

MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS E DOENÇAS DE PLANTAS

Raquel Ghini



Embrapa

Meio Ambiente

Raquel Ghini é Engenheira Agrônoma, formada pela Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), da Universidade de São Paulo (USP). Fez seu mestrado e doutoramento na mesma universidade, na área de Fitopatologia. Tem pós-doutoramento pela Universidade de Torino (Itália), na área de impacto ambiental de agentes de controle biológico.

É pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, desde 1986, onde desenvolve trabalhos com métodos alternativos de controle de doenças de plantas.

*Mudanças climáticas
globais e doenças de
plantas*

República Federativa do Brasil

Luiz Inácio Lula da Silva
Presidente

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Roberto Rodrigues
Ministro

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Conselho de Administração

José Amauri Dimárzio
Presidente

Clayton Campanhola
Vice-Presidente

Alexandre Kalil Pires
Dietrich Gerhard Quast
Sérgio Fausto
Urbano Campos Ribeiral
Membros

Diretoria-Executiva da Embrapa

Clayton Campanhola
Diretor-Presidente

Gustavo Kauark Chianca
Herbert Cavalcante de Lima
Mariza Marilena T. Luz Barbosa
Diretores-Executivos

Embrapa Meio Ambiente

Paulo Choji Kitamura
Chefe-Geral

Geraldo Stachetti Rodrigues
Chefe-Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento

Maria Cristina Martins Cruz
Chefe-Adjunto de Administração

Ariovaldo Luchiarí Júnior
Chefe-Adjunto de Comunicação e Negócios

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Meio Ambiente
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Mudanças climáticas globais e doenças de plantas

Raquel Ghini

Embrapa Meio Ambiente
Jaguariúna, SP
2005

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Meio Ambiente

Rodovia SP 340 - km 127,5 - Tanquinho Velho
Caixa Postal 69 13820-000 Jaguariúna, SP
Fone: 19-3867-8750 Fax: 19-3867-8740
sac@cnpma.embrapa.br www.cnpma.embrapa.br

Comitê de Publicações:

Cláudio Cesar de Almeida Buschinelli, Geraldo Stachetti Rodrigues (Presidente),
Heloísa Ferreira Filizola, José Maria Guzman Ferraz, Manoel Dornelas de Souza,
Marcelo Augusto Boechat Morandi, Maria Amélia de Toledo Leme, Maria Lúcia
Saito, Sandro Freitas Nunes.

Revisão de texto

Marília Marcello Braidá
Maria Amélia de Toledo Leme

Editoração eletrônica

Silvana Cristina Teixeira

Normalização bibliográfica

Maria Amélia de Toledo Leme

Capa

Luis Alexandre Sereda

Projeto gráfico

Silvana Cristina Teixeira

Foto da capa

Itamar Soares de Melo

Tratamento das ilustrações

Alexandre Rita da Conceição e
Silvana Cristina Teixeira

1ª edição

1ª impressão (2005): 1000 exemplares

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo
ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei n.º 9610)

É permitida a reprodução parcial do conteúdo
deste livro desde que citada a fonte

CIP. Brasil. Catalogação na publicação.

Ghini, Raquel.

Mudanças climáticas globais e doenças de plantas / Raquel Ghini. -- Jaguariúna, SP : Embrapa Meio Ambiente, 2005.

104p. : il. ; 22cm.

ISBN 85-85771-32-1

1. Doença de planta. I. Título.

CDD: 632.3

Apresentação

Com a adesão da Rússia ao Protocolo de Kyoto, as atenções do mundo se voltam para encaminhamentos concretos de políticas públicas relacionadas à Convenção Multilateral sobre Mudanças do Clima. A entrada em vigor do Protocolo de Kyoto e, conseqüentemente, das metas de redução de emissões de carbono, pelos países signatários, abrirá oportunidades para comercialização de certificados no mercado de carbono, cujas possibilidades são amplas para o Brasil.

Contudo, neste momento de euforia nos mercados internacionais, em virtude das perspectivas de negócios com o carbono, cabe destacar outros temas importantes relacionados também à Convenção de Mudanças do Clima: o estudo das vulnerabilidades da agropecuária a essas mudanças e a busca de estratégias adaptativas de longo prazo.

No Brasil, apesar do esforço significativo de pesquisa sobre o tema mudanças climáticas, a ênfase tem sido dada ao inventário de gases do efeito estufa de fontes agropecuárias e à busca de tecnologias para a sua mitigação. Assim, ainda são poucos os estudos relacionados aos efeitos das mudanças climáticas na agropecuária. É, certamente, um tema portador de futuro, que merece atenção da comunidade científica brasileira.

O livro que ora apresentamos, **Mudanças Climáticas Globais e Doenças de Plantas**, de Raquel Ghini, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, vem contribuir para preencher essa lacuna, ao organizar de forma criativa o tema - doenças de plantas - a partir de um novo olhar: os efeitos das mudanças climáticas globais.

A obra está organizada em nove capítulos. Nos dois primeiros, a autora relaciona os processos de mudanças climáticas com a agropecuária.

Na parte central do livro, capítulos terceiro até o quinto, discorre sobre os efeitos das mudanças climáticas sobre as relações patógeno-hospedeiro, os impactos das mudanças climáticas sobre doenças de plantas e o efeito do CO₂ sobre doenças de plantas e microrganismos. Nos capítulos finais, a autora trata dos métodos de experimentação, da modelagem matemática e faz recomendações para novas pesquisas.

É, sem dúvida, uma obra pioneira, não só pela apresentação de um novo olhar para o estudo das doenças de plantas como, também, pela oferta, de forma didática, de métodos de pesquisa e experimentação e de temas de pesquisa relevantes. São contribuições valiosas para estudantes e professores universitários e, também, para a comunidade científica interessada nas mudanças climáticas globais e as suas conseqüências no dia-a-dia daqueles que atuam diretamente no setor agropecuário.

Paulo Choji Kitamura

Chefe Geral da Embrapa Meio Ambiente

Prefácio

A fim de obter alimentos para sua sobrevivência, a humanidade vem continuamente substituindo os ecossistemas naturais em equilíbrio por agrossistemas em desequilíbrio ambiental.

Há algumas décadas os conhecimentos científicos do ambiente eram escassos e, conseqüentemente, não havia preocupação com os reflexos das mudanças do uso do solo nem com a queima dos combustíveis fósseis nas mudanças climáticas globais.

Apenas nas duas últimas décadas os cientistas perceberam que o uso da terra para fins agrícolas tem impactos importantes nas mudanças climáticas, pois manejos inadequados ocasionam emissões de gases do efeito estufa, provocando o aquecimento global. Os avanços científicos atuais não são suficientes para demonstrar que esse aquecimento esteja provocando mudanças climáticas globais. Contudo, é questão de tempo, visto que logo virão as evidências. O mais preocupante é que, se nada for feito, essas mudanças afetarão as gerações futuras, pois tudo leva a crer que haverá impactos nas distribuições das chuvas, nas oscilações na temperatura, no nível do mar, acarretando produtividade agrícola diferente da atual. Outro fator importante é que essas alterações climáticas poderão promover o aparecimento ou ressurgimento de doenças nos reinos animal e vegetal.

O livro ora apresentado pela Dra. Raquel Ghini é oportuno, porque retrata fielmente, à luz dos conhecimentos atuais, o “feedback” das alterações climáticas nas doenças das plantas, o que permite, então, a tomada de providências proativas, de modo a evitar visões pessimistas para o futuro.

O livro está dividido em oito capítulos principais, nos quais a autora trata das mudanças climáticas na agricultura, os efeitos dessas

mudanças sobre o ciclo das relações patógeno/hospedeiro e os impactos nas doenças das plantas. Descreve ainda, eficientemente, o efeito do CO₂ sobre as doenças das plantas, sugerindo uma linha de novas pesquisas para mitigar o problema. Torna-se, pois, uma leitura indispensável para alunos, professores, pesquisadores e tomadores de decisão, para, juntos, poderem construir um ambiente melhor e mais seguro.

