
*Impacto de Mudanças
Climáticas Globais sobre
a Microbiota Terrestre*

Raquel Ghini

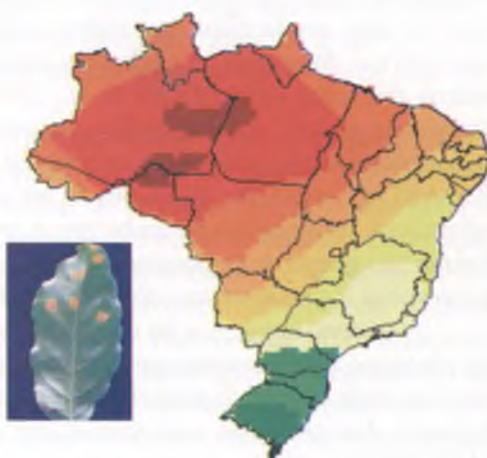


Foto: Folha de café (de I.S. Melo)

I. Introdução

As atividades antrópicas estão alterando as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera, causando mudanças no clima do planeta. O efeito estufa é um processo natural que permite a manutenção da temperatura necessária para o estabelecimento e sustento da vida na Terra. O vapor de água, o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), o ozônio (O_3) e outros gases presentes na atmosfera, denominados gases de efeito estufa, retêm parcialmente a radiação térmica que é emitida quando a radiação solar atinge a superfície do planeta. As atividades antrópicas, intensificadas após a Revolução Industrial, no final do século XVIII, caracterizam-se pela emissão de gases na atmosfera devido ao uso dos recursos naturais, como a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento. Como consequência, há uma maior retenção de radiação que resulta na intensificação do efeito estufa, elevando a temperatura média da superfície do planeta, além de outros efeitos. Durante o século XX, houve um aumento significativo na temperatura média da superfície do planeta e maiores incrementos estão previstos para o próximo século (IPCC, 2001). Recentemente, o fenômeno tem se acelerado, pois as maiores temperaturas médias anuais foram registradas nos últimos anos.

A mudança climática tem se manifestado de diversas formas, dentre as quais se destaca o “aquecimento global”, termo usado para identificar o fenômeno. Porém, também está sendo observada maior frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, alterações na precipitação, perturbações nas correntes marítimas, retração de geleiras e elevação do nível dos oceanos. O termo “mudança ambiental global” envolve uma ampla gama de eventos, incluindo o aumento da concentração de CO_2 atmosférico, de ozônio na troposfera (da superfície do planeta até 10km de altura) e outros impactos (STADDON *et al.*, 2002). Os termos “mudança biosférica” ou “mudança global” foram também sugeridos porque envolvem o conceito de que interações complexas estão ocorrendo entre o ambiente físico e o biológico (COAKLEY, 1995). As alterações de um afetam o outro e podem resultar em efeitos aditivos ou sinérgicos no ambiente. A mudança climática pode afetar de diferentes formas um grupo de organismos, este grupo afeta outros e o conjunto de mudanças pode voltar a causar efeitos no ambiente físico.

A idéia de que a ação do homem pode modificar os processos fundamentais do planeta é relativamente nova, pois se pensava que o poder tampão dos sistemas naturais seria suficiente para eliminar esses efeitos. Agora, entretanto, sabe-se que o balanço dos sistemas naturais é, em muitos casos, extremamente delicado (ATKINSON, 1993). Alguns podem ser especialmente vulneráveis às mudanças climáticas em função da capacidade limitada de adaptação, podendo sofrer danos significativos e irreversíveis. Quanto à biodiversidade, espécies já ameaçadas terão um risco maior de extinção em função do sinergismo de pressões adversas, podendo

acarretar em graves impactos em atividades sócioeconômicas em função da alteração de serviços ambientais, como a polinização e controle natural de pragas e pestes, dentre outras (CANHOS, 2005).

A preocupação com o estudo do impacto das mudanças globais na microbiota terrestre é recente, porém o assunto vem despertando crescente interesse da comunidade científica devido à importância do tema. Os microrganismos estão entre os primeiros organismos a demonstrar os efeitos das alterações climáticas devido às numerosas populações, facilidade de multiplicação e dispersão, além do curto tempo entre gerações. Dessa forma, constituem um grupo fundamental de indicadores biológicos para o estudo dos impactos das mudanças climáticas globais.

2. Mudanças climáticas

O clima do planeta é regulado pelo fluxo de energia solar que atravessa a atmosfera na forma de radiação de ondas curtas. Parte dessa energia é devolvida pela Terra na forma de radiação infravermelha. Os gases de efeito estufa são definidos como os constituintes gasosos da atmosfera que absorvem e reemitem radiação infravermelha. A história da Terra é marcada por ciclos naturais de aquecimento e resfriamento. As atividades vulcânicas e solares são responsáveis por intensas mudanças no clima de tempos em tempos. Imensas quantidades de materiais lançados na atmosfera pelos vulcões intensificaram o efeito estufa natural. Essas alterações ocorreram em períodos de milhões de anos.

Entretanto, desde a década de 1980, evidências científicas sobre mudanças acentuadas no clima vêm despertando a atenção da sociedade (MARENGO & SOARES, 2003). O termo “mudanças climáticas globais” foi cunhado durante a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima, aprovada em 1992, e é definida como “mudança que possa ser direta ou indiretamente atribuída à atividade humana, que altere a composição da atmosfera mundial e que se some àquela provocada pela variabilidade climática natural observada ao longo de períodos comparáveis”.

