Ecologia e biodiversidade do solo no contexto da agroecologia

Heitor Luiz da Costa Coutinho[1]
Mariella C. Uzêda[2]
Aluísio Granato de Andrade[3]
Sílvio Roberto de Lucena Tavares[4]

Resumo - Os aspectos da ecologia e da biodiversidade do solo no contexto da agroecologia são vários. Um modelo conceitual que explica os fatores determinantes da sustentabilidade, do ponto de vista ecológico e de produtividade, de sistemas de produção que se baseiam nos preceitos da agroecologia, é aqui descrito, assim como a influência e as relações existentes entre a biodiversidade do solo e esses fatores. Uma revisão dos componentes e funções da biodiversidade do solo é apresentada, preparando o leitor para uma análise dos impactos que o manejo agrícola das terras pode acarretar aos processos ecológicos do solo e, por outro lado, das possibilidades de manejo daquela biodiversidade e/ou de suas funções, visando otimizar os fatores determinantes da sustentabilidade de sistemas de produção agroecológicos. Por fim, é importante considerar o conhecimento tradicional do homem do campo no desenvolvimento de estratégias de manejo da biodiversidade do solo e analisar os cenários futuros e os desafios para lograr êxito na busca pela agricultura ecológica sustentável.

Palavras-chave: Agroecossistema; Ecossistema; Agricultura sustentável.

INTRODUÇÃO

Em muitos anos de esforços voltados para o aumento da produtividade agrícola, inúmeros sucessos foram alcançados, conferindo maior competitividade aos países produtores em um mercado globalizado e obtenção de relativa capitalização. Entretanto, junto com os ganhos produtivos vieram os problemas associados à degradação ambiental, principalmente devido à redução da qualidade do solo e disponibilidade de nutrientes, erosão e contaminação por metais pesados e pesticidas, levando ao comprometimento de aqüíferos e dos índices produtivos conquistados.

Este artigo analisa, sob a ótica da agroecologia, as possibilidades que os conhecimentos acumulados sobre o solo, sua biodiversidade e funcionamento nos apontam, direcionando-os para o desenvolvimento de sistemas de produção que valorizam os processos biológicos fundamentais à produtividade agrícola sustentável.

AGRICULTURA SUSTENTÁVEL

Em 1987, a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, criada pelas Nações Unidas, publicou o Relatório Bruntland, no qual foi apresentada a definição mais aceita e adotada para o desenvolvimento sustentável: aquele "que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades". O Relatório Bruntland, também conhecido como "Nosso Futuro Comum", reafirma uma visão crítica do modelo de desenvolvimento adotado pelos países industrializados e reproduzido pelas nações em desenvolvimento, e ressalta os riscos do uso excessivo dos recursos naturais sem considerar a capacidade de suporte dos ecossistemas.

Este conceito foi então aplicado aos variados setores da economia global,

[1]*Engº Agrº, Ph.D., Pesq. Embrapa Solos, Rua Jardim Botânico, 1024, CEP 22041-070 Rio de Janeiro-RJ. Correio eletrônico: heitor@cnps.embrapa.br*

[2]*Engª Agrª, D.Sc., Profª Instituto de Educação Superior UNYAHNA, Rua Bicuíba, Patamares, CEP 41680-440 Salvador-BA. Correio eletrônico: mariellauzeda@uol.com.br*

[3]*Engº Agrº, D.Sc., Pesq. Embrapa Solos, Rua Jardim Botânico, 1024, CEP 22041-070 Rio de Janeiro-RJ. Correio eletrônico: aluísio@cnps.embrapa.br*

[4]*Engº Agrº, M.Sc., Pesq. Embrapa Solos, Rua Jardim Botânico 1024, CEP 22041-070 Rio de Janeiro-RJ. Correio eletrônico: stavares@cnps.embrapa.br*

sendo inevitavelmente adotado pela agricultura. A sustentabilidade da agricultura tem sido definida, segundo a FAO (1989), como a capacidade de um sistema de produção de fibras, bioenergia ou alimento em:

a) manter, no longo prazo, a qualidade e quantidade dos recursos naturais e a produtividade das culturas;

b) minimizar os impactos adversos ao meio ambiente;

c) prover retornos econômicos adequados aos produtores;

d) otimizar a produção com um mínimo de insumos externos;

e) satisfazer as necessidades humanas de alimentos e renda;

f) atender às necessidades sociais das famílias e comunidades rurais.

O desenvolvimento da agricultura nos ambientes tropicais evoluiu às custas da deterioração progressiva dos recursos naturais, em função da perda da biodiversidade associada à remoção da vegetação original e conseqüente degradação do solo, em função da redução da fertilidade e aumento da erosão. A definição de um manejo sustentável requer o entendimento do funcionamento do ecossistema em resposta às práticas agrícolas utilizadas, tanto no que diz respeito à produção, quanto no que envolve o ambiente.

AGROECOLOGIA

A consolidação do conceito de agricultura sustentável fortaleceu o movimento favorável à agricultura ecológica, como aquela em condições de atender aos critérios de sustentabilidade na produção de alimentos. O novo paradigma incorpora a preocupação com a "saúde" das interações solo-água-planta e busca maximizar as contribuições biológicas, minimizando as entradas energéticas no sistema, principalmente de pesticidas e adubos minerais solúveis.

A agroecologia é uma ciência híbrida, fruto da união da ecologia com a agronomia. Representa a fusão entre a ciência pura e a natureza, por um lado, e a ciência aplicada e o esforço humano, por outro (GLIESSMAN, 2000). Tem como principal objetivo desenvolver formas de manejo agrícola que harmonizem a produção de alimentos com as estratégias vitais dos componentes bióticos do sistema, incluindo aí a espécie humana.

