica, saturação por bases, alumínio e cobertura vegetal. Nessa perspectiva, a vegetação desempenha papel central não apenas como componente estrutural da paisagem, mas como mediadora das condições físicas, químicas e biológicas que influenciam diretamente a atividade microbiana, a disponibilidade de nichos ecológicos e a ocorrência de associações simbióticas relevantes.

Também se evidencia que as restingas possuem singularidade microbiológica própria, expressa tanto pela diferenciação entre suas fitofisionomias quanto pela presença de grupos simbiotes de elevada importância ecológica, especialmente fungos micorrízicos ainda insuficientemente explorados na literatura. Tal constatação reforça que esse ecossistema abriga uma microbiota funcionalmente relevante e ecologicamente especializada, cuja compreensão ainda permanece parcial diante da complexidade ambiental e da escassez de estudos mais aprofundados.

Desse modo, conclui-se que o avanço do conhecimento sobre a ecologia microbiana das restingas brasileiras depende do fortalecimento de investigações integradas, capazes de relacionar com maior resolução os gradientes edáficos, hidrológicos e fitofisionômicos à estrutura e ao funcionamento das comunidades microbianas do solo. Esse aprofundamento é essencial não apenas para o desenvolvimento do conhecimento ecológico sobre ambientes costeiros tropicais, mas também para subsidiar estratégias mais consistentes de conservação, monitoramento e manejo de ecossistemas frágeis, dinâmicos e crescentemente ameaçados

Referências

- Bardgett, R. D. & Van der Putten, W. H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*. 515(7528), 505-11. DOI: 10.1038/nature13855.
- Bonilha, R. M., Casagrande, J. C., Soares, M. R. & Reis-Duarte, R. M. (2012). Characterization of the soil fertility and root system of restinga forests. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 36(6), 1804-13. DOI: 10.1590/S0100-06832012000600014.
- Brito, L. S., Irmiler, U., Forte, B. V. G., Xavier, T. P. & Martins, R. L. (2018). Matter turnover in the oligotrophic restinga ecosystem and the importance of the key species *Clusia hilariana*. *Biota Neotropica*. 18(4), e20180552. DOI: 10.1590/1676-0611-BN-2018-0552.
- Brockett, B. F. T., Prescott, C. E. & Grayston, S. J. (2012). Soil moisture is the major factor influencing microbial community structure and enzyme activities across seven biogeoclimatic zones in western Canada. *Soil Biology and Biochemistry*. 44(1), 9-20. DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.09.003.
- Correia, B. E. F., Almeida, J. R. E. B. & Zanin, M. (2020). Key Points about North and Northern Brazilian Restinga: a Review of Geomorphological Characterization, Phytophysionomies Classification, and Studies' Tendencies. *The Botanical Review*. 86(3-4), 329-37. DOI: 10.1007/s12229-020-09230-2.
- Duarte, L. M., Bertini, S. C. B., Stürmer, S. L., Lambais, M. R. & Azevedo, L. C. B. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungal communities in soils under three phytophysionomies of the Brazilian Atlantic Forest. *Acta Botanica Brasílica*. 33(1), 50-60. DOI: 10.1590/0102-33062018abb0236.
- Fenandes, J. M. B., Vieira, L. T. & Castelhana, M. V. C. (2023). Revisão narrativa enquanto metodologia científica significativa: reflexões técnico-formativas. *REDES – Revista Educacional da Sucesso*. 3(1), 1-7. ISSN: 2763-6704.