As geleiras da Antártica fornecem um importante arquivo de informações sobre o clima e a composição de gases do planeta durante os últimos 650 mil anos. Os dados obtidos a partir de amostras de bolhas de ar capturadas pelo gelo polar e retiradas em diferentes profundidades das geleiras demonstram uma alta correlação entre mudanças de temperatura do planeta e a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera. A concentração de CO₂ não excedeu 300 ppm em volume durante esse período (SIEGENTHALER *et al.*, 2005). Por volta de 1750, iniciou-se a Revolução Industrial, marcada por um grande salto tecnológico especialmente nos setores de transportes e máquinas. Os métodos de produção se tornaram mais eficientes e a exploração dos recursos naturais pelo homem tomou proporções jamais conhecidas. Concomitantemente, os problemas de degradação ambiental pela ação antrópica assumiram grande importância. Gases de efeito estufa, dentre os quais alguns que não existiam na atmosfera (clorofluorcarbonos - CFC, hidrofluorcarbonos - HFC, hidrofluorclorocarbonos - HCFC, perfluorcarbonos - PFC e hexafluoreto de

enxofre - SF_6 , por exemplo), sofreram acentuado aumento na concentração devido à ação antrópica, dificultando a eficiência com que a Terra se resfria. Outros gases, como o monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e outros compostos orgânicos voláteis não metânicos (NMVOC), mesmo não sendo gases de efeito estufa direto, possuem influência nas reações químicas que ocorrem na atmosfera.

Desde os primórdios da Revolução Industrial, a concentração atmosférica de CO_2 aumentou 31% e mais da metade desse crescimento ocorreu nos últimos cinquenta anos. Desde 1760 até 1960, os níveis de concentração de CO_2 atmosférico aumentaram de 277 ppm para 317 ppm, isto é, 40 ppm em 200 anos. Nas últimas quatro décadas, de 1960 até 2001, as concentrações de CO_2 aumentaram de 317 ppm para 371 ppm, um acréscimo de 54 ppm. Este aumento nas décadas recentes corresponde ao aumento no uso de combustível fóssil durante esse período (MARENGO & SOARES, 2003).

A concentração de CH_4 aumentou de 700ppt na era pré-industrial para 1745ppt; o N_2O , de 270 para 314ppt e os CFCs, que não existiam na atmosfera, atingiram 533ppt. As projeções são para que o CO_2 atinja 540 a 970 ppm, por volta de 2100, representando um aumento de 75 a 350% em relação ao período antes da Revolução Industrial (IPCC, 2001).

Os gases de efeito estufa são fundamentais para manter as condições ambientais adequadas para a existência da vida no planeta. Nessas condições, as temperaturas permitem a existência de água tanto na forma líquida quanto na gasosa, para a manutenção do ciclo hidrológico e da vida. Sem o efeito estufa, a temperatura média da superfície do planeta seria de, aproximadamente, $-18^\circ C$. Estima-se que o aumento da temperatura é de $33^\circ C$, graças à retenção de calor pelos gases, proporcionando um valor médio de $15^\circ C$. Porém, com o aumento do efeito estufa, no último século, a temperatura média da superfície do planeta aumentou $0,6^\circ C + 0,2^\circ C$ e as projeções para o próximo século são de um aquecimento no entre 1,4 a $5,8^\circ C$ (IPCC, 2001).

Como consequência, a cobertura de neve e gelo diminuiu, aproximadamente, 10% desde 1960 e o nível médio do mar aumentou, assim como o teor calórico dos oceanos. Houve uma redução na frequência de temperaturas mínimas extremas, enquanto aumentou a frequência de temperaturas máximas extremas. As precipitações aumentaram nas médias e altas latitudes do Hemisfério Norte e diminuíram na região subtropical.

A destruição da camada de ozônio na estratosfera pela ação antrópica tem resultado no aumento da radiação ultravioleta-B (UV-B; 280 a 320 nm) que atinge a superfície do planeta. Essa camada é de extrema importância para a vida e tal dano, conhecido como "buraco na camada de ozônio", pode apresentar sérias consequências para o planeta. Apesar das medidas adotadas pelos diversos países que assinaram o Protocolo de Montreal, com a finalidade de reduzir a emissão de gases que destroem a camada de ozônio estratosférico, algumas décadas são necessárias para que se atinjam os níveis encontrados antes de 1980 (PAUL, 2000).

Há grandes incertezas sobre os cenários de mudanças climáticas para os próximos séculos, principalmente por que há incertezas quanto aos cenários futuros de emissões de gases de efeito estufa. Além disso, é questionável a efetividade dos

modelos globais utilizados como ferramentas para estimar alterações climáticas resultantes do aquecimento global, além da dificuldade desses modelos em caracterizar o clima regional (MARIENGO & SOARES, 2003). Porém, o aumento da concentração de gases de efeito estufa e as mudanças climáticas previstas para os próximos anos certamente causarão sérios impactos nos seres vivos do planeta.

Nas discussões sobre mudanças climáticas, os termos “vulnerabilidade”, “impactos” e “adaptação” possuem conotações particulares. Vulnerabilidade refere-se ao nível de reação de um determinado sistema para uma mudança climática específica. Impactos referem-se às conseqüências da mudança climática nos sistemas naturais e humanos. Adaptação descreve ajustes em sistemas ecológicos ou socioeconômicos em resposta às mudanças climáticas correntes ou projetadas, resultantes de práticas, processos, medidas ou mudanças estruturais (Mudanças do clima, 2005).

3. Microrganismos do solo

O solo é um *habitat* microbiano por excelência, onde há inúmeras comunidades de microrganismos e, como conseqüência, constitui o principal reservatório de diversidade desse grupo. Apesar de não se conhecer a identidade da grande maioria de espécies que habita o solo, sabe-se que grupos funcionais de microrganismos regulam processos vitais nos ecossistemas. A presença desses é diretamente afetada pelas condições edafoclimáticas impostas nos diversos microssítios, como a presença de partículas de matéria orgânica, raízes, facilidade de trocas gasosas e outros (CARDOSO, 1992).

