

Viviane Santos | Org.

PESQUISAS EM
**CIÊNCIAS
BIOLÓGICAS**

VOLUME 1

 editora
itacaiúnas

Viviane Corrêa Santos
(Organizadora)

PESQUISAS EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
VOLUME 2

1ª edição

Editora Itacaiúnas
Ananindeua – PA
2024

©2024 por Editora Itacaiúnas
©2024 por diversos autores
Todos os direitos reservados.

1ª edição

Conselho editorial / Colaboradores

Márcia Aparecida da Silva Pimentel – Universidade Federal do Pará, Brasil
José Antônio Herrera – Universidade Federal do Pará, Brasil
Márcio Júnior Benassuly Barros – Universidade Federal do Oeste do Pará, Brasil
Miguel Rodrigues Netto – Universidade do Estado de Mato Grosso, Brasil
Wildoberto Batista Gurgel – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Brasil
André Luiz de Oliveira Brum – Universidade Federal de Rondônia, Brasil
Mário Silva Uacane – Universidade Licungo, Moçambique
Francisco da Silva Costa – Universidade do Minho, Portugal
Ofélia Pérez Montero - Universidad de Oriente – Santiago de Cuba, Cuba

Editora-chefe: Viviane Corrêa Santos – Universidade do Estado do Pará, Brasil
Editor e web designer: Walter Luiz Jardim Rodrigues – Editora Itacaiúnas, Brasil

Edição eletrônica e capa: Walter Rodrigues

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

P474	Pesquisas em ciências biológicas [recurso eletrônico] / organizado por Viviane Corrêa Santos. - 1. ed. – Ananindeua: Itacaiúnas, 2024. (Coleção Pesquisas em Ciências Biológicas, v.1) ISBN: 978-85-9535-265-0 (e-book) DOI: 10.36599/itac-978-85-9535-265-0 1. Biologia. 2. Ciências da vida. I. Corrêa Santos, Viviane. II. Título. CDD 570 CDU: 57
------	---

Índice para catálogo sistemático:

1. Ciências da vida, biologia: 570
2. Ciências biológicas geral: 57

E-book publicado no formato PDF (*Portable Document Format*). Utilize software [Adobe Reader](#) para uma melhor experiência de navegabilidade nessa obra.

Todo o conteúdo apresentado neste livro é de responsabilidade do(s) autor(es). Esta publicação está licenciada sob [CC BY-NC-ND 4.0](#)

Esta obra foi publicada pela **Editora Itacaiúnas** em junho de 2024.



SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	6
CAPÍTULO 1	
ECOS DA NATUREZA: A JORNADA DA SUCESSÃO ECOLÓGICA.....	7
CAPÍTULO 2	
DESVENDANDO A BIODIVERSIDADE: PADRÕES GLOBAIS, PROCESSOS BIOGEOGRÁFICOS E MACROECOLÓGICOS	14
CAPÍTULO 3	
RECONSTITUINDO A NATUREZA: RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA NO ANTROPOCENO.....	20
CAPÍTULO 4	
TRAMAS NATURAIS: INTERAÇÕES PLANTA-ANIMAL E A TEIA DA VIDA	27

Apresentação

É com grande satisfação que apresentamos a coleção “Pesquisas em Ciências Biológicas”, uma compilação de estudos e reflexões que refletem o compromisso contínuo da comunidade científica com a compreensão e preservação do mundo natural.

Nesta coleção, mergulhamos em uma variedade de temas que abrangem desde os processos fundamentais que sustentam a vida em nosso planeta até as complexas interações entre os organismos que habitam os ecossistemas. Cada contribuição para esta coleção representa um avanço no conhecimento científico, oferecendo novas perspectivas e descobertas que ampliam nossa compreensão da biologia e suas aplicações práticas.

Ao compartilhar essas pesquisas, esperamos não apenas enriquecer o diálogo acadêmico, mas também inspirar ações concretas para a conservação da biodiversidade e a promoção da sustentabilidade ambiental. Esta coleção é um testemunho do poder da colaboração e do compromisso da comunidade científica em enfrentar os desafios urgentes que enfrentamos em relação ao meio ambiente e à saúde do nosso planeta.

Que esses estudos sirvam como uma fonte de inspiração e orientação para futuras pesquisas, capacitando-nos a construir um futuro mais sustentável e equilibrado para todas as formas de vida em nosso planeta.

Walter Rodrigues
Editor de publicações da Editora Itacaiúnas.

Viviane Santos
Organizadora.



Capítulo 1

ECOS DA NATUREZA: A JORNADA DA SUCESSÃO ECOLÓGICA

DOI: 10.36599/itac-978-85-9535-265-0_001

Luiza Fonseca Amorim de Paula¹

¹ Departamento de Genética, Ecologia e Evolução, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil



Resumo

O ensaio explora a sucessão ecológica, que é a mudança na composição e estrutura das comunidades vegetais ao longo do tempo. Aborda conceitos teóricos, como as visões de Clements e Gleason, e discute os tipos de perturbações que iniciam a sucessão, como fogo e tempestades, e as categorias de sucessão primária e secundária. Analisa métodos de estudo, incluindo cronossequências e dendrocronologia, e examina mecanismos como facilitação, inibição e tolerância. Destaca ainda a importância de se compreender e investigar a sucessão ecológica, visando especialmente restaurar ecossistemas degradados e manejar áreas naturais.

1. Introdução

A mudança direcional na composição e estrutura da comunidade ao longo do tempo é chamada de sucessão ecológica. Neste ensaio, explorarei os principais conceitos teóricos relacionados à sucessão ecológica, especialmente no que diz respeito aos seus padrões e processos em comunidades vegetais. Também abordarei uma série de outros aspectos de comunidades: a sua continuidade no tempo, previsibilidade e se elas atingem o equilíbrio. Discutirei também a importância prática de se compreender melhor a sucessão ecológica, visando à restauração, conservação e o manejo das comunidades vegetais.

2. Fundamentos da Sucessão Ecológica

A sucessão ecológica é um fenômeno natural que ocorre em diferentes escalas de tempo e em uma variedade de ambientes. A sucessão começa quando uma perturbação – um evento que remove parte ou toda a comunidade – é seguida por colonização e rebrota de plantas em um sítio perturbado (Gurevitch et al. 2009). As discussões a respeito das causas e da natureza do processo sucessional são parte do debate sobre a natureza das comunidades.

Existem duas visões extremas sobre a natureza das comunidades e da sucessão, conhecidas na literatura como o embate de Clements-Gleason. Na visão de Clements (1916), as comunidades eram consideradas como entidades bastante organizadas constituídas por espécies mutuamente interdependentes. Para ele, as comunidades são superorganismos, que nascem, crescem e finalmente morrem. Nessa visão, a trajetória da sucessão e seu ponto final são altamente previsíveis. Na visão alternativa de Gleason (1917, 1927), comunidades resultavam de interações entre espécies e o meio ambiente (fatores bióticos e abióticos) em combinação com eventos históricos ao acaso. Cada espécie tem tolerâncias peculiares, e, assim, responde às condições ambientais à sua própria maneira. Dentro da amplitude de condições ambientais que uma espécie pode tolerar, eventos ao acaso determinam quando uma espécie é encontrada em um dado local. Hoje, o consenso em vigor encontra-se entre essas duas visões. Eventos determinísticos e casuais, processos bióticos e abióticos, todos são considerados importantes com relação



à natureza das comunidades e da sucessão ecológica (Staude et al. 2023). Contudo, apesar da dicotomia Clementes-Gleson ser importante de ser mencionada, ela não responde muitas outras questões que atualmente consideramos relevantes para a compreensão da sucessão. Nenhuma dessas duas visões abordou profundamente o papel da competição e da herbivoria na determinação da estrutura e função das comunidades vegetais, e até os tempos atuais esses aspectos ainda levantam muitos questionamentos.