A agroecologia utiliza ferramentas e estratégias da ecologia de ecossistemas para estudar sistemas agrícolas, passando, então, a chamá-los agroecossistemas. Estes, segundo Odum (1984), diferem dos ecossistemas naturais por:

a) necessitar de energia auxiliar, além da energia solar, para seu funcionamento (trabalho humano e animal, pesticidas, fertilizantes, maquinário);

b) ter, na maioria dos casos, sua diversidade biológica reduzida, visando à maximização da produção;

c) resultar de uma seleção artificial de espécies, que produz, via seleção natural subseqüente, organismos dominantes no sistema (ex. monoculturas, pragas e doenças);

d) ter um maior controle externo do que interno.

A agroecologia vem ganhando força nos últimos anos em virtude da evolução da produção de alimentos orgânicos, que vem crescendo no mundo a taxas de 20% a 30% anualmente. No Brasil, a agroecologia ocupa uma área de 275 mil/ha, representando 2% da produção agrícola do país, e cresce a taxas de 50% ao ano (EPAGRI, 2003). O movimento agroecológico também tem influenciado a agricultura industrial, que vem adotando de maneira crescente o sistema de plantio direto (SPD), caracterizado pela eliminação das arações e gradagens e pela manutenção da cobertura do solo. Hoje, algo em torno de 12 milhões de hectares de terras brasileiras estão sob SPD, o que resultou em reduções significativas de perda de solo por erosão e o aporte de sedimentos aos nossos rios (LANDERS, 2001).

A produtividade e a manutenção da qualidade dos sistemas agroecológicos vão depender das interações entre quatro fatores básicos (Fig. 1):

a) potencial genético das culturas;

b) características pedoclimáticas;

c) sincronia no tempo e no espaço entre a disponibilidade e a demanda nutricional das culturas;

d) o equilíbrio ecológico entre os fatores bióticos e abióticos do agroecossistema (Fig. 1).

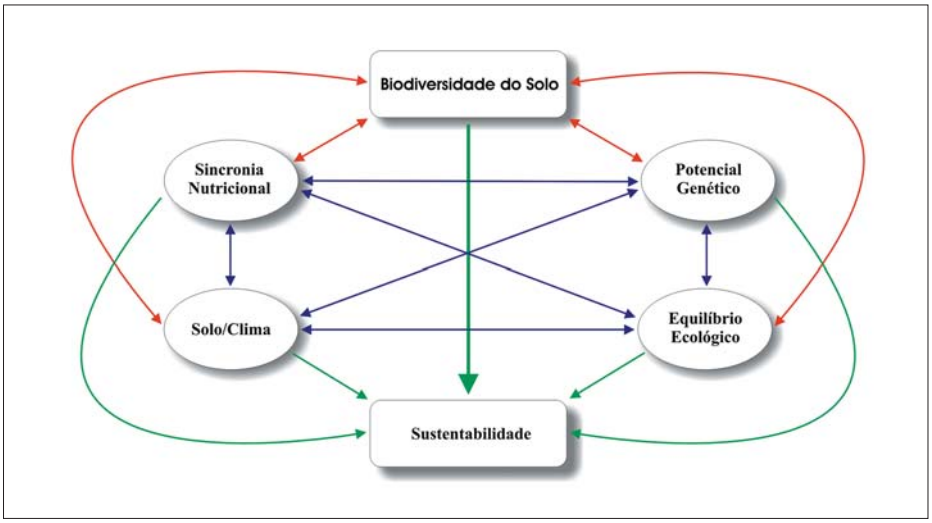

Figura 1 - Modelagem conceitual dos fatores intervenientes na produtividade sustentável de sistemas de produção agroecológicos e suas relações com a biodiversidade do solo

É importante lembrar que a maior parte das trocas de energia, entradas e saídas de matéria de um ecossistema, seja ele natural ou agrícola, ocorre através do solo. A sua biodiversidade é um dos primeiros componentes a afetar e a ser afetado pelos fatores mencionados. A biodiversidade do solo tem, portanto, fundamental importância para o estabelecimento de uma produtividade sustentável nos sistemas agroecológicos.

Potencial genético das culturas

As variedades de culturas agrícolas desenvolvidas pelas empresas e instituições de pesquisa agropecuárias têm um potencial produtivo definido por suas características genéticas e condições do meio onde são cultivadas. Na maior parte dos casos, este potencial é determinado em ensaios controlados, realizados em campos experimentais, e não é alcançado nas fazendas e outras unidades produtivas. Isto porque, em condições reais de campo, é muito difícil garantir a uniformidade genética das sementes, a homogeneidade da aplicação de adubos e da disponibilidade de água e nutrientes às plantas, e a ação de organismos do solo que interfiram no desempenho dessas plantas melhoradas. Estes podem ter efeito positivo ou negativo sobre o potencial produtivo das culturas. Por exemplo, as variedades de soja brasileiras são desenvolvidas levando-se em consideração sua capacidade de associar-se simbioticamente com bactérias fixadoras de nitrogênio do grupo dos rizóbios. Se estas não se encontram no solo e não são inoculadas no plantio, o potencial genético de produção dificilmente será alcançado. Fatores abióticos também podem afetar a nodulação e a fixação biológica de nitrogênio na soja, como temperatura, umidade, presença de nitrato no solo, e assim comprometer o potencial produtivo da variedade melhorada. Um exemplo de efeito negativo à produção causado por organismos de solo, ainda referente à cultura da soja, é o aparecimento de nematóides fitófagos em sistemas de monocultura sem rotação, impedindo a cultura de alcançar seu potencial genético.

Características pedoclimáticas

A adequação de sistemas de produção à aptidão agrícola das terras é condição fundamental para o sucesso de sistemas agroecológicos. A aptidão agrícola é determinada por uma conjugação de fatores ambientais – solo, clima, topografia – que indicam se determinada área deve ser ocupada por lavouras anuais, pastagens, lavouras perenes, atividades florestais, ou simplesmente deixada sem ocupação. Este fator também é influenciado pela ação de organismos do solo, uma vez que estes são determinantes para o processo de formação de solos (pedogênese). A biodiversidade do solo também interfere no clima, devido às suas atuações na produção de gases associados às mudanças climáticas globais, como o metano e óxidos nitrosos, e no seqüestro de carbono.

