



## **Criptógamas através do tempo: estabilidade evolutiva, resiliência ecológica e bioindicação em ambientes extremos**

### ***Cryptogams through time: evolutionary stability, ecological resilience, and bioindication in extreme environments***

**André Fontana Weber**

Faculdade Única, <https://orcid.org/0000-0002-2494-8758>  
[afontanaweber@gmail.com](mailto:afontanaweber@gmail.com)

**Ruan Braian Pereira**

Centro Universitário Leonardo da Vinci – UNIASSELVI, <https://orcid.org/0009-0003-2107-3794>  
[ruanbraian889@gmail.com](mailto:ruanbraian889@gmail.com)

**Hilton Paulo Potker**

Centro Universitário Única de Ipatinga, <https://orcid.org/0009-0001-9874-7414>  
[hilton2015hilton2025@outlook.com](mailto:hilton2015hilton2025@outlook.com)

**Ronald Assis Fonseca**

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Faculdade Única, <https://orcid.org/0000-0002-7504-621X>  
[ronald.ufv@hotmail.com](mailto:ronald.ufv@hotmail.com)

#### **Resumo**

As criptógamas - briófitas, líquens, pteridófitas, algas e fungos - são organismos vegetais primitivos que persistem desde o Paleozoico, com papel central na colonização terrestre e formação dos primeiros ecossistemas. Esta pesquisa discute sua relevância ecológica, evolutiva e o potencial como bioindicadores ambientais. Registros fósseis em estratos cretáceos, mesozoicos e âmbar neotropical do Mioceno evidenciam estabilidade morfológica e funcional, com linhagens como *Frullania* e *Parmotrema* ocupando nichos úmidos semelhantes aos atuais. Sua ausência de vasos condutores e reprodução por esporos ilustram uma linhagem basal resiliente, capaz de persistir em contextos ecológicos diversos. Estudos recentes demonstram sua presença significativa em ambientes negligenciados - como zonas úmidas efêmeras, florestas urbanas e regiões periglaciais - onde atuam como vetores estruturais da biodiversidade, sentinelas





microambientais e suporte à microfauna especializada, como nematoides e tardígrados. Esses achados reforçam seu papel como modelos de estabilidade evolutiva e ferramentas estratégicas para monitoramento ecológico e restauração de paisagens degradadas.

Palavras-chave: Botânica; Resiliência ecológica; Nichos epifíticos.

## Abstract

Cryptogams - including bryophytes, lichens, pteridophytes, algae, and fungi - are primitive plant organisms that have persisted since the Paleozoic era, playing a central role in terrestrial colonization and the formation of early ecosystems. This research explores their ecological and evolutionary significance, as well as their potential as environmental bioindicators. Fossil records from Cretaceous and Mesozoic strata, along with Miocene neotropical amber, reveal morphological and functional stability, with lineages such as *Frullania* and *Parmotrema* occupying moist niches similar to those found today. Their lack of vascular tissues and spore-based reproduction illustrate a resilient basal lineage capable of thriving in diverse ecological contexts. Recent studies highlight their notable presence in overlooked environments - such as ephemeral wetlands, urban forests, and periglacial regions - where they function as structural vectors of biodiversity, microenvironmental sentinels, and support systems for specialized microfauna like nematodes and tardigrades. These findings underscore their role as models of evolutionary stability and strategic tools for ecological monitoring and the restoration of degraded landscapes.

Keywords: Botany; Ecological resilience; Epiphytic niches.

## 1 Introdução

A diversidade e a persistência das criptógamas refletem a sua notável capacidade de adaptação a diferentes pressões ecológicas ao longo do tempo geológico. Essas plantas não vasculares desempenharam um papel relevante na colonização inicial de ambientes terrestres, participando dos processos de formação do solo, fixação de nutrientes e construção de nichos ecológicos primários (Dilrukshi *et al.*, 2024).

Registros fósseis amplamente distribuídos, como os analisados por Feldberg *et al.* (2025), apontam que diversas linhagens de criptógamas conservaram suas formas morfológicas e funções ecológicas por dezenas de milhões de anos, inclusive em nichos epifíticos úmidos semelhantes aos ocupados atualmente. Além disso, sua alta sensibilidade a alterações microambientais - como umidade, temperatura e distúrbios físicos - confere a essas linhagens uma dupla relevância: ao mesmo tempo em que revelam resiliência funcional diante das variações climáticas, também atuam como bioindicadores eficazes de degradação ambiental e mudanças nos regimes ecológicos locais (Mir-Rosselló *et al.*, 2025).