A maior parte dos ecólogos atuais pensa que os tipos diferentes de perturbações desempenham um papel crucial na ecologia de comunidades (Ogwayo 2023), o que antigamente ainda era muito debatido. Perturbação é um evento relativamente descontínuo no tempo, que causa mudanças abruptas na estrutura de ecossistemas, comunidades ou populações e mudanças na disponibilidade de recursos. Exemplos de fontes de perturbações são: fogo, tempestades, terremotos, erupções vulcânicas, enchentes, atividades animais, doenças e atividades antrópicas. Perturbações são características normais de todos os ecossistemas, e hoje é discutido o regime de perturbação, ou seja, a intensidade, tamanho e frequência de determinado distúrbio.

Existem duas categorias principais de perturbação, aquelas que removem completamente a comunidade, incluindo todo o solo orgânico, e aquelas que não removem completamente a comunidade. Essas duas categorias de perturbação levam a duas categorias de sucessão. A sucessão primária ocorre quando plantas colonizam uma superfície que não tinha sido previamente vegetada. Entre os exemplos estão o estabelecimento de comunidades vegetais sobre campos de lava, minas devastadas, dunas de areias, praias recém-formadas e afloramentos rochosos. Típicos colonizadores na sucessão primária são líquens e musgos, que formam as chamadas crostas criptogâmicas, que geralmente são muito resistentes a condições extremas de temperatura e falta de solo. Na sucessão primária, os solos precisam ser formados, o que ocorre à medida que a comunidade de plantas e a biota associada se desenvolve. A sucessão secundária ocorre quando plantas colonizam uma superfície previamente ocupada por uma comunidade. O solo já existe, e os propágulos vegetais (sementes e rametas) estão disponíveis. Entre os exemplos, estão o desenvolvimento florestal após uma queimada e a colonização de uma área agrícola abandonada.

3. Métodos e Compreensão da Sucessão

As mudanças nos métodos para estudar a sucessão têm alterado a nossa compreensão do processo, e vice-versa. É um desafio estudar a sucessão porque o processo é lento, e pode levar décadas ou séculos, dependendo do ecossistema estudado. Portanto, é difícil acompanhar o processo inteiro. Um método para estudar a sucessão é a cronosequência, introduzido e popularizado por Cowles (1899). Esse método consiste em acompanhar um conjunto de comunidades em diferentes idades desde uma perturbação. Os defensores desse método assumem que diferenças entre essas comunidades representariam o que ocorreria dentro de uma comunidade ao longo do tempo. As principais críticas a esse método é que a sucessão é considerada como



altamente previsível, já que se espera que todas as comunidades similares passarão pela mesma sequência sucessional. Outras críticas estão no fato do método desconsiderar as mudanças no clima e outros aspectos ambientais durante a cronossequência. Além disso, existem debates se é coreto assumir, a priori, que comunidades em uma mesma macrorregião são suficientemente similares para serem consideradas parte de uma mesma sequência sucessional.

Métodos alternativos surgiram, como os estudos de longa duração. A princípio, eles eram mais observacionais, com o passar do tempo, os ecólogos passaram a realizar diferentes tratamentos experimentais em comunidades e o estudo de suas respostas, para entender melhor os processos sucessionais. Projetos bem conhecidos fazem parte do Pesquisas Ecológicas de Longa Duração (PELD), realizados tanto no exterior como no Brasil. Tipos de manipulação experimentais utilizadas nesses locais consistem em, por exemplo, fertilização de parcelas com diferentes níveis de nitrogênio, criação de parcelas de tamanhos diferentes e estabelecimento de parcelas com conjuntos diferentes de espécies. Um terceiro método usado para reconstruir história de comunidades é a dendrocronologia, que estuda os anéis de crescimento de espécies arbóreas. Esse método é interessante porque dá para estudar sucessão ao longo dos séculos, que é uma limitação dos outros métodos citados. Para árvores de clima temperado, os anéis de crescimento são anuais, o que possibilita estimar suas idades, e, conseqüentemente, estimar quando as espécies começaram a se estabelecer em determinado local. Para espécies de climas tropicais, em que os anéis não são anuais, existem limitações para esse método.

4. Mecanismos e Fases da Sucessão Ecológica

À medida que os métodos para se estudar a ecologia da secessão vão se desenvolvendo, ecólogos vêm desvendando padrões sucessionais e processos responsáveis por eles. Connel e Slatyer (1977) propuseram três mecanismos possíveis pelos quais pode ocorrer a sucessão, e que provavelmente interagem entre si: facilitação, inibição e tolerância. A facilitação ocorre quando espécies sucessionais iniciais criam condições favoráveis para a colonização e estabelecimento de espécies de estágio intermediário e tardio. Esse processo pode ser visto em afloramentos rochosos e restingas, quando espécies tolerantes ao estresse, como cactos e bromélias, começam a formar tapetes sobre a rocha ou areia, e posteriormente servem de substrato para outras espécies. A inibição envolve a supressão competitiva entre diferentes espécies, o que pode direcionar a sucessão. Por exemplo, uma espécie sucessional inicial pode monopolizar os recursos (água, luz, nutrientes) e inibir as espécies tardias. Ao longo do tempo, as tardias, que são adaptadas a estágios mais avançados da sucessão (ex. adaptações a ambientes mais sombreados), eliminariam as iniciais por competição. Por sua vez, a tolerância sugere que uma sequência previsível é produzida pela existência de espécies que desenvolveram estratégias diferentes para explorar recursos. Assim, espécies residentes seriam aquelas com capacidade de tolerar mudanças ambientais que nenhuma outra espécie é capaz de tolerar. Outro cenário alternativo para a sucessão foi descrito por Egler (1954), que descreveu a combinação florística inicial. Essa visão enfatiza o processo de



colonização e as diferenças no ciclo de vida das espécies. A sucessão seria, assim, um processo de desdobramento das diversas histórias de vida que se sucedem em taxas diferentes.

Muitos ecólogos defendiam diferentes fases da sucessão, em que a fase clímax seria a etapa final, marcada por um ecossistema maduro e estável, com uma comunidade biológica equilibrada e autossustentável. Essa hipótese, que considera um ponto final estático e determinístico para a sucessão, é muito debatida, e existe a tendência de uma mudança conceitual a respeito desse tema. A maior parte dos ecólogos, hoje em dia, reconhece que as comunidades e paisagens nunca atingem um estado constante e imutável (Gurevitch 2009). Além disso, o entendimento contemporâneo do clímax considera que diferentes fatores, como interações bióticas, eventos climáticos e diferentes perturbações, podem moldar a composição e a estrutura das comunidades vegetais. Assim, as comunidades vegetais podem estar em estados de equilíbrio dinâmico, respondendo continuamente às variações nas condições ambientais. As mudanças climáticas, a introdução ou evolução de novas espécies, as transformações geomorfológicas, a formação de montanhas e os movimentos continentais indicam que o mundo está sempre em fluxo.

5. Aplicações Práticas da Sucessão Ecológica

5.1. Restauração de Ecossistemas Degradados

Compreender os processos de sucessão ecológica é fundamental para orientar práticas de restauração de ecossistemas degradados. Entender como as comunidades biológicas se desenvolvem ao longo do tempo permite que os gestores ambientais implementem práticas que acelerem o processo de recuperação. Além disso, conhecer os padrões e processos de sucessão são essenciais para a escolha das espécies a serem selecionadas durante, por exemplo, estágios sucessionais iniciais e tardios. A previsibilidade da sucessão é particularmente importante para ecólogos e restauradores que tentam recuperar comunidades, o que é um desafio, já que sabemos que em muitos casos, as trajetórias ecológicas podem ser imprevisíveis (Rodrigues 2013). Por isso, conhecer as possíveis trajetórias sucessionais, manejos adaptativos e ações corretivas é extremamente importante para a restauração de ecossistemas degradados.

