

DIVERSIDADE FUNCIONAL EM PROJETOS DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS

FUNCTIONAL DIVERSITY IN ENVIRONMENTAL SCIENCE PROJECTS

Fagner de Souza¹, Nathalia Fernanda Ribeiro Mafra², Ronielson Gaia da Silva³, Afonso Pelli⁴

¹Centro de Estudos Biografia. ²Colégio Cívico-Militar Osmar Guaracy Freire³. Universidade Federal de Uberlândia. ⁴Universidade Federal do Triângulo Mineiro, desouza.fagner@gmail.com

RESUMO

A diversidade funcional em estudos de biodiversidade tem como objetivo entender as relações entre os organismos e os serviços ambientais que estes prestam ao ecossistema. Assim, compreender esta área tem sido de grande importância para pesquisadores de ciências ambientais, pois os resultados podem evidenciar o estado qualitativo do ambiente, a estrutura composicional das comunidades e também direcionar previsões sobre o futuro desta área analisada. Dentro desta perspectiva, o trabalho objetivou apresentar as facetas que a diversidade funcional pode exibir em projetos de ciências ambientais. Para isso foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os principais aspectos desta área e suas aplicações em diversos tipos de cenário ambientais. De forma geral, foram encontradas diversas aplicações em diferentes tipos de cenários e, concomitante a isto, diferentes tipos de dados, dentre os maiores destaques para dados relativos à riqueza de espécie e a relação destas espécies com diversos espectros do ambiente, como alimentação, posição geográfica no ambiente e diversos tipos de recursos, principalmente os relacionados à cadeia alimentar. Por fim, em termos gerais, a diversidade funcional não é a única forma de conduzir estas discussões, mas vem se mostrando como uma boa ferramenta na compreensão dos funcionamentos ecossistêmicos, compreendendo que as funções não são relacionadas às espécies e sim aos indivíduos, e que estes podem ser “monofuncionais” a “polifuncionais”.

PALAVRAS-CHAVE: Análise ecológica; Diversidade de espécies; Ecologia de ecossistemas; Serviços ambientais.

ABSTRACT

Functional diversity in biodiversity studies aims to understand the relationships between organisms and the environmental services they provide to the ecosystem. Thus, understanding this area has been of great importance for environmental science researchers, as the results can highlight the qualitative state of the environment, the compositional structure of communities and also direct predictions about the future of this analyzed area. Within this perspective, the work aimed to present the facets that functional diversity can exhibit in environmental science projects. To this end, a bibliographical review was carried out on the main aspects of this area and its applications in different types of environmental scenarios. In general, several applications were found in different types of scenarios and concomitantly with this different types of data, among the biggest highlights for data relating to species richness and the relationship of these species with different spectrums of the environment, such as food, geographic position in the environments and different types of resources, mainly those related to the food chain. Finally, in general terms, functional diversity is not the only way to conduct these discussions, but it has proven to be a good tool for understanding ecosystem functioning, understanding that functions are not related to species but to individuals, and that these can be “monofunctional” to “polyfunctional”.

KEYWORDS: Ecological analysis; Species diversity; Ecosystem ecology; Environmental services.

INTRODUÇÃO

A área de ciências ambientais engloba inúmeras subáreas, como ciências biológicas, ciências agrárias, engenharias, além de subáreas sociais e econômicas, como gestão ambiental e direito ambiental. O amplo espectro desta área proporciona uma grande interação multidisciplinar, esbarrando em questões específicas de várias vertentes para resolver questões de cunhos sociais, econômicos e ambientais que um empreendimento pode gerar.

Um exemplo bem claro desta interação está em empreendimentos de hidrelétricas, nos quais para conseguir a licença de instalação é necessária uma gama de documentos e relatórios que inter-relacionam com estas esferas anteriormente citadas. Na esfera social é necessário que aprovações da sociedade sejam feitas por seus representantes, a fim de avaliar qual é o impacto que as ações do empreendimento a ser instalado podem causar em seu município, por exemplo. Além disso, avaliar como estas ações podem influenciar direta e indiretamente a diversidade cultural e, conseqüentemente, a rotina dos cidadãos daquela região.

Na esfera econômica, que ocorre de forma indissociável com a social, é necessário conhecer e prever os impactos econômicos que tal empreendimento acarretará para a população da região. Estes impactos podem estar ligados, por exemplo, com a mudança da base econômica da cidade, a perda/inclusão de certos ofícios, o aumento do Produto Interno Bruto (PIB) municipal (devido ao arrecadamento de impostos), a mudança de vias e fluxo rodoviários, a quantidade de empregos que serão gerados, aumento migratório para a cidade em questão (culminando na oscilação positiva ou negativa da densidade populacional), dentre outras possibilidades.

Por fim, a esfera ambiental, na qual temos os impactos diretos e indiretos que as ações antropogênicas podem causar, que culmina na alteração da homeostase no ecossistema atingido. Nesta perspectiva, preza-se que as estruturas e processos bióticos e abióticos sejam analisados, tendo em vista que estes poderão dar indicativos de como este empreendimento irá afetar o sistema biótico. Assim, destaque para os bem conhecidos Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório do Impacto no Meio Ambiente (RIMA), que são primariamente essenciais para subsidiar previsões e análises mais profundas sobre o que a implantação e as atividades do empreendimento irão gerar na estrutura e composição do meio ambiente

Uma questão interessante nesta última esfera, é a multiplicidade de técnicas a serem aplicadas e interpretações que podem ser extraídas em, por exemplo, um simples monitoramento/levantamento da biota no local e áreas adjacentes da implantação do empreendimento. Dentro destas interpretações, o uso da diversidade de espécie “reina” quase que totalmente nas hipóteses criadas sobre as ações dos empreendimentos, exibindo inúmeros relatórios pautados nesta perspectiva, assim como diversos artigos que subsidiam estas interpretações sobre o ecossistema. Vale destacar aqui os métodos interpretativos que se utilizam, índices ecológicos e/ou parâmetros ecológicos, pois em muitos casos são a base para interpretações sobre a estrutura do ecossistema e para tomadas de ações conservacionistas, mitigatórias etc.