Nesse contexto, surge como questão a importância em entender como as criptógamas, apesar de sua simplicidade estrutural e origem evolutiva antiga, mantêm estabilidade morfológica e funcional ao longo do tempo geológico e continuam a exercer papéis ecológicos centrais e bioindicadores em ecossistemas contemporâneos, inclusive sob condições ambientais extremas ou degradadas.

Assim, compreender a trajetória evolutiva e ecológica das criptógamas contribui no entendimento da sucessão ecológica e para desenvolver ferramentas diagnósticas e estratégias de manejo frente aos desafios ambientais contemporâneos. Nesse sentido, ao conduzir esta pesquisa, buscou-se investigar a importância evolutiva, ecológica e bioindicadora das criptógamas - especialmente briófitas e líquens - por meio da análise de dados paleobotânicos, fisiológicos e ecológicos recentes, obtidos nas literaturas pesquisadas, a fim de compreender sua estabilidade morfológica, persistência funcional e relevância contemporânea em distintos ecossistemas, incluindo ambientes extremos e antropizados. E, como objetivos específicos: analisar o papel das criptógamas na colonização primária de ambientes terrestres e sua contribuição para os primeiros processos de sucessão ecológica, avaliar a presença e função ecológica atual das criptógamas em ambientes diversos e identificar processos evolutivos e associações ecológicas.

Este estudo apresenta natureza bibliográfica, de abordagem qualitativa, com foco descritivo e interpretativo, conforme preconizado por Gil (2017) e Severino (2013) para investigações baseadas na sistematização do conhecimento científico existente. A escolha por essa modalidade justifica-se pela necessidade de reunir, organizar e interpretar criticamente os achados recentes sobre as criptógamas, sobretudo no que tange à sua trajetória evolutiva, função ecológica e relevância como bioindicadores ambientais (Dilrukshi; Rubasinghe, 2024; Mir-Rosselló *et al.*, 2025).

Empregou-se o Portal de Periódicos Scopus, reconhecido por sua cobertura abrangente e atualizada da literatura científica internacional (Franklin *et al.*, 2025). A estratégia de busca envolveu o uso do descritor “*cryptogam*”, resultando na seleção intencional de 16 artigos científicos publicados entre 2024 e 2025, com o objetivo de assegurar a contemporaneidade da análise. Foram incluídas apenas as publicações que





abordavam direta ou indiretamente aspectos evolutivos, ecológicos, funcionais ou bioindicadores das criptógamas, a partir de critérios de relevância temática e rigor metodológico (Betway-May *et al.*, 2025; Bowker *et al.*, 2025; De Vargas *et al.*, 2025).

O método de análise adotado foi o dedutivo, partindo de concepções amplas sobre evolução vegetal e ecologia funcional para a compreensão específica dos processos que caracterizam as criptógamas em distintos períodos geológicos e ecossistemas atuais (Feldberg *et al.*, 2025; El-Saadawi *et al.*, 2025). A análise centrou-se na identificação de





características evolutivas conservadas, estratégias adaptativas, funções ecológicas persistentes e marcadores de resiliência funcional frente a mudanças ambientais (Nokhsorov; Protopopov, 2025; Ganazhapa-Plasencia *et al.*, 2025; Dickie; Gosden, 2025).

Além disso, a metodologia incorporou o diálogo crítico entre os estudos selecionados, promovendo comparações entre dados paleoambientais, envolvendo registros fósseis (Feldberg *et al.*, 2025; El-Saadawi *et al.*, 2025) e as evidências contemporâneas em ecossistemas vulneráveis: zonas úmidas, dunas, florestas urbanas e regiões periglaciais (Skubała *et al.*, 2025; Zhou *et al.*, 2025; Senko *et al.*, 2024). Essa triangulação buscou integrar distintas perspectivas científicas para a compreensão do papel histórico e atual das criptógamas na conservação ecológica e no monitoramento ambiental.

## 2 Desenvolvimento

### Criptógamas através do tempo

As criptógamas, grupo que abrange briófitas, líquens, pteridófitas, algas e fungos, representam algumas das formas vegetais mais antigas da Terra, caracterizadas por sua estrutura simples, ausência de vasos condutores e reprodução via esporos (Dilrukshi *et al.*, 2024). Essa simplicidade, associada a uma notável adaptabilidade ecológica, permitiu sua ampla distribuição e permanência ao longo de diferentes eras geológicas, como evidenciam registros fósseis desde o Paleozoico (El-Saadawi *et al.*, 2025). Sua persistência revela padrões de conservação morfológica e continuidade filogenética, com morfologias praticamente inalteradas preservadas em âmbar neotropical do Mioceno (Feldberg *et al.*, 2025), e funcionalidade estável mantida mesmo sob mudanças contemporâneas na cobertura vegetal, como nas tundras árticas (Betway-May *et al.*, 2025). Tais evidências tornam as criptógamas modelos ideais para o estudo da evolução das plantas terrestres. Além disso, sua capacidade de colonizar substratos inóspitos, formar solo e iniciar sucessões ecológicas primárias evidencia o papel funcional





que essas linhagens exercem tanto em ecossistemas antigos quanto nas atuais estratégias de restauração e conservação (Bowker *et al.*, 2025; Skubała *et al.*, 2025).