5.2. Manejo Sustentável de Áreas Naturais e Conservação da Biodiversidade

Ao compreender os padrões de sucessão ecológica, é possível também desenvolver estratégias de conservação e manejo sustentável para áreas naturais. Isso inclui a definição de políticas de uso da terra, que levem em consideração as fases de sucessão ecológica e promovam a coexistência harmoniosa entre atividades humanas e processos naturais. Um exemplo clássico do avanço do conhecimento sobre novas estratégias de manejo foi em relação ao importante papel do fogo na estruturação e composição de comunidades vegetais. Antigamente, o fogo era visto como um fator



negativo, hoje ele é compreendido como fator natural e necessário em alguns ecossistemas. Por exemplo, em áreas de Cerrado ou campos rupestres, o fogo é um elemento - chave e uma das principais fontes de perturbação (Le Stradic et al. 2015). As espécies desses ambientes têm adaptações ao fogo: quebra de dormência de sementes após queimadas (ex. espécies de Cyperaceae), estimulação da floração pós-fogo, meristemas protegidos (localizados na superfície ou abaixo do solo, ex. em gramíneas), resinas inflamáveis (o que garante que o fogo passe bem rápido e permita que os tecidos meristemáticos protegidos permaneçam vivos, ex. espécies de Velloziaceae).

Caso essas comunidades não tenham um regime de fogo adequado e não houver manejo, na ausência do fogo pode haver aumento substancial da carga de combustível, e quando a queimada acontece ela pode ser muito intensa e dizimar boa parte da comunidade. A mudança do regime de fogo pode também afetar a reprodução das espécies, visto que germinação e floração são influenciadas, o que pode levar às alterações na composição e estrutura das comunidades. Dito isso, sabendo que o regime de fogo é parte natural das comunidades, o manejo do fogo nessas áreas é extremamente importante para a conservação da sua biota. A proteção de áreas naturais e a promoção de práticas agrícolas sustentáveis baseadas na compreensão dos processos de sucessão contribuem para a preservação de espécies e ecossistemas a longo prazo.

6. Desafios e Perspectivas Futuras

Atividades humanas, como desmatamento, urbanização e poluição, podem interferir nos processos naturais de sucessão ecológica. Isso pode levar à perda de biodiversidade, degradação do solo e desequilíbrios nos ecossistemas, exigindo intervenções específicas para restauração e conservação. As mudanças climáticas representam um desafio adicional. Alterações nos padrões de temperatura, precipitação e eventos extremos podem influenciar a dinâmica das comunidades biológicas, levando a diversos impactos na biota. Para enfrentar esses desafios, é crucial investir em pesquisa contínua e educação ambiental.

A sucessão ecológica, da teoria à prática, desempenha um papel vital na construção e manutenção de comunidades biodiversas e resilientes. Ao compreender os fundamentos, os mecanismos e as fases desse fenômeno, podemos aplicar esse conhecimento de maneira prática para promover a conservação da biodiversidade, a restauração de ecossistemas degradados e o manejo sustentável de áreas naturais.

7. Referências

Clements, F. E. (1916). *Plant succession. An analysis of the development of vegetation.* Carnegie Inst. Washington Publ. 242. Washington, D. C.

Connell, J. H. & Slatyer, R. O. (1977). Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization. *The american naturalist*, 111: 1119-1144.



Cowles, H.C. (1899). The ecological relations of the vegetation on the sand dunes of Lake Michigan: part I—geographical relations of the dune floras. *Botanical Gazette* 27: 95–117.

Gleason, H. A. (1917). The structure and development of the plant association. *Bull. Torrey Club* 44: 463-481.

Gleason, H. A. (1927). Further views on the succession-concept. *Ecology* 8: 299-326.

Gurevitch, J., Scheiner, S.M., Fox, G.A. (2009). *Ecologia Vegetal*. Ed. Artmed, São Paulo.

Le Stradic, S., Silveira, F. A., Buisson, E., Cazelles, K., Carvalho, V., & Fernandes, G. W. (2015). Diversity of germination strategies and seed dormancy in herbaceous species of campo rupestre grasslands. *Austral Ecology* 40: 537-546.

Ogwayo, E. (2023). Ecological Succession in Post-Fire Forests. *European Journal of Natural Sciences* 1: 13-24.

Rodrigues, E. (2013). *Ecologia da Restauração*. Ed. Planta. Londrina. p.300.

Stauder, I. R., Weigelt, A., & Wirth, C. (2023). Biodiversity change in light of succession theory. *Oikos* 11: e09883.



Capítulo 2

DESVENDANDO A BIODIVERSIDADE: PADRÕES GLOBAIS, PROCESSOS BIOGEOGRÁFICOS E MACROECOLÓGICOS

DOI: 10.36599/itac-978-85-9535-265-0_002

Luiza Fonseca Amorim de Paula²

² Departamento de Genética, Ecologia e Evolução, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil



Resumo

A biodiversidade é distribuída de forma heterogênea pelo planeta, e entender as razões dessas variações é um desafio central para ecólogos e biogeógrafos. Este ensaio resume temas fundamentais da biogeografia e macroecologia, destacando os gradientes latitudinal e altitudinal na riqueza de espécies. Explora também os processos biogeográficos de dispersão e vicariância, que são cruciais para a distribuição das espécies, e aborda questões atuais na biogeografia histórica. Diante das crises climáticas e da perda de biodiversidade, esses estudos são essenciais para prever como as espécies responderão às mudanças ambientais futuras.

2. Introdução

A biodiversidade está distribuída de forma heterogênea pela Terra. Algumas áreas apresentam alta diversidade biológica (por exemplo, algumas florestas tropicais úmidas e recifes de coral), enquanto outras são quase desprovidas de vida (por exemplo, alguns desertos e regiões polares). Determinar o porquê dessas diferenças ocorrem tem sido um objetivo central para ecólogos e biogeógrafos. Neste ensaio, apresento um resumo de temas centrais discutidos dentro do campo da biogeografia e macroecologia.

2. O Gradiente Latitudinal

O gradiente latitudinal na riqueza de espécies é um dos padrões mais consistentes na biogeografia e macroecologia, mas há pouco consenso sobre a importância relativa dos processos que o geram. A diversidade vegetal, tal como a da maioria dos outros grupos taxonômicos, atinge o seu pico nos trópicos, onde as condições climáticas são quentes e úmidas, e diminui em direção às zonas temperadas e polares à medida que as condições se tornam mais frias e secas, com temperaturas mais variáveis sazonalmente. Várias hipóteses tentaram explicar o gradiente de diversidade latitudinal, duas delas são bastante testadas. A hipótese “Out of the Tropics” assume que os clados de importantes grupos de plantas e animais se originam preferencialmente nos trópicos, mas se expandem em direção aos pólos (evolução de nicho) sem perder sua presença tropical (Jablonski et al. 2006). Os trópicos são, portanto, um berço e um museu (tem linhagens antigas) de biodiversidade. A hipótese “Tropical Conservatism Hypothesis” postula que (1) a maioria dos grupos se originou nos trópicos e é especializada em um regime climático tropical, (2) a maioria das espécies e clados não conseguiram se dispersar para fora dos trópicos (devido ao conservadorismo de nicho) e (3) o maior tempo e área disponível para especiação nos trópicos levou a uma maior riqueza de espécies nos trópicos para a maioria dos táxons (Wiens & Donoghue 2004). Pesquisas anteriores sobre padrões de riqueza de espécies através de gradientes climáticos já apoiaram e refutaram essas hipóteses. Testar a validade dessas hipóteses em um contexto evolutivo é um desafio, já que requer dados em larga escala sobre a distribuição geográfica e as relações filogenéticas de múltiplas linhagens ao longo de gradientes ambientais. Até hoje trata-se ainda de um dos grandes



temas de investigação contemporâneo da biogeografia e da macroecologia (Diniz-Filho 2023).