Além disso, em muitos casos, apesar destas análises serem baseadas em dados de abundância relativa (número de indivíduos em relação a cada espécie encontrada), há pressupostos relativos, como a individualidade ecológica de cada grupo taxonômico e/ou espécie, que nesta visão não são analisadas diretamente. Muitas vezes essa ausência de relação com as individualidades ecológicas, conduzidas por este tipo de análise, pode ter tendências neutras em relação às espécies analisadas, ou seja, as funções que as espécies desenvolvem no ambiente ficam em segundo plano, dando preferência às discussões voltadas a dados de riqueza (quantidade de táxons) e abundância (número de indivíduos).

Apesar desta pequena crítica conduzida no exemplo acima, muitos trabalhos que utilizam este tipo de metodologia tentam, posteriormente, relacionar as possíveis “funções” das espécies que são encontradas. Estas ideias dentro da ecologia já são apontadas há algum tempo por ecólogos¹, os quais relataram mecanismos constantes, que prestam manutenção na estabilidade dos ecossistemas, nos quais um deles chamam mais atenção, para o que aqui está exposto, a homotaxia congênica. Neste modelo de estruturação os componentes do ecossistema (*e.g.* espécies) podem possuir funções similares e, na ausência de algum componente, o outro compensa.

Mais recentemente, estas ideias começaram a ressoar um pouco mais alto dentro das discussões científicas, pois, vários trabalhos levam em conta não só a riqueza e abundância das espécies, mas sim qual o papel destas espécies na estrutura da comunidade e na estabilidade de um ecossistema². Desta forma, as espécies passam a ter uma importância não só taxonômica e quantitativa, mas sim em um panorama qualitativo. Assim, possibilitando uma análise mais ampla e livre sobre as espécies: o que essa espécie contribui para a dinâmica ecossistêmica? Há espécies

com este mesmo papel ecossistêmico? O que acontece quando há perda de espécies com certas funções? As espécies podem exercer novas funções ecossistêmicas?

Com base nestas ideias e questões, este capítulo tem como objetivo apresentar as facetas que a diversidade funcional pode exibir em projetos de ciências ambientais. Assim, tentaremos expor as ideias que auxiliam na compreensão da importância das funções das espécies em vários níveis ecológicos; apresentar como a diversidade funcional pode ser aplicada; e quais as ideias metodológicas desta área.

ESTRUTURA POPULACIONAL E A RELAÇÃO COM DIVERSIDADE FUNCIONAL

Partindo da premissa de que uma população é composta por indivíduos da mesma espécie que habitam uma dada região espacial em um certo período temporal, as populações podem apresentar uma forte influência nas características funcionais de um ecossistema, já que as variações em uma população podem influenciar as interações da biota com o ambiente, principalmente quando esta espécie exibe um papel funcional importante no ecossistema em que está inserida.

Por exemplo, em uma comunidade com controle *top-down* (de cima pra baixo), a eliminação ou variações extremas na densidade de uma população de predador de topo pode desencadear um efeito negativo no sistema devido a uma cascata de desestruturações de outras populações³. Assim, a eliminação de um predador de topo influencia diretamente as suas presas (ex. consumidor primário) que, na ausência da predação, pode aumentar sua densidade e, conseqüentemente, o uso de recursos, o que, por sua vez, influencia negativamente a densidade dos outros níveis tróficos subsequentemente abaixo (produtores). Este evento, além de desestruturar as populações que compõem um sistema, pode automaticamente influenciar as funções que as espécies desenvolvem neste sistema.

Desta forma, é importante compreender que uma população pode exibir particularidades individuais em cada um dos seus componentes/indivíduos⁴. Dentre estas, pode-se apontar as variações comportamentais, morfológicas, fisiológicas, dentre outras. Estas variações compreendem a amplitude e variabilidade de características que uma população possui, apontando o quanto esta contribui para o funcionamento do sistema. Assim, a presença de um amplo espectro funcional culmina em uma grande quantidade de funções. Esta maior variabilidade pode auxiliar na manutenção estrutural das populações, diminuindo a competição intraespecífica dentro da

população. Este pacote de características (variação intraespecífica) é apontado como um dos principais fatores que auxiliam a seleção natural na evolução das espécies⁵.

Além disso, algumas espécies podem exibir padrões comportamentais intrapopulacionais distintos, como, por exemplo, em grupos de insetos sociais, como algumas espécies de Hymenoptera (formigas), que possuem castas nítidas dentro da sociedade que estão estruturadas. Nesta sociedade, certos grupos/morfotipos podem exibir funções distintas dentro da população. Os indivíduos possuem funções distintas, como explorar o ambiente, ou proteger o local do conglomerado social ou reprodução. Estas dissimilaridades sociais dentro deste grupo podem demonstrar como há variações nas ações comportamentais dos indivíduos dentro de uma população, e estas em combinação ou isoladamente podem representar dimensões funcionais para um ecossistema.