Um exemplo dessa longevidade é o catálogo sistemático elaborado por El-Saadawi *et al.* (2025), que compila mais de dois séculos de dados sobre macrofósseis vegetais no Egito, abrangendo desde o Devoniano até o Quaternário. Entre os 643 táxons registrados, destacam-se 130 espécies de macroalgas calcárias e 172 pteridófitas, representando uma parcela expressiva da flora fóssil do país. A diversidade desses grupos criptogâmicos em estratos cretáceos e mesozoicos evidencia sua dominância ecológica anterior ao estabelecimento amplo das angiospermas. Esses achados reforçam a tese de que as criptógamas constituem linhagens funcionalmente estáveis, fundamentais para a colonização primária de ambientes e para a construção das primeiras cadeias ecológicas terrestres.

Registros em âmbar neotropical do Mioceno (15–23 Ma) revelam a notável continuidade morfológica e ecológica de criptógamas epifíticas, como demonstrado por Feldberg *et al.* (2025) e Schmidt (2025). Espécies de hepáticas folhosas, como *Frullania chiapasensis* e *Thysananthus patrickmuelleri* e líquens do gênero *Parmotrema*, foram preservadas com morfologias praticamente idênticas às de suas contrapartes atuais, indicando que mantiveram suas estratégias adaptativas ao longo de dezenas de milhões de anos. Esses fósseis, encontrados em resinas da árvore *Hymenaea*, ainda presente na flora moderna da América Central e Caribe, reforçam a correspondência entre os habitats fósseis e as condições úmidas e sombreadas das florestas tropicais atuais.

Ao ilustrar visualmente a continuidade morfológica entre fósseis e espécies atuais, tais imagens contribuem para a compreensão da trajetória filogenética das criptógamas (Figura 1). Tais achados fortalecem sua relevância como modelos de resiliência ecológica e bioindicação em ecossistemas contemporâneos.

**Figura 1. Exemplares fossilizados de plantas criptogâmicas preservados em rochas sedimentares, evidenciando padrões morfológicos conservados desde o Paleozoico.**





**Fonte: Autores (2025).**

Tais evidências de estabilidade filogenética e ecológica são corroboradas por registros macrofósseis amplamente distribuídos, desde o Devoniano ao Quaternário (El-Saadawi *et al.*, 2025). Essa persistência estrutural e funcional também se manifesta na atualidade: líquens e musgos continuam a ocupar nichos ecológicos semelhantes e a desempenhar funções equivalentes, como observado em ambientes de tundra analisados por Betway-May *et al.* (2025), onde mantêm sua cobertura e funcionalidade mesmo diante de mudanças significativas na vegetação vascular dominante e evoluíram sob pressões ambientais relativamente estáveis, desenvolvendo estratégias adaptativas que envolvem retenção de umidade, fixação de nutrientes, estruturação de micro-habitats e suporte à microfauna, tornando-as modelos ideais para compreender a constância funcional das plantas não vasculares.

### **Criptógamas: bioindicação em ambientes extremos**

Briófitas e líquens continuam a desempenhar funções ecológicas críticas, especialmente em habitats úmidos efêmeros como os *kettle hole tarns* da Ilha Sul da Nova Zelândia — depressões de origem glacial com acúmulo sazonal de água. Estudos como os de Dickie e Gosden (2025) e Ganazhapa-Plasencia *et al.* (2025) demonstraram que esses ambientes historicamente negligenciados, devido à sua acessibilidade limitada e aparente instabilidade, sustentam uma elevada diversidade criptogâmica, incluindo espécies endêmicas e de status de conservação indefinido. A heterogeneidade microambiental — variações de umidade, temperatura, insolação e composição do substrato — favorece a formação de comunidades especializadas que, embora invisíveis a inventários florísticos convencionais, representam importantes indicadores da estabilidade funcional e da integridade ecológica das paisagens. Em contextos distintos,