3. O Gradiente Altitudinal

Outro padrão global explorado, de variação espacial na biodiversidade, é o gradiente altitudinal. Durante décadas, a visão predominante foi a de que as condições físicas e ambientais mudam com a altitude, da mesma forma que mudam com o aumento da latitude. Como os gradientes de riqueza de espécies eram frequentemente explicados pela temperatura, e a temperatura média diminui com a elevação, sugeriu-se que o gradiente de riqueza de espécies em altitude deveria ser apenas um espelho do gradiente latitudinal, com diminuição da riqueza das terras baixas em direção a altitudes elevadas, refletindo a diminuição da riqueza das latitudes baixas para as altas. No entanto, dados empíricos têm mostrado que o gradiente altitudinal da riqueza de espécies pode assumir muitas formas, e nem sempre segue o mesmo padrão do gradiente latitudinal. Uma tendência relacionada à distribuição das espécies ao longo de gradientes altitudinais é a relação positiva entre a média da amplitude de distribuição altitudinal das espécies e a altitude, que é conhecida como o efeito Rapoport, cunhado por Stevens (1992). Contudo, o padrão encontrado para a distribuição de vários grupos taxonômicos não parece seguir esse modelo. Assim como o gradiente latitudinal, o gradiente altitudinal também segue sendo investigado, e grandes questionamentos ainda intrigam os biogeógrafos, por exemplo, as hipóteses atuais para padrões geográficos de diversidade de espécies em grande escala não conseguem explicar a biodiversidade extraordinariamente elevada das regiões montanhosas, particularmente nos trópicos (Rahbek et al. 2019).

4. Relação Espécies-Área

A relação espécies-área é outro padrão comumente investigado na biologia. Um momento marcante na história da biogeografia e da ecologia de forma geral foi a publicação da Teoria de Biogeografia de Ilhas (TBI), desenvolvida por MacArthur e Wilson (1967). Nela, propuseram um modelo mecanicista simples para descrever os padrões de riqueza de espécies observados nas ilhas, e levantaram a hipótese de que a riqueza de espécies nas ilhas é moldada por um equilíbrio dinâmico de colonização e extinção dependendo do tamanho e isolamento da ilha. Ilhas maiores e menos isoladas abrigariam mais espécies do que ilhas menores ou mais isoladas. Atualmente a teoria é aplicada não apenas para ilhas oceânicas, mas também em referência a qualquer habitat que esteja isolado ecologicamente, como por exemplo lagos isolados por terra e picos de montanhas. A TBI tem sido muito aplicada para estudar o efeito da fragmentação de habitats e, assim, embasar as decisões sobre a necessidade de implantação de corredores ecológicos. Desde sua publicação, a TBI vem sendo ampliada, para incluir, por exemplo, abordagens funcionais e filogenéticas.



5. Dispersão e Vicariância: Processos Biogeográficos na Distribuição de Espécies

Dois processos biogeográficos alternativos foram propostos para se compreender a origem e distribuição das espécies, e são bem explicados em Sanmartín (2012). O primeiro é a dispersão, onde o ancestral do grupo foi originalmente distribuído em uma das áreas, o “centro de origem”, de onde se dispersou para as outras áreas cruzando uma barreira geográfica (por exemplo, as bacias oceânicas do Hemisfério Sul). O grupo que migra, ao longo do tempo, se diferencia da população original. Vários mecanismos podem induzir a dispersão dos organismos, como as pressões intrapopulacionais, modificações ambientais, ou o acaso. O outro processo é a vicariância, onde o grupo ancestral distribuía-se por uma área ampla, abrangendo então toda a sua distribuição atual, que se tornou fragmentada por sucessivas barreiras geográficas (ex. soerguimento de montanhas, deriva continental). As barreiras têm um importante papel na diferenciação entre as espécies, pois o isolamento geográfico é um dos mecanismos responsáveis pela especiação (especiação alopátrica). O melhor exemplo é a dissolução do antigo supercontinente de Gondwana, que tem sido frequentemente argumentado para explicar padrões de distribuição disjunta austral. Na explicação da dispersão, a barreira antecede a disjunção geográfica, enquanto na explicação vicariante, o aparecimento da barreira provoca a divisão geográfica, pelo que deve ter a mesma idade do evento de especiação alopátrica resultante. A extinção também é um processo reconhecido na biogeografia histórica. Ela tem o potencial de obscurecer padrões biogeográficos porque biotas podem parecer diferentes simplesmente porque uma região sofreu extinção diferencial. Os mecanismos para explicá-la geralmente não preocupam os biogeógrafos porque não forma padrões; no entanto, devemos estar cientes da relevância potencial da extinção nos estudos biogeográficos.

6. Biogeografia Cladística: Reconstruindo a História Biogeográfica de Linhagens

A biogeografia cladística representou um enorme avanço para a biogeografia histórica, porque, pela primeira vez, surgiu um quadro analítico para reconstruir a história biogeográfica de linhagens e biotas (Sanmartín 2012). Na biogeografia cladística, supõem-se que os táxons que compartilham padrões filogenéticos e de distribuição semelhantes compartilham uma história biogeográfica comum; isto é, fazem parte da mesma biota ancestral que foi dividida por eventos de isolamento vicariantes (geológicos ou climáticos). A dispersão e a extinção são processos invocadas principalmente para explicar a discordância entre os cladogramas.

7. Modelagem de Nicho Ecológico: Integração de Processos Ecológicos e Biogeográficos

A integração de processos ecológicos na reconstrução de cenários biogeográficos tem sido um objetivo de longo prazo na biogeografia histórica. Isso tornou-se possível através do desenvolvimento de técnicas de modelagem de nicho ecológico. De acordo com o conceito de conservadorismo de nicho (Wiens 2004; Wiens & Donoghue 2004), as



linhagens tendem a conservar o seu nicho ecológico ao longo do tempo, ou seja, o conjunto de condições ambientais nas quais as linhagens podem reproduzir e manter populações viáveis. As modelagens de nicho ecológico utilizam a associação entre dados de distribuição (ocorrências de espécies) e variáveis ambientais (por exemplo, temperatura, precipitação) para prever a faixa dentro da qual uma espécie pode ocorrer. Assumindo que os nichos são preservados ao longo do tempo (“conservadorismo de nicho”), e tendo em conta informações sobre climas passados, pode-se projetar o nicho ecológico para diferentes pontos no tempo para reconstruir padrões passados de distribuição de espécies, ou para encontrar áreas que no passado estavam dentro da tolerância ambiental da espécie e poderiam ter funcionado como corredores de dispersão através de regiões que são agora inabitáveis.

8. Conclusão

Hoje em dia, os biogeógrafos e macroecólogos têm um novo e excitante conjunto de ferramentas para abordar questões evolutivas, impulsionado pelo advento dos estudos filogenéticos e pelo desenvolvimento de novos métodos capazes de integrar múltiplas fontes de evidências em suas inferências, por exemplo, os tempos de divergência de linhagens, informações paleogeográficas e paleoclimáticas e nicho ecológico das linhagens. As atuais crises climáticas e de perda de biodiversidade, e a necessidade urgente de decidir o que preservar, levaram a uma nova onda de interesse em estudos biogeográficos e macroecológicos, que tentam compreender a origem evolutiva das linhagens e a montagem histórica das biotas. Somente compreendendo como e onde as linhagens se diversificaram, poderemos inferir como irão responder às futuras mudanças climáticas e de habitat.

9. Referências

Diniz-Filho, J. A. F. (2023). *The Macroecological Perspective: Theories, Models and Methods*. Springer Nature.