Carlos Clemente Cerri

CENA / USP

Sumário

1. <i>Introdução</i>	11
2. <i>Mudanças climáticas globais e a agricultura</i>	17
2.1 <i>Dióxido de carbono</i>	21
2.2 <i>Ozônio</i>	27
2.3 <i>Radiação ultravioleta-B</i>	30
3. <i>Efeitos das mudanças climáticas sobre o ciclo das relações patógeno-hospedeiro</i>	33
4. <i>Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de plantas</i>	39
4.1 <i>Danos causados pelas doenças</i>	40
4.2 <i>Mudanças na distribuição geográfica das doenças</i>	41
4.3 <i>Eficácia dos métodos de controle</i>	43
5. <i>Efeitos do CO₂ sobre doenças de plantas e microrganismos relacionados</i>	47
5.1 <i>Fungos fitopatogênicos</i>	48
5.2 <i>Fitopatógenos veiculados pelo solo</i>	57
5.3 <i>Vírus</i>	61
5.4 <i>Endofíticos</i>	62
5.5 <i>Microrganismos simbiotes</i>	66
5.6 <i>Outros microrganismos</i>	70
6. <i>Métodos de experimentação</i>	75
7. <i>Modelagem matemática</i>	85
8. <i>Necessidade de novas pesquisas</i>	89
9. <i>Literatura citada</i>	93



1. Introdução

A importância do ambiente sobre o desenvolvimento de doenças de plantas tem sido observada há mais de dois mil anos. Theophrastus (370-286 a.C.) verificou que os cereais plantados em regiões de maior altitude apresentavam menor incidência de doenças do que os cultivados em locais de menor altitude. Durante o século XVIII e início do século XIX, iniciou-se o estudo dos efeitos de fatores como nutrição, umidade e ventos na ocorrência de doenças de plantas (Colhoun, 1973). Hoje, sabe-se que o ambiente pode influenciar o desenvolvimento 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.

Variações climáticas globais apresentam reflexos no desenvolvimento de doenças de plantas. O El Niño, por exemplo, recentemente promoveu severas alterações de temperatura e de precipitação. Gómez *et al.* (1999) demonstraram que em Cuba, para o período de 1929 a 1990, houve correlação entre a ocorrência de eventos da Oscilação Sul do El Niño ("El Niño / Southern Oscillation", ENSO) e epidemias de requeima da batata (causada por *Phytophthora infestans*) e do mofo azul do fumo (causado por *Peronospora hyoscyami* f. sp. *tabacina*). O mesmo fenômeno foi relacionado à ocorrência de ferrugens em trigo, causadas por *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* e *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*, nas regiões do norte da China e do meio-oeste dos Estados Unidos, respectivamente (Scherm & Yang, 1995).

As recentes mudanças verificadas no clima do planeta, diante da intensificação das atividades antrópicas, certamente estão promovendo significativas alterações na ocorrência e severidade de doenças de plantas. A partir da revolução industrial, está se verificando um acentuado aumento na concentração de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), monóxido de carbono

(CO₂), óxido nitroso (N₂O), óxidos de nitrogênio (NO_x), ozônio (O₃) e outros gases na atmosfera (Fig. 1). Tais acréscimos na concentração desses gases, conhecidos como “gases de efeito estufa”, propiciam a ocorrência de mudanças climáticas. Dentre elas, destacam-se o aquecimento global, modificações nos padrões de ventos, pluviosidade e circulação dos oceanos (Lima *et al.*, 2001). Apesar dos intensos esforços de comprometimento de diversos países em atingir as metas ambientais propostas nos acordos internacionais, as mudanças climáticas constituem uma das principais ameaças ao planeta no futuro próximo.

Segundo Marengo (2001), alguns dos principais efeitos adversos sinalizados e já percebidos nos dias atuais são: aumento do nível do mar, alteração no suprimento de água doce, fortes e mais frequentes tempestades de chuva e neve e ressecamento rápido do solo devido a períodos secos mais intensos. As temperaturas médias da superfície da Terra estão mais altas que em qualquer época dos últimos 600 anos, tendo sido a década de 1990 a mais quente do milênio.

A agricultura é uma atividade econômica que depende diretamente dos fatores climáticos. Qualquer mudança no clima pode afetar o zoneamento agrícola, a produtividade das diversas culturas e as técnicas de manejo. Tais alterações podem representar sérias consequências econômicas, sociais e ambientais (EPA, 1989). À proteção de plantas cabe o objetivo de reduzir os danos causados pelos problemas fitossanitários, permitindo que o potencial de aumento de produção seja alcançado. Por esse motivo, a análise dos possíveis efeitos das alterações climáticas sobre as doenças de plantas é fundamental para a adoção de medidas mitigadoras, com a finalidade de evitar prejuízos mais sérios. No passado, diversas epidemias que ocorreram na agricultura brasileira poderiam ter sido evitadas ou os danos reduzidos se estudos tivessem sido realizados para a adoção de medidas preventivas.



Fig. 1. Origem das mudanças climáticas devido às atividades humanas desde a Revolução Industrial, com base em Manning & Tiedemann (1995).

Há poucos trabalhos publicados a respeito dos efeitos das mudanças climáticas sobre doenças de plantas (Chakraborty, 2001). Testes conduzidos em ambientes controlados podem caracterizar efeitos isolados de determinados fatores ambientais nas interações patógeno-hospedeiro. Em ambientes abertos, os poucos trabalhos disponíveis foram conduzidos no Hemisfério Norte. Pouco se sabe a respeito dos efeitos em doenças policíclicas, que são as responsáveis por significativas perdas na agricultura devido à ocorrência de severas epidemias. De modo geral, essas doenças não podem ser estudadas em ambientes fechados, pois os resultados geralmente não são representativos.

As plantas invasoras são diretamente afetadas pelas mudanças climáticas. A ocorrência de pragas e de doenças pode ser afetada, tanto de forma direta como de forma indireta, pelas alterações no metabolismo, desenvolvimento e morfologia do hospedeiro. Novas combinações de clima, componentes atmosféricos e condições do solo podem resultar em novas infestações de diversas pragas e doenças. A importância dessas alterações ainda não está estabelecida, especialmente para regiões de clima tropical ou subtropical.

As mudanças climáticas podem alterar o atual cenário fitossanitário da agricultura brasileira. Certamente, num futuro próximo, ocorrerão modificações na importância relativa de cada doença de planta. O impacto econômico pode ser positivo, negativo ou neutro, pois as mudanças climáticas podem diminuir, aumentar ou não ter efeito sobre os diferentes patossistemas, em cada região. As estratégias de mitigação devem considerar todas essas possibilidades. Para as culturas com maior risco de perdas, a obtenção de variedades resistentes deve ser iniciada o quanto antes, pois essa estratégia requer um maior tempo de desenvolvimento. Além disso, diante dos efeitos das mudanças climáticas, no controle biológico natural e nas opções de controle químico, novas estratégias deverão ser estudadas e, para tanto, a pesquisa deve estar preparada para enfrentar o novo problema que pode alterar o manejo de doenças de plantas (Chakraborty, 2001).

Os microrganismos fitopatogênicos são ubíquos, em sistemas naturais ou manejados, e podem alterar a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas (Agrios, 1988; Malmström & Field, 1997). Os fitopatógenos estão entre os primeiros organismos a demonstrar os efeitos das mudanças climáticas devido às numerosas populações, facilidade de multiplicação e dispersão e o curto tempo entre gerações (Scherm *et al.*, 2000). Dessa forma, constituem um grupo fundamental que precisa ser avaliado quanto aos impactos das mudanças climáticas, pois são um dos principais fatores responsáveis por reduções de produção e podem colocar em risco a sustentabilidade do agroecossistema.

Diante das ameaças que representam as mudanças climáticas à proteção de plantas, nos próximos anos, torna-se necessário o estudo detalhado dos trabalhos já realizados sobre o assunto.

2. Mudanças climáticas globais e a agricultura

O vapor de água, CO₂, O₃, CH₄, N₂O e outros gases presentes na atmosfera retêm parcialmente a radiação térmica que é emitida quando a radiação solar atinge a superfície da Terra. Assim, parte da energia recebida é mantida, promovendo o aquecimento do planeta, e parte volta para o espaço. Por esse motivo, tais gases de ocorrência natural, que absorvem raios infravermelhos, são considerados “de efeito estufa”. Sem eles, a temperatura seria extremamente baixa, não permitindo a ocorrência de vida no planeta.

As atividades antrópicas estão alterando as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera, levando a mudanças no clima do planeta. A ação antrópica foi intensificada após a Revolução Industrial e caracteriza-se pela emissão de gases na atmosfera devido ao uso de recursos naturais pelo homem. Como consequência, há uma maior retenção de radiação, que resulta no aumento do efeito estufa, elevando a temperatura média da superfície do planeta. Por esse motivo, a mudança climática é comumente denominada de aquecimento global, mas outros efeitos são também importantes, como alterações nos padrões de distribuição e intensidade de ventos, chuvas e circulação dos oceanos (Fig. 1). Embora haja registro de mudanças climáticas originárias de causas naturais na história, as modificações resultantes da atividade humana estão crescendo significativamente nas últimas décadas (Chakraborty, 2001).

A idéia de que a ação do homem pode modificar os processos fundamentais do planeta é relativamente nova, pois pensava-se 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). O desenvolvimento de

regiões urbanas e agrícolas, devido à intensificação das atividades econômicas, tem levado à destruição e à degradação de ecossistemas. Tais atividades também têm resultado num aumento significativo de emissões de gases, oriundos da própria agricultura, queima de combustíveis fósseis e processos industriais (Manning & Tiedemann, 1995).