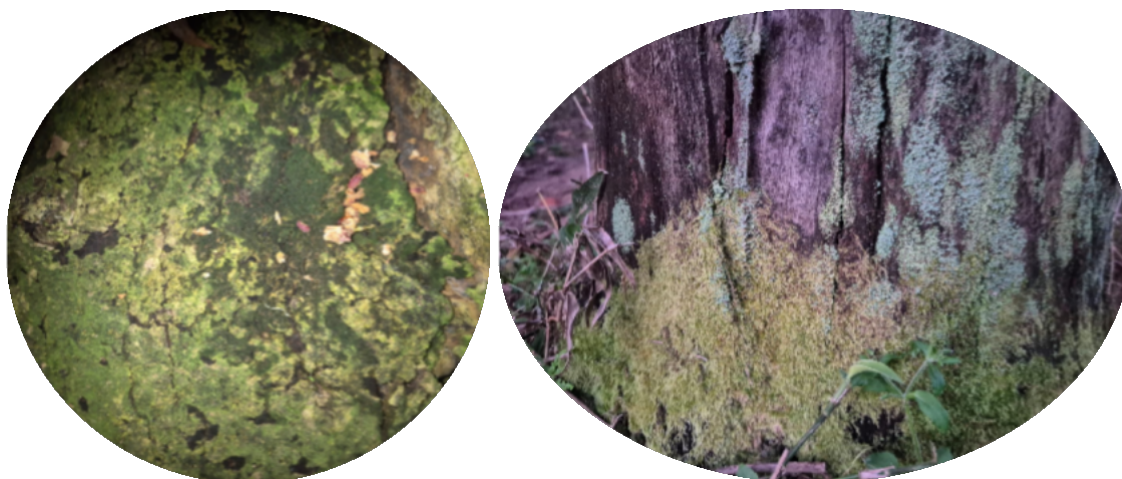




como em zonas úmidas antropizadas do Equador ou florestas urbanas da China, líquens e musgos continuam a refletir com acurácia as condições locais, como evidenciado por Zhou *et al.* (2025), reforçando seu papel transversal como bioindicadores ambientais sensíveis a diferentes graus de antropização.

A presença de líquens e musgos em troncos de árvores, como evidenciado nas imagens capturadas em campo, exemplifica a ocupação de nichos epifíticos por criptógamas em ambientes florestais contemporâneos. Esses organismos colonizam superfícies lenhosas com elevada rugosidade e retenção de umidade, formando comunidades especializadas que refletem com precisão as condições microambientais locais. A estrutura do tronco, as fissuras da casca e a composição química do substrato influenciam diretamente a diversidade criptogâmica, tornando essas formações vegetais indicadores sensíveis de qualidade do ar, umidade relativa e grau de antropização (Figura 2). Tais registros visuais reforçam os achados de Zhou *et al.* (2025) e Dilrukshi; Rubasinghe (2024), ao demonstrar que florestas urbanas e naturais com dosséis fechados favorecem a colonização por briófitas e líquens, consolidando sua função como sentinelas ecológicas e vetores de biodiversidade funcional.

**Figura 2. Observação direta de líquens e musgos em troncos de árvores na região sul do Brasil**



**Fonte: Autores (2025)**

Além da riqueza florística, os *kettle hole tarns* se destacam como microambientes altamente estruturados do ponto de vista funcional. Dickie (2025) registrou 81 espécies criptogâmicas em 269 tarns, com interações ecológicas expressivas



envolvendo invertebrados como nematoides e tardígrados. Esses musgos e líquens funcionam como filtros ecológicos, criando nichos seletivos para organismos especializados. Loeffelholz *et al.* (2025) e Mir-Rosselló *et al.* (2025) confirmam que essas associações biológicas estão diretamente vinculadas à composição do substrato, altitude, regime hídrico e complexidade florística, sendo fundamentais para a manutenção da resiliência e da funcionalidade ecossistêmica. Tais evidências reiteram as conclusões de Dilrukshi; Rubasinghe (2024), ao indicarem que a inclusão sistemática das criptógamas em estratégias de monitoramento ecológico uma vez que detectam variações ambientais sutis em ecossistemas frágeis ou em transição.

A influência das florestas urbanas sobre a diversidade criptogâmica está diretamente associada à complexidade dos fatores microambientais que essas formações vegetais proporcionam. Estudos como o de Zhou *et al.* (2025), realizados em Hefei, China, demonstram que dosséis arbóreos fechados favorecem a diversidade de briófitas ao regular variáveis ecológicas críticas, como sombreamento difuso, umidade relativa do solo e do ar, e estabilidade térmica. A estrutura física do solo e da serapilheira nessas florestas se mostra mais heterogênea, com presença de matéria orgânica em diferentes estágios de decomposição favorece a formação de nichos epífitos, terrícolas e saxícolas, essenciais à colonização por criptógamas.