Jablonski, D., Roy, K., & Valentine, J. W. (2006). Out of the tropics: evolutionary dynamics of the latitudinal diversity gradient. *Science* 314: 102-106.

MacArthur, R. H. & Wilson, E. O. (1967). *The Theory of Island Biogeography*. Princeton, N.J.: Princeton University Press, 203 p.

Rahbek, C., Borregaard, M. K., Colwell, R. K., Dalsgaard, B. O., Holt, B. G., Morueta-Holme, N., Nogues-Bravo, D., Whittaker, R.J., Fjeldså, J. (2019). Humboldt’s enigma: What causes global patterns of mountain biodiversity?. *Science* 365: 1108-1113.

Sanmartín, I. (2012). Historical biogeography: evolution in time and space. *Evolution: Education and Outreach* 5: 555-568.



Stevens, G. C. (1992). The elevational gradient in altitudinal range: an extension of Rapoport's latitudinal rule to altitude. *The American Naturalist* 140: 893-911.

Wiens, J. J., & Donoghue, M. J. (2004). Historical biogeography, ecology and species richness. *Trends in Ecology & Evolution* 19: 639-644.



Capítulo 3

RECONSTITUINDO A NATUREZA: RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA NO ANTROPOCENO

DOI: 10.36599/itac-978-85-9535-265-0_003

Luiza Fonseca Amorim de Paula³

³ Departamento de Genética, Ecologia e Evolução, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil



Resumo

Este ensaio aborda a restauração ecológica, uma ferramenta vital para reverter danos antropogênicos no Antropoceno. Explora conceitos fundamentais, como restauração passiva e ativa, ecossistemas de referência, trajetória ecológica e parâmetros. Discute os objetivos da restauração, incluindo retorno à condição original, ao entorno, e criação de neo-ecossistemas. Destaca a importância da preparação do terreno, envolvendo restauração física e química, e a montagem de ecossistemas, com foco na sucessão ecológica e escolha de espécies. Além disso, aborda a necessidade de monitoramento contínuo para avaliar o sucesso da restauração e a importância de considerar aspectos socioeconômicos, envolvendo comunidades locais. Conclui destacando a importância de implementar a legislação vigente e promover a colaboração entre diversos atores para alcançar ecossistemas sustentáveis e resilientes.

1. Introdução à Restauração Ecológica

A restauração ecológica emerge como uma ferramenta vital no Antropoceno, desempenhando um papel significativo na reversão dos danos causados pelas atividades antropogênicas. A Ecologia da Restauração é uma ciência ampla, que abrange todo e qualquer sistema natural, desde recife de corais até florestas tropicais e temperadas. Recentemente, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente declarou 2021–2030 como a “Década das Nações Unidas para a Restauração de Ecossistemas” (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente 2019), e visa intensificar massivamente a restauração ecológica para mitigar as alterações climáticas, sustentar a biodiversidade, garantir alimentos, e fornecer recursos essenciais às populações humanas. Neste ensaio, irei abordar, de forma geral, conceitos fundamentais relacionados à ecologia da restauração, usando de referência a cartilha da *Society for Ecological Restoration* (SER, 2004), o livro *Ecologia da Restauração*, de Rodrigues (2013), e o livro *Restauração Florestal*, de Brancalion, Gandolfi e Rodrigues (2015). Além disso, abordarei teorias e práticas no contexto da restauração ecológica, seus desafios e perspectivas futuras. Nos exemplos, foco será dado à restauração florestal, e, especialmente, aos projetos desenvolvidos na Mata Atlântica.

2. Conceitos Fundamentais

A definição de restauração ecológica vigente adotada na cartilha da SER (2004) é bem genérica: “é o processo de auxiliar a recuperação de um ecossistema que foi degradado, danificado ou destruído”. Frequentemente, é comum encontrar na literatura os termos restauração passiva e ativa. Na restauração passiva, apesar do homem geralmente influenciar o processo ao isolar a área a ser restaurada ou ao eliminar o fator responsável pelo distúrbio, não existem outras influências diretas e quem opera é o processo de regeneração natural. Já a restauração ativa, também conhecida como assistida, é fundamentada nas ações de restauração promovidas pelo homem, na maioria das vezes com a intenção de conduzir, direcionar e favorecer o processo de sucessão ecológica em áreas e paisagens degradadas.



Outros conceitos importantes referem-se aos ecossistemas de referência, trajetória ecológica e parâmetros. O ecossistema de referência serve como modelo para o planejamento de um projeto de restauração e posteriormente para o monitoramento do sucesso da restauração. Por exemplo, após o rompimento da barragem de Brumadinho/MG, fragmentos de Mata Atlântica, com fitofisionomias de Floresta Estacional Semi-Decidual (FES), foram degradados. O projeto atual de restauração da área objetiva aproximá-la do seu estado original, portanto, outras áreas de FES que estão próximas e em bom estado de conservação, especialmente da mesma bacia hidrográfica (bacia do Paraopeba), estão sendo tomadas como ecossistemas de referência. A trajetória ecológica já é um termo utilizado para descrever o caminho de desenvolvimento de um ecossistema através do tempo. Usando o mesmo exemplo citado anteriormente, a área de FES a ser restaurada terá sua trajetória ecológica acompanhada pelos restauradores, para avaliar se seu desenvolvimento está se aproximando do ecossistema de referência. Por fim, os parâmetros (ou também chamados de atributos) determinam e demonstram se a trajetória está adequada, se o ecossistema a ser restaurado está na direção do objetivo pretendido. São exemplos de parâmetros: diversidade e estrutura da comunidade similares aos locais de referência, presença de espécies nativas, cobertura de dossel, mortalidade, recrutamento, presença de grupos funcionais necessários para a estabilidade a longo prazo, entre outros.

3. Objetivos da Restauração

Apesar de existirem objetivos de restauração muito variados, citarei três ideias principais de restauração: 1) retorno à condição original, 2) retorno ao entorno, 3) criação de novos contextos ecológicos (neo-ecossistemas). No primeiro caso, um dos maiores desafios é conseguir informações de como era a condição original da área degradada: parecia ao entorno? Já tinha algum sinal de degradação? A condição original almejada seria para o estado antes da degradação, antes da colonização ou antes da chegada do homem? No segundo caso, a lógica é seguir o ecossistema de referência, que esteja no entorno da área degradada. Alguns restauradores indicam a adoção de mais de um ecossistema de referência, para haver mais variedade de modelos. No terceiro caso, novos ecossistemas são criados, que são chamados de neo-ecossistemas ou paisagens culturais. Essa terceira opção geralmente é objetivada quando não é possível voltar na condição original porque elementos-chave foram eliminados, por exemplo, em regiões onde a megafauna foi extinta no Novo Mundo. Isso ocorrem também em paisagens culturais, ou seja, em locais utilizados há muito tempo por modos de vida tradicionais e sustentáveis. Em ambos os casos, a restauração ecológica foca na criação de novos ecossistemas.

4. Preparação do Terreno: Restauração Física e Química

Antes da restauração biológica, é importante considerar se será necessário a restauração física da área, que na maioria das vezes está entre as primeiras medidas a serem tomadas. Em muitos casos, as áreas oferecem riscos imediatos de, por exemplo, desmoronamento, e precisam ser corrigidas, em outras situações o meio não possui



características físicas adequadas para espécies se desenvolverem. Mecanismos fundamentais a serem considerados durante a restauração física são aqueles relacionados à estabilidade do solo, retenção e dispersão da água. Muitas áreas também precisam de restauração química, quando houve contaminação ambiental ou esgotamento da fertilidade do solo. Nesses casos, metodologias específicas são necessárias para o tratamento químico do meio (ex. biorremediação) ou para aumentar o aporte de nutrientes (ex. adição de fertilizantes, uso de espécies de leguminosas fixadoras de nitrogênio).