Diversas terminologias têm sido adotadas para definir as alterações que estão ocorrendo no planeta. O termo “mudança ambiental global”, usado por Staddon *et al.* (2002), envolve uma ampla gama de eventos, incluindo o aumento da concentração de CO₂ atmosférico, que resulta não só no aquecimento global, mas, também, no aumento da concentração de ozônio na troposfera (da superfície do planeta até 10 km de altura) e outros impactos. Os termos “mudança biosférica” ou “mudança global” foram sugeridos como substitutos da expressão “mudança climática” por Coakley (1995), porque envolvem o conceito de que interações complexas estão ocorrendo entre o ambiente físico e o biológico. As alterações de um afetam o outro e podem resultar em efeitos aditivos ou sinérgicos no ambiente global. 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.

Os problemas gerados por tais alterações revelam-se uma das grandes ameaças ao planeta no futuro próximo. Desde o final do século XIX, a temperatura média da Terra aumentou $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$, e estima-se que em 2100 deve atingir $1,5$ a 6°C . O aumento da concentração de um único gás atmosférico tem efeito direto na biota do planeta, mas, além disso, se forem considerados os efeitos desse aumento no clima global, outros fatores podem exercer significativa influência e interagir entre si, como o aumento de temperatura, mudanças na precipitação e ventos (Manning & Tiedemann, 1995). Desde o início da Revolução Industrial, o CO₂, por exemplo, sofreu um aumento de aproximadamente 30%; o CH₄, de 145%; e o N₂O, de 15% (Chakraborty *et al.*, 2000 a, b; Chakraborty, 2001).

Para o Brasil, Siqueira *et al.* (2001), realizando pesquisas sobre o efeito estufa desenvolvidas a partir de modelos de equilíbrio atmosférico, projetaram elevações de temperatura em torno de 3° a 5°C, com tendência de maiores efeitos para as Regiões Central, Sul e Centro-sul. Os modelos projetam um aumento médio no volume anual de chuvas em torno de 11%. Os impactos são mais expressivos nas latitudes maiores, com aumento no volume de chuvas para os meses de março a maio e setembro a novembro, períodos estes referentes às lavouras de verão na fase de colheita e cultivos de inverno em plena fase reprodutiva, respectivamente. O aumento da precipitação na primavera pode representar maiores dificuldades quanto ao manejo dos cultivos, maior probabilidade de incidência de doenças nos cultivos de inverno (trigo) e maiores riscos de erosão hídrica do solo, considerando-se que, nessa época, realiza-se o preparo do solo para a instalação dos cultivos de verão. Para o Nordeste brasileiro, excluindo-se o aumento de 15% no volume de chuvas previsto para o trimestre de março a maio, para os demais meses do ano são projetadas reduções do volume de chuvas, especialmente no inverno (redução de 21%), situando-se o decréscimo anual em torno de 2%. Esses resultados apontam a possibilidade de agravamento dos conflitos associados à disponibilidade de água para o Nordeste. Pode ocorrer encurtamento do ciclo em torno de 15% para as culturas de trigo e milho, nenhum efeito para a soja e reduções da produtividade potencial média, em torno de 30 e 16%, para o trigo e milho, respectivamente, com reflexos positivos para a cultura da soja, em torno de 21%. As estimativas de produção anual de grãos de trigo e milho correspondem, respectivamente, a reduções em torno de 1 e 2,8 milhões de toneladas, em contraste com aumentos de 3,5 milhões de toneladas para a soja. Porém, os autores alertam que pesquisas relacionadas ao manejo de pragas, de doenças e do solo tornam-se cada vez mais importantes no contexto do efeito estufa, em face dos impactos ambientais esperados.

Marengo (2001) publicou uma revisão sobre o estado atual do clima, estudos sobre mudanças climáticas e projeções de cenários climáticos do futuro para o Brasil. O aquecimento pode variar por região, sendo acompanhado por mudanças na precipitação que podem incluir incrementos ou reduções em diferentes regiões, e também mudanças na variabilidade do clima e na frequência e intensidade de eventos extremos de clima. Os cenários previstos de mudanças climáticas foram obtidos a partir de modelos de circulação global e estão relacionados com diferentes projeções de emissões de gases de efeito estufa. As várias regiões do país possuem diferentes graus de previsibilidade do clima, o que causa incertezas em alguns resultados. Há maior segurança em outros, como o aumento da concentração de CO₂, aumento do nível do mar, menor frequência de chuvas intensas e períodos secos mais fortes e frequentes. Estima-se que o aquecimento atinja valores entre 0,1°C e 0,4°C por década para os meses de dezembro a fevereiro, e 0,2°C a 0,6°C por década para o período entre junho e agosto. Os valores mais elevados da taxa de aquecimento são previstos para a floresta Amazônica e os menores, para a Região Sudeste e costa da Mata Atlântica. Quanto à precipitação, os estados do sul tornam-se mais úmidos, enquanto grande parte da Amazônia fica mais seca, especialmente entre março e maio, quando ocorrem 35% da precipitação anual do Brasil. A zona seca do Nordeste sofre variações opostas entre dezembro e maio (tornando-se mais úmida) e de junho a novembro (tornando-se mais seca).

Diversos componentes do ambiente estão sendo alterados; dentre eles, tem-se dado destaque a gases presentes como traços na troposfera, como o O₃ e o CO₂, que podem ter significativos impactos diretos nos ecossistemas, assim como a radiação ultravioleta-B (UV-B) (Coakley & Scherm, 1996).

2.1 Dióxido de carbono

A análise do ar contido nas diferentes profundidades das geleiras polares indica que os níveis de dióxido de carbono aumentaram de $280 \mu\text{L.L}^{-1}$, no século XVIII, antes da Revolução Industrial, para quase $358 \mu\text{L.L}^{-1}$, em 1994. Quando a lenha era o principal combustível, o CO_2 liberado na queima retornava para a vegetação por meio da fotossíntese. Com a intensificação da destruição de florestas e a substituição da fonte de energia pela queima de combustíveis fósseis, os problemas se agravaram, pois foi iniciada a injeção de CO_2 por uma nova fonte de emissão (Fig. 2) (Atkinson, 1993).

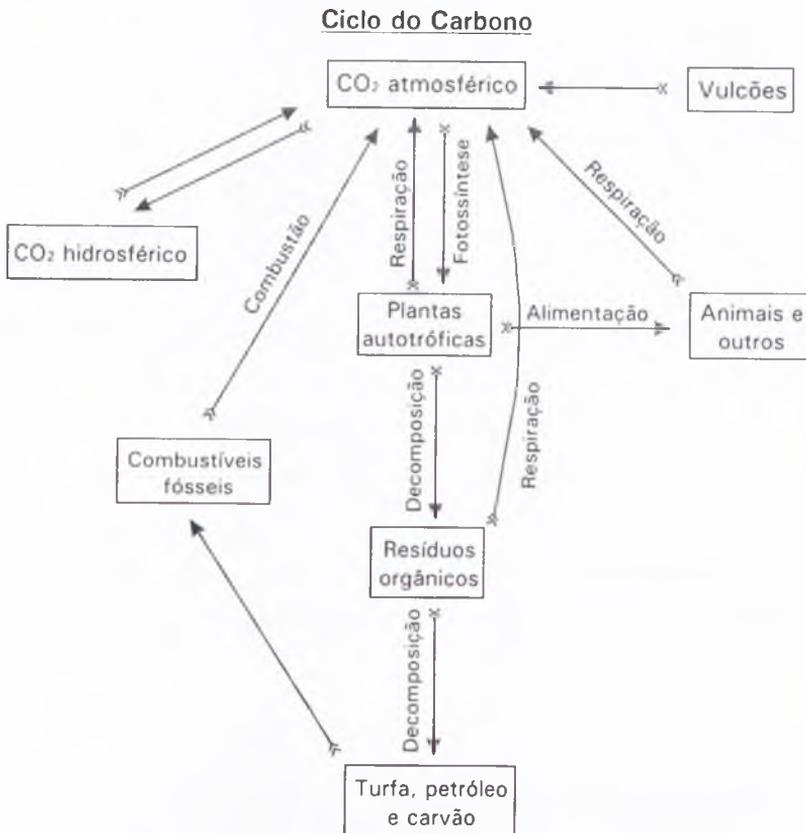


Fig. 2. Ciclo do carbono, baseado em Epstein (1975).