Em contraste, áreas com cobertura herbácea ou arbustiva tendem a apresentar menor complexidade estrutural, maior exposição à radiação solar direta e maior déficit hídrico, limitando o desenvolvimento dessas espécies sensíveis. Dilrukshi; Rubasinghe (2024) reforçam que essa sensibilidade ecológica torna líquens e briófitas bioindicadores ideais para detectar alterações associadas à urbanização, poluição e mudanças no uso do solo, sendo recomendada sua inclusão em programas de monitoramento com suporte em técnicas como barcoding molecular e mapeamentos de base. Skubala *et al.* (2025) evidenciam que áreas com mosaicos de micro-habitats, como as encontradas em florestas urbanas restauradas, favorecem a atividade microbiana associada à sucessão ecológica, reforçando a importância desses ambientes na manutenção da biodiversidade funcional.

Esse potencial bioindicador é exemplificado com clareza por Mir-Rosselló *et al.* (2025), que, ao investigarem 17 sistemas dunares nas Ilhas Baleares, identificaram cinco comunidades distintas de criptógamas — sobretudo musgos — cujas composições florísticas e padrões de abundância refletem diretamente os processos ecológicos e os



distúrbios antrópicos nas paisagens litorâneas mediterrâneas. Entre elas, duas comunidades derivadas da espécie *Tortella flavovirens* merecem destaque. Este musgo generalista, tolerante a ampla variação ambiental, atua como espécie fundadora, permitindo o estabelecimento de outras criptógamas, como *Bryum dichotomum* e *Ptychostomum torquescens*.

A aplicação de musgos como bioindicadores em sistemas dunares costeiros permite diagnosticar alterações na dinâmica ecológica e nas pressões antrópicas sobre ecossistemas frágeis. O estudo conduzido por Mir-Rosselló *et al.* (2025) nas Ilhas Baleares identificou cinco comunidades distintas de criptógamas, cuja composição florística reflete diretamente a intensidade de distúrbios ambientais e o grau de conservação dos habitats. Destacam-se duas comunidades derivadas da espécie *Tortella flavovirens*, um musgo generalista que atua como espécie fundadora, facilitando o estabelecimento de táxons com diferentes exigências ecológicas. Essa abordagem evidencia que comunidades criptogâmicas são vistas como sistemas de alerta precoce, capazes de sinalizar mudanças sutis na sucessão das dunas.

Nesse contexto, *Bryum dichotomum* e *Ptychostomum torquescens* emergem como indicadores ecológicos opostos, representando dois extremos nos processos de degradação e de modificação antrópica da paisagem dunar. A dominância de *B. dichotomum* foi associada a áreas degradadas, próximas a trilhas e zonas urbanizadas, caracterizando-se como espécie ruderal altamente resistente à compactação e à eutrofização. Sua presença em abundância denuncia a perda de complexidade ecológica, sendo um marcador de ruderalização intensa. Em contraposição, comunidades centradas em *P. torquescens* foram observadas em dunas estabilizadas artificialmente por revegetação ou barreiras físicas, nas quais o acúmulo de matéria orgânica e o sombreamento favoreceram musgos de crescimento lento, como *Rhytidiadelphus megapolitanum*. Essas associações criptogâmicas indicam interrupção da mobilidade natural das dunas, refletindo um desvio funcional da sucessão ecológica típica desses ambientes (Mir-Rosselló *et al.*, 2025).

A efetividade das criptógamas como bioindicadores ecológicos locais e regionais decorre de sua plasticidade fisiológica e sensibilidade ambiental, características que lhes permitem responder com agilidade a variações microambientais e a perturbações antrópicas. Essa dualidade funcional também se manifesta em biomas extremos, como



demonstrado por De Vargas *et al.* (2025), ao evidenciarem que musgos antárticos cultivados *in vitro* exibem plasticidade de crescimento sob diferentes substratos e restrições ambientais severas. Complementarmente, Nokhsorov; Protopopov (2025) documentaram em criptógamas siberianas a presença de compostos bioativos — como ácidos graxos poli-insaturados e antioxidantes — que promovem resiliência ao congelamento e ao estresse oxidativo. Esses achados corroboram a proposta de Dilrukshi; Rubasinghe (2024), que recomendam o uso sistemático de criptógamas como ferramentas de monitoramento ambiental multiescalar, tanto em ecossistemas perturbados quanto em zonas de fronteira ecológica.