5. Montagem de Ecossistemas: Sucessão Ecológica e Escolha de Espécies

A restauração biológica, por sua vez, exige conhecimentos de montagem de ecossistemas e de sucessão ecológica. Esse é um ponto de grande desafio para o restaurador, que tem que lidar com a ideia de previsibilidade da sucessão ecológica para definir quais espécies escolher, e compreender o estágio de sucessão em que a área se encontra. Na literatura, existem duas visões extremas sobre a natureza da sucessão ecológica. Uma visão, que foi fortemente defendida por Clements (1916), é a de que a sucessão é um processo ordenado e previsível, resultante das propriedades emergentes de comunidades. A outra visão, defendida por Gleason (1917, 1927), é a de que a sucessão é uma série de eventos imprevisíveis, que resultam da interação entre os indivíduos e o meio biótico. Hoje, a maioria dos ecólogos defende uma posição intermediária entre esses pontos de vista, e grande parte tem avançado além de ambos. Baseando-se especialmente nos ecossistemas de referência, o restaurador precisa selecionar as espécies a serem incluídas na área a ser restaurada. O uso de espécies regionais é indicado, dado que foi nesses locais que as espécies evoluíram, e, portanto, são esperadas adaptações ecológicas, referentes, por exemplo, aos tipos de solo, clima, polinizadores e dispersores de sementes.

No caso da restauração florestal, existem áreas que possibilitam o aproveitamento inicial da regeneração natural, e é feita uma condução da sucessão ecológica através do controle de plantas exóticas, coroamento, adubação, controle de formigas cortadeiras, etc. Em áreas que não possibilitam o aproveitamento inicial da regeneração natural, são necessárias técnicas de plantio, através da introdução de mudas, sementes (semeadura direta) ou transposição de solo com banco de sementes, rebrota de caules, serapilheira, etc. Para as áreas que necessitam da introdução de mudas, o plantio pode ser feito em núcleos (nucleação) de vegetação nativa, que depois se expandem e são conectados. Outra técnica consiste em fazer o plantio da área total, em linhas com espécies de diferentes grupos funcionais: recobrimento e diversidade. O grupo de recobrimento é constituído por espécies que possuem rápido crescimento e boa cobertura de copa, proporcionando acelerado fechamento e sombreamento da área plantada. O grupo de diversidade, inclui espécies de crescimento mais lento e menor cobertura de copa, mas que são fundamentais para garantir a recomposição das áreas e aumentar a diversidade do sistema.

Os grupos ecológicos também são levados em consideração, visando a implantação das espécies dos diferentes estágios de sucessão ecológica. Apesar de haver um caloroso debate sobre os grupos ecológicos e qual grupo cada espécie pertence, de



forma geral existem aquelas espécies que fazem parte dos estágios iniciais de sucessão (tradicionalmente chamadas de pioneiras e secundárias iniciais) e dos estágios avançados de sucessão (secundárias tardias e climácicas), compondo unidades sucessionais que resultam em uma gradual substituição de espécies. O termo espécies climácicas ainda é utilizado em livros-texto e manuais de restauração, apesar de que hoje existe uma mudança conceitual no que era considerado clímax. O clímax era considerado pelos ecólogos como um ponto final estático e determinístico para a sucessão. Hoje, os ecólogos reconhecem que as comunidades e as paisagens não atingem um estado constante e imutável. Contudo, por questões práticas, os restauradores precisam escolher quais espécies são mais adaptadas aos estágios iniciais e tardios da sucessão, e mais uma vez têm que lidar com a controvérsia de previsibilidade *versus* casualidade da sucessão. Portanto, conceitos como espécie pioneira, secundária e climácica ainda são encontrados na literatura. Além dos conceitos, o mais importante é o restaurador compreender os padrões e processos da sucessão ecológica.

Importante ressaltar aqui que a diversidade genética, tanto das mudas quanto das sementes, deve ser levada em consideração. É importante manter populações com certo grau de diversidade genética, do contrário, as populações com baixa variabilidade genética podem ficar mais vulneráveis a pragas e doenças. Bancos de produção de mudas e sementes também devem ser organizados, para que sejam produzidos propágulos com a genética local/regional. Esse último é um grande desafio da restauração, porque a demanda por propágulos, muitas vezes, é maior do que o tempo de produção.

6. Monitoramento da Restauração

Uma etapa fundamental dos projetos e programas de restauração é o monitoramento. Essa etapa é essencial para avaliar o sucesso da restauração, tanto no que se refere à avaliação dos métodos usados, como para inferir se a área em restauração está seguindo uma trajetória ecológica adequada e desejada. O monitoramento fornece direções e recomendações de possíveis ações práticas de manejo adaptativo e ações corretivas para ajustar essas trajetórias. Um exemplo interessante é o Protocolo de Monitoramento da Restauração Florestal, elaborado pelos integrantes do Pacto da Mata Atlântica, movimento nacional que articula e integra atores interessados na restauração desse bioma. O protocolo de monitoramento apresenta os princípios, critérios e indicadores que devem ser utilizados como referência para o monitoramento dos projetos de restauração florestal, e descreve como estes aspectos devem ser verificados, mensurados e avaliados ao longo do tempo de desenvolvimento dos projetos.

Numa visão mais abrangente e atual, a restauração ecológica considera não só aspectos biológicos, que tratam dos restabelecimentos da biodiversidade e dos processos ecológicos nos ecossistemas, mas também leva em consideração aspectos socioeconômicos relacionados à restauração. Envolver as comunidades locais no processo de restauração é essencial. A restauração baseada em comunidades não apenas promove a conscientização ambiental, mas também garante a sustentabilidade a longo



prazo, envolvendo as pessoas diretamente afetadas na gestão e proteção dos ecossistemas restaurados. Além disso, muitos projetos de restauração podem gerar trabalho e renda, o que pode aumentar o bem-estar socioeconômico dos vários atores envolvidos nos programas de restauração.

7. Desafios Contemporâneos: Fragmentação de Habitats e Mudanças Climáticas

Além dos desafios conceituais, teóricos e práticos descritos anteriormente, vale citar ainda outros desafios mais abrangentes da restauração ecológica. Um deles é a crescente fragmentação de habitats, que dificulta a implementação bem-sucedida de projetos de restauração. A expansão urbana, estradas e atividades agropecuárias muitas vezes dividem ecossistemas, comprometendo a conectividade necessária para processos como dispersão de sementes e migração de espécies. As mudanças climáticas adicionam uma camada a mais de complexidade, alterando padrões de temperatura, precipitação e gerando eventos climáticos extremos. Essas mudanças podem afetar aspectos físicos, químicos e biológicos dos ecossistemas, e interferir diretamente na trajetória ecológica das áreas restauradas. Além disso, a restauração ecológica geralmente ocorre em meio a pressões antropogênicas contínuas, como desmatamento, incêndios e expansão agropecuária. A coexistência de esforços de restauração com atividades destrutivas cria um dilema desafiador que requer intervenções práticas (ex. criação de aceiros em locais que pegam fogo frequentemente), políticas e sociais coordenadas.