Nutrição das plantas

Este fator talvez seja o mais relevante para a sustentabilidade de sistemas de produção agroecológicos. Para que a necessidade de adubação química seja minimizada, as culturas devem contar, o máximo possível, com nutrientes provenientes da decomposição de resíduos de tecidos vegetais de culturas anteriormente plantadas ou consorciadas, e com simbioses, que permitam o alcance de fontes de nutrientes antes inacessíveis. O ideal é que a maior disponibilização de nutrientes se dê nos momentos de maior exigência nutricional das plantas, normalmente nas fases inicial de crescimento e de frutificação e/ou amadurecimento de grãos. Esta sincronia dependerá da quantidade e qualidade dos resíduos vegetais em decomposição, da estrutura e da atividade das comunidades de organismos de solo decompositores, das condições pedoclimáticas e das características fisiológicas e morfológicas das plantas. A consolidação do paradigma agroecológico na agricultura e da busca pela sustentabilidade abriu novas frentes para a pesquisa, sendo uma delas o desenvolvimento de tecnologia de manejo da biodiversidade do solo visando otimizar o aporte de nutrientes da biomassa para as culturas agrícolas, e o seu retorno ao solo, via decomposição da matéria orgânica e estoque nutricional na biomassa microbiana. Nos sistemas agrícolas convencionais, o aporte de matéria orgânica é reduzido, e a simplificação do sistema prejudica as associações simbióticas, aumentando a dependência por insumos químicos. Esta linha de pesquisa ainda está em fase de aquisição dos conhecimentos básicos necessários para modelar, no espaço e no tempo, a dinâmica dos processos ecológicos no solo e realizar estudos de cenários, para então poder testar tecnologias de manejo cultural.

Equilíbrio ecológico

Ambientes naturais não têm problemas de pragas ou doenças que comprometam significativamente o ecossistema. Uma floresta em estado de equilíbrio não deixa de existir em função de um ataque de uma espécie de lagarta ou algum fungo parasita. Este equilíbrio resulta das cadeias tróficas e interações que regulam os ecossistemas. Microrganismos fitopatogênicos costumam ter especificidade hospedeira, ou seja, não infectam todas as espécies. Esta especificidade pode ser bastante alta, a ponto de apenas algumas subespécies de plantas serem hospedeiras de determinada estirpe de fitopatógeno. Da mesma forma, a maioria dos insetos fitófagos tem preferência alimentar, e não consomem todas as espécies de plantas. Ademais, ocupam posição intermediária nas cadeias tróficas, isto é, têm inimigos naturais que tratam de manter suas populações em níveis controlados. Já no ambiente agrícola, a destruição do *habitat* original resulta no desaparecimento de grande número de espécies, o que compromete interações ecológicas, além de causar ruptura do equilíbrio das cadeias tróficas. Isto, aliado à oferta de grandes quantidades de alimento preferencial para determinados organismos, fato agravado nas monoculturas, leva ao surgimento das pragas e doenças. Quanto maior o equilíbrio ecológico de um agroecossistema, ou seja, cadeias tróficas estruturalmente íntegras, com grande quantidade de indivíduos representantes de diferentes categorias funcionais

garantindo as interações, e fisiologicamente ativas, menor será a necessidade de aplicações de pesticidas. Evidentemente que este equilíbrio só poderá ser alcançado com o aumento da agrobiodiversidade, ou seja, da riqueza e abundância de espécies presentes no sistema de produção.

BIODIVERSIDADE DO SOLO

O solo, por apresentar formas muito sutis de vida que desenvolvem processos de maneiras pouco evidentes, freqüentemente é visto como uma base físico/química para o que seria a parte verdadeiramente viva do sistema. Entretanto, essa "caixa-preta" vem sendo gradativamente desvendada e, atualmente, o solo já passa a ser entendido como um complexo de seres vivos e materiais minerais e orgânicos, cujas interações resultam em suas propriedades específicas (estrutura, fertilidade, matéria orgânica, capacidade de troca iônica etc.). Os organismos do solo não são apenas seus habitantes, mas também seus componentes e construtores. A biodiversidade e a atividade biológica estão estreita e diretamente relacionadas com as funções e características essenciais para a manutenção da capacidade produtiva e da qualidade dos solos e ecossistemas a eles relacionados.

A seguir serão descritas algumas destas funções essenciais.

Gênese dos solos (pedogênese)

Sem os organismos, os solos não seriam formados. A intemperização físico-química das rochas matrizes por si só resultaria em terrenos sem nenhuma fertilidade, visto que há necessidade de nitrogênio e esqueletos de carbono para que a vida se estabeleça. As algas são tidas como colonizadores primários do solo, pela sua capacidade de fixar carbono e nitrogênio da atmosfera através dos processos de fotossíntese e fixação biológica de nitrogênio, respectivamente. A partir daí, fungos e bactérias terão recursos para se desenvolver e liberar nutrientes dos minerais do solo, como o fósforo, cálcio e ferro. O solo formado, havendo a disponibilidade de água, permitirá o crescimento de plantas que, ao serem decompostas, gerarão matéria orgânica. Esta reterá nutrientes, liberando-os lentamente para os próximos colonizadores. Esta maneira simplificada de apreender o processo de pedogênese, do ponto de vista biológico, ilustra a importância da biodiversidade para a formação dos solos.

Estrutura de solos e bioturbação

O grau de porosidade e agregação de solos é determinado fortemente pela diversidade de sua macrofauna. A atividade de raízes, formigas, cupins e minhocas geram canais, poros e agregados que terão forte influência no transporte de gases e água no solo. A estabilidade dos agregados também é influenciada pela produção de açúcares, gomas e outras moléculas por microrganismos do solo.