### **Criptógamas: estabilidade evolutiva e resiliência ecológica**

A resiliência fisiológica e a plasticidade adaptativa das criptógamas frente a condições ambientais extremas vêm sendo evidenciadas por diversos estudos recentes. Em ambientes periglaciais, como na Antártica, o cultivo *in vitro* de musgos tem demonstrado potencial para conservação *ex situ*, mesmo sob limitações severas de temperatura e umidade (De Vargas *et al.*, 2025). Já em regiões árticas, Betway-May *et al.* (2025) documentaram a persistência e até o aumento da cobertura de líquens ao longo de três décadas, mesmo com o fechamento gradual do dossel vegetal em tundras do Alasca, indicando estabilidade funcional diante de pressões climáticas. Complementarmente, em ecossistemas de *permafrost* da Sibéria, Nokhsorov; Protopopov (2025) identificaram ácidos graxos poli-insaturados e compostos antioxidantes em líquens e musgos, reforçando a capacidade dessas criptógamas de resistirem ao congelamento e ao estresse oxidativo. Essas evidências convergem ao demonstrar que, mesmo em biomas extremos ou sob mudanças climáticas aceleradas, as criptógamas mantêm funcionalidades ecológicas essenciais, atuando como sentinelas biofisiológicas da integridade ambiental.

Essa capacidade adaptativa também tem sido explorada em estratégias de restauração ecológica, particularmente no uso de *biocrusts* — comunidades compostas por musgos, líquens, cianobactérias e microalgas — como ferramentas para estabilização do solo e promoção da fertilidade superficial. Bowker *et al.* (2025) demonstraram que barreiras biodegradáveis recobertas com musgos podem facilitar o estabelecimento de *biocrusts*, ainda que apresentem limitações no controle de plantas invasoras. Em dunas continentais restauradas, Skubała *et al.* (2025) destacaram o papel das *biocrusts* e da



rizosfera como *hotspots* de atividade microbiana e enriquecimento nutricional, elementos-chave para a sucessão vegetal e a resiliência do solo. Já Franklin *et al.* (2025), em meta-análise conduzida na Austrália, observaram que intervenções como a queima controlada tendem a favorecer o retorno de comunidades criptogâmicas em maior proporção que outras práticas restaurativas. Além disso, De Vargas *et al.* (2025) apontaram avanços no cultivo *in vitro* de musgos antárticos como alternativa promissora para conservação *ex situ* e reintrodução assistida, enquanto Dilrukshi; Rubasinghe (2024) propuseram diretrizes metodológicas para o uso de criptógamas como bioindicadores em intervenções ecológicas. Tais evidências indicam o potencial multifuncional das criptógamas como agentes ativos na bioengenharia da paisagem, associando conhecimento fisiológico e molecular a soluções sustentáveis para cenários de degradação ambiental.

Em contraste ao paradigma tradicional que prevê o declínio das criptógamas diante da expansão de plantas vasculares em ambientes frios — em razão do sombreamento, competição por nutrientes e alteração microclimática —, estudos recentes apontam uma resiliência surpreendente dessas comunidades em tundras árticas. Betway-May *et al.* (2025), ao analisar séries temporais de mais de três décadas no Alasca, observaram que líquens e musgos apresentaram aumento de cobertura, indicando uma capacidade de coexistência mediada por microhabitats específicos. Fendas no solo, sombreamento parcial de gramíneas, retenção hídrica sob arbustos e o abrigo proporcionado pela neve sazonal criam condições favoráveis à manutenção da diversidade criptogâmica. Essa resiliência parece estar intrinsecamente ligada à fisiologia poiquilohídrica dessas plantas, que lhes permite sobreviver a ciclos intensos de congelamento e descongelamento, e ao seu metabolismo fotossintético flexível, adaptado a radiação difusa e temperaturas extremas. Além disso, o principal motor das transformações observadas não foi o aquecimento do verão, mas sim o aumento das temperaturas inverniais, implicando pressões seletivas distintas daquelas registradas em outras regiões do Ártico (Betway-May *et al.*, 2025; Nokhsorov; Protopopov, 2025).

Jacob *et al.* (2025) demonstraram que musgos e líquens são habitat preferencial de microinvertebrados como tardígrados e nematoides, com relações específicas entre espécies vegetais e fauna associada. Em um estudo notável na Dinamarca, Gąsiorek *et al.* (2024) ampliaram de 14 para 55 o número de espécies de tardígrados conhecidas por meio de barcoding genético, sendo a maioria encontrada em





substratos criptogâmicos. A descrição do novo gênero *Parahypsibius* reforça que esses organismos atuam como verdadeiros refúgios evolutivos, capazes de conservar linhagens antigas, especializadas e pouco visíveis nos inventários taxonômicos tradicionais. Ao modular a presença de microfauna adaptada a condições específicas, as criptógamas funcionam como filtros ecológicos e vetores de diversificação, contribuindo para a manutenção da biodiversidade críptica — um componente muitas vezes negligenciado, mas essencial à integridade biológica dos ecossistemas.