Há uma quantidade relativamente grande de trabalhos sobre o efeito benéfico da elevação do teor de CO₂ no crescimento de plantas. Na última década, publicaram-se aproximadamente 2700 trabalhos sobre o assunto (Jones & Curtis, 2000; Loladze, 2002). Sendo a única fonte de carbono, o aumento da concentração de CO₂ resulta em benefícios para o desenvolvimento das plantas, embora diferenças entre espécies possam existir. Tal fato é conhecido desde 1964, com a publicação de um artigo pioneiro sobre enriquecimento de estufas com CO₂ para a produção de alimentos (Wittwer & Robb, 1964, citados por Idso & Idso, 1994). Diversos autores chegaram à mesma conclusão com diferentes culturas, ecossistemas naturais e espécies florestais. O percentual de incremento no desenvolvimento das plantas em ambiente enriquecido com CO₂ é mais acentuado quando outros fatores ambientais estão em níveis limitantes, como disponibilidade de água, nutrientes e luz, ou estresses devidos à salinidade ou poluentes, conforme relatam Idso & Idso (1994), em uma revisão detalhada sobre o assunto.

A elevação dos teores de CO₂ promove alterações no metabolismo, crescimento e processos fisiológicos da planta. Há significativo 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 e do nitrogênio pela planta (Thompson & Drake, 1994). Jwa & Walling (2001) citam o exemplo de tomateiros, cultivados em túneis plásticos com elevadas concentrações de CO₂, que apresentaram um aumento de produção de 32% e de 65 a 77% no diâmetro dos frutos, devido à redução da taxa de transpiração e ao aumento da taxa de fotossíntese. No Brasil, Furlan *et al.* (2002) avaliaram o efeito da aplicação de diferentes lâminas de irrigação e do enriquecimento da atmosfera com CO₂ (800 µL.L⁻¹), em experimento com a

cultura do pimentão (cultivar Mayata) em ambientes protegidos. Os resultados mostraram que, com a aplicação de CO_2 , houve a obtenção de maiores comprimento, diâmetro e número de frutos por planta, além da massa e rendimento, na ordem de 12,4%; 11,9%; 21,4%; 20,0% e 51,3%, respectivamente, em relação ao ambiente protegido, sem aplicação de CO_2 .

O estímulo à fotossíntese se deve à redução da competição entre o CO_2 e o O_2 atmosféricos para serem fixados pela enzima ribulose 1,5-bisfosfato carboxilase-oxigenase (RUBISCO). A concentração de O_2 da atmosfera normalmente inibe a absorção de CO_2 pela planta e ocasiona a fotorrespiração. Com o aumento da concentração de CO_2 , a inibição do O_2 à fotossíntese tende a diminuir devido ao aumento da relação $\text{CO}_2:\text{O}_2$.

De um modo geral, o aumento do CO_2 resulta em maior crescimento de plantas do tipo C3, seguidas das C4 e das possuidoras do Metabolismo Ácido das Crassuláceas (CAM), embora algumas reduções tenham sido observadas (Idso & Idso, 1994). Além disso, plantas do mesmo grupo podem apresentar respostas diferentes. Hibberd *et al.* (1996a) verificaram aumento de 87% no crescimento de plantas de cevada cultivadas em ambiente com $700 \mu\text{L.L}^{-1}$ de CO_2 , o que é superior às respostas encontradas para outras plantas C3. Segundo os autores, esses resultados indicam a importância do estudo das respostas específicas de cada espécie, mas também alertam que cuidados devem ser tomados na comparação dos resultados, devido às diferenças quanto aos métodos usados para a avaliação da taxa de crescimento. A capacidade de reprodução das plantas também pode ser aumentada, como demonstraram LaDeau & Clark (2001), em experimento conduzido por quatro anos em campo, com *Pinus taeda*.

A qualidade dos alimentos produzidos em ambientes enriquecidos com CO_2 pode ser alterada. A maior produção de biomassa nem sempre é acompanhada pela manutenção da qualidade nutricional dos alimentos produzidos. Idso & Idso (2001) relatam que, a partir de uma revisão realizada

com 75 artigos publicados, verificou-se um decréscimo no teor de nitrogênio das plantas em 82% dos experimentos realizados, com uma redução média de 14% (base seca). Esse resultado é uma consequência do aumento do carboidrato total não estrutural das plantas devido ao estímulo de crescimento. Para Makino (2003), o decréscimo do teor de nitrogênio foliar não é devido à diluição desse nutriente causada pelo aumento da área foliar ou biomassa da planta, mas pela alteração da alocação do nitrogênio na planta.

Assim como observado para o nitrogênio, o teor de proteínas das plantas também pode ser reduzido, promovendo efeitos deletérios em ruminantes selvagens e domésticos e insetos herbívoros (Idso & Idso, 2001). Todavia, tais reduções são mais freqüentes em plantas cultivadas em solos com teores limitantes de nitrogênio. O estímulo da fixação simbiótica de nitrogênio com o aumento de CO₂ pode ser, em parte, devido à maior necessidade desse nutriente no ecossistema.

Calfapietra *et al.* (2003) continuaram questionando se o estímulo ao crescimento das plantas permanece por longos períodos e quais são os efeitos das limitações na disponibilidade de nutrientes e água. Em experimento conduzido em campo, com espécies de *Populus*, os autores verificaram redução acentuada do nitrogênio inorgânico do solo em áreas com aumento da concentração de CO₂, o que pode comprometer a produtividade futura. Segundo Ziska (2003), a biomassa total é dependente do suprimento de nitrogênio, mas a habilidade de responder vegetativamente ao aumento da concentração de CO₂ não depende desse nutriente.

Norby *et al.* (1986) avaliaram o desenvolvimento de plantas de carvalho branco (*Quercus alba*), por 40 semanas, em câmaras controladas com concentrações de CO₂ de 362 $\mu\text{L.L}^{-1}$ e 690 $\mu\text{L.L}^{-1}$, cultivadas em solo de floresta deficiente em nutrientes. Os resultados mostraram que houve aumento de 85% no crescimento, especialmente do sistema radicular, com o aumento da concentração de CO₂. Com o maior desenvolvimento, as plantas

apresentaram severa deficiência de N. O maior desenvolvimento não aumentou o teor total de água por planta, indicando aumento significativo na eficiência do uso da água. A absorção total de N, S e B não foi afetada pelo CO₂, assim, a concentração desses nutrientes nos tecidos foliares foi menor. Por outro lado, a absorção de P aumentou, provavelmente, devido à maior proliferação de radículas e micorrizas, assim como bactérias da rizosfera, que estimulam a mineralização do P. Esses resultados indicam que a resposta ao enriquecimento com CO₂ também é possível em sistemas deficientes em nutrientes, e que os mecanismos de resposta podem incluir tanto o aumento do suprimento do nutriente como decréscimo da demanda fisiológica. Norby (1987) também verificou um maior desenvolvimento de plantas e uma maior atividade total de nódulos de simbioses fixadores de nitrogênio em solo pobre em nutrientes.

No Brasil, Aidar *et al.* (2002) testaram os efeitos do enriquecimento com CO₂ no estabelecimento de plântulas de jatobá (*Hymenaea courbaril*), utilizando estufas de topo aberto com concentração alterada de CO₂ (720 µL.L⁻¹ e a testemunha com 340 µL.L⁻¹). Os autores concluíram que o aumento de CO₂ promoveu um aumento significativo na área foliar dos mesófilos e na fotossíntese. Os resultados também evidenciaram que as plantas crescidas sob condições enriquecidas de CO₂ não se aclimataram e, portanto, sob as condições climáticas previstas com base nos níveis atmosféricos atuais, as plântulas de jatobá deverão se estabelecer mais rapidamente em seu ambiente natural e também poderão servir como um meio eficiente de seqüestro de carbono pela floresta. Porém, a possível limitação no crescimento das árvores, resultante da falta de nitrogênio, não foi discutida.

Excetuando-se o nitrogênio, praticamente nenhuma informação está disponível com relação a outros elementos químicos, como ferro, iodo e zinco, que constituem importantes componentes das dietas da população humana. Uma discussão a esse respeito foi publicada por Loladze (2002). A partir dos dados de 25 trabalhos publicados, com 19 plantas herbáceas, 11 espécies arbóreas

e cinco cultivares de trigo, o autor concluiu que o enriquecimento da atmosfera com CO₂ provoca significativa redução dos elementos essenciais. A alteração da composição das plantas é um resultado de extrema importância do ponto de vista nutricional, já que elas constituem o início da cadeia alimentar.

Resultados variáveis foram obtidos quanto aos efeitos do aumento da concentração de CO₂ do ar em compostos secundários das plantas, digestibilidade, palatabilidade, atratividade, defesa contra doenças, qualidade nutricional, concentração de minerais e outros componentes. Idso & Idso (2001) argumentam que algumas das variações observadas podem ser resultantes dos diferentes teores de nitrogênio disponíveis para as plantas nos solos em que se realizaram os testes, o que pode ter alterado nelas a concentração desse nutriente e, conseqüentemente, também a produção de proteínas e outros compostos.