Outro exemplo interessante das variações comportamentais particulares dentro de uma população é o de alguns mamíferos que exibem separações funcionais claras quando em “bando”. Pode-se observar, em alguns grupos, divisões funcionais, como, por exemplo, durante o forrageio, no qual alguns indivíduos são responsáveis pela exploração do ambiente, ou por sinalizar possíveis perigos ou ainda proteger os jovens do grupo. Outra característica interessante é a presença de uma função reprodutiva, como a do macho alfa. Neste ponto, pode acontecer o “câmbio” funcional, no qual outros machos podem substituir o macho alfa, como, por exemplo, após “disputa” por esta função na população. Esta característica (câmbio de macho alfa após enfrentamento) demonstra a plasticidade funcional de uma população, ou seja, em alguns casos estes atributos funcionais podem ser readequados devido às condições de uma população.

Uma outra perspectiva interessante que trabalha direto com o efeito do ambiente nas características individuais dos indivíduos de uma população é a ecomorfologia^{6, 7}. Apesar de estar mais ligada às áreas da biologia como a evolução, pois sua premissa trata em identificar e entender os padrões morfológicos selecionados pela pressão de cada ambiente, ela também busca compreender padrões comportamentais selecionados em cada ambiente.

Dependendo do ponto de vista, a ecomorfologia parece não ter relação com as funções ecossistêmicas. Mas quando olhamos mais a fundo, as características das populações podem nos ajudar a prever, em parte, o funcionamento do ecossistema (já que suas inferências discutem uso), a exploração e ocupação de habitat, as pressões seletoras responsáveis pela variabilidade

morfotípica dos indivíduos, a relação da região que a espécie forrageia com as possíveis presas, dentre outras.

Além disso, outro espectro das populações pode influenciar diretamente o funcionamento do sistema biótico, como, por exemplo, as migrações. Esta ação pode acarretar a diminuição ou aumento de funções ecológicas, já que influencia diretamente a densidade das populações e, conseqüentemente, a função que cada indivíduo executa em um sistema. Assim, é necessário entender que a variação sazonal e, por conseguinte, gatilho migratório para algumas espécies pode ocasionar uma mudança da estrutura funcional, ou seja, ausência da função ou ainda diminuição da efetividade desta função.

Um exemplo interessante é a migração da população de espécies de grande porte, o qual, retomando o controle *top-down*, pode ocasionar a desestruturação trófica da comunidade (como já discutido anteriormente). Outro exemplo a se citar é de populações de pássaros que contribuem no enriquecimento de matéria orgânica do solo e germinação de plantas, devido à defecação. Desta forma, a emigração desses locais pode ocasionar um empobrecimento do solo e diminuição da taxa de colonização de certas plantas. Estes fatos podem influenciar o funcionamento estrutural do ecossistema reduzindo o fluxo e ciclagem de materiais.

Assim, apesar de ser um espectro analítico mais restrito, já que o principal foco é a população de uma espécie, as relações íntimas com o ambiente e as interações ecológicas influenciam na dinâmica estrutural do sistema biótico. Estas observações, acerca das populações, podem nos ajudar a inferir o funcionamento de parte de um sistema ecológico. Assim, é possível prever as variações funcionais, devido às interações que esta população ou populações desenvolvem com as esferas bióticas e abióticas nas dimensões espaciais e temporais de um dado ambiente. Estas inferências nos possibilitam responder questões ecológicas e traçar hipóteses de funcionamento ecossistêmico e seus controladores.

ESTRUTURA DA COMUNIDADE E A RELAÇÃO COM DIVERSIDADE FUNCIONAL

Como anteriormente discutido, uma população pode proporcionar uma gama de processos que podem ajudar no funcionamento do ecossistema. Tendo em vista esta abordagem, as populações normalmente se inter-relacionam umas com as outras aumentando esta complexidade de funções e, portanto, de interpretações. Neste contexto, temos que levar em conta as comunidades bióticas, que podem ser definidas como o conjunto de espécies em dado local em um determinado

período temporal. Ter a conceituação do que é a comunidade é necessário quando falamos de diversidade funcional, pois, como já discutido, as populações afetam drasticamente as funções ambientais.

Apesar deste fato estar bem difundido na ecologia e nas ideias conservacionistas, a principal ferramenta utilizada para avaliar a estrutura do ambiente ainda não é baseada na funcionalidade de seus componentes, mas sim na quantidade de espécies e suas respectivas abundâncias relativas. Neste sentido, é importante revisar algumas destas ferramentas e em quais conceitos estão ancoradas, para poder confrontar e relacionar este ponto de vista predominante com o da análise funcional.

Dentro dos usos mais comuns estão a abundância de indivíduos, riqueza de espécies e os índices ecológicos, como, por exemplo, os índices de diversidade de espécies, equitabilidade/equabilidade e dominância. Estes índices tem como principais objetivos calcular como a abundância relativa está distribuída entre as espécies de um ambiente, e baseado nos seus pressupostos respectivos podem ajudar a responder questões relativas à composição da comunidade e sua estrutura ecológica.

A abundância de indivíduos é uma métrica simples, já que ela é apenas o número de indivíduos da comunidade. No entanto, é possível aprofundá-la um pouco mais, observando a abundância relativa de cada espécie contida na comunidade. Esta abordagem possibilita utilizar componentes de outros níveis da ecologia, como os de populações, principalmente quando as interpretações e respostas para uma questão da comunidade é mais evidenciada em determinadas espécies (*e.g.* espécies bioindicadoras).

A riqueza de espécies, que também é obtida de forma bem simples, é a quantidade de espécies dentro de uma comunidade. Esta medida biótica é utilizada em vários trabalhos clássicos na ecologia, como no trabalho de biogeografia de ilhas⁸ que usa como um dos principais dados o número de espécies (não importando quem são elas e quais suas funções) e a sua oscilação em ilhas com áreas e distâncias diferentes.