A complexidade das interações ecológicas entre criptógamas e microfauna, como demonstrado por Loeffelholz *et al.* (2025) e Gąsiorek *et al.* (2024), evidencia que musgos e líquens atuam como filtros ecológicos e vetores de biodiversidade críptica. Esses organismos refletem padrões de adaptação refinados e de longa duração, modulando a presença de táxons como tardígrados e nematoides em resposta a microvariações ambientais, o que reforça seu papel como bioindicadores locais. No entanto, a relevância das criptógamas ultrapassa a escala microambiental: líquens, em especial, formam simbioses sensíveis a variações climáticas e edáficas, tornando-se marcadores naturais de estabilidade ecológica e de limites biogeográficos. Senko *et al.* (2024), ao investigar líquens saxícolas do gênero *Solenopsora* no Mediterrâneo, demonstraram que seus padrões de ocorrência coincidem com os contornos ecológicos desse bioma, funcionando como indicadores precisos da estabilidade climática e da heterogeneidade ambiental. Da mesma forma, Mir-Rosselló *et al.* (2025) destacaram comunidades criptogâmicas em dunas costeiras como métricas confiáveis para avaliar impactos humanos e efeitos de micro-habitats. Assim, as criptógamas se consolidam como organismos-chave para a identificação de zonas ecotonais, a delimitação de biomas e a interpretação da resiliência dos ecossistemas frente às pressões ambientais contemporâneas.

### 3 Conclusão

As evidências reunidas ao longo desta pesquisa confirmam que as criptógamas, embora representem uma linhagem basal na história evolutiva das plantas, exercem até os dias atuais funções ecológicas de alta complexidade e relevância ambiental. A análise dos dados paleobotânicos, fisiológicos e ecológicos demonstrou que



esses organismos — especialmente musgos e líquens — sustentam uma impressionante continuidade funcional e morfológica, tendo ocupado papéis fundamentais na colonização primária de ambientes terrestres, na formação do solo e na estruturação das primeiras redes ecológicas. Estudos recentes evidenciam sua permanência em nichos ecológicos altamente especializados, tanto em florestas úmidas tropicais quanto em ambientes extremos como tundras árticas, dunas litorâneas ou zonas úmidas efêmeras.

Além de sua resiliência evolutiva, as criptógamas também se destacam como bioindicadores sensíveis a alterações antrópicas e climáticas, refletindo mudanças em escala local e regional com notável precisão. Seus padrões de conservação filogenética, plasticidade ecológica e interações simbióticas com a microfauna, as criptógamas reafirmam sua importância como vetores de estabilidade ecológica e filtros de biodiversidade críptica. Assim, compreendê-las sob a ótica integrada da evolução, da ecologia e da conservação torna-se estratégico para o monitoramento e a recuperação de ecossistemas contemporâneos. A presente pesquisa, ao reunir e analisar os achados mais atualizados da literatura científica, reafirma a relevância das criptógamas como agentes-chave na manutenção da vida vegetal e animal ao longo do tempo profundo até os desafios ambientais do presente.

## Referências

BETWAY-MAY, K. R.; GOULD, W. A.; ELMENDORF, S. C.; MAY, J. L.; HOLLISTER, Robert D.; OBERBAUER, S. F.; BREEN, Amy; CRAIN, Benjamin J.; CUERVO, Ana Maria Sanchez; WALKER, Marilyn D.; WALKER, Donald A. Tundra Plant Canopies Gradually Close Over Three Decades While *Cryptogams* Persist. **Global change biology**, v. 31, n. 4, abr. 2025. DOI: 10.1111/gcb.70155.

BOWKER, M. A.; ANENBERG, J.; ANTONINKA, A.; RAMSEY, P. W.; DURHAM, R. A. Moss-covered biodegradable weed barriers promote *biocrust* establishment but fail to suppress exotic plants. **Restoration Ecology**, v. 33, n. 3, mar. 2025. DOI: 10.1111/rec.14372.

DE VARGAS, M. V. M.; DE ANDRADE, G. A. K.; GOULART, S. N. B.; BERNARDES, B. M.; De CARVALHO V. F. Improving *in vitro* culture conditions for ex-situ conservation of antarctic mosses. **In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant**, 2025. DOI: 10.1007/s11627-025-10541-5.





DICKIE, L. R.; GOSDEN, J. L. Unexpectedly diverse bryophyte and lichen flora found in South Island kettle hole tarns. **New Zealand Journal of Botany**, 2025. DOI:10.1080/0028825X.2025.2454594.

DILRUKSHI, H.A.C.; RUBASINGHE, S.C.K. *Cryptogams* as bio-indicators for ecosystem monitoring in Sri Lanka: a comprehensive review and recommendations. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 196, n. 12, dez. 2024. DOI: 10.1007/s10661-024-13392-6.