Os estudos sobre a qualidade nutricional dos alimentos sofrem diversos problemas metodológicos que resultam em interpretações controversas (Idso & Idso, 2001). Entre os problemas, destaca-se, por exemplo, a comparação de plantas com a mesma idade, sem considerar o estágio fisiológico. Muitas características das plantas dependem do seu estágio de desenvolvimento e, por esse motivo, estudos que consideram somente a sua idade podem resultar em enganos na comparação dos efeitos do estímulo de crescimento. Também a duração dos experimentos é um importante fator que deve ser considerado, pois as alterações podem ocorrer em diversos períodos do desenvolvimento das plantas.

O enriquecimento com CO₂ também pode promover alterações na fisiologia e morfologia de raízes, como: aumento da densidade de raízes, especialmente nas camadas superficiais do solo, da sua taxa de desenvolvimento e da quantidade de exsudatos liberados, que podem aumentar a infecção de micorrizas (Sionit *et al.*, 1982; Jwa & Walling, 2001).

Mais de 1000 estudos realizados concluíram que, dobrando-se a concentração de CO_2 , pode haver um aumento de produtividade de 33% em plantas C3 e 10% nas C4, porém esses trabalhos foram conduzidos na ausência de danos causados por doenças, competição com plantas invasoras e pragas (Patterson *et al.*, 1999; Coakley & Scherm, 1996; Chakraborty *et al.*, 2000b; Jwa & Walling, 2001). Não há informações se os benefícios do CO_2 ocorrerão em presença de patógenos ou de outros fatores limitantes. Há alguma informação disponível sobre a influência de quantidades elevadas de CO_2 sobre patógenos em cultura pura, mas pouco se sabe a respeito dos efeitos no desenvolvimento de importantes doenças de plantas, especialmente em países tropicais.

2.2. Ozônio

A camada de O_3 , localizada na estratosfera (aproximadamente, entre 10 a 50 km da superfície do planeta) absorve a radiação ultravioleta (210 a 290 nm, sendo que a radiação < 280 nm é UV-C e de 280 a 320 nm é UV-B). Essa camada, de extrema importância para a vida no planeta, está sofrendo dano causado por ações antrópicas. Tal dano, conhecido como "buraco na camada de ozônio", pode apresentar sérias conseqüências para o planeta.

Além dessa camada, na troposfera está ocorrendo aumento na concentração do O_3 , especialmente ao redor dos grandes centros urbanos, devido ao aumento da emissão de CO, NO_x e compostos orgânicos voláteis (VOCs), que reagem e produzem O_3 (Fig. 3). Embora seja considerado um gás de efeito estufa, apresenta contribuição relativamente pequena na regulação da temperatura do ar. Por outro lado, o O_3 é considerado o mais importante poluente tóxico às plantas, podendo causar injúria foliar, redução do crescimento

e da produção das plantas devido à indução de estresse, aumento da senescência, redução da taxa fotossintética, além de causar a degradação de proteínas.

Ciclo do Ozônio



Fig. 3. Equação simplificada da produção de ozônio troposférico, baseada em Atkinson (1993).

As plantas podem apresentar sintomas resultantes de exposições agudas ou crônicas ao O₃. A exposição aguda consiste em doses relativamente altas de O₃ (por exemplo, maiores que 80 nL.L⁻¹), por algumas horas consecutivas, em alguns dias. A exposição crônica consiste em concentrações baixas (menores que 40 nL.L⁻¹) durante todo o ciclo da planta, com interrupções periódicas ou alguns picos com maiores concentrações (Krupa *et al.*, 2001). Na Europa Central, a concentração de O₃ na troposfera aumentou três a quatro vezes no último século e houve uma mudança do pico anual, que geralmente ocorria na primavera, para a época de verão. Assim, a maior concentração desse oxidante altamente fitotóxico coincide com a estação de crescimento das culturas (Tiedemann & Firsching, 2000).

Nos últimos 25 anos, com o aumento da população dos centros urbanos e industriais, tem havido um número crescente de relatos sobre danos causados a diversas espécies de importância agrônômica e florestal. O estresse crônico causado por O₃, adicionado ao ar na quantidade de 20 nL.L⁻¹, em feijoeiros, foi observado no período de apenas 21 dias após a emergência das plantas, em experimento conduzido no sudoeste da França, e aos 60 dias, com adição de 30 nL.L⁻¹, em teste simultâneo realizado na Inglaterra, por Sanders

et al. (1992). As plantas apresentaram sintomas típicos de estresse crônico, constituído por pequenas manchas de coloração bronze, acompanhadas de senescência prematura das folhas.

Um dos principais efeitos do O_3 é alterar, de forma imprevisível, a suscetibilidade das plantas hospedeiras a outros estresses ambientais e a fitopatógenos. Os efeitos diretos sobre os patógenos são menos pronunciados (Sandermann Jr., 1996). De modo geral, há o decréscimo da incidência de doenças causadas por parasitas obrigatórios, ao passo que há o aumento dos problemas ocasionados por parasitas facultativos. Isso ocorre porque os parasitas facultativos infectam preferencialmente plantas debilitadas, enquanto os obrigatórios são mais adaptados para causar doenças nas plantas saudáveis. A interação das injúrias causadas pelo O_3 com as causadas por vírus e bactérias apresenta resultados variáveis para cada patossistema. Geralmente, doenças causadas por patógenos veiculados pelo solo são estimuladas. Resultados variáveis foram obtidos com micorrizas (Manning & Tiedemann, 1995). A decomposição da liteira é reduzida com o aumento do O_3 , implicando alterações na ciclagem de nutrientes e biodiversidade. Porém, essas regras não podem ser aplicadas para todos os casos. Outros fatores, como época de exposição ao O_3 em relação à infecção, presença ou ausência de injúria, causada por exposição aguda antes da inoculação, e as relações específicas patógeno-hospedeiro desempenham importante papel nos efeitos de predisposição à ocorrência da doença. A maior parte das informações é proveniente de observações empíricas em campo ou experimentos conduzidos em ambientes controlados, especialmente no Hemisfério Norte (Krupa *et al.*, 2001).

No Brasil, as determinações de concentração de O_3 troposférico têm se concentrado na região amazônica, com a finalidade de avaliar efeitos das queimadas. Em algumas regiões, os dados apontam para uma situação de poluição semelhante aos valores descritos para países do Hemisfério Norte,

contudo, as informações ainda são extremamente escassas (Martins & Rodrigues, 2001).

Tresmondi (2003) avaliou a qualidade do ar em Paulínia (SP) e região, para verificar o nível de poluição em locais sob a influência do pólo industrial. Os resultados das concentrações dos poluentes levaram à conclusão de que O_3 é um problema de qualidade do ar. As maiores fontes de poluição, identificadas por análise de componentes principais, foram: veículos, queima de combustível fóssil, transporte de pluma de região industrializada para o local e fontes pontuais de emissão de SO_2 . Entre os compostos orgânicos voláteis presentes em Paulínia, m + p xileno são os que mais contribuem para a formação de O_3 .

2.3. Radiação ultravioleta-B

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; Fig. 4) que atinge a superfície do 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).

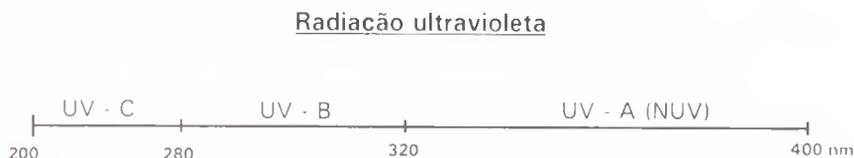


Fig. 4. Comprimento de onda da radiação ultravioleta (UV).

Numerosos estudos foram realizados com o objetivo de avaliar as respostas ao aumento da radiação UV-B em ecossistemas naturais e em plantas de importância agrônômica. Para algumas culturas, como soja, ervilha e arroz, há maior quantidade de informações, mas para a grande maioria das plantas cultivadas os dados são limitados. Além disso, as informações disponíveis foram, de modo geral, obtidas em testes conduzidos em condições controladas, que não têm apresentado correlações com as respostas obtidas em ensaios em condições mais próximas às de campo. Devido a tais problemas, Paul (2000) realizou uma revisão de literatura a respeito dos métodos empregados para estudos dos efeitos de UV-B sobre fitopatógenos e doenças de plantas.

A exposição direta de esporos de fungos ao UV-B pode danificar as estruturas e as suas fases iniciais de desenvolvimento, incluindo a infecção de plantas. 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).

O UV-B geralmente causa alterações morfológicas nas plantas, como redução do crescimento e do tamanho das folhas, e aumento da ramificação ou perfilhamento e número de folhas. Essas alterações favorecem a criação de um microclima favorável à infecção por fungos e bactérias e o desenvolvimento de epidemias (Manning & Tiedemann, 1995; Paul, 2000). Estudos recentes demonstraram que não há inibição da fotossíntese. As alterações fisiológicas incluem alteração do teor de proteínas solúveis e lipídeos

das membranas, da estrutura e das propriedades químicas da superfície foliar, incluindo as ceras, e de flavonóides (Paul, 2000).