Outro bom exemplo clássico é o trabalho do rio contínuo⁹, que prevê a variação da composição da diversidade (mais especificamente a riqueza de espécies e a composição trófica) ao longo do gradiente longitudinal (das nascentes até a foz de grandes bacias hidrográficas). Este possui uma afinidade maior com as questões de funcionalidade quando inclui as relações tróficas nos gradientes.

Apesar da abundância e riqueza proporcionar uma boa visualização da estrutura da comunidade, estes parâmetros apresentam fragilidades quando se é relacionado à riqueza e suas respectivas abundâncias. Além disso, questões oriundas desta relação podem ser emergidas nestes trabalhos clássicos, como por exemplo: como é a abundância das espécies em determinadas ilhas e em uma certa distância? Há alguma variação no número de indivíduos ou são todas similares? Existem espécies mais abundantes ou menos abundantes? A extinção é mais comum em que tipo de espécies, as mais ou as menos abundantes? Desta maneira, é necessário compreender a relação destes dados nas comunidades que estão sendo analisadas. Para isso, alguns índices possibilitam uma diluição desta relação, assim como uma visualização mais ampla de como estes parâmetros se comportam, como é o caso dos índices ecológicos.

Destes índices, a diversidade de espécie, comumente representada pelos índices de Shannon-Wiener e Simpson, pode avaliar a possibilidade de se coletar as mesmas espécies de um local, sendo que uma possibilidade alta pode refletir uma baixa diversidade de espécies. Contraponto esta visão, os índices de dominância, com predominância de uso para o índice de dominância de Simpson, é considerado o oposto da diversidade e pode evidenciar que se alguma (s) espécie (s) aparece (m) desproporcionalmente com maior abundância que outras, isto pode indicar sua dominância no ambiente. Ou seja, demonstra uma composição da comunidade desbalanceada. Por fim, os índices de equitabilidade/equabilidade, com uso mais frequente dos índices de Pielou e Shannon, analisam como é a distribuição da abundância entre as espécies. A alta similaridade de abundância relativa das espécies é o fator que evidencia uma melhor avaliação de igualdade neste índice.

Estes índices, assim como a riqueza e a abundância, são a base para diversas teorias clássicas da ecologia. Apesar da crítica, aqui instaurada, essas métricas relacionadas à composição e estrutura da comunidade se apresenta como uma das principais metodologias para se entender a oscilação dos componentes de uma comunidade e a sua relação com o ambiente em que está inserido. Além disso, muitos resultados e suas explicações, obtidos por esta percepção, se entrelaçam, mesmo que por meio de inferências, com as ideias do funcionamento do ecossistema e o papel das espécies encontradas.

Nesta ótica, é possível observar que há um componente funcional importante a se compreender quando os ambientes são analisados com este ponto de vista de funcionalidade. No entanto, em grande parte as inferências relacionadas às análises de diversidade convencional

refletem pouco esta aplicação, apenas especulam ou relacionam de forma indireta os efeitos funcionais entre o ambiente analisado e as ações das comunidades e, conseqüentemente, do ecossistema que estão ali inseridos.

Esta ideia pode ser observada quando discutimos os fatores que afetam a diversidade de um ambiente, como nas hipóteses relacionadas à composição ecológica estrutural com base na competição, predação^{10, 11}, estabilidade, complexidade e heterogeneidade de habitats¹².

ESTRUTURA DO ECOSISTEMA E A RELAÇÃO COM DIVERSIDADE FUNCIONAL

Dando seqüência à discussão dos níveis ecológicos e suas relações com a diversidade funcional, o estudo dos ecossistemas é o que melhor se encaixa neste contexto, devido à sua abrangência e às relações que são observadas. Apesar de estarmos observando de forma fragmentada esta discussão, estes níveis são todos integrados e suas dinâmicas são concomitantes afetando drasticamente as composições biótica e abiótica dos ambientes. Assim, a visualização de um ecossistema nos permite observar mais de perto os compartimentos do ambiente, como funcionam e quais fatores que estão atuando.

Como de praxe, é necessário definirmos os ambientes que estamos analisando, portanto, a definição do nível deve ser, novamente, uma das principais aliadas na sua compreensão. Com isso, um ecossistema pode ser definido como qualquer sistema ecológico que abranja todos os organismos que funcionam em conjunto numa dada área e num dado período temporal, interagindo com o ambiente físico de tal forma que o fluxo de energia entre eles produza estrutura bióticas claramente definidas e com uma ciclagem de materiais entre as partes vivas e não-vivas¹.

Além disso, deve-se considerar os sistemas de entrada e saída nos ecossistemas. A ideia de ecossistema¹³, na qual também incluía as contribuições sobre como as teias tróficas funcionavam na formação de estrutura de uma comunidade¹⁴. Contudo, conceitos similares, como os de biocenose¹⁵ e microcosmo¹⁶, já vinham premeditando as ideias que foram destacadas por Tansley.

A estrutura de um ecossistema seguindo as ideias de Elton, relatando a trofia de um sistema em compartimentos, separa dois grandes estratos: autotróficos, os que produzem seu próprio alimento, chamando de faixa “verde” do ambiente (plantas e parte de plantas); e heterotróficos, os que consomem a matéria produzida pelos autotróficos, chamando de faixa marrom (solo, sedimento, materiais em decomposição etc.). Além disso, complementa que o ecossistema possui os seguinte componentes: 1= substâncias inorgânicas (C, N, CO₂, H₂O); 2= compostos orgânicos

(proteínas, carboidratos, lipídios, etc); 3=Ambientes atmosféricos, hidrológicos e substrato (incluindo os fatores climáticos e físicos); 4=produtores; 5=macroconsumidores ou fagotrófos (organismos heterotróficos, ex. animais); 6=microconsumidores, saprotófos, decompositores ou osmotrófos (organismos heterotróficos, ex.: bactérias, fungos) ¹.