As mudanças climáticas podem alterar o equilíbrio químico, físico e biológico dos solos. Grupos funcionais de microrganismos podem ser alterados, o que resultará em mudanças nos processos dos ecossistemas. Entretanto, os efeitos indiretos serão de grande importância haja vista que a íntima relação entre a vegetação e a microbiota do solo faz com que qualquer interferência causada pelas mudanças climáticas nesses grupos resulte em significativas conseqüências para o funcionamento do ecossistema. A complexidade das numerosas interações entre os vários fatores ambientais que controlam as relações entre plantas e microrganismos do solo ainda não foi adequadamente elucidada. Como resultado dessa complexidade, as mudanças globais podem levar a alterações não lineares, que podem variar quanto à intensidade em diferentes regiões.

A tolerância de um sistema a uma mudança depende do grau de continuidade da característica biológica entre as espécies que desempenham a função afetada. Alterações em espécies com características que são amplamente distribuídas na comunidade terão pequeno significado, pois espécies mais tolerantes à nova condição podem compensar as que foram afetadas. Dentre os microrganismos decompositores, por exemplo, são encontradas inúmeras espécies. Por outro lado, mudanças que afetam espécies com características singulares não podem ser compensadas por outras espécies. Os microrganismos fixadores de N que desempenham relação de mutualismo com plantas, geralmente, possuem uma associação estreita e altamente específica. Alterações na ocorrência desses microrganismos podem comprometer a disponibilidade do nutriente para as plantas (WOLTERS *et al.*, 2000).

Por outro lado, mudanças na estrutura da comunidade de plantas podem afetar a disponibilidade de fontes de alimento para a microbiota do solo. Isto por que as espécies de plantas diferem quanto a características como taxa de crescimento e eficiência no uso da água e de nutrientes, que podem afetar as propriedades físico-químicas do solo, acúmulo de matéria orgânica e disponibilidade de nutrientes. A elevação da temperatura e as alterações na precipitação certamente trarão sérias consequências para a vegetação, o que deve resultar em distúrbios na microbiota do solo.

A rizosfera afeta intensamente a atividade da microbiota por possuir características diferentes das do solo distante das raízes. Longe das raízes, os microrganismos dependem da incorporação de matéria orgânica como fonte de energia para seu desenvolvimento. Na rizosfera há maior concentração de nutrientes orgânicos oriundos das raízes, que propiciam o desenvolvimento da microbiota. A planta exerce tal influência devido à liberação de células mortas, mucilagens, exsudatos e outros compostos liberados pelas raízes. Assim, alterações na planta, como, por exemplo, no metabolismo de nutrientes, surtem efeito direto na microbiota da rizosfera, como estímulo ou inibição de microrganismos promotores de crescimento ou fitopatógenos.

O aumento previsto da relação C:N das plantas pode ter importantes reflexos contrários na taxa de decomposição da matéria orgânica e, assim, afetar o suprimento de nutrientes disponíveis para as plantas. Entretanto, as expectativas são de que a reciclagem de nutrientes seja acelerada, que haja maior fixação biológica do nitrogênio do ar, maior acidificação dos solos e maior perda de nitrogênio por escoamento superficial (SIQUEIRA, 2001).

Outro aspecto importante das mudanças climáticas diz respeito à alteração nas interações entre espécies devido à diferente taxa de migração entre plantas, micorrizas, fixadores de N e invertebrados com baixa capacidade de locomoção. Com a mudança no clima, as espécies tendem a reduzir a frequência de ocorrência onde as condições não são mais favoráveis e essa modificação na distribuição geográfica pode alterar as relações entre as espécies.

A microbiota do solo também pode ser diretamente afetada pelas condições climáticas. Flutuações na umidade do solo podem refletir negativamente sobre grupos de microrganismos, como por exemplo, os decompositores (TAYLOR *et al.*, 2004). A produção de importantes enzimas por diferentes linhagens de fungos depende da ocorrência de temperaturas ótimas. A capacidade de competição dessas linhagens é seriamente afetada com o aumento da temperatura. A elevação da temperatura pode aumentar a taxa de decomposição da matéria orgânica. Cerri *et al.*, (2005), usando modelos de simulação, concluíram que as mudanças climáticas podem alterar a dinâmica da matéria orgânica do solo cultivado com pastagens na região amazônica. O estoque de C do solo nos cenários futuros será reduzido devido ao aumento da temperatura.

Muitos efeitos podem ser transitórios e diferentes entre os sistemas, especialmente nas próximas décadas. Pequenas mudanças na microbiota serão retardadas pelo efeito tampão dos sistemas. As alterações no funcionamento de ecossistemas devem ser maiores em sistemas que possuem comunidades enfraquecidas devido à distribuição descontínua de fatores que controlam as relações entre os organismos (WOLTERS *et al.*, 2000).

A concentração de CO_2 no ar do solo possui uma ordem de grandeza muitas vezes superior à da atmosfera. Os valores podem atingir até 4% de CO_2 no solo a 10cm de profundidade, o que representa valores até 100 vezes superiores aos da atmosfera (BUENO & SOUZA, 2002). Por esse motivo, o aumento da concentração de CO_2 atmosférico deve ter poucos efeitos diretos sobre a microbiota do solo. Porém, os efeitos indiretos do aumento da concentração de CO_2 na microbiota do solo provavelmente serão mais significativos, como por exemplo, devido às alterações no crescimento de raízes.

A elevação dos teores de CO_2 promove alterações no metabolismo, crescimento e processos fisiológicos da planta. Há aumento da taxa fotossintética, a taxa de transpiração por unidade foliar decresce, enquanto a transpiração total da planta algumas vezes é aumentada, devido à maior área foliar (JWA & WALLING, 2001; LI *et al.*, 2003). Os efeitos são evidentes especialmente nas fases iniciais de desenvolvimento da planta (SIONIT *et al.*, 1982). As alterações também incluem maior eficiência do uso da água, devido à menor abertura estomatal e do nitrogênio pela planta (THOMPSON & DRAKE, 1994). Como consequência, a maior interceptação da radiação solar pelo maior dossel pode reduzir a temperatura e alterar a umidade do solo. O aumento da massa vegetal pode afetar de diversas formas os microrganismos do solo, assim como a composição da matéria orgânica originária das plantas no novo ambiente.