Matéria orgânica, capacidade de retenção e estoque de nutrientes

Os organismos formam a chamada matéria orgânica viva do solo. Quanto maior a biomassa de um solo, maior o seu potencial de estoque de nutrientes através do acúmulo destes nas células microbianas. Os nutrientes são liberados conforme degradação das células, devido à morte ou predação por outros organismos.

Ciclagem de nutrientes

A decomposição da matéria orgânica resulta na quebra dos compostos orgânicos e liberação de elementos essenciais que estão presentes nas moléculas dos tecidos vegetais e animais. Antes da ação dos microrganismos, a matéria orgânica é atacada por ácaros, minhocas e cupins que trituram os resíduos e dispersam propágulos microbianos, facilitando a ação destes na mineralização do carbono. Pequenos predadores, como os protozoários e nematóides, regulam a atividade dos microrganismos. O ataque predatório mantém as populações microbianas jovens e com atividade metabólica alta. O nitrogênio é fixado biologicamente por bactérias do solo, que reduzem a forma gasosa presente na atmosfera para amônio, íon assimilável pelas plantas. O fósforo está normalmente presente nos solos tropicais em formas químicas indisponíveis. Microrganismos podem solubilizar fosfatos (bactérias) ou transportá-los para a planta (fungos micorrízicos). Praticamente todos o nutrientes necessitam da ação de microrganismos em alguma fase de seus ciclos.

Biodegradação de xenobióticos

A ação heterotrófica dos microrganismos nos fornece serviços de extrema importância, como a degradação de compostos tóxicos à natureza e ao homem. Agrotóxicos, resíduos industriais, compostos aromáticos e combustíveis podem ser degradados no solo por espécies capazes de quebrar as ligações químicas destes compostos. Em alguns casos, os compostos resultantes da degradação microbiana são mais tóxicos que a molécula original. Em outras situações, os microrganismos são capazes de mineralizar totalmente o composto tóxico.

Controle biológico

O controle de pragas e doenças é decorrência da atividade agrícola e só é aplicável em ecossistemas manejados pelo homem. Tais sistemas têm, por via de regra, biodiversidade consideravelmente reduzida em relação aos sistemas naturais, donde se conclui que o controle natural dos problemas fitossanitários é feito pela biodiversidade e seu equilíbrio ecológico.

COMPOSIÇÃO DA BIODIVERSIDADE DO SOLO

A biodiversidade de solos é composta por organismos com variadas funções, tamanhos e preferências de *habitat*. No entanto, todos estão interligados por cadeias tróficas e relações de dependência funcional.

O Quadro 1 relaciona os principais grupos de organismos do solo e suas respectivas funções. Note-se que muitos pro-

QUADRO 1 - Principais grupos de organismos do solo e suas funções

Grupos de organismos	Funções
Bactérias de vida livre	Imobilização e mineralização de elementos; associações mutualísticas intestinais; alimento para predadores; gênese de biofilmes; promoção de crescimento de plantas; auxiliares de associações micorrízicas; patógenos de plantas; parasitas e patógenos de animais do solo; síntese de material húmico; agregação do solo; decomposição de agroquímicos e xenobióticos.
Rizóbios	Oferecem vantagem competitiva às plantas através da fixação biológica de nitrogênio; alimento para nematóides e outros animais rizófagos.
Fungos não-micorrízicos	Imobilização e mineralização de elementos; associações mutualísticas e comensais; alimento para artrópodos, protozoários e nematóides predadores, além de alguns fungos; redistribuição de nutrientes; condicionamento de detritos; parasitas de artrópodos e nematóides; síntese de material húmico; agregação do solo; decomposição de agroquímicos e xenobióticos.
Fungos micorrízicos	Oferecem vantagem competitiva às plantas através dos seguintes mecanismos: intermediação do transporte de elementos essenciais e água do solo para as raízes; intermediação do movimento entre plantas de elementos essenciais e carboidratos; sequestro de elementos essenciais indisponíveis para as plantas; regulação do processo de fotossíntese das plantas.
Protozoários	Predadores de bactérias e fungos; estimulam o crescimento microbiano; aumentam a disponibilidade de C e N aos níveis tróficos superiores; alimento para nematóides e mesofauna; hospedeiros de patógenos bacterianos; parasitas de organismos superiores.
Nematóides	Predadores de bactérias e fungos; aumentam a disponibilidade de C e N aos níveis tróficos superiores; dispersão de bactérias e fungos; herbívoros de raízes e parasitas de plantas; parasitas e predadores de microfauna, mesofauna e insetos; alimento para meso e macrofauna.
Ácaros	Predadores de bactérias, fungos, nematóides e insetos; consomem resíduos de plantas e carcassas de animais; herbívoros de raízes, dispersão de microrganismos; dispersão e vetores de parasitas helmínticos; hospedeiros de protozoários parasitas; parasitas e parasitóides de insetos e outros artrópodes; alimento para macrofauna; construção de microecossistemas.
Insetos em geral	Predadores de microrganismos da rizosfera e de outros organismos do solo; dispersão de microrganismos; decompositores de materiais vegetal e animal.
Insetos rizófagos	Modificação da performance das plantas
Insetos (Collembola)	Predadores de microflora e microfauna, principalmente na rizosfera; consumo de resíduos de planta e carcassas de animais; micropredadores de nematóides, tardígrades e rotíferos; dispersão de microrganismos; dispersão de parasitas helmínticos e cestódicos; hospedeiros de parasitas; alimento para macrofauna; construção de microecossistemas.
Insetos (formigas e cupins)	Bioturbadores; estimulam o crescimento microbiano; espécies-chave para fauna e plantas associadas a formigueiros e cupinzeiros.
Enquitraídeos	Fragmentação de resíduos de plantas; estimulam o crescimento microbiano; bioturbadores; dispersão de microrganismos.
Minhocas	Bioturbadores; estimulam o crescimento microbiano; dispersão de microrganismos e algas; hospedeiros de protozoários e outros parasitas.