Nesta estruturação, surgem discussões sobre como é controlado o ecossistema e se este é estável. Nesta prerrogativa, hipóteses surgem para tentar explicar como é a relação entre o meio biótico e abiótico no controle de um ecossistema. A “hipótese de gaia” sustenta que os organismos não só se adaptam ao meio abiótico, mas também por meio de suas atividades realizadas, para suprir suas necessidades e realizar a manutenção da vida, geram mudanças no meio geoquímico, proporcionando uma nova composição dos fatores abióticos¹⁷. Porém, algumas questões permanecem sobre estas afirmações, já que em ambientes com características ambientais muito extremas as ações bióticas são irrelevantes, não controlando o ambiente e levando em muitos casos à extinção de espécies. Mas, contrapondo esta ideia, alguns teóricos retratam que estas ações extremas são passageiras e que a longo prazo podem ocorrer as interações transformadoras previstas pela hipótese de gaia. Assim, um fator importante a se pensar aqui é a definição de ecossistema, principalmente na escala temporal.

Seguindo a ideia de controle, foram propostos outros modelos de controle ecossistêmico, como o de retroalimentação ou redundância e o de homotaxia congênica. Contudo, estes se baseiam na ideia de um ecossistema instável, no qual deve se levar em conta a estabilidade de resistência (a capacidade de não alterar sua estrutura e composição frente a um distúrbio) e sua estabilidade de elasticidade (a capacidade de recuperar sua estrutura e composição após um distúrbio) ¹.

O controle de retroalimentação ou redundância acontece quando a energia/materiais que entraram no sistema e estão sendo direcionados à sua saída são reaproveitados ou inseridos dentro do sistema, proporcionando um retroalimentação positiva, quando possibilita um melhor funcionamento do sistema (aumento da produtividade, crescimento de biomassa global, dentre outros), ou negativa, quando afeta de forma negativa a estrutura do sistema (diminui a produção primária, diminuição da biomassa global, dentre outros).

Já o controle por homotaxia congênica acontece quando componentes dentro do sistema (*e.g.* espécies) realizam certas funções similares. Assim, mesmo com a perda de componentes não

há prejuízo ao sistema, já que outros componentes passam a exercer esta função e compensam essa falta, provendo vias alternativas para manter a estabilidade do sistema.

Nestes dois modelos, é possível observar a preocupação com as funções que os componentes executam no sistema. Contudo, fica claro que os dois possuem pressupostos distintos. O primeiro modelo (retroalimentação ou redundância) leva em conta as conceituações de superorganismos¹⁸, nas quais, as espécies trabalham em conjunto com funções específicas e a perda de componentes pode ser danosa para o funcionamento do ecossistema, já que certas funções não podem ser recuperadas.

O segundo modelo (homotaxia congênica) se ancora nas espécies individualistas e na variabilidade funcional dos indivíduos¹⁹. Nesta concepção, as espécies possuem amplitudes funcionais, quando observado suas populações e os indivíduos que as compõem, e estas muitas vezes exibem pequenas variações que os dão vantagem para explorar novos nichos, quando disponíveis. Desta forma, as espécies podem explorar um maior espectro de espaços funcionais, não sendo restringidas a funções específicas. Com a perda de componentes (*e.g.* espécies) de um sistema, surgem nichos vagos que podem ser ocupados por organismos de espécies com amplitudes funcionais restringidas (por exemplo, pela competição) mantendo a homeostase e funcionamento do sistema sem prejuízo.

Estes pressupostos, que são aceitos nestes modelos, fazem parte do debate histórico sobre a composição e estrutura de comunidades, comunidades organísmicas (Clements) versus comunidades individualistas (Gleason), gerada no início do século 20. Os ideais individualistas (suprimidas pela comunidade científica no início do século, devido à formação mais “Clementisiana” dos pesquisadores) foram postos à prova, na década de 1950, e se mostraram mais aplicáveis do que os ideais organísmicos⁴.

Neste aspecto, foi Lotka o primeiro a discutir sobre um conceito termodinâmico de ecossistema, no qual ele sugeriu que o sistema poderia ser descrito por um conjunto de equações que expressam a relação entre as trocas de energia e matéria e seus componentes. Ele acreditava que as taxas de transformação de energia e matéria, dentro de um sistema, seguiam os princípios da termodinâmica. Contudo, só anos depois estas ideias foram retomadas por Lindeman, propondo um modelo alternativo para este vislumbre. Assim, Lindeman visualizava o balanço de entrada e saída de energia e materiais de um sistema por meio de níveis tróficos, integrando a proposta de

Elton¹. Esta interpretação possibilitou construir uma pirâmide de energia, dando uma abstração de como a energia flui dentro dos níveis tróficos.

Vale lembrar que estas ideias estão sobre a ótica da termodinâmica e seguem duas leis essenciais: primeira lei da termodinâmica, ou lei da conservação da energia, a qual afirma que a energia pode ser transformada (de luz para calor), mas não pode ser criada ou destruída; segunda lei da termodinâmica, ou lei da entropia, que afirma que em processos que transformam a energia ocorrerá uma degradação de uma forma composta para difusa. A par destes pressupostos, a energia solar que entra em um sistema é transformada (ex. em calor) e essa energia transformada não se mantém concentrada e se difunde (ex. respiração, perda de calor). Desta forma, a cada transferência de energia em uma cadeia trófica, de um organismo para o outro, grande parte da energia se perde em forma de calor¹.