Em uma revisão a respeito dos efeitos do UV-B sobre a ocorrência e a severidade de doenças, Manning & Tiedemann (1995) verificaram que, de treze doenças causadas por patógenos necrotróficos, nove tiveram aumentada a sua incidência (*Botrytis cinerea*, em pepino e tomate; *Sclerotinia sclerotiorum*, em berinjela e pepino; *Alternaria dauci*, *Alternaria porri*, *Alternaria solani* e *Botrytis squamosa*, em hortaliças em estufa; *Colletotrichum lagenarium* e *Cladosporium cucumerinum*, em pepino, e *Cercospora beticola*, em beterraba), duas não foram afetadas (*Cladosporium* sp. e *Alternaria* sp., em tomate) e duas tiveram redução (*Colletotrichum lagenarium*, em pepino, e *Diplocarpon rosae*, em rosas). Das quatro doenças causadas por patógenos biotróficos, três tiveram a incidência reduzida (*Puccinia coronata*, em aveia, *Uromyces phaseoli*, em feijoeiro, e *Erysiphe graminis*, em trigo) e uma aumentada (*Puccinia recondita* f. sp. *tritici*, em trigo). Porém, os autores argumentam que um problema na comparação dos resultados dos testes é o fato de terem sido utilizados diferentes métodos de exposição, intensidade e qualidade de luz, o que produziu resultados contraditórios, como, por exemplo, com *Colletotrichum lagenarium*, em pepino.

Orth *et al.* (1990) estudaram os efeitos do UV-B em três cultivares de pepino, antes e após inoculação com *Colletotrichum lagenarium* e *Cladosporium cucumerinum*. O tratamento antes da inoculação aumentou a suscetibilidade às duas doenças, indicando a alteração de mecanismos de defesa da planta. O tratamento pós-inoculação não apresentou os mesmos resultados. Os autores concluíram que os efeitos do UV-B foram mais acentuados na planta que nos patógenos, já que não houve diferenças entre a severidade das doenças em plantas que receberam o tratamento somente antes da inoculação e as que receberam antes e após a inoculação.

3. Efeitos das mudanças climáticas sobre o ciclo das relações patógeno-hospedeiro

O clássico triângulo de doença (Fig. 5) 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. Conseqüentemente, a doença não ocorre se houver eliminação de um dos componentes. Essa relação triangular é característica exclusiva da Fitopatologia, em comparação com as áreas de Veterinária e Medicina, pois as plantas terrestres possuem pouca capacidade de estoque térmico, e a imobilidade impede o escape de ambientes adversos (Francl, 2001).



Fig. 5. Triângulo de doença apresentando a interação entre os elementos fundamentais que determinam a ocorrência de uma doença.

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 (Fig. 6). Além desses, também pode afetar outros organismos com os quais a planta e o patógeno interagem, como 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. As relações entre clima e doenças são tão intensas que são rotineiramente usadas em sistemas de previsão de doenças e manejo de epidemias, pois as flutuações na severidade de doenças são determinadas através dos anos, principalmente, pelas variações climáticas.

Ciclo das relações patógeno - hospedeiro

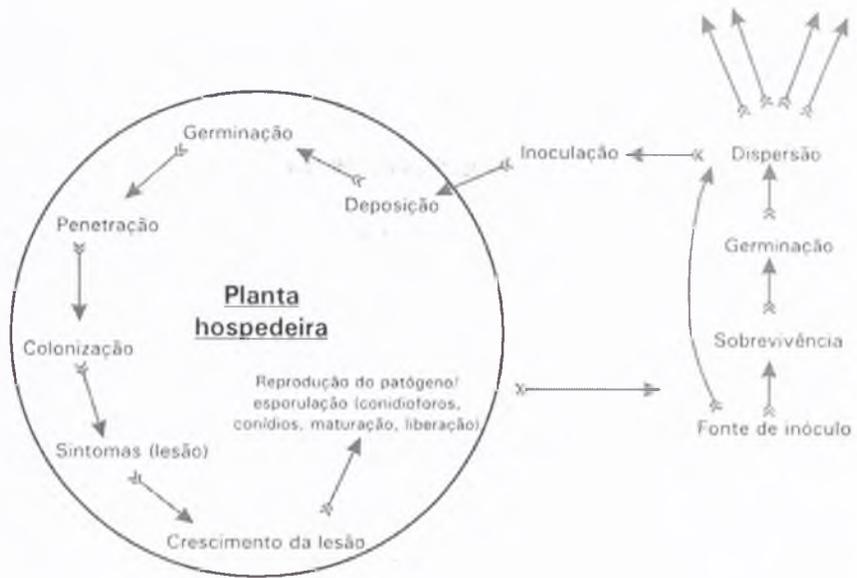


Fig. 6. Ciclo básico das relações patógeno-hospedeiro, baseado em Galli (1980), Bergamin Filho *et al.* (1995) e Bergamin Filho & Amorim (1996).

A mudança climática pode ter efeitos diretos e indiretos tanto sobre os patógenos quanto sobre as plantas hospedeiras e a interação de ambos (Fig. 7). Sobre os microrganismos fitopatogênicos, a 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.

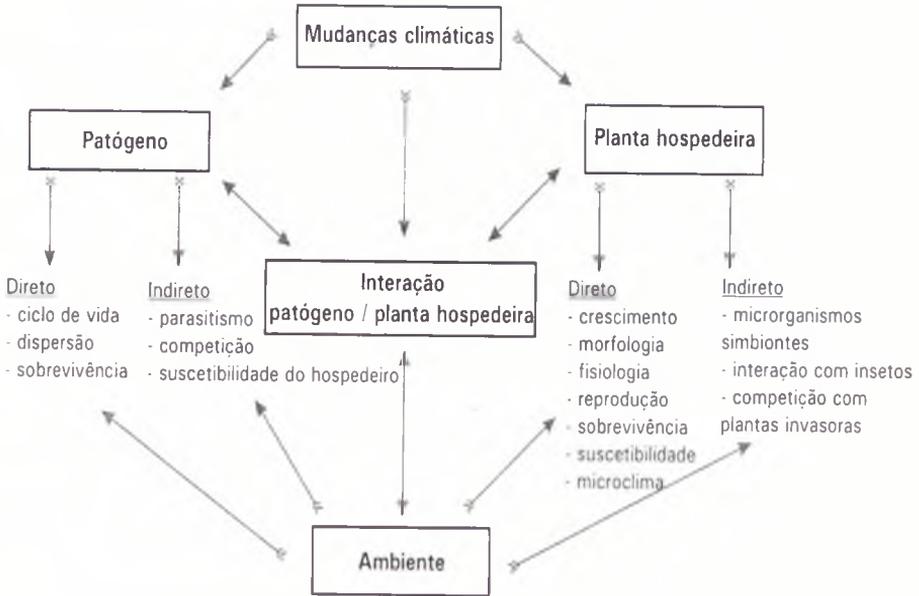


Fig. 7. Triângulo de doença expandido, apresentando os efeitos diretos e indiretos das mudanças climáticas sobre o patógeno, a planta hospedeira e a interação patógeno/planta hospedeira, baseado em Coakley (1995); Manning & Tiedemann (1995) e Bell *et al.* (1993).

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 saprofítica.

Os efeitos das mudanças climáticas em doenças de plantas arbóreas, segundo Lonsdale & Gibbs (1994), podem ser avaliados pela análise das informações já existentes sobre efeitos de flutuações climáticas e ocorrência das doenças. Para patógenos cuja distribuição geográfica ou atividade patogênica são afetadas diretamente pela temperatura, podem-se prever os efeitos do aquecimento global. Entre eles, estão patógenos que são favorecidos por altas temperaturas no verão e também aqueles que requerem temperaturas amenas na estação de dormência, época em que podem atacar o hospedeiro. Os efeitos do aumento da frequência de períodos de seca no verão também podem ser previsíveis, já que são conhecidas as conseqüências do estresse das plantas na ocorrência de diversas doenças, especialmente as causadas por patógenos veiculados pelo solo. Por outro lado, a previsão é mais difícil para patógenos cuja reprodução e dispersão são basicamente afetadas pela umidade atmosférica e para os que interagem com outros organismos para permitir a ocorrência da doença, como insetos vetores e micorrizas.

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 negativo, 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.

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. Certamente, a natureza da planta hospedeira (por exemplo, anual ou perene; C3 ou C4) e do patógeno (veiculado pelo solo, ou da parte aérea, biotrófico ou necrotrófico) determina como serão os impactos das mudanças climáticas, podendo ser positivos, negativos ou sem efeito. Supostas alterações morfológicas e fisiológicas que podem ocorrer 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 sílicio, nos locais de penetração de apressórios, e aumento do número de células do mesófilo (Chakraborty *et al.*, 2000a). A elevação da concentração de CO₂ 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).