Tais estudos possuem grandes dificuldades metodológicas. A grande maioria de bactérias do solo, por exemplo, que constituem um dos principais grupos, não pode ser cultivada ou observada microscopicamente. O método de estudo altera os resultados e as conclusões obtidas. Com o objetivo de verificar os efeitos do aumento de CO_2 atmosférico na comunidade de bactérias do solo, Bruce *et al.*, (2000) utilizaram métodos moleculares de avaliação em ambiente controlado enriquecido com 200 ppm de CO_2 . Porém, não foram observadas diferenças entre os tratamentos.

Além das variáveis climáticas já discutidas, o aumento da radiação UV-B representa importantes consequências para a microbiota terrestre. A exposição direta de esporos de fungos ao UV-B pode danificar o DNA, as estruturas, as fases iniciais de desenvolvimento e reprodução dos microrganismos, mas doses letais são superiores às registradas na superfície do planeta. Há uma quantidade relativamente grande de trabalhos realizados *in vitro* sobre os efeitos do UV-B na germinação de esporos, crescimento de hifas e esporulação de fungos. O efeito da luz próxima ao ultravioleta ("near-ultraviolet light", NUV, UV-A, 320 a 400 nm) na indução à esporulação é conhecido para uma ampla gama de fungos. O aumento da radiação UV poderia significar um aumento na indução à esporulação. Entretanto, a quantidade dessa radiação atualmente já é suficiente para estimular os fungos dependentes de luz, e aumentos nessa radiação podem não ter importância do ponto de vista epidemiológico (MANNING & TIEDEMANN, 1995).

Como a radiação UV-B consegue penetrar somente na profundidade de 100 μm no horizonte do solo, enganosamente se considera que a comunidade microbiana do solo não será afetada pela destruição da camada de ozônio do planeta. Porém, o aumento da UV-B pode alterar a estrutura de comunidades, a biomassa e a atividade de microrganismos terrestres. Uma revisão sobre o assunto foi publicada por Johnson (2003).

4. Microrganismos relacionados às plantas

4.1 Microrganismos fitopatogênicos

O ambiente pode influenciar o crescimento e a suscetibilidade da planta hospedeira, a multiplicação, a sobrevivência e as atividades do patógeno, assim como a interação entre a planta hospedeira e o patógeno. Por esse motivo, as mudanças climáticas globais constituem uma séria ameaça especialmente à agricultura, pois podem promover significativas alterações na ocorrência e severidade de doenças de plantas. Tais alterações podem representar graves consequências econômicas, sociais e ambientais. A análise desses efeitos é fundamental para a adoção de medidas mitigadoras, com a finalidade de evitar prejuízos futuros (CHAKRABORTY & PANGGA, 2004; GHINI, 2005).

O clássico triângulo de doença ilustra um dos paradigmas da Fitopatologia, que estabelece as condições para o desenvolvimento de doenças, isto é, a interação entre o hospedeiro suscetível, o patógeno virulento e o ambiente favorável (Figura 1). Conseqüentemente, a doença não ocorre se houver eliminação de um dos componentes. Outro aspecto a ser considerado é que a alteração de um determinado fator climático pode ter efeitos positivos, em uma das partes do triângulo da doença, e negativos, em outra. Além disso, os efeitos podem ser também contrários nas diversas fases do ciclo de vida do patógeno (COAKLEY, 1995). Assim sendo, somente a análise completa do sistema pode definir se a doença será estimulada ou não.

O ambiente influencia todos os estádios de desenvolvimento, tanto do patógeno quanto da planta hospedeira, assim como da doença, nas diversas etapas do ciclo das relações patógeno-hospedeiro. Além desses, também pode afetar outros organismos com os quais a planta e o patógeno interagem, como microrganismos endofíticos, saprófitas ou antagonistas. Assim, numa área onde tanto a planta hospedeira como o patógeno estão presentes, o aparecimento e o desenvolvimento da doença são determinados pelo ambiente. Importantes doenças podem se tornar secundárias se as condições ambientais não forem favoráveis.

A mudança global pode ter efeitos diretos e indiretos tanto sobre os patógenos quanto sobre as plantas hospedeiras e a interação de ambos. Sobre os microrganismos fitopatogênicos, a



FIGURA 1. Triângulo de doença: interação entre os elementos fundamentais que determinam a ocorrência de uma doença de planta.

distribuição geográfica, por exemplo, é determinada pela gama de temperaturas nas quais o microrganismo pode crescer, mas muitas espécies prevalecem somente em regiões onde a temperatura e outros fatores climáticos estão próximos aos valores ótimos para permitir um rápido desenvolvimento. A distribuição temporal também pode ser

afetada. Diversos patógenos, especialmente os que infectam folhas, apresentam flutuações quanto à incidência e à severidade durante o ano, que podem ser frequentemente atribuídas às variações de clima. Muitos desses patógenos são favorecidos pelo aumento da umidade durante a estação de crescimento, devido ao aumento da produção de esporos. Por outro lado, doenças como os oídios são favorecidas por condições de baixa umidade. As condições favoráveis são específicas para cada patossistema e, assim, não podem ser generalizadas.

Em muitos casos, o aumento da precipitação permite uma maior dispersão de propágulos por gotas de chuva. A redução do número de dias de chuva durante o verão, por exemplo, pode diminuir a dispersão de diversos patógenos. Os ventos também exercem importante papel na disseminação de propágulos, tanto à curta como à longa distância. Fatores relacionados com a turbulência do ar, intensidade e direção dos ventos podem influenciar a liberação, o transporte e a deposição do inóculo.