Para se entender melhor esse fluxo de energia, o conceito de produtividade pode ajudar na interpretação desta interlocução. A produtividade se define como a taxa na qual a energia radiante é convertida, pela atividade foto e quimiossintética, em substâncias orgânicas. Assim, podemos dividi-la em: produtividade primária bruta, que é a taxa global da fotossíntese, incluindo a respiração e excreção; produtividade primária líquida, que é a taxa de armazenamento de matéria após a respiração e excreção; produtividade líquida da comunidade, definida como a taxa da produção primária líquida menos o consumo heterotrófico; produtividade secundária, correspondente à taxa de armazenamento energético em níveis de consumidores^{1, 3}.

Nesta linha, o modelo de fluxo energético integra estas visões e exhibe a seguinte estrutura: A) entrada de energia ou energia ingerida, B) energia não utilizável (excreção de materiais não utilizados na absorção), C) Energia assimilada, D) respiração, E) produção ($f(x)$: energia assimilada - respiração), F) crescimento (investidura da produção sobressalente), G) Energia depositada ou armazenada (parte da produção sobressalente que não é usada e é armazenada para uso futuro)¹. Este processo pode ser visto desde o nível dos organismos até um nível sistêmico, sintetizando os compartimentos que auxiliam na produção da biomassa de um indivíduo ou de um determinado sistema.

Complementando essas ideias, é relatado que as cadeias ou redes tróficas são curtas, com no máximo de 4 a 5 elos¹⁴. Esta afirmativa é justificada devido à dissipação da energia (lei da termodinâmica) ao passar de um nível trófico para outro. Neste princípio, a energia que chega nos produtores não é a mesma que está disponível para os consumidores primários, exibindo uma perda

significativa na transferência de nível, devido os processos que ocorreram em cada nível/compartimento. Este processo pode gerar uma transferência insignificante quando o fluxo se aproxima dos níveis tróficos mais altos. Além disso, muitas vezes a quantidade de elos em um sistema depende da quantidade de energia disponível.

Outro ponto a ser observado é a qualidade da energia transferida, já que, ao contrário da quantidade de energia, que vai diminuindo em direção aos níveis tróficos mais altos, a qualidade da energia se mostra mais elevada nesta mesma direção. Ou seja, a qualidade da energia disponível na transferência entre os produtores e consumidores é de menor qualidade, quando comparado à transferência ocorrida entre um consumidor terciário e um quaternário.

Uma das explicações mais difundidas é que a capacidade de gerar calorías muda de um nível para o outro, já que estruturalmente produtores e consumidores são distintos. Assim, é necessário um maior consumo de biomassa de produtores do que da biomassa de consumidores, já que a digestão e assimilação da biomassa gastam um pouco mais de energia e apresentam uma maior taxa de excreção, principalmente devido a estruturas como parede celular, lignina, dentre outros. Já em níveis tróficos mais elevados, o consumo desta biomassa é quase total, já que as estruturas necessitam de menos gasto de energia para sua assimilação.

Tendo visto estas questões e suas perspectivas, as pirâmides tróficas podem ser uma maneira de expressar esse fluxo e os elos. Dentre elas, pode-se citar: a pirâmide de número, que expressa a quantidade de indivíduos entre um nível e outro; a pirâmide de biomassa, que exibe a biomassa de todos os indivíduos de um nível para o outro; e a pirâmide de energia, que mostra a taxa de energia contida em cada nível. De certa forma, a pirâmide de energia nos permite uma imagem mais geral da natureza funcional do sistema, já que ela pode demonstrar a velocidade da passagem de massa entre os níveis tróficos e sua forma não é afetada por variações de tamanhos e taxas metabólicas.

Apesar de ser uma boa forma de entender o funcionamento de um ecossistema, outras questões devem ser consideradas, como, por exemplo, a complexidade do sistema e a capacidade de suporte. Em relação à complexidade do sistema, deve-se levar em conta o seu tamanho/escala, ou seja, se um sistema mais complexo ou maior é necessário uma maior quantidade de energia para sustentá-lo. Um bom exemplo a explorar utilizando o modelo de energia em cadeias/redes tróficas, é verificar se a complexidade das relações aumentam, por exemplo, por invasão e/ou introdução de uma nova espécie, situação na qual, teoricamente, é necessário aumentar o fluxo de energia dentro do sistema, ou um novo rearranjo neste fluxo. Geralmente, à medida que um sistema se torna maior

e mais complexo, aumenta-se a taxa de respiração da produção bruta para sustentar esse novo formato, e conseqüentemente, diminui o investimento em crescimento e armazenamento do sistema.

Estas mudanças nos levam a questionar: a entrada de um novo componente pode afetar o funcionamento e as funções de um sistema? A entrada desta nova espécie pode aumentar as interações e, conseqüentemente, inserir novas funções no metabolismo do ambiente? Estas indagações vêm à tona quando transcendemos a observação da composição e estrutura do sistema, e colocamos em pauta como as ações individuais e integradas afetam o sistema e seu funcionamento.

DIVERSIDADE FUNCIONAL E A INTEGRAÇÃO DOS NÍVEIS ECOLÓGICOS

Como discutido nos tópicos anteriores, um dos mais importantes objetivos da ecologia é explicar quais fatores e processos são responsáveis pelos padrões de composição, estrutura e dinâmica dos níveis ecológicos²⁰. Recentemente, tem se ampliado as possibilidades de compreender esses padrões e, neste olhar, as regras que regem os padrões têm recebido maior atenção, principalmente para os fatores que estruturam as comunidades ecológicas, como os filtros ambientais e a similaridade limitante²¹.