EL-SAADAWI, W., NOUR-EL-DEEN, S.; EL-DIN, M. K.; EL-NOAMANI, Z. Annotated catalog of the Egyptian macrofossil plants: An overview of over 200 years of research—*Cryptogamae* and *Phanerogamae*. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 340, set. 2025. DOI: 10.1016/j.revpalbo.2025.105320.

FELDBERG, K. V. B.; KAASALAINEN, U.; MAMONTOV, Y. S.; RADSTEIN, S. R.; SCHÄFER-VERWIMP, A.; DIVAKAR, P. K.; SCHMIDT, A. R. Extending the fossil record of Miocene neotropical epiphyte communities. **Fossil Record**, v. 28, n. 1, p. 79-102, 2025. DOI: 10.3897/fr.28.137758.

FRANKLIN, M. J. M.; GORROD, E. J.; WHITE, L. A.; OLIVER, I.; RYMER, P. D.; NIELSEN, U. N. State of knowledge on the effectiveness of management interventions to restore degraded eucalypt woodlands. **Restoration Ecology**, v.1, n. 1. 2025. DOI: 10.1111/rec.70004.

GANAZHAPA-PLASENCIA, M.; YANGUA-SOLANO, E.; RUIZ, L.; ANDRADE-HIDALGO, R.; BENÍTEZ, Á. Epiphytes as Environmental Bioindicators in Forest Remnants of the Pisaca Reserve: Preserving the Unique Pre-Inca Artificial Wetland of Paltas, Ecuador. **Forests**, v. 16, abr. 2025. DOI: 10.3390/f16040628.

GAŚIOREK, P.; SØRENSEN, M. V.; LILLEMAR, M. R.; LEERHØI, F.; TØTTRUP, A. P. Massive citizen science sampling and integrated taxonomic approach unravel Danish *cryptogam*-dwelling tardigrade fauna. **Frontiers in Zoology**, v. 21, n. 1, dez. 2024. DOI: 10.1186/s12983-024-00547-x.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6.ed. São Paulo: Atlas, 2017. 208 p.

LOEFFELHOLZ, J.; RAYNOR, S.; SÁNCHEZ-MORENO, S.; MOMENI, S.; MANZITTO-TRIPP, E. Tardigrada and Nematoda associations with lichen and bryophyte habitats from Southwest Wisconsin state parks, universities, and private land. **Biogeographia**, v. 40, n. 1, 2025. DOI: 10.21426/B6.40056.

MIR-ROSSELLÓ, P. M.; CERRATO, M. D.; CORTÉS-FERNÁNDEZ, I.; CARDONA, C.; SALOM-VICENS, L.; R.S. A.; SÁEZ, L.; SICILIA, D.; GIL, L. *Cryptogam* communities in Mediterranean coastal dunes as indicators of microhabitat effect and human influence. **Ecological Indicators**, v. 172, mar. 2025. DOI: 10.1016/j.ecolind.2025.113257.



NOKHSOROV, V. V.; PROTOPOPOV, F. F. Composition of fatty acids, essential oils and morphological characteristics of some medial plants growing in permafrost ecosystems. **Acta Biologica Sibirica**, v. 11, p. 91-107.2025. DOI: 10.5281/zenodo.14810032.

SENKO, D.; SVITOK, M.; SLOVÁK, M.; FAČKOVCOVÁ, Z.; PAOLI, L.; KUČERA, J.; MUNZI, S.; BREIDY, J.; DOKMAK, H.; GUTTOVÁ, A. Organisms with high dispersal ability as a proxy for biogeographical characterisation of the Mediterranean biome. **Global Ecology and Conservation**, v. 56, dez. 2024. DOI: 10.1016/j.gecco.2024.e03268.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. 24. ed. rev. e ampl. São Paulo: Cortez, 2013. 315 p.

SKUBAŁA, K.; CHOWANIEC, K.; STANEK, M.; BŁASZKOWSKI, J.; MÓLL, M.; ZUBEK, S. Soil and vegetation drivers of microbial attributes in a microhabitat mosaic at different successional stages after restoration of inland sand dunes. **Applied Soil Ecology**, v. 206, fev. 2025. DOI: 10.1016/j.apsoil.2024.105832.

ZHOU, Z.; FANG, P.; DONG, L.; SUN, Z.; ZUO, Q; W., J.; ZHAO, D. Urban vegetation types and bryophyte diversity: why woodlands matter. **Journal of Forestry Research**, v. 36, n. 1, dez. 2025. DOI: 10.1007/s11676-025-01862-7.