Os efeitos diretos das mudanças climáticas também podem ser observados na fase de sobrevivência dos patógenos. Patógenos de plantas anuais ou perenes com folhas decíduas, por exemplo, necessitam suportar longos períodos de tempo sem tecido da planta hospedeira disponível. Nesses casos, a fase de sobrevivência é fundamental para garantir a presença de inóculo para o ciclo seguinte da doença. As condições durante a estação de inverno, por exemplo, são importantes para determinar o sucesso da sobrevivência saíprofítica (LONSDALE & GIBBS, 1996).

As mudanças climáticas também podem ter efeitos diretos sobre a planta hospedeira. Um dos mecanismos envolvidos é a alteração da predisposição da planta, que consiste na modificação da sua suscetibilidade às doenças por fatores externos a ela, isto é, fatores não genéticos, que atuam antes da infecção (Schoeneweiss, 1975).

O desenvolvimento de uma planta é resultante da interação entre o seu genótipo e o ambiente. Assim, as mudanças no clima interferem na morfologia, fisiologia e metabolismo das plantas, resultando em alterações na ocorrência e severidade de doenças. Supostas alterações morfológicas e fisiológicas que podem ocorrer com o aumento da concentração de CO_2 e afetar as interações patógeno-hospedeiro incluem redução da densidade de estômatos, maior acúmulo de carboidratos nas folhas, maior camada de ceras e de células epidérmicas, com aumento no teor de fibras, produção de papilas e acúmulo de silício, nos locais de penetração de apressórios, e aumento do número de células do mesófilo (CHAKRABORTY *et al.*, 2000). A elevação da concentração de CO_2 altera o início e a duração dos estádios de desenvolvimento do patógeno. O período latente, isto é, o período entre a inoculação e a esporulação, pode ser alterado, assim como a capacidade de multiplicação de alguns patógenos. Dessa forma, os mecanismos de resistência das plantas hospedeiras podem ser quebrados mais rapidamente, como resultado do desenvolvimento acelerado das populações dos patógenos (CHAKRABORTY, 2001).

Manning & Tiedeman (1995) analisaram os efeitos potenciais do aumento da concentração de CO_2 sobre doenças de plantas, baseados nas respostas das plantas nesse novo ambiente. O aumento de produção de biomassa da planta, isto é, o aumento de brotações, folhas, flores e frutos, representa uma maior quantidade de tecido que

pode ser infectado pelos fitopatógenos. O aumento do teor de carboidratos pode estimular o desenvolvimento de patógenos dependentes de açúcares, como ferrugens e oídios. O aumento da densidade da copa e tamanho das plantas pode promover um maior crescimento, esporulação e disseminação de fungos foliares, que requerem alta umidade do ar, mas não chuva, como as ferrugens, oídios e fungos necrotróficos. O aumento de resíduos das culturas pode significar melhores condições para a sobrevivência de patógenos necrotróficos. A redução da abertura de estômatos pode inibir patógenos que penetram por essa abertura, como ferrugens, míldios e alguns necrotróficos. A redução do período de vegetação da planta, com colheita e senescência precoces, pode diminuir o período de infecção de patógenos biotróficos e aumentar os necrotróficos. O aumento da biomassa de raízes amplia a quantidade de tecido a ser infectado por micorrizas ou patógenos veiculados pelo solo, mas pode compensar a perda causada pelos patógenos. A maior exsudação das raízes pode estimular tanto patógenos quanto antagonistas (promotores de crescimento da planta).

Outros organismos que interagem com o patógeno e a planta hospedeira também podem ser afetados pelas mudanças climáticas, resultando em modificações na incidência das doenças. Doenças que requerem insetos ou outros vetores podem sofrer uma nova distribuição geográfica ou temporal, que será resultante da interação ambiente-planta-patógeno-vetor (SUTHERST *et al.*, 1998). Aumentos na temperatura ou incidência de secas podem estender a área de ocorrência da doença para regiões onde o patógeno e a planta estão presentes, mas o vetor ainda não atuava.

4.2 Microrganismos endofíticos

Os microrganismos endofíticos, isto é, microrganismos que vivem no interior das plantas, sem causar danos, possuem grande importância ecológica, devido à evolução conjunta que realizaram com as plantas. A importância e o papel desses organismos para a biodiversidade decorrem dos benefícios que freqüentemente oferecem às plantas. Alguns fungos endofíticos produzem alcalóides tóxicos que protegem seus hospedeiros contra herbívoros. Outros benefícios incluem o maior crescimento ou aumento da capacidade competitiva das plantas, resistência à seca ou outras situações de estresse, pragas e doenças.

Apesar da grande importância do grupo, poucos trabalhos foram desenvolvidos a respeito dos impactos das mudanças climáticas globais. A escolha de uma metodologia adequada é de extrema importância para a obtenção dos resultados. Com essa preocupação e com a finalidade de verificar os efeitos da elevação do teor de CO₂ sobre *Epichloë sylvatica* em *Brachypodium sylvaticum*, Meijer & Leuchtmann (2000) utilizaram as instalações do tipo FACE ("Free Air Carbon Dioxide Enrichment"), em Eschikon (Suíça). Esse tipo de experimento promove a liberação do gás em condições de campo, porém o custo proibitivo das instalações tem restringido seu emprego. Segundo os autores, as consequências induzidas pela elevação do CO₂ parecem depender das espécies envolvidas.

Groppe *et al.*, (1999) estudaram o efeito de CO₂ nas interações entre *Epichloë bromicola* e *Bromus* spp., em estufa de topo aberto (“open-top chambers”, OTC). Esse tipo de instalação permite a liberação de CO₂ em menores proporções que os experimentos FACE, porém possui a desvantagem da interferência das paredes da estufa, geralmente constituídas de plástico. Os autores verificaram que a elevação do teor de CO₂ não resultou em alteração do crescimento vegetativo de *Bromus erectus*, mas observou-se aumento das estruturas reprodutivas de plantas infectadas com *Epichloë bromicola* e um decréscimo nas não infectadas. Estes resultados demonstraram que o fungo endofítico pode estar em vantagem seletiva se ocorrer tal mudança na concentração de CO₂.