8. Perspectivas Futuras e Conclusão

Para perspectivas futuras, será importante pensar em estratégias de restauração especialmente para ecossistemas abertos (não florestais), como savanas, campos (*grasslands*) e afloramentos rochosos. As estratégias e políticas atuais são fortemente orientadas para ecossistemas florestais, e focam muito no potencial de plantio de árvores. De forma equivocada, muitos ainda consideram que esses ambientes abertos eram originalmente florestados e que plantar árvores neles irá aumentar a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos. Contudo, ecossistemas abertos têm suas próprias histórias evolutivas, com espécies majoritariamente herbáceas e arbustivas, muitas delas endêmicas, e não são uma condição que antecede sistemas florestais. Dentro ou margeando a Mata Atlântica, por exemplo, temos diversos tipos de ecossistemas abertos, como a biota dos inselbergs (afloramento de granito) e os campos rupestres da Cadeia do Espinhaço, e não devem de forma alguma serem restaurados com espécies arbóreas de fitofisionomias florestais. Ecossistemas abertos são resilientes, e frequentemente dependem de regimes de distúrbio, como fogo e herbivoria, e, portanto, têm suas próprias dinâmicas de regeneração, trajetória de sucessão e conectividade com a paisagem. Geralmente, seus solos são pobres e as condições ambientais são mais severas, mas suas espécies são adaptadas, possuindo especializações de raízes ou órgãos de reserva. Portanto, utilizar práticas típicas de ambiente florestais, como fertilização, não são adequadas para ecossistemas abertos. Entender melhor a ecologia desses ambientes é extremamente importante, para que técnicas apropriadas de restauração sejam



desenvolvidas e utilizadas, e políticas específicas sejam aplicadas. Isso faz-se necessário especialmente porque ambientes abertos são muito ricos em espécies e grupos funcionais, além de proverem serviços ecossistêmicos fundamentais, já que regulam ciclos de água e carbono, possuem plantas medicinais e de potencial ornamental, são nicho para polinizadores e possuem grande beleza cênica.

Nos próximos anos, será fundamental colocar em prática a legislação vigente que regulamenta a restauração, mas que também incentiva essas práticas, respeitando as particularidades dos variados ecossistemas. Será também importante avançar as discussões a respeito dos serviços ecológicos providos pelos ecossistemas e como relacioná-los com capital natural. Apesar de ser muito difícil valorar os serviços providos pela natureza, pode ser uma estratégia para viabilizar e acelerar ações de restauração em larga escala. Será também fundamental aproximar diferentes profissionais e atores interessados na restauração ecológica, articulando instituições públicas e privadas, comunidade científica e proprietários de terras para integrar seus esforços e recursos na geração de resultados em restauração e conservação da biodiversidade. Apesar dos desafios, os exemplos práticos de sucesso destacam o potencial das ações de restauração na busca de ecossistemas mais equilibrados, sustentáveis e resilientes.

9. Referências

- Clements, F. E. (1916). Plant succession. An analysis of the development of vegetation. Carnegie Inst. Washington Publ. 242. Washington, D. C.
- Gleason, H. A. (1917). The structure and development of the plant association. Bull. Torrey Club 44: 463-481.
- Gleason, H. A. (1927). Further views on the succession-concept. Ecology 8: 299-326.
- Rodrigues, E. (2013). Ecologia da Restauração. Ed. Planta. Londrina. p.300.
- Rodrigues, R. R., Gandolfi, S. & Brancalion, P. H. S. (2015). *Restauração florestal*. Oficina de Textos.
- SER. (2004). The SER international primer on ecological restoration. Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. <http://www.ser.org>.



Capítulo 4

TRAMAS NATURAIS: INTERAÇÕES PLANTA-ANIMAL E A TEIA DA VIDA

DOI: 10.36599/itac-978-85-9535-265-0_004

Luiza Fonseca Amorim de Paula⁴

⁴ Departamento de Genética, Ecologia e Evolução, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil



Resumo

O ensaio explora as interações planta-animal, fundamentais para a biodiversidade e a dinâmica dos ecossistemas. Destaca relações mutualísticas, como polinização e dispersão de sementes, e antagonísticas, como a herbivoria. Discute como essas interações influenciam a distribuição e abundância das plantas, além de abordar padrões de redes complexas, especializações versus generalizações, e os impactos das perturbações antrópicas. Conclui ressaltando a importância de compreender esses processos para a conservação da biodiversidade e restauração ecológica.

1. Introdução

As interações planta-animal emergem como elos cruciais na complexa rede da vida, influenciando diretamente a biodiversidade e a dinâmica dos ecossistemas. Neste ensaio, destacarei as relações mutualísticas e antagonísticas. Discutirei também, como essas interações, especialmente a dispersão, influenciam a distribuição e abundância das plantas. Além disso, abordarei brevemente a respeito de padrões de redes complexas de interações, especializações versus generalizações, e consequências das perturbações antrópicas nas interações planta-animal e seus serviços ecossistêmicos. Para os conceitos e exemplos fornecidos neste ensaio foram usados de referência principalmente os livros “Plant-animal interactions: an evolutionary approach” (Herrera e Pellmyr 2002), “Ecología y evolución de interacciones planta-animal” (Zamora et al. 2009.) e Ecologia Vegetal (Gurevitch et al. 2009).

2. Mutualismo em Ação: Polinização e Dispersão de Sementes

As relações mutualísticas são um tipo de interação ecológica em que pelo menos duas espécies diferentes se beneficiam mutuamente. Polinização e dispersão são exemplos de mutualismo e constituem a base para o funcionamento de muitos ecossistemas, onde plantas e animais tiram proveito da relação.

Existem diversas formas das plantas atraírem polinizadores que estão interessados no néctar (rico principalmente em açúcares) e/ou nos grãos de pólen (rico em proteínas). Uma delas é através de estratégias visuais, as plantas usam das cores para atrair animais de grupos específicos, já que polinizadores variam em sua capacidade de ver e discriminar cores. Muitas espécies de plantas também possuem flores com guias de néctar, que são padrões de coloração que guiam os polinizadores para áreas onde estão nectários, anteras e estigma. Outras espécies, além das flores, possuem brácteas coloridas e chamativas. O odor floral também é um importante atrativo, e pode agir por distâncias mais longas. As plantas, comumente, combinam odores e dispositivos visuais para aumentar a atração. O formato das flores também é importante, e filtra determinados tipos de polinizadores. Certas combinações desses atributos das plantas parecem estar associadas a tipos particulares de polinizadores, as chamadas síndromes de polinização. Por exemplo, abelhas são geralmente atraídas por flores amarelas, odor adocicado e produção diurna de néctar. Aves são chamadas por flores vermelhas, laranjas, sem odores, tubulares e com



produção diurna de néctar. Por sua vez, morcegos são atraídos por flores brancas, com odor fermentado e com produção noturna de néctar.

Geralmente, há correspondências entre esses conjuntos de características das plantas e os conjuntos de atributos de polinizadores (aparelho bucal, hábito de forrageamento, etc). Interações entre plantas e polinizadores são vistas como mutualismos que coevoluíram. Coevolução é a evolução simultânea de adaptações em duas ou mais espécies que interagem tão intimamente que cada uma delas age como uma força seletiva sobre a outra. Diversas interações ecológicas entre plantas e animais podem resultar em coevolução: mutualismo, predador-presa, competição, parasitismo etc.

A dispersão de sementes também é um tipo de interação mutualística entre plantas-animais. Nessa interação, as plantas têm que proteger suas sementes e frutos da predação e ao mesmo tempo atrair animais para dispersar as sementes. Existem estratégias para equilibrar essas funções, por exemplo, sementes podem ser ingeridas por animais sem serem destruídas. Existem algumas formas das plantas estimularem os animais frugívoros a se deslocarem, entre elas pode-se citar o amadurecimento não sincrônico dos frutos, assim dispersores devem visitar outros indivíduos e percorrer maiores distâncias. Outra estratégia é manter fruto levemente tóxico, assim o animal comerá, de cada vez, apenas poucos frutos de determinada espécie e vai se deslocar mais.

Síndrome de dispersão é o conjunto de características morfológicas, químicas e nutricionais presentes nas unidades de dispersão das plantas que favorecem a ação de determinados agentes dispersores. Por exemplo, frutos de cores vistosas com polpas ou arilos carnosos e suculentos, na maioria das vezes são características que indicam uma adaptação para a ornitocoria (dispersão por aves), enquanto que a mirmecocoria (dispersão de sementes por formigas) envolve espécies de plantas que produzem um corpo gorduroso preso externamente à semente, chamado elaiossomo.