Destes fatores, os filtros ambientais são considerados os responsáveis por selecionar as espécies que vivem em um determinado habitat. Já a similaridade limitante, considera que as espécies que possuem características distintas podem co-ocorrer em um dado habitat sem ocorrer exclusão competitiva²². Apesar de existir uma premissa de nicho e uso de espaço nestas visões, muitos dos trabalhos que avaliam estes fatores se limitam aos parâmetros ecológicos tradicionais (pautadas na riqueza e abundância relativa).

Neste contexto, emerge a diversidade funcional, que está conceituada nas relações que as espécies/comunidades exibem no funcionamento do sistema ecológico, como bens e serviços (*e.g.* participações na produtividade, decomposição, ciclagem de nutrientes, dentre outros) que estas desempenham no ambiente. Assim, esta conjectura possibilita observar além dos aspectos quantitativos (dados baseados nos valores de riqueza e abundância relativa) para um aspecto integrativo tanto quantitativo quanto qualitativo (papel funcional no ambiente).

Dentre as métricas utilizadas para obter os “traços” funcionais, destaque para a produção, uso de espaço (para plantas), características morfológicas, história de vida (animais e plantas),

ecologia trófica (animais), dentre outras. Desta forma, o uso destes “traços” funcionais proporciona uma faixa larga de exploração de dados, devido à grande diversificação de organismos e informações que podem ser amostradas e/ou encontradas na literatura²³.

Por também ser mais um componente da biodiversidade, a diversidade funcional pode ser aplicada para compreender a estrutura, composição e funcionamento de um dado sistema. Ainda, por levar em conta como as espécies exploram os recursos e como suas ações (transformação de materiais) alteram o ambiente, esta área da ecologia pode ajudar a dar uma melhor visualização dos padrões locais, regionais e globais das relações meio biótico e abiótico.

A diversidade funcional pode ser categorizada em três principais aspectos: riqueza funcional, Equitabilidade funcional e divergência funcional²⁴. A riqueza funcional pode representar a quantidade de funções que uma espécie/comunidade pode prover/ocupar em um sistema. Já a equitabilidade funcional tem relação em como está distribuído/equilibrado as funções entre as espécies, ou seja, se há espécies com mais ou menos funções que outras ou se há uma separação similar entre elas. Por fim, a divergência funcional, que possibilita verificar se a abundância das espécies e suas funções são distintas, ou seja, se realizam diferentes funções e sua eficácia.

Outras métricas (além da riqueza, equitabilidade e divergência funcional) que podem ser utilizadas em escalas espaciais e temporais, como a identidade funcional, dispersão funcional, entropia funcional, especialização funcional e originalidade funcional²⁵.

Na identidade funcional, observa-se a variação da abundância dos indivíduos de uma dada função ambiental, assim observa-se que a variação da abundância das espécies pode gerar oscilação nas funções que estão sendo executadas em um ambiente. A dispersão funcional pode refletir as mudanças na amplitude da abundância das espécies e como isto afeta as funções realizadas dispersando a espécie para um aumento e/ou diminuição de funções em um ambiente. Entropia funcional pode demonstrar como as mudanças na amplitude da abundância de espécies funcionalmente similares pode gerar uma aproximação ou distanciamento funcional entre as espécies, a nível de função e eficácia. Especialização funcional analisa como espécies com funções específicas (especialista) ou “multifunções” (generalista) tendem a aumentar sua abundância quando submetidas a algum distúrbio. Originalidade funcional quantifica como as mudanças na abundância das espécies podem ocasionar redundância funcional, ou seja, considera-se que as espécies tendem a exibir funções pouco originais após um distúrbio, devido a diminuição de materiais e recursos disponíveis em um sistema²⁵.

Estes aparatos explicitados acima podem ajudar na avaliação de ambientes com distintas características ambientais ou em ambientes que sofreram distúrbios (pré e pós-distúrbio). No entanto, este tipo de análise não se limita a apenas avaliar qualidade ambiental, mas também discutir propostas conceituais que vêm sendo utilizadas na ecologia. Como já comentado, algumas teorias se baseiam em dados de abundância ou riqueza e traçam conceitualmente predições sobre certas questões ecológicas.

Será que ilhas mais próximas possuem mais funções ou variações de funções do que ilhas distantes? Será que o balanço entre migração e extinção afeta as funções ambientais? São questões que podem surgir da teoria de biogeografia de ilhas. Será que em regiões de médio curso de rios as funções seguem a tendência de diversidade em relação aos outros gradientes de um rio? Será que a presença de barramento (represas) em um certo gradiente de um rio modifica os padrões de diversidade funcional? Será que as características distintas de um certo gradiente em um rio podem exibir diferenças funcionais? Questões que podem surgir com base na teoria de rio contínuo, descontinuidade seriada e domínio de processos, respectivamente.

Observando estas questões levantadas de forma rápida, vemos que a aplicabilidade desta área da ecologia pode nos trazer complementaridade para alguns conceitos já propostos, e/ou novas interpretações sobre como um dado sistema funciona e todos os seus níveis.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em síntese, a ecologia vem buscando interpretações sobre diversos fenômenos (biótico e abiótico) que influenciam a estrutura, composição e função dos seus diversos níveis ecológicos, e esta tarefa tem cada vez mais incorporado visões e novas interpretações que auxiliam em explicar os padrões encontrados. O fato é que quando estamos observando estes padrões temos que compreender que diversos pressupostos estão embutidos e estes devem estar bem claros, pois são interpretações conceituais complementares que podem nos guiar para um melhor esclarecimento de questões ecológicas que queremos responder.