Com objetivos semelhantes, Marks & Clay (1990) estudaram o efeito do aumento da concentração de CO₂ nas interações entre *Lolium perenne* (azevém, uma gramínea do tipo C3) e *Tridens flavus* (C4) e os fungos endofíticos *Acremonium lolii* e *Balansia epichloë*, respectivamente, em experimento conduzido em câmara de crescimento com ambiente controlado. Esse tipo de experimento possui a desvantagem de nem sempre retratar os resultados que poderiam ser obtidos em campo. Além disso, apesar das relações simbióticas não terem sido alteradas nos dois casos estudados, os resultados referem-se a um período curto de tempo e, segundo os autores, poderiam apresentar diferenças, se fossem avaliados diversos ciclos das culturas.

A elevação do nível de CO₂ atmosférico pode afetar, além das relações entre a planta hospedeira e o microrganismo endofítico, também as relações entre insetos herbívoros e as plantas, e destes com os endofíticos. Tal alteração ambiente pode causar efeitos na composição nutricional e em fatores aleloquímicos das folhas, sendo que, para muitas plantas, a redução do valor nutricional resulta do aumento do conteúdo de amido e carboidratos e declínio no teor de nitrogênio. Essas alterações causam mudanças no consumo e crescimento de insetos herbívoros. Como as folhas apresentam aumento da relação carboidrato/nitrogênio em ambientes com elevado teor de CO₂, os insetos compensam parcialmente essa mudança aumentando as taxas de consumo. Marks & Lincoln (1996) realizaram estudo para verificar os efeitos da elevação do teor de CO₂ nas interações entre gramíneas, microrganismos endofíticos e insetos herbívoros, por se tratar de um interessante modelo de interação de três grupos distintos de organismos. Os autores verificaram que o consumo relativo de folhas de *Festuca arundinacea* pela lagarta *Spodoptera frugiperda* foi maior na concentração de CO₂ de 700 ppm, quando comparado com 400 ppm, tanto na presença quanto na ausência do endofítico *Acremonium coenophialum*. A lagarta teve sua taxa de crescimento relativo reduzida na presença do endofítico, como esperado. O aumento de CO₂ e a presença do endofítico reduziram a eficiência de conversão de alimento ingerido pela lagarta, isto é, a relação entre a biomassa consumida e a efetivamente produzida. Houve inclusive interação entre a presença do endofítico e o CO₂, resultando na mais baixa taxa de conversão. Isto significa que os insetos foram negativamente afetados pelo endofítico em presença de maior concentração de CO₂, o que pode ser de grande importância na nova condição climática. Com aumento do CO₂ pode ter ocorrido diluição do alcalóide tóxico produzido pelo endofítico, mas isto pode ter sido compensado pelo maior consumo de folhas.

4.3 Microrganismos simbiotes

As micorrizas constituem uma associação mutualística, na qual plantas vasculares são colonizadas por fungos específicos, ocorrendo perfeita integração morfológica e funcional entre os simbiotes. Trata-se de uma simbiose praticamente universal, não só pelo grande número de plantas suscetíveis à micorrização como também pela ocorrência generalizada na maioria dos ecossistemas (SILVEIRA, 1992). Devido à maior fixação de carbono pela fotossíntese em condições com elevado teor de CO_2 na atmosfera, há maior quantidade desse elemento disponível nas raízes para microrganismos simbiotes, como as micorrizas. Mudanças na estrutura da comunidade de micorrizas e no seu funcionamento podem ter importantes conseqüências para o ciclo do carbono, particularmente no fato de uma maior quantidade de carbono estar sendo transferida e estocada no solo. A resposta das micorrizas ao aumento da quantidade disponível de CO_2 também é de crucial importância para o entendimento de como os ecossistemas podem ser alterados com essa mudança climática. Para Colpaert & van Tichelen (1996), a elevação do CO_2 pode causar estresse por deficiência de nutrientes, o que pode aumentar a dependência de micorrizas na maioria dos ecossistemas naturais.

Além do aspecto nutricional, o efeito das micorrizas, especialmente das ectomicorrizas, na proteção das raízes contra o ataque de patógenos também constitui um efeito benéfico para o desenvolvimento das plantas. A presença do micélio do simbiote envolvendo a raiz cria uma barreira física que impede a penetração nas células corticais mais externas. Outro mecanismo de ação direta é a produção de substâncias químicas pelo simbiote, que são liberadas no solo e podem afetar o desenvolvimento dos patógenos. Entre os mecanismos de ação indireta estão a produção de compostos, que reduzem a atratividade das raízes aos patógenos, a alteração da microbiota da rizosfera e a indução de resistência das plantas (AUER & KRÜGNER, 1991). Apesar da destacada importância, os efeitos do aumento da concentração de CO_2 atmosférico em micorrizas foi muito pouco estudado.

Provavelmente, os fungos micorrízicos apresentam diferentes respostas à elevação da concentração de CO_2 , fato que pode refletir nas associações entre as espécies e alterar a estrutura da comunidade de plantas (STADDON & FITTER, 1998). Além disso, as micorrizas são dependentes, em parte, da fotossíntese da planta hospedeira, que pode ser afetada pelo aumento do CO_2 . Por esse motivo, diversos autores acreditam que há tendência de aumento da colonização micorrízica com a mudança prevista na concentração do gás.