FONTE: Brussaard et al. (1997).

cessos dependem de organismos taxonomicamente bastante distintos, da mesma maneira que um mesmo grupo de organismos pode desempenhar uma gama variada de funções. O entendimento desta biodiversidade, suas inter-relações intrínsecas e o grau de ameaça derivada das atividades antrópicas são desafios para a Ciência.

Os principais grupos taxonômicos do solo apresentam uma alta diversidade de espécies, que variam conforme o tipo de solo, o regime hídrico e climático, e a forma de uso e manejo do solo. Por via de regra, o número de espécies conhecidas e descritas na literatura é significativamente menor do que o real, em virtude das dificuldades inerentes à identificação de espécies, principalmente dos microrganismos, cuja maioria não é cultivável em laboratório e tampouco pode ser diferenciada morfologicamente.

A biodiversidade do solo pode ser classificada de acordo com seu tamanho médio, em macro, meso e microfauna.

Macrofauna

Insetos

Os insetos de solos em ecossistemas naturais têm sido muito pouco estudados. Os cupins são os principais decompositores na maioria dos ecossistemas terrestres tropicais, sendo responsáveis por até 30% da produção primária líquida e de até 60% da digestão de liteiras. As formigas podem ser predadoras, herbívoras ou granívoras e bioturbadoras (revolvimento e produção de canais), acarretando em alterações nas propriedades física e química dos solos.

A ação dos cupins e formigas resulta num aumento da macroporosidade e da capacidade de infiltração dos solos, que traz benefícios tanto para a retenção de água quanto para a produtividade dos solos.

Minhocas

A diversidade de espécies de minhocas é determinada pelo tipo de solo e pela qualidade da matéria orgânica, teor de nutrientes e pelo grau de distúrbio causado pelo homem. Estes fatores são mais determinantes para a diversidade de minhocas do que para a diversidade de plantas.

Mesofauna

Ácaros

Os ácaros são o grupo de artrópodos de maior diversidade, sendo conhecidas em torno de 45 mil espécies no mundo, o que reflete nos hábitos alimentares. Estes animais consomem desde tecidos vegetais até bactérias, dependendo da espécie.

Collembola

Collembola são pequenos insetos sem asas, diferenciados em grupos ecomorfológicos de ocorrência específica em diferentes horizontes do solo. A maior parte é altamente especializada na predação de fungos, bactérias, actinomicetos e algas do solo.

Enquitreídeos

Ainda pouco conhecidos, os enquitreídeos (Oligocheta, Anelida) são parentes das minhocas. Por seu tamanho reduzido, distribuem-se nos microporos do solo, revolvendo-o. Influenciam na estruturação e ciclagem de nutrientes, atuam na trituração da matéria orgânica do solo e são predadores de fungos e bactérias.

Microfauna

Protozoários

Juntamente com os nematóides, os protozoários são os principais predadores de microrganismos dos ecossistemas terrestres. Os protozoários poderiam ser classificados de acordo com sua preferência alimentar (bactérias ou fungos), preferência de *habitat* (acidófilo ou neutrófilo) ou importância ecológica. Alterações na diversidade de protozoários poderiam ser relacionadas com as mudanças nos processos ecológicos do ecossistema.

Nematóides

Os nematóides do solo são seres microscópicos que vivem nas películas de água formadas ao redor de partículas do solo. Estima-se que mais de 100 mil espécies de nematóides do solo ainda estão para ser descritas. Estes animais são muito importantes para as cadeias tróficas de todos os solos. As espécies mais conhecidas de nematóides são as de parasitas de plantas de interesse agrícola, uma vez que causam redução da produtividade das culturas. Um maior esforço e incentivo deveria ser dado a pesquisas que visam à descrição e conhecimento das espécies de nematóides de vida livre no solo.

Microrganismos

Bactérias

As bactérias são muito importantes nos processos de ciclagem de nutrientes. Os elementos químicos mais importantes, cuja circulação na natureza depende da ação de bactérias dos solos, e os grupos funcionais que atuam nestas transformações são (BRUSSAARD et al., 1997):

a) carbono: autótrofos, heterótrofos, metanótrofos, metilótrofos, metanogênicos;

b) hidrogênio: oxidantes de H_2, produtores de H_2, oxidantes de butirato, oxidantes de propionato;

c) nitrogênio: fixadores de N_2, denitrificadores, nitrificadores, redutores dissimilatórios de nitrato para amônia, mineralizadores, imobilizadores;

d) enxofre: oxidantes de enxofre, redutores de sulfato;

e) ferro: oxidantes de Fe^{2+}, redutores de Fe^{3+};

f) fósforo: solubilizadores de fosfatos.

Um grande número de espécies de bactérias vive na rizosfera, ambiente produzido pela interação solo-raízes. Sobrevivem decompondo resíduos de compostos orgânicos exsudados pelas raízes. Algumas espécies de bactérias de rizosfera produzem substâncias que estimulam o crescimento das plantas, enquanto outras induzem a uma maior absorção de nutrientes. Estas espécies são chamadas bactérias promotoras de crescimento. Outras têm uma relação de alta especificidade com a planta

hospedeira, como os rizóbios, que colonizam nódulos produzidos pelas raízes de leguminosas, onde promovem a fixação biológica de nitrogênio e possibilitam o crescimento das plantas em solos degradados e inférteis.

Fungos

Os fungos envolvem-se em inúmeras relações mutualistas, amensais, comensais e competitivas com outros organismos do solo. Os fungos micorrízicos são comuns em todo o mundo, porém apenas as espécies associadas a plantas de interesse agrícola foram estudadas de maneira adequada. Estes organismos deveriam receber uma prioridade dos micologistas, uma vez que a perda de espécies de plantas, devido à destruição de *habitats*, pode resultar em perdas de espécies fúngicas ainda não conhecidas e com potencial tecnológico a ser explorado.