Assim, a diversidade funcional não é a única forma de conduzir estas discussões, mas vem se mostrando como uma boa ferramenta na compreensão do funcionamento de um sistema dos níveis ecológicos mais baixos (*e.g.* organismos) até os mais elevados (*e.g.* ecossistemas). Um outro triunfo da diversidade funcional é que ela compreende que as funções não são relacionadas às

espécies e sim aos indivíduos, e que estes podem ser de “monofuncionais” a “polifuncionais”. Estes últimos, quando há vacância de um espaço funcional (por perda de indivíduo/espécie que realizava uma função), ampliam seu espectro funcional para exercê-la, como discutido nas ideias de nicho vago e sistemas individualistas.

Por fim, deve-se lembrar que as questões ambientais não são traçadas pelas metodologias ou equipamentos que temos disponíveis, e sim ao contrário. É necessário realizar os exercícios básicos das disciplinas de metodologia de pesquisa, avaliando primeiro o que se procura responder (pergunta problema) e seus objetivos, e se estes, em seu delineamento metodológico, necessitam destas métricas propostas. Assim, é possível uma melhor resolução de sua problemática.

REFERÊNCIAS

1. Odum, EP. Ecologia. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1988.
2. Tilman, D. Functional Diversity. *Encyclopedia of Biodiversity* 2001, 3: 109-120. <https://doi.org/10.1006/rwbd.1999.0154>.
3. Ricklefs, RE. A Economia da Natureza. 5ª ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 2003.
4. Petry, AC; Pelicice, FM; Belline, LM. Ecólogos e suas histórias: um olhar sobre a construção das ideias ecológicas. Maringá: EDUEM, 2010. p. 61-88.
5. Darwin, C. On the origin of species. London: John Murray, 1859.
6. JOHNSTON, RF. *Current Ornithology*. Washington: Springer, 1995. p. 155-176.
7. Gomes, LN; Pinheiro, JR; Piorski, NM. Aspectos ecomorfológicos da comunidade de peixes do estuário do rio Anil, Ilha de São Luis-MA. *Boletim do Laboratório de Hidrobiologia*. 2003; 16: 29-34. <http://dx.doi.org/10.18561/2179-5746/biotaamazonia.v13n1p30-35>.
8. Macarthur, RH; Wilson, EO. *The theory of island biogeography*. New Jersey: Princeton University Press, 1967.
9. Vannote, RL, Minshall GW, Cummins KW, Sedell JR; Cushing, CE. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1980; 37: 130-137. <https://doi.org/10.1139/f80-017>.
10. Paine, RT. Food web complexity and species diversity. *American Naturalist*. 1966; 100: 65-75.
11. Paine, RT. Trophic control of production in a rocky intertidal community. *Ecology*. 1969; 50: 950-961.

12. Stiling, P. Ecology: theories and applications. 4^o ed. New Jersey: Prentice-Hall INC., 2002.
13. Tansley, AG. The use and abuse of vegetational concepts and terms. Ecology. 1935; 16: 284-307. <https://doi.org/10.2307/1930070>.
14. Elton, CS. Animal ecology. London: Sidgwick and Jackson, 1927.
15. Möbius, KA. Die Auster und die Austernwirthschaft. Berlin: Verlag von Wiegandt, Hempel & Parey, 1877.
16. Forbes, SA. On some interactions of organisms. Laboratory of Natural History Building. 1880; 1: 3-17.
17. Lovelock, JE. Letter to the Editors – Gaia as seen through the Atmosphere. Atmospheric Environment. 1972; 6: 579-580. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(72\)90076-5](https://doi.org/10.1016/0004-6981(72)90076-5).
18. Clements, FE. Plant Succession. An analysis of the development of vegetation. Washington: Carnegie Institution, 1916.
19. Gleason, HA. The Structure and Development of the Plant Association. Bulletin of the Torrey Botanical Club. 1917; 44(10): 463-481. <https://doi.org/10.2307/2479596>.
20. Weiher, E; Keddy, PA. Ecological Assembly Rules – Perspectives, advances, retreats. Cambridge: Cambridge University Press. 1999.
21. Sobral, FL.; Cianciaruso, MV. Estrutura filogenética e funcional de assembleias: (re)montando a ecologia de comunidades em diferentes Escalas espaciais. Bioscience Journal. 2012; 2(4): 617-631. Available from: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/13491>.
22. Funk, JL; Cleland, EE; Suding, KN; Zavaleta, ES. Restoration through reassembly: Plant traits and invasion resistance. Trends in Ecology and Evolution. 2008; 23(12): 695-703. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.07.013>.
23. Gómez, JP; Bravo, GA; Brumfield, RT; Tello, JG; Cadena, CD. A Phylogenetic approach to disentangling the role of competition and habitat filtering in community assembly of Neotropical forest birds. Journal of Animal Ecology. 2010; 79(6): 1181-1192. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2010.01725.x>.
24. Mouchet, M; Villéger, S; Mason, NWH; Mouillot, D. Functional diversity measures: an overview of their redundancy and their ability to discriminate community assembly rules. Functional Ecology. 2010; 24(24): 867-876. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2010.01695.x>.
25. Mouillot, D; Graham, NAJ; Villegger, S; Mason, NWH; Bellwood, DR. A functional approach reveals community responses to disturbances. Trends in Ecology and Evolution. 2013; 28(3): 167-177. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2012.10.004>.