Entretanto, trabalhos desenvolvidos com efeitos de CO_2 em ectomicorrizas demonstram que nem sempre esse resultado é obtido. Observou-se aumento de ectomicorrizas de algumas espécies de plantas, como *Quercus alba*, *Pinus echinata*, *Betula alleghaniensis*, *Betula papyrifera* e *Pinus strobus*. Porém, para *Tsuga canadensis*, *Pinus taeda* e *Pinus sylvestris* não foram observadas diferenças (STADDON & FITTER, 1998). Com carvalho (*Quercus robur*), por exemplo, notou-se efeito sinérgico da presença do CO_2 e de ectomicorrizas no crescimento da planta. A elevação da concentração de CO_2 levou ao aumento na quantidade de

carboidratos disponíveis no sistema radicular. Esse aumento pode ter beneficiado o fungo e, conseqüentemente, o carvalho, porque a micorriza tem aumentada sua capacidade de absorção de nutrientes, especialmente fósforo. Além disso, a colonização com micorrizas pode ter aumentado a capacidade de resposta da planta ao CO₂, pois elas podem atuar como reservatório para o excesso de carbono fixado, o qual pode causar problemas à fotossíntese.

Além da interferência dos efeitos da fertilidade do solo, Marks & Clay (1990) afirmam que os efeitos do CO₂ nas interações micorrízicas são também dependentes do tempo, isto é, podem ser observados durante algum estágio de desenvolvimento da planta e, depois, desaparecem. Todavia, não existem informações sobre os efeitos cumulativos, após algumas estações de cultivo.

Segundo Staddon *et al.*, (2002) diversas conclusões contraditórias se devem às comparações entre resultados obtidos em experimentos conduzidos em vasos com uma única combinação planta-fungo micorrízico. Respostas diferentes podem ser obtidas em sistemas com múltiplas espécies ou experimentos em campo, onde ocorrem interações interespecíficas (como, por exemplo, a competição) ou alteração de fatores abióticos (como disponibilidade de nitrogênio). Para estes autores, a associação simbiótica de uma determinada planta com dois fungos micorrízicos diferentes pode não ser alterada em testes conduzidos com os fungos inoculados separadamente. Entretanto, quando inoculados em conjunto, como ocorre na natureza, os efeitos do aumento da concentração de CO₂ na associação simbiótica são dependentes das interações entre os organismos, que por sua vez dependem das respostas específicas das espécies. A maior disponibilidade de carboidratos nas raízes da planta hospedeira pode resultar em alterações do balanço da competição entre as duas espécies de fungos micorrízicos se, por exemplo, uma espécie apresentar uma taxa de crescimento intrínseco ligeiramente maior que a outra.

5. Considerações finais

A avaliação das alterações no funcionamento dos ecossistemas por mudanças climáticas requer a análise detalhada de interações específicas em experimentos em campo e laboratório, e se possível o monitoramento de extensas áreas por longos períodos. Há necessidade de realização de novos trabalhos de pesquisa, especialmente em ecossistemas menos estudados, para a avaliação da vulnerabilidade.

Referências

- ATKINSON, D. **Global climate change: its implications for crop protection**. Surrey: BCPC, 1993. 102 p.
- AUER, C.G.; KRÜGNER, T.L. Potencial de controle de doenças de plantas com fungos ectomicorrízicos. In: BETTIOL, W. (Ed.). **Controle biológico de doenças de plantas**. Jaguariúna: Embrapa/CNPDA, 1991. p.71-85.
- BRUCE, K. D.; JONES, T. H.; BEZEMER, T. M.; THOMPSON, L. J.; RITCHIE, D. A. The effect of elevated atmospheric carbon dioxide levels on soil bacterial communities. **Global Change Biology**, v.6, p.427-434, 2000.
- BUENO, C.J.; SOUZA, N.L. de. Sonda para gases de subsolo. **Summa Phytopathologica**, v.28, p.215-218, 2002.