O USO DA TERRA E SEUS IMPACTOS SOBRE OS PROCESSOS ECOLÓGICOS E A BIODIVERSIDADE DO SOLO

Os solos e seus organismos podem ser afetados pela maneira como o homem cuida deste recurso natural. A atividade agrícola predatória, o desmatamento exacerbado, a poluição e as mudanças globais podem acarretar conseqüências nefastas para o solo e sua biodiversidade, tais como:

a) perda do potencial de produção agrícola;

b) redução das taxas de aporte e decomposição da matéria orgânica;

c) ruptura ou alterações nos ciclos globais de nutrientes;

d) aumento das emissões de gases causadores do efeito estufa;

e) degradação de terras, erosão e desertificação.

A atividade agrícola, principalmente a agricultura pós-industrial, tem levado a uma redução da biodiversidade, a começar pela transição de terra nativa, com muitas espécies de plantas e animais em equilíbrio ecológico, para terra agrícola, onde predominam menos espécies e em desequilíbrio. Muito provavelmente ocorre também uma redução da biodiversidade do solo, resultante da:

a) perda de espécies vegetais cujas raízes representam fonte de energia para microrganismos específicos da rizosfera que, por sua vez, seriam decompostos por outros organismos, formando a cadeia trófica;

b) degradação física do solo, com perda dos microambientes associados aos espaços intra e interagregados;

c) aplicação de agroquímicos.

Este processo pode ser bastante acentuado em sistemas de monocultura com uso intenso de pesticidas, principalmente inseticidas de solo (nematicidas) e fungicidas. Processos vitais como a decomposição de matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes, entre outros, podem sofrer impactos elevados, levando à maior dependência por fertilizantes.

Nos ecossistemas naturais e agrícolas é comum a redundância de espécies no cumprimento de uma única função. Entretanto, é pouco provável encontrar duas espécies que cumpram o mesmo conjunto de funções a elas atribuído. Devemos também levar em consideração que organismos de mesma função podem possuir diferentes tolerâncias ambientais, necessidades fisiológicas e *habitats* preferenciais. Portanto, organismos que possuem uma ou mais funções em comum podem desempenhar papéis diferentes, e uma maior diversidade concederia ao ecossistema maior capacidade de absorver ou recuperar de impactos. Neste caso, uma vez que os princípios de funcionamento de um ecossistema agrícola são muito semelhantes aos de um ecossistema natural, seria bastante fácil concluir que quanto mais diversificado for um agroecossistema, maior será sua capacidade de superar situações de estresse (falta d'água, falta de nutrientes etc.).

Os agroecossistemas devem ser palco de esforços de pesquisa para avaliar qual o impacto das diferentes práticas agrícolas na biodiversidade do solo, particularmente da pedobiota envolvida em processos vitais, como a fixação de nitrogênio, degradação de compostos lignocelulolíticos, solubilização de fosfatos, estruturação e revolvimento do solo, e distribuição da matéria orgânica entre os diferentes horizontes. Consideramos que sistemas agroecológicos, que produzam menor impacto na biodiversidade do solo, oferecem um maior grau de sustentabilidade à produção agrícola que sistemas convencionais de produção, fortemente dependentes de pesticidas e fertilizantes solúveis.

MANEJO DA BIODIVERSIDADE DO SOLO NA AGROECOLOGIA

Os processos ecológicos do solo podem ser otimizados através de manejo agroecológico dos sistemas de produção. A pesquisa agropecuária e, principalmente, os produtores brasileiros vêm desenvolvendo, com base científica ou empírica, tecnologias alternativas visando à sustentabilidade da agricultura.

Decomposição da matéria orgânica e mineralização de nutrientes

O manejo da decomposição da matéria orgânica do solo visando à regulação, no espaço e no tempo, da liberação de nutrientes requer ainda substanciais avanços no conhecimento científico. Esta tem sido uma das principais demandas de pesquisa identificadas por produtores que adotam o sistema de plantio direto para o cultivo de grãos (milho, soja e trigo).

Experiências realizadas de forma empírica por produtores vêm dando resultados promissores. Um exemplo é o Sistema Agroflorestal Regenerativo e Análogo (Safra), desenvolvido na Mata Atlântica do Sul da Bahia, pelo produtor rural Ernst Gosch (SCHULZ et al., 1994). Este sistema baseia-se em policultivo manejado com podas, sem remoção de material vegetal do sistema, e no consórcio de espécies florestais, arbustivas, lavouras anuais e culturas

perenes. A seleção das espécies que compõem o sistema resulta da observação dos processos sucessionais em fragmentos de florestas e capoeiras na região. Assim, através de manejo da matéria-prima do processo de decomposição de matéria orgânica, ou seja, das plantas, procura-se manter o equilíbrio ecológico, as características pedoambientais e a sincronia na liberação de nutrientes existentes no ecossistema natural.

A adição de microrganismos, visando otimizar o processo de decomposição de matéria orgânica e liberação de nutrientes, é uma alternativa de manejo e já vem sendo aplicada com sucesso por alguns produtores. Os *effective microorganisms* (EM) são um coquetel de microrganismos condicionadores do solo contendo espécies originadas da fermentação de alimentos (cerveja, iogurtes e pasta de soja), incluindo populações de bactérias ácido lácticas, fotossintéticas, actinomicetos e leveduras, que aceleram a decomposição de matéria orgânica e a mineralização de nutrientes (VALARINI et al., 2002).

Espera-se um grande desenvolvimento desta área de pesquisa nos próximos anos e o aprimoramento da tecnologia de inoculações biológicas aos solos agrícolas.

Fixação biológica de nitrogênio

A fixação biológica de nitrogênio (FBN) talvez seja o processo microbiano relacionado com a agricultura mais bem estudado e explorado tecnologicamente. A FBN é mediada por uma ampla gama de microrganismos procarióticos, incluindo cianobactérias e bactérias gram-positivas e gram-negativas. A inoculação de sementes de leguminosas com bactérias diazotróficas é prática comum em vários países. No Brasil, a inoculação da soja com estirpes de *Bradyrhizobium japonicum* ou *B. elkanii* propicia uma economia da ordem de US$2 bilhões anuais em fertilizantes nitrogenados (ALVES et al, no prelo). Além dos benefícios econômicos, a redução nas aplicações destes fertilizantes leva a uma melhoria da qualidade ambiental, com menor aporte de nitratos para as águas superficiais e subterrâneas. A FBN também já foi verificada em diversas espécies isoladas de raízes e caules de gramíneas (milho, cana-de-açúcar, arroz etc.), da superfície de raízes (rizoplano) e da rizosfera. Para otimizar o processo de FBN, adubos nitrogenados solúveis devem ser evitados, pois inibem a nodulação e a fixação de nitrogênio. A maximização das contribuições da FBN nos agroecossistemas tornou-se parte integrante dos esforços de pesquisa que visam à sustentabilidade das produções agrícolas e, particularmente, da agroecologia. A adubação verde com leguminosas é uma prática com base em FBN que visa à melhoria da fertilidade do solo para as culturas posteriores.

Associações micorrízicas

Micorrizas são definidas como associações entre fungos e raízes de plantas. A colonização das raízes pelos fungos resulta num aumento da superfície de absorção de nutrientes, principalmente o fósforo e a água pelas plantas. Nos solos brasileiros, deficientes em fósforo, as micorrizas têm um papel fundamental a desempenhar, tanto em ambientes agrícolas quanto em ecossistemas naturais. São várias as culturas agrícolas que se beneficiam das associações micorrízicas, com destaque para as frutíferas como banana e coco. A otimização do benefício desta associação pode-se dar de duas formas: inoculação e manejo das populações presentes no solo. O maior empecilho para a inoculação em larga escala de fungos micorrízicos é a falta de produtos comerciais. Já para a produção de mudas de culturas perenes em viveiros, como café, citros e leguminosas arbóreas utilizadas em projetos de recuperação de áreas degradadas, a inoculação tem-se mostrado viável. Práticas de manejo que devem ser seguidas em sistemas de produção agroecológicos para maximizar a contribuição das associações micorrízicas segundo Moreira e Siqueira (2002) incluem:

a) fazer rotação de culturas e consórcios que incluam espécies de plantas multiplicadoras de propágulos;

b) reduzir as aplicações de adubos solúveis ao mínimo necessário;

c) priorizar fontes não solúveis de fósforo (a micorrização é inibida por fosfato na solução do solo);

d) reduzir ao mínimo a aplicação de pesticidas, principalmente os fungicidas.

Seqüestro de carbono e conservação da matéria orgânica

A necessidade da humanidade em reduzir os níveis de CO_2 na atmosfera fez surgir o Protocolo de Kyoto, que estabelece metas para redução das emissões de gases por parte dos países industrializados. O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo foi proposto pelo governo brasileiro como forma de as indústrias poluidoras reduzirem seus passivos ambientais através do financiamento de projetos, conduzidos nos países em desenvolvimento, que comprovadamente resultem em fixação de carbono na biomassa viva (vegetação e microrganismos do solo) ou morta (matéria orgânica do solo). O último Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), realizado em abril de 2002, já considerava o solo como potencial sequestrador de carbono e previa que solos e florestas poderiam vir a sequestrar até 40% do carbono oriundo da atividade humana. Com isso, abre-se uma frente de pesquisas promissoras para o desenvolvimento de tecnologia de manejo da biodiversidade do solo em sistemas agroecológicos que resultem em maiores quantidades de carbono fixado no solo, estabilizado na forma de matéria orgânica.

Bioturbação (estrutura do solo e formação de agregados)

Elementos da fauna do solo são exímios engenheiros do ecossistema, atuando na formação de canais, favorecendo a estrutura do solo e redistribuindo matéria orgânica ao longo do seu perfil. Alguns trabalhos relatam a introdução de minhocas nos sistemas de produção, resultando em

aumento da produtividade e manutenção da qualidade do solo (PASHANASI et al., 1996). Entretanto, estes organismos atuam em equipe, com diferentes espécies atuando de forma complementar, ocupando diferentes nichos e permitindo o equilíbrio do ecossistema. Recentes trabalhos em solos da Amazônia relataram aumento na compactação de solos ocupados por pastagens, associado à ocorrência de uma só espécie de minhoca. Estudos posteriores mostraram que, quando monólitos deste solo compactado eram introduzidos na floresta, algumas espécies de cupins atuavam revertendo o processo de compactação (BARROS et al., 2002). Estes resultados causam um certo alento, pois demonstram a capacidade de regeneração da qualidade do solo pela ação da pedobiota, e ressaltam a necessidade de pesquisas sobre o seu manejo em diferentes agroecossistemas.

A DIMENSÃO HUMANA DOS AGROECOSSISTEMAS E SUA INTERFERÊNCIA SOBRE A BIODIVERSIDADE DO SOLO

Um dos principais elementos que diferencia agroecossistemas de ecossistemas naturais é o fato de serem criados pelos homens para atender prioritariamente às suas necessidades. Portanto, sua construção e condução são reflexos da cultura de quem os criou e conduz. A simplificação cultural é característica dos sistemas agrícolas europeus. Durante o colonialismo, este modelo foi exportado para todo o mundo, de maneira que a maior parte dos agroecossistemas estão restritos ao cultivo de poucas espécies, e cada sistema produtivo é dominado por apenas uma só variedade de planta cultivada. Apesar de existir cerca de 7 mil variedades de plantas cultiváveis disponíveis, 90% dos alimentos do mundo vêm de apenas 30% delas. Mais da metade de todas as áreas cultivadas no planeta são plantadas com arroz, milho e trigo.

Uma pesquisa relatada por Gervásio e Schlindwein (2001) descreve a maestria dos índios caiapós ao manejarem o ecossistema amazônico para o estabelecimento de suas roças, respeitando as estruturas espacial e temporal do ecossistema e algumas vezes ampliando a diversidade. Estes princípios de aproveitamento otimizado dos microclimas e nichos existentes são hoje os principais fundamentos dos Sistemas Agroflorestais (SAFs), cujas bases foram herdadas de uma concepção de ambiente bastante distinta da ocidental.