- Fierer, N. & Jackson, R. B. (2006). The diversity and biogeography of soil bacterial communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 103(3), 626-31. DOI: 10.1073/pnas.0507535103.
- Fierer, N., Leff, J. W., Adams, B. J., Nielsen, U. N., Bates, S. T., Lauber, C. L., Owens, S., Gibert, J. A., Wall, D. H. & Caporaso, J. G. (2012). Cross-biome metagenomic analyses of soil microbial communities and their functional attributes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 109(52), 21390-5. DOI: 10.1073/pnas.1215210110.
- Furtado, A. N. M., Leonardi, M. Comandini, O., Neves, M. A. & Rinaldi, A. C. (2023). Restinga ectomycorrhizae: a work in progress. *F1000Research*. 12, 317. DOI: 10.12688/f1000research.131558.1.
- Giaretta, A., Menezes, L. F. T. & Pereira, O. J. (2013). Structure and floristic pattern of a coastal dunes in southeastern Brazil. *Acta Botanica Brasilica*. 27(1), 87-107. DOI: 10.1590/S0102-33062013000100011.
- Lauber, C. L., Hamady, M., Knight, R. & Fierer, N. (2009). Pyrosequencing-based assessment of soil pH as a predictor of soil bacterial community structure at the continental scale. *Applied and Environmental Microbiology*. 75(15), 5111-20. DOI: 10.1128/AEM.00335-09.
- Lourenço, J. R. J., Newman, E. A., Ventura, J. A., Milanez, C. R. D., Thomaz, L. D., Wanderkoren, D. T. & Enquist, B. J. (2021). Soil-associated drivers of plant traits and functional composition in Atlantic Forest coastal tree communities. *Ecosphere*. 12(7), e03629. DOI: 10.1002/ecs2.3629.
- Magnago, L. F. S., Martins, S. V. & Pereira, O. J. (2011). Heterogeneidade florística das fitocenoses de restingas nos estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo, Brasil. *Revista Arvore*. 35(2), 245-54. DOI: 10.1590/S0100-67622011000200009.
- Magnago, L. F. S., Martins, S. V., Schefer, C. E. G. R. & Neri, A. V. (2010). Gradiente fitofisionômico-edáfico em formações florestais de Restinga no sudeste do Brasil. *Acta Botanica Brasilica*. 24(3), 734-46. DOI: 10.1590/S0102-33062010000300017.
- Mendes, L. W. & Tsai, S. M. (2018). Distinct taxonomic and functional composition of soil microbiomes along the gradient forest-restinga-mangrove in southeastern Brazil. *Antonie van Leeuwenhoek*. 111(1), 101-14. DOI: 10.1007/s10482-017-0931-6.
- Menezes, L. F. T., Araujo, D. S. D. & Nettesheim, F. C. (2010). Estrutura comunitária e amplitude ecológica do componente lenhoso de uma floresta de restinga mal drenada no sudeste do Brasil. *Acta Botanica Brasilica*. 24(3), 825-39. DOI: 10.1590/S0102-33062010000300025.
- McGuire, K. L. & Treseder, K. K. (2009). Microbial communities and their relevance for ecosystem models: decomposition as a case study. *Soil Biology and Biochemistry*. 42(4), 529-35. DOI: 10.1016/j.soilbio.2009.11.016.
- Pereira, O. J. & Assis, A. M. (2000). Florística da restinga de Camburi, Vitória, ES. *Acta Botanica Brasilica*. 14(1), 99-111. DOI: 10.1590/S0102-33062000000100009.
- Pereira, A. S. et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [free ebook]. Santa Maria: Editora da UFSM.
- Risemberg, R. I. C. et al. (2026). A importância da metodologia científica no desenvolvimento de artigos científicos. *E-Acadêmica*, 7(1), e0171675. <https://eacademica.org/eacademica/article/view/675>.
- Pinto, A. L., Canei, A. D., De Armas, R. D., Silva, E. P., Herández, A. G., Giachini, A. J., Soares, C. R. F. S. (2020). Structure of microbial soil communities in areas of restinga: a case study in a conservation unit in the Atlantic Forest of the Southern Brazilian coast. *Tropical Ecology*. 61, 594-600. DOI: 10.1007/s42965-020-00103-8.
- Pupin, B. & Nahas, E. (2014). Microbial populations and activities of mangrove, restinga and Atlantic forest soils from Cardoso Island, Brazil. *Journal of Applied Microbiology*. 116(4), 851-64. DOI: 10.1111/jam.12413.
- Rother, E. T. (2007). Revisão sistemática vs. revisão narrativa. *Acta Paulista de Enfermagem*. 20(2), 5-6.
- Santos, C. R., Freitas, R. R. & Medeiros, J. D. (2023). Participação social e retrocessos na proteção da vegetação de restinga no Brasil no período entre 1965 e 2021. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*. 61, 58-84. DOI: 10.5380/dma.v61i0.81531.
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*. 104, 333-9. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>.
- Van der Heijden, M. G. A., Bardgett, R. D. & Van Straalen, N. M. (2008). The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*. 11(3), 296-310. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2007.01139.x.