- CANHOS, V.P. Impactos na biodiversidade. In: **Mudança do clima: volume I: Negociações internacionais sobre a mudança do clima: vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima.** Brasília, DF: Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, 2005. 250p. (Cadernos NAE, 3).
- CARDOSO, E.J.B.N. Ecologia microbiana do solo. In: CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M.; NEVES, M.C.P. (Ed.). **Microbiologia do solo.** Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p.33-39.
- CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; CERRI, C.E.P.; PAUSTIAN, K. Impact of climate change on SOM status in cattle pasture in western Brazilian Amazon. In: R. Lal, B. Stewart, N. Uphoff, D.O. Hansen. (Org.). **Climate Change and Global Food Security.** Boca Raton, 2005. p.223-240.
- CHAKRABORTY, S. Effects of climate change. In: WALLER, J.M.L.; WALLER, S. J. (Ed.). **Plant pathologist's pocketbook.** Wallingford: CAB International, 2001. p.203-207.
- CHAKRABORTY, S.; PANGGA, I.B. Plant disease and climate change. In: Gillings, M.; Holmes, A. **Plant microbiology.** London: BIOS Scientific Publishers, 2004. cap.9, p.163-180.
- CHAKRABORTY, S.; TIEDEMANN, A.V.; TENG, P.S. Climate change: potential impact on plant diseases. **Environmental Pollution**, v.108, p.317-326, 2000.
- COAKLEY, S. M. Biospheric change: will it matter in plant pathology? **Canadian Journal of Plant Pathology**, v.17, p.147-153, 1995.
- COLPAERT, J.V.; VAN TICHELEN, K.K. Mycorrhizas and environmental stress. In: FRANKLAND, J.C.; MAGAN, N.; GADD, G.M. (Ed.). **Fungi and environmental change.** Cambridge: Cambridge University Press, 1996. p.109-128.
- GHINI, R. **Mudanças climáticas globais e doenças de plantas.** Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2005, 104p.
- GROPPE, K.; STEINGER, T.; SANDERS, L.; SCHMID, B.; WIEMKEN, A.; BOLLER, T. Interaction between the endophytic fungus *Epichloë bromicola* and the grass *Bromus erectus*: effects of endophyte infection, fungal concentration and environment on grass growth and flowering. **Molecular Ecology**, v.8, n.11, p.1827-1835, 1999.
- INTERGOVERNMENTAL PAINEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2001: the scientific basis** IPCC WG I, TAR., 2001, 881p.
- JOHNSON, D. Response of terrestrial microorganisms to ultraviolet-B radiation in ecosystems. **Research in Microbiology**, v.154, p.315-320, 2003.
- JWA, N.S.; WALLING, L.L. Influence of elevated CO₂ concentration on disease development in tomato. **New Phytologist**, v.149, n.3, p.509-518, 2001.
- LI, F.; KANG, S.; ZHANG, J.; COHEN, S. Effects of atmospheric CO₂ enrichment, water status and applied nitrogen on water- and nitrogen-use efficiencies of wheat. **Plant and Soil**, v.254, n.2, p.279-289, 2003.
- LONSDALE, D.; GIBBS, J.N. Effects of climate change on fungal diseases of trees. In: FRANKLAND, J.C.; MAGAN, N.; GADD, G.M. (Ed.). **Fungi and environmental change** Cambridge: Cambridge University Press, 1996. p.1-19.
- MANNING, W.J.; TIEDEMANN, A.V. Climate change: potential effects of increased atmospheric carbon dioxide (CO₂), ozone (O₃), and Ultraviolet-B (UV-B) radiation on plant diseases. **Environmental Pollution**, v.88, n.2, p.219-245, 1995.
- MARENCO, J.A.; SOARES, W.R. Impacto das mudanças climáticas no Brasil e possíveis futuros cenários climáticos: síntese do terceiro relatório do IPCC. In: TUCCI, C.E.M.; BRAGA, B. **Clima e Recursos Hídricos no Brasil.** Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos/FBMC-ANA, 2003. p.209-242.
- MARKS, S.; CLAY, K. Effects of CO₂ enrichment, nutrient addition, and fungal endophyte-infection on the growth of two grasses. **Oecologia**, v.84, p.207-214, 1990.
- MARKS, S.; LINCON, D.E. Antiherbivore defense mutualism under elevated carbon dioxide levels: a fungal endophyte and grass. **Environmental Entomology**, v.25, n.3, p.618-623, 1996.
- MEIJER, G.; LEUCHTMANN, A. The effects of genetic and environmental factors on disease expression (stroma formation) and plant growth in *Brachypodium sylvaticum* infected by *Epichloë sylvatica*. **Oikos**, v.91, n.3, p.446-458, 2000.
- MUDANÇA DO CLIMA: volume I: Negociações internacionais sobre a mudança do clima: vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima. Brasília, DF: Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, 2005. 250p. (Cadernos NAE, 3).
- PAUL, N.D. Stratospheric ozone depletion, UV-B radiation and crop disease. **Environmental Pollution**, v.108, p.343-355, 2000.
- SCHOENEWEISS, D.F. Predisposition, stress, and plant disease. **Annual Review of Phytopathology**, v.11, p.193-211, 1975.
- SILVEIRA, A.P.D. Micorrizas. In: CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M.; NEVES, M.C.P. (Ed.). **Microbiologia do solo.** Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p.257-282.

- SIQUEIRA, O.J.W. de; SALLES, L.A.B. de; FERNANDES, J.M. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M.A. de; CABRAL, O.M.R.; MIGUEZ, J.D.G. (Ed.). **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. p.33-63.
- STADDON, P.L.; FITTER, A.H. Does elevated atmospheric carbon dioxide affect arbuscular mycorrhizas? **Tree**, v.13, n.11, p.455-458, 1998.
- STADDON, P.L.; HEINEMEYER, A.; FITTER, A.H. Mycorrhizas and global environmental change: research at different scales. **Plant and Soil**, v.244, p.253-261, 2002.
- SUTHERST, R.W.; INGRAM, J.S.I.; SCHERM, H. Global change and vector-borne diseases. **Parasitology Today**, v.14, p.297-299, 1998.
- TAYLOR, A.R.; SCHRÖTER, D.; PFLUG, A.; WOLTERS, V. Response of different decomposer communities to the manipulation of moisture availability: potential effects of changing precipitation patterns. **Global Change Biology**, v.10, p.1313-1324, 2004.
- SIEGENTHALER, U.; STOCKER, T.F.; MONNIN, E.; LÜTHI, D.; SCHWANDER, J.; STAUFFER, B.; RAYNAUD, D.; BARNOLA, J. M.; FISCHER, H.; MASSON-DELMOTTE, V.; JOUZEL, J. Stable carbon cycle-climate relationship during the late Pleistocene. **Science**, v.310, p.1313-1317, 2005.
- SIONIT, N.; HELLMERS, H.; STRAIN, B. R. Interaction of atmospheric CO₂ enrichment and irradiance on plant growth. **Agronomy Journal**, v.74, n.4, p.721-725, 1982.
- THOMPSON, G.B.; DRAKE, B.G. Insects and fungi on a C3 sedge and a C4 grass exposed to elevated atmospheric CO₂ concentrations in open-top chambers in the field. **Plant, Cell and Environment**, v.17, p.1161-1167, 1994.
- WOLTERS, V.; SILVER, W. L.; BIGNELL, D.E.; COLEMAN, D.C.; LAVELLE, P.; VAN DER PUTTEN, W.H.; DE RUITER, P.; RUSEK, J.; WALL, D.H.; WARDLE, D.A.; BRUSSAARD, L.; DANGERFIELD, J.M.; BROWN, V.K.; GILLER, K.E.; HOOPER, D.U.; SALA, O.; TIEDJE, J.; VAN VEEN, J.A. Effects of global changes on above- and belowground biodiversity in terrestrial ecosystems: implications for ecosystem functioning. **Bioscience**, v.50, n.12, p.1089-1098, 2000.