Ainda hoje, em todo o Brasil, são encontradas formas muito particulares de cultivo e convívio com a natureza, fruto de um aprendizado aprofundado, que têm permitido a sobrevivência de muitas comunidades e a manutenção da qualidade do solo. Silveira et al. (2002) descrevem inúmeras experiências de recriação tecnológica a partir do conhecimento do sertanejo e suas estratégias de resistência à seca, apontando para o enorme potencial, ainda pouco considerado, do "saber ambiental" das comunidades agrícolas.

CENÁRIOS FUTUROS E DESAFIOS

O desvendar da "caixa-preta" que era o solo, aliado à abordagem agroecológica, aponta para oportunidades de delineamento de sistemas de produção mais sustentáveis. Os princípios da agroecologia, fundamentados na ecologia e biodiversidade do solo, que poderão gerar grandes avanços tecnológicos são:

a) conservação de alta diversidade funcional dos organismos do solo;

b) priorização de sistemas que possibilitem maior acúmulo de biomassa, aporte de matéria orgânica e retenção de nutrientes no solo;

c) diversificação dos usos do solo (agrobiodiversidade e agricultura multifuncional).

A gestão participativa dos recursos hídricos, as práticas orgânicas de cultivo e sua associação a programas de certificações de qualidade ambiental, práticas vegetativas de baixo custo para a recuperação de áreas degradadas, e a expansão do sistema de plantio direto, agroflorestais e agrossilvipastoris, são apenas algumas das muitas vertentes a serem beneficiadas dentro deste cenário de descobertas que a associação entre a agroecologia e a ecologia do solo faz surgir.

Entretanto, é importante lembrar que para superar os problemas ambientais causados pela agricultura convencional, faz-se necessária uma mudança na relação entre o homem e a natureza e sua vertente historicamente produtivista. Será determinante também que a relação sociocultural entre os homens permita que o saber popular ocupe seu espaço no ambiente acadêmico, e que esta valorosa fonte de conhecimento seja agregada aos protocolos de pesquisa, ampliando o potencial ambiental do conhecimento das comunidades locais.

REFERÊNCIAS

ALVES, B.J.F.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. The success of BNF in soybean in Brazil. **Plant and Soil**, The Hague. No prelo.

BARROS, E.; PASHANASI, B.; CONSTANTINO, R. Effects of land use system on the soil macrofauna in Western Brazilian Amazonia. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.35, p.338-347, 2002.

BRUSSAARD, L.; BEHAN-PELLETIER, V.M.; BIGNELL, D.E. Biodiversity and ecosystem functioning in soil. **Ambio**, Stockholm, v.26, p.563-570, 1997.

EPAGRI. **A Agroecologia no mundo, Brasil e Santa Catarina**. Florianópolis, 2003. Disponível em: <http://www.epagri.rct-sc.br/agroecologia/agroecologia_sc.html>. Acesso em 2003.

FAO. **Sustainable agriculture production:** implications of international agricultural research. Rome, 1989. 131p. (FAO Research and Technology Paper, 4).

GERVÁSIO, P.; SCHLINDWEIN, S.L. Agricultura sustentável ou (re)construção do significado de agricultura. **Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável**, Porto Alegre, v.2, n.3, p.44-52, jul./set. 2001.

GLIESSMAN, S.R. A história da agroecologia. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE ECOLOGIA, 1.; SEMINÁRIO ESTADUAL SOBRE ECOLOGIA, 2.; ENCONTRO NACIONAL SOBRE PESQUISA EM AGROECOLOGIA, 2., 2000, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 2000. p.51-52.

LANDERS, J.N. Zero tillage development in tropical Brazil: the history of a succesfull NGO activity. Rome: FAO, 2001. 57p. (FAO. Agricultural Services Bulletin, 147).

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: UFLA, 2002. 626p.

ODUM, E. Properties of agro-ecosystems. In: LOWRANCE, R.; STINNER, B.R.; HOUSE, G.J. (Ed.). **Agricultural ecossystems:** unifying concepts. New York: J. Wiley, 1984. p.5-11.

PASHANASI, B.; LAVELLE, P.; ALEGRE, J.; CHARPENTIER, F. Effect of inoculation with the endogeic earthworm *Pontocolex corethrurus* on soil chemical characteristics and plant growth in a low-input agricultural system of Peruvian Amazonia. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.28, p.801-810, 1996.

SCHULZ, B.; BECKER, B.; GÖTSCH, E. Indigenous knowledge in a "modern" sustainable agroforestry system: a case study from eastern Brazil. **Agroforestry Systems**, Netherlands, v.25, p.59-69, 1994.

SILVEIRA, L.; PETERSEN, P.; SABOURIN, E. **Agricultura familiar e agroecologia no semi-árido:** avanços a partir do Agreste da Paraíba. Rio de Janeiro: AS-PTA, 2002. 336p.

VALARINI, P. J.; ALVAREZ, M.C.D.; GASCÓ, J.M.; GUERRERO, F.; TOKESHI, H. Integrated evaluation of soil quality after the incorporation of organic matter and microorganisms. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v.33, n.1, p.35-40, jan. 2002.

INFORME AGROPECUÁRIO

É uma publicação editada pela
Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais - EPAMIG,
que veicula tecnologia agropecuária.
Cada edição trata, de forma sistemática, um tema de interesse
do complexo agrícola, trazendo informações que vão
desde o preparo de solo, no caso de culturas vegetais,
até tecnologias de colheita e armazenagem.
Quando o tema é cultura animal,
a abordagem tem a mesma extensão.

EPAMIG

Faça sua assinatura

R$ 60,00 - 6 exemplares

Informações: (31) 3488 6688 - sac@epamig.br