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. Fungos micorrízicos, microrganismos endofíticos e os fixadores de nitrogênio também podem sofrer os efeitos das mudanças climáticas, acarretando alterações na severidade de doenças.

A maior parte dos trabalhos referentes aos efeitos do ambiente sobre doenças de plantas foi realizada com patógenos da parte aérea, mas aqueles veiculados pelo solo também podem sofrer significativas mudanças. A temperatura do solo, por exemplo, afeta a atividade de rizobactérias que conferem supressividade de solos a *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris*, agente causal de murcha em grão-de-bico (*Cicer arietinum*), além de afetar o potencial de inóculo do patógeno (Landa *et al.*, 2001).

4. Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de plantas

Os impactos das mudanças climáticas sobre doenças de plantas podem se expressar em diferentes aspectos. Entre os principais, destacam-se os efeitos nos danos causados pelas doenças, na distribuição geográfica das doenças, na eficácia dos métodos de controle e nos demais organismos que interagem com a planta, como micorrizas, rizobactérias, antagonistas e endofíticos, entre outros (Chakraborty *et al.*, 2000a; Chakraborty, 2001). As avaliações devem ser realizadas com cautela, pois muitas vezes somente dados obtidos em ambientes controlados estão disponíveis e nem sempre esses resultados podem ser transpostos para escalas maiores. Além disso, há pouca informação sobre a adaptação à mudança climática pelas populações de hospedeiros e de patógenos.

Em um levantamento sobre os trabalhos publicados, de 1930 a 1993 - poucos, por sinal -, a respeito dos efeitos do aumento da concentração de CO₂ em doenças de plantas, Manning & Tiedemann (1995) verificaram que houve tendência do aumento de doenças. Os autores fizeram uma análise sobre os efeitos potenciais do aumento da concentração de CO₂ em 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, mildios 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). Tais alterações podem ter grande influência no desenvolvimento de epidemias.

4.1. Danos causados pelas doenças

Os efeitos das mudanças climáticas sobre os danos causados pelas doenças são determinados pelas interações de um grande número de fatores que, direta ou indiretamente, influenciam a ocorrência e a severidade das doenças. Entre os fatores diretos, as alterações da fisiologia e da morfologia da planta hospedeira, pelo aumento no teor de CO₂, podem influir na interceptação da luz e precipitação, modificar a estrutura da parte aérea da planta e, conseqüentemente, o microclima, o que influencia os componentes epidemiológicos das doenças. Algumas doenças podem reduzir o desenvolvimento das plantas de forma mais acentuada em ambiente enriquecido com CO₂, como relatado para oídio em cevada (Hibberd *et al.*, 1996a). O crescimento de plantas doentes é freqüentemente reduzido, mesmo quando a severidade da doença é diminuída com a elevação do CO₂ (Chakraborty *et al.*, 2000a).

Entre os fatores indiretos, o O₃ pode predispor as plantas a danos maiores que os ocasionados por fitopatógenos, enquanto os efeitos do

UV-B ainda são inconsistentes (Manning & Tiedemann, 1995). Por outro lado, um aumento de severidade de uma determinada doença, provocado por uma mudança climática, não implica necessariamente o aumento de perdas (Luo *et al.*, 1995). Em um levantamento realizado por Chakraborty *et al.* (1998), dos dez patógenos biotróficos estudados, a severidade da doença foi aumentada em seis e reduzida em quatro patossistemas, com o aumento do CO₂. De quinze patógenos necrotróficos, a severidade da doença aumentou em nove, foi reduzida em quatro e permaneceu inalterada em outros dois patossistemas. Segundo Chakraborty *et al.* (2000a), há necessidade imediata da realização de análises detalhadas sobre as alterações resultantes de mudanças climáticas nas perdas ocasionadas por doenças.

Para Coakley & Scherm (1996), as culturas perenes localizadas em regiões marginais sofrerão um período de estresse crônico, levando ao aumento da predisposição à ocorrência de doenças. Nesse tipo de cultura é mais difícil adotar medidas de manejo a curto prazo, devido ao alto custo de substituição das plantas.

4.2. *Mudanças na distribuição geográfica das doenças*

O aumento da temperatura do planeta altera as zonas agroclimáticas e interfere diretamente na distribuição geográfica das doenças de plantas. Utilizando modelos matemáticos, Carter *et al.* (1996) simularam mudanças climáticas na Finlândia e concluíram que o aquecimento vai ampliar a área de cultivo de cereais em 2050 (100 a 150 km lineares para cada grau Celsius de aumento na temperatura média anual); além disso, com o aumento da concentração de CO₂, espera-se maior produtividade. Nesse cenário, o cultivo de batata também será beneficiado, com um aumento estimado de 20 a 30%

na produtividade. Porém, também está prevista nova distribuição de nematóides fitopatogênicos, expandindo-se para o norte do país, e com maior número de gerações ao ano. Nessa situação, o risco de requeima da batata (causada por *Phytophthora infestans*) é significativamente maior em todas as regiões da Finlândia. Os danos causados pelo aumento da incidência desses importantes fitopatógenos não foram estimados.

Para os nematóides fitopatogênicos, *Xiphinema* e *Longidorus*, Boag *et al.* (1991) obtiveram resultados semelhantes. Os dados do levantamento sobre distribuição geográfica desses nematóides, na Grã-Bretanha e na Europa Continental (amostras coletadas em grades de 10 km² e 50 km², respectivamente), foram associados às linhas isotérmicas de temperatura do solo em julho. A distribuição geográfica dos nematóides possui associação direta com a temperatura, dessa forma, os problemas com esses microrganismos devem se intensificar no Norte da Europa, devido ao aumento das populações existentes e devido à disseminação dessas espécies a partir da Região Sul.

Um cenário semelhante também foi previsto, por Brasier & Scott (1994) e Brasier (1996), para a ocorrência de *Phytophthora cinnamomi* em carvalho (*Quercus* spp.). O estudo foi realizado devido à importância ecológica e hidrológica das espécies nativas de carvalho para o continente europeu. Com o aquecimento global, a ocorrência de podridão de raízes e a sobrevivência desse patógeno exótico provavelmente vão aumentar, assim como a gama de plantas hospedeiras. O modelo explorou três cenários: 1,5 e 3°C de aumento na temperatura mínima e máxima média anual, e 3°C de aumento na temperatura mínima e máxima média anual, com aumento de 20% da precipitação no verão. Em todos os casos, os resultados demonstraram que poderá haver aumento significativo da atividade patogênica e das áreas contaminadas. Entretanto, em regiões com inverno rigoroso, como a Escandinávia, Rússia e o Danúbio Central, deve haver menor disseminação do patógeno. Entre os fatores responsáveis pelo

aumento da importância da doença devido à mudança climática, os autores citam a possibilidade de disseminação para novas áreas, maior período favorável para produção de inóculo e infecção, maior taxa de disseminação e sobrevivência em raízes e no solo, além de maior predisposição da planta.

Qualquer que seja a mudança climática, os patógenos tendem a seguir a planta hospedeira em sua distribuição geográfica. A velocidade com a qual os patógenos vão se estabelecer no novo ambiente é função da possibilidade de dispersão e sobrevivência entre estações do ano ou de cultivo e das mudanças fisiológicas e ecológicas da planta hospedeira. Segundo Chakraborty *et al.* (2000a), linhagens mais agressivas de patógenos com ampla gama de hospedeiros, como *Rhizoctonia*, *Sclerotinia*, *Sclerotium* e outros patógenos necrotróficos, podem migrar de agroecossistemas para vegetações naturais, assim como patógenos menos agressivos, de comunidades naturais de plantas, podem começar a causar problemas em monoculturas de regiões vizinhas. No caso particular de patógenos pouco especializados, como os necrotróficos, pode haver uma ampliação da gama de hospedeiros devido à migração das culturas.

Segundo Coakley & Scherm (1996), com as mudanças climáticas, os patógenos veiculados pelo solo continuarão a apresentar maiores problemas de controle que os foliares, devido às poucas opções de manejo. Uma vez que o solo esteja infestado, o patógeno pode permanecer por anos, mesmo na ausência de hospedeiro suscetível. Assim, medidas de quarentena e exclusão continuarão a desempenhar um importante papel para evitar a disseminação de patógenos para novas áreas.