Estudos sobre dispersão de sementes constituem uma importante ferramenta para a conservação de comunidades vegetais, já que buscam esclarecer a dinâmica reprodutiva das plantas, suas interações com fatores bióticos (animais) e abióticos e seu processo de regeneração. As sementes podem ser dispersadas isoladamente ou em grupos, bem como no tempo e no espaço. Todos esses fatores têm efeitos diferentes sobre os padrões de dispersão de sementes. Tais padrões são importantes porque determinam a estrutura demográfica e genética de populações vegetais, a intensidade da competição intra e interespecífica, bem como os padrões de migração de espécies. A dispersão por animais, quando comparada com a dispersão pelo vento e pela água, envolve mecanismos mais diversificados e determina padrões de dispersão mais variados. Existem casos em que frutos ou sementes possuem apêndices que se prendem em animais (geralmente mamíferos ou aves) e assim são dispersados para distâncias maiores. Um exemplo de dispersão agregada ocorre com formigas, elas carregam os elaiossomos para dentro dos ninhos e as sementes ficam para fora e não são comidas, formando uma dispersão



agregada. Portanto, existem diversos padrões de dispersão, que são demograficamente importantes e influenciam a distribuição das espécies de plantas.

3. Relações Antagônicas: Herbivoria e Estratégias de Defesa das Planta

Relações animal-planta antagônicas, como herbivoria, coexistem com relações mutualísticas. A herbivoria é o consumo de toda a planta ou parte dela por um herbívoro, e pode ter efeitos ecológicos em nível de indivíduo, população, comunidade, ecossistema e paisagem. A coevolução entre plantas e herbívoros também é tema de investigação entre ecólogos, onde são estudadas especialmente estratégias de defesa das plantas e respostas desenvolvidas pelos animais. Existem duas estratégias principais das plantas à herbivoria: resistência e tolerância. A resistência é a capacidade da planta de evitar ser comida. A tolerância é a capacidade de minimizar reduções no desempenho. Antigamente, acreditava-se que as plantas aparentemente respondiam à herbivoria crescendo mais, o que seria benéfico para a planta, o que ficou conhecido por teoria de supercompensação. Hoje em dia, a maior parte dos ecólogos concorda que a herbivoria danifica as plantas, reduzindo crescimento e ganho reprodutivo.

Existem diversas defesas das plantas contra a herbivoria. Pode-se citar como defesa física a presença de acúleos e espinhos, presença de tricomas (alguns até mesmo secretam substâncias nocivas, como em Euphorbiaceae e Urticaceae), casca grossa em troncos e raízes, dureza das folhas, presença de sílica nas folhas (ex. gramíneas). Outra forma de defesa das plantas é a produção dos metabólitos secundários. Entre eles pode-se citar os fenóis (ex. flavonoides, taninos, lignina), alcalóides (ex. cocaína, cafeína e nicotina) e terpenos (ex. látex). Esses compostos dificultam a palatabilidade e digestibilidade da planta ou são tóxicos para os animais. Contudo, os herbívoros evoluíram vários meios de superar as defesas vegetais, o que é conhecido como “corrida armamentista coevolutiva”, já que a interação planta-animal exerce pressões seletivas nas duas direções para a criação de “arsenal bélico” e defesa. Entre as estratégias dos herbívoros, estão questões comportamentais, bioquímicas e morfológicas.

4. Redes Complexas: Interações Planta-Animal e Conectividade

Ecólogos ainda buscam padrões de interações planta-animal, mas estudo de redes complexas tem contribuído nessa área do conhecimento. Assim como fazemos inventários de plantas e animais, interações também devem ser catalogadas. As matrizes de interação podem ser graficamente representadas como redes. Existem padrões topológicos nas redes de interações, relacionados à distribuição da conectividade, o que descreve interações entre especialistas e generalistas (Bascompte e Jordano 2007). Além disso, as redes podem conter informações sobre a intensidade ou força da interação das espécies de planta- animal, e não só sua presença e ausência.

As interações podem assumir caráter especializado, como aquelas entre uma espécie de flor e seu polinizador específico (casos clássicos em famílias de planta como



Orchidaceae e abelhas), ou generalista, como observado em polinizadores que visitam uma variedade ampla de flores. As redes podem ter diferentes sensibilidades à perda de espécies, e isso pode ser ainda mais complicado com a perda de espécies-chave, ou seja, aquelas espécies que contribuem desproporcionalmente à estrutura da rede, que são hiperconectadas, também conhecidas como espécies supergeneralistas. As análises de padrões de interação planta-animal em redes complexas, que compreendem melhor as generalidades e especificidades, revelam que as interações não se produzem ao acaso, e mostram até mesmo uma estrutura preditiva. Outra questão a ser levada em consideração é que somente recentemente estamos decifrando a base evolutiva das matrizes de interação, ainda não é clara qual a carga filogenética no padrão de interação que observamos e se espécies filogeneticamente mais próximas mostram padrões de interação mais similares.

As perturbações antrópicas, como a fragmentação de habitats, e as mudanças climáticas, impactam profundamente as interações planta-animal. Esses impactos têm efeitos em cascata na diversidade taxonômica e funcional das comunidades de plantas e animais e nos serviços ecossistêmicos que eles promovem. Por exemplo, tem sido documentado que extinções locais ou mudanças comportamentais de alguns animais podem causar o desaparecimento de plantas que dependem deles para sua polinização, dispersão de sementes ou proteção contra herbivoria, o que pode levar à redução nos serviços ecossistêmicos de produção de alimentos e controle de pragas. Desequilíbrios nessas interações podem ter sérias implicações para a segurança alimentar em todo planeta (Kremen et al. 2007), já que grande parte da nossa dieta está embasada em plantas que necessitam de polinização e dispersão feita por animais.

5. Conclusão

Em resumo, as interações planta-animal são um campo vasto e fascinante que permeia a vida na Terra. A compreensão abrangente desses processos, tanto os mutualísticos como os antagonísticos, são fundamentais para entendermos melhor o funcionamento dos ecossistemas e traçarmos melhores práticas de como conservá-los. Em um mundo em constante transformação, devemos nos concentrar em estudos de restauração ecológica focados na recuperação das interações planta-animal, no intuito de sustentarmos a biodiversidade e visando a nossa segurança alimentar.

6. Referências

Bascompte, J. & Jordano, P. (2007). Plant-animal mutualistic networks: the architecture of biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 38: 567-593.

Gurevitch, J., Scheiner, S.M., Fox, G.A. (2009). *Ecologia Vegetal*. Ed. Artmed, São Paulo.

Herrera, C. M. & Pellmyr, O. (eds). (2002). *Plant-animal interactions: an evolutionary approach*. Blackwell, Oxford, UK.



Kremen, C., Williams, N. M., Aizen, M. A., Gemmill-Herren, B., LeBuhn, G., Minckley, R., Packer, L., Potts, S.G., Roulston, T., Steffan-Dewenter, I., Vázquez, D.P., Winfree, R., Adams, L., Crone, E.E., Greenleaf, S.S., Keitt, T.H., Klein, A.M., Regetz, J., Ricketts, T.H. (2007). Pollination and other ecosystem services produced by mobile organisms: a conceptual framework for the effects of land-use change. *Ecology Letters* 10: 299-314.

Zamora, R., Aizen, M.A., Medel, R. (2009). *Ecología y evolución de interacciones planta-animal*. Editorial Universitaria, Santiago, Chile.



Viviane Santos | Org.

PESQUISAS EM
**CIÊNCIAS
BIOLÓGICAS**

VOLUME 1

ISBN: 978-85-9535-265-0

DOI: 10.36599/itac-978-85-9535-265-0

 editora
itacaiúnas