

AVANÇOS NA UTILIZAÇÃO DE NEMATOIDES COMO BIOINDICADORES DA QUALIDADE DO MEIO AMBIENTE

Giovani de Oliveira Arieira¹

¹Departamento de Fitotecnia e Fitossanidade/Faculdade de Agronomia e Zootecnia,
Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil
E-mail: goarieira@gmail.com

Indicadores ambientais são os atributos que medem ou refletem o *status* ambiental ou a condição de sustentabilidade de um ecossistema, podendo ser classificados como físicos, químicos e biológicos (mais comumente chamados de bioindicadores). Os bioindicadores podem ser utilizados para avaliação da qualidade ambiental, bem como para o monitoramento de ecossistemas, de três formas:

- **Processos biológicos:** quando, em vez de se medir diretamente algum componente da biota, utiliza-se medidas dos processos por ela desempenhados. É uma ferramenta importante quando a mensuração direta do organismo é inviável, como é caso da biota microbiana. Nesse caso, mensura-se as enzimas do solo ou a fixação biológica do nitrogênio (FBN), por exemplo.
- **Espécies:** em alguns casos, quando se conhece muito bem o gradiente de resposta de um determinado organismo a um parâmetro ambiental específico, é possível utilizar as alterações na sua abundância para verificar a qualidade do meio ambiente. A qualidade marinha pode ser medida pelas alterações em determinadas populações de recifes de corais.
- **Componentes de comunidades:** no caso de nematoides e outros organismos da biota do solo, utiliza-se a mensuração das comunidades, ou seja, do conjunto de populações dos organismos. Essa medida é interessante do ponto de vista de fornecer não apenas uma análise da diversidade dos organismos em si, mas também da estrutura e das funções desempenhadas por cada componente, o que permite uma caracterização do estado funcional do ecossistema.

As funções ecológicas dos nematoides no solo incluem a decomposição de matéria orgânica, a mineralização de nutrientes, a degradação de toxinas e a regulação da população de microrganismos, além de serem organismos importantes no processo de fluxo energético na cadeia trófica.

Mas, entre tantos membros da fauna do solo, por que os nematoides são bons indicadores biológicos? Entre as razões, pode-se citar que: (a) são metazoários simples, ocorrendo em qualquer ambiente que forneça uma fonte de carbono orgânico, em qualquer tipo de solo, sob diversas condições climáticas e em *habitats* que variam de equilibrado a perturbado; (b) no solo, vivem em filmes de água e sua cutícula permeável controla o contato com o microambiente; (c) não migram rapidamente de condições estressantes e muitas espécies sobrevivem à desidratação, congelamento ou estresse por oxigênio; (d) ocupam posições-chave nas redes alimentares do solo; (e) suas características morfológicas internas podem ser vistas sem dissecação, o que facilita sua identificação em relação a outros organismos do solo, como anelídeos; (f) o hábito alimentar é facilmente identificado de acordo com a estrutura da cavidade bucal e faringe; (g) respondem rapidamente à perturbação e enriquecimento nutricional do ambiente; (h) são mais facilmente extraídos do ambiente, principalmente relação a colêmbolos, por exemplo.

Mensuração das comunidades de nematoides

Uma amostra de um ecossistema agrícola pode conter mais de 50 *taxons* de nematoides, em variadas proporções e, assim, faz-se necessário reunir essa complexidade em um valor único ou índice. Ao longo do tempo, desenvolveu-se uma série de formas de mensurar as comunidades de nematoides.

- **Abundância:** a abundância total é avaliada pela contagem do número total de nematoides em uma amostra com volume conhecido de solo, enquanto as abundâncias absoluta (número) e relativa (percentagem) de cada *taxon* são calculadas por meio de amostragem, considerando-se a abundância total de nematoides na amostra.
- **Riqueza e diversidade:** uma primeira medida da diversidade de organismos em uma comunidade se baseia na riqueza, ou seja, o número de diferentes *taxons* encontrados em cada condição. Além dessa medida mais simples existem diversos índices matemáticos aplicáveis para mensuração da diversidade de qualquer organismo, incorporando, para tanto, dados de proporção entre os *taxons*. Usualmente, os índices básicos que têm sido calculados são: Índice de Diversidade de Shannon-Weaver (H'), Índice de Equitatividade de Shannon (J'),

Índice de Riqueza de Margalef (SR), Índice de Dominância de Simpson (Ds) e Índice de Diversidade de Simpson (H_2).

- **Estrutura trófica:** basicamente, trata-se de uma medida da proporção entre os grupos tróficos de nematoides no ambiente. No caso de ambientes terrestres, essa avaliação tem ficado bastante restrita a cinco grupos: parasitas de plantas, fungívoros, bacteriófagos, carnívoros e onívoros. Entretanto, em condições distintas, os nematoides algívoros têm sido considerados. Além disso, pode-se mensurar a diversidade de grupos tróficos pelo cálculo do Índice de Diversidade Trófica, considerando-se a abundância relativa de cada grupo.
- **Maturidade ecológica:** com base na estratégia de vida (colonização do ambiente) e na posição percebida dos *taxons* em um espectro baseado na taxa reprodutiva e características correlacionadas, as famílias de nematoides podem ser divididas em uma escala colonizador-persistente (c-p). Tal escala varia de um (estrategistas r, primeiros colonizadores dos novos recursos) a cinco (estrategistas K, persistentes em hábitat sem perturbação). Assim, considerando a proporção de família, utiliza-se as medidas do Índice de Maturidade (MI), do Índice de Maturidade 2-5 (MI2-5) e do Índice de Parasitas de Plantas (PPI).
- **Condição de cadeia trófica:** As primeiras iniciativas de se mensurar a cadeia trófica do solo através de nematoides valia-se de razões entre abundâncias relativas de certos grupos tróficos. Esse conceito evoluiu para o Índice Basal (BI), Índice de Estrutura (SI), Índice de Enriquecimento (EI) e Índice Canal (CI), com base na presença e abundância de determinadas guildas indicadoras da condição ecológica do solo, especialmente com relação a cadeias alimentares. Assim, é considerada basal a cadeia alimentar que foi reduzida em função do estresse, como estruturada a cadeia alimentar na qual os recursos são mais abundantes ou onde a recuperação de estresse está ocorrendo e como enriquecida quando ocorre perturbação ou distúrbio e os recursos tornam-se disponíveis por causa da mortalidade de organismos.
- **Perfil faunal e pegadas metabólicas:** a representação gráfica dos índices SI e EI geram o perfil faunal, que explicita a condição ambiental e o nível de distúrbio do ecossistema. Essa representação, quando leva em conta possíveis alterações ao longo do ciclo de vida, como a biomassa, geram as pegadas metabólicas.

Avanços nas últimas décadas

Inúmeros avanços nas técnicas e ferramentas para avaliação de comunidades de nematoides foram desenvolvidos ao longo do tempo. Nos últimos 5 anos uma nova realidade tem se aberto para esse tipo de estudo, principalmente no sentido de ampliar a as pesquisas por nematologistas em geral, e não apenas pelos taxonomistas clássicos, que prevaleciam até então.

Uma primeira ferramenta desenvolvida nesse sentido foi a criação do NINJA (Nematode Indicator Joint Analysis), uma plataforma online baseada na linguagem R que realiza os cálculos dos índices para mensuração da maturidade ecológica, estrutura trófica e avaliações de cadeia alimentar. Trata-se de uma plataforma gratuita, simples e de fácil uso, além de agilizar o cálculo dos índices. Outro ponto interessante é o fato de que essa ferramenta permite total controle dos dados, o que é necessário tendo em vista que alguns grupos de nematoides podem ser alocados em grupos funcionais diferentes dependendo do objetivo do trabalho. No caso dos índices de diversidade, já existe uma grande quantidade de softwares que realizam esses cálculos e muitos desses softwares permitem também que se realize a classificação hierárquica por similaridade ou dissimilaridade, dependendo do índice considerado.

Mas com certeza um dos pontos que mais desestimulam pesquisadores a realizarem trabalhos na área de ecologia de comunidades de nematoides se baseia no fato de que a caracterização morfológica requer muito tempo e treinamento específico. Nos últimos anos, entretanto, têm-se avançado muito na aplicação de técnicas moleculares para caracterização da diversidade taxonômica nas comunidades de nematoides, principalmente em estudos realizados no ambiente terrestre.

As abundâncias de determinados grupos de nematoides do solo podem ser determinadas com uso de PCR quantitativa (qPCR) e uma ampla gama de *primers* específicos têm sido desenvolvidos com o intuito de estudar determinados *taxons* de nematoides no solo. Entretanto, essas abordagens quantitativas não têm sido efetivas em fornecer informação sobre toda a diversidade presente em comunidades de nematoides multi-específicas, já que são obtidos dados de apenas alguns *taxons* específicos, para os quais os *primers* foram desenvolvidos.

A fim de contemplar a composição total da diversidade em comunidades de nematoides, têm-se aplicado técnicas de análises de diversidade molecular, como DGGE, T-RFLP e, predominantemente, HTS. Estudos comparativos têm verificado, inclusive,

que a utilização de técnicas de HTS produzem uma alta resolução taxonômica da comunidade de nematoides e se aproxima de dados obtidos pela avaliação morfológica clássica.

Alguns grupos têm apontado, mais recentemente, a utilização de técnicas de *metabarcoding* como uma provável alternativa para avaliar a diversidade total das comunidades de nematoides, principalmente no caso daqueles *taxons* que são raros ou de difícil observação de estádios importantes para a identificação morfológica precisa (quando se necessita de características exclusivas dos espécimes adultos). Entretanto, estudos recentes demonstraram que essa utilização pode tanto superestimar quanto subestimar a prevalência de várias famílias. Dessa forma, a discrepância entre essas técnicas, principalmente em comparação com a identificação morfológica clássica, necessita de pesquisas complementares para solidificar a acurácia dessas técnicas de caracterização das comunidades de nematoides do solo.