4.3. *Eficácia dos métodos de controle*

Todas as modalidades de controle de doenças de plantas são afetadas pelas condições climáticas. Alterações na precipitação, por exemplo,

quanto à duração, intensidade e freqüência de chuvas, têm efeito no controle químico - se ocorrerem no período pós-aplicação, muitos fungicidas, por exemplo, podem ter sua eficácia comprometida. Para o controle biológico de doenças de plantas, as alterações na composição da atmosfera podem modificar as comunidades da microbiota da filosfera e da rizosfera (Manning & Tiedmann, 1995). Na rizosfera, o aumento do teor de CO₂ pode interagir com o nitrogênio e outros fatores do solo e alterar a ocorrência de doenças radiculares e a absorção de nutrientes. Alguns estudos, realizados em curto período de tempo e sob condições controladas, demonstraram que o CO₂ pode estimular a colonização de raízes por micorrizas devido ao maior desenvolvimento das plantas (Staddon & Fitter, 1998). A colonização de raízes por fungos micorrízicos vesículo-arbusculares é favorecida em solos mais pobres em nutrientes (Silveira, 1992), mas ainda não há informações se o maior estoque de carbono no solo, devido ao maior crescimento de raízes e de micorrizas com o aumento do CO₂, irá influenciar a colonização micorrízica.

Uma conseqüência direta das modificações causadas pelas mudanças climáticas nas relações patógeno-hospedeiro é na resistência genética de plantas às doenças. Muitas modificações na fisiologia da planta podem alterar os mecanismos de resistência de cultivares obtidas tanto por métodos tradicionais como por engenharia genética. Vários trabalhos comprovam tais alterações, como aumentos significativos das taxas de fotossíntese, produção de papilas, acúmulo de silício em locais de penetração dos apressórios, maior acúmulo de carboidratos na folhas, mais cera, camadas adicionais de células epidérmicas, aumento da quantidade de fibras e redução da concentração de nutrientes (Hibberd *et al.*, 1996b; Chakraborty *et al.*, 2000a). A redução da densidade de estômatos devida ao aumento do teor de CO₂, por exemplo, afeta diretamente os componentes epidemiológicos de diversas doenças, pois resulta em restrição da penetração de patógenos.

Algumas formas de resistência podem ser mais afetadas que outras. Entretanto, a maior ameaça à resistência genética é a aceleração dos ciclos dos patógenos que, com o aumento do CO₂, podem sofrer alterações em todos os estádios de vida. Alguns trabalhos verificaram que, apesar de haver um atraso no desenvolvimento inicial e redução na penetração no hospedeiro, as colônias estabelecidas se desenvolvem em maior velocidade e há aumento da multiplicação do patógeno nos tecidos da planta (Hibberd *et al.*, 1996b; Chakraborty *et al.*, 2000a). A multiplicação mais intensa do patógeno, associada a um microclima propício, devido ao maior desenvolvimento das plantas, favorece a ocorrência de epidemias.

A aparente plasticidade de alguns sistemas agrícolas pode ajudar a minimizar os impactos negativos das mudanças climáticas com a adoção de novas cultivares ou outras práticas. Porém, os países em desenvolvimento provavelmente terão maiores dificuldades de adaptação às mudanças climáticas, devido ao menor desenvolvimento tecnológico e aos poucos recursos disponíveis para a adoção de medidas. Segundo Bell *et al.* (1993), há uma necessidade urgente de aquisição de conhecimentos sobre as complexas interações entre diferentes compostos atmosféricos e as doenças de plantas, com a finalidade de minimizar futuros impactos ecológicos e econômicos adversos.

5. Efeitos do CO₂ sobre doenças de plantas e microrganismos relacionados

Poucos trabalhos foram desenvolvidos com a finalidade de avaliar os efeitos do aumento da concentração atmosférica de CO₂ sobre as doenças de plantas. Uma utilização rotineira é a aplicação de atmosfera modificada para o manejo de doenças pós-colheita (Benato *et al.*, 2001). O aumento de CO₂ e a redução de O₂, isoladamente ou em conjunto, têm como objetivo estender o período de conservação das frutas, reduzindo a taxa respiratória e retardando os processos bioquímicos de maturação e senescência, além de suprimir o desenvolvimento de podridões. O efeito da atmosfera modificada pode ser direto ou indireto. A maturação da fruta em boas condições fisiológicas resulta numa fruta com maior resistência a doenças. O efeito indireto sobre microrganismos também pode ocorrer pela supressão de alguns estádios de crescimento ou atividades enzimáticas. As concentrações utilizadas, entretanto, são elevadas, isto é, da ordem de 1 a 5%, ou mais, em alguns casos.

Segundo Manning & Tiedemann (1995), estudos realizados com o objetivo de avaliar o efeito direto do aumento da concentração de CO₂ sobre microrganismos fitopatogênicos contribuem pouco para a pesquisa de mudanças climáticas globais e doenças de plantas. Isso ocorre, pois, de modo geral, é necessário um aumento expressivo do gás para se verificar alteração no comportamento dos microrganismos. Muitos fungos habitantes do solo toleram mais de 10 a 20 vezes de aumento na concentração do CO₂ atmosférico. Assim, freqüentemente não se observam alterações, ou observa-se algum estímulo no crescimento. Tal estímulo é atribuído à fixação do CO₂ pelos fungos, sendo o carbono incorporado em ácidos orgânicos, como o ácido oxaloacético, fumárico ou cítrico. Assim sendo, o estudo das relações entre o CO₂ e as doenças de plantas deve ser realizado avaliando-se a incidência da doença e não somente os efeitos sobre o patógeno. Por outro lado, Coakley & Scherm

(1996) contestam a conclusão de Manning & Tiedemann (1995) sobre a pouca utilidade da realização de estudos sobre os efeitos diretos do aumento da concentração de CO₂ sobre os patógenos. Segundo aqueles autores, apesar de essa afirmação ser verdadeira para alguns patógenos, tal possibilidade não deve ser descartada, pois pode haver esse efeito em outros casos.

As alterações no metabolismo e processos fisiológicos do hospedeiro podem resultar em mudanças na predisposição da planta, sendo este e outros mecanismos pouco elucidados. Nenhum trabalho foi desenvolvido no Brasil visando caracterizar os efeitos das mudanças climáticas sobre as doenças de plantas.

Segundo Coakley (1995), as mudanças climáticas estão ocorrendo, a concentração de CO₂ está aumentando sensivelmente e haverá uma resposta biológica a essas alterações. A velocidade com que essa resposta ocorrerá depende da habilidade de adaptação das plantas hospedeiras e dos patógenos.

5.1. *Fungos fitopatogênicos*

Em um levantamento bibliográfico realizado por Manning & Tiedemann (1995), verificou-se que, dos nove relatos encontrados com fungos fitopatogênicos necrotróficos, em quatro ocorreu aumento da doença com o aumento da concentração de CO₂ (*Fusarium nivale*, em centeio, *Fusarium oxysporum* f. sp. *cyclaminis*, em ciclame, *Fusarium* sp., em trigo, e *Cladosporium fulvum*, em tomate), em quatro a doença não foi afetada (*Pythium splendens* e *Thielaviopsis basicola*, em *Poinsettia*, *Botrytis cinerea*, em ciclame, e *Sclerotinia minor*, em alface) e, em um, houve redução (*Rhizoctonia solani*, em beterraba açucareira). Para fungos biotróficos, dos sete trabalhos publicados, em seis foi relatado o aumento da doença (*Ustilago hordei*, em cevada, *Ustilago maydis*,

em milho, *Puccinia* spp., em cereais), e redução, em apenas um (*Sphaerotheca pannosa*, em roseiras). Esses resultados evidenciam a carência de informações sobre o assunto, apesar de os fungos consistirem no grupo mais estudado. Além disso, os efeitos do CO₂, no aumento ou redução de doenças, dependem das características específicas dos patossistemas.

De um modo geral, a maioria dos trabalhos realizados para avaliar os efeitos do aumento da concentração de CO₂ sobre doenças de plantas não tem como objetivo estudar as conseqüências das mudanças climáticas globais. Tal enfoque surgiu somente nos últimos anos. A partir de então, as altas concentrações de CO₂ testadas nos trabalhos com outras finalidades foram substituídas pelas concentrações de, aproximadamente, 350 e 700 µL.L⁻¹. Não obstante o objetivo diverso, esses trabalhos iniciais podem fornecer informações a respeito do assunto. Um dos primeiros foi conduzido, na Alemanha, por Gassner & Straib (1930), citados por Manning & Tiedemann (1995), em que se testou o efeito de várias concentrações do CO₂ em ferrugens de cereais. O objetivo foi relatar os efeitos do teor de carboidratos dos cereais na suscetibilidade às ferrugens. Para tanto, plantas de trigo, cevada e aveia foram inoculadas e mantidas em ambiente com 0,03; 0,15; 0,3; 0,75; 1,5; 4,5 e 6% de CO₂. Os resultados mostraram significativo aumento das ferrugens na faixa de 0,15 a 0,75% de CO₂.

Diversos fatores, como fertilização do solo ou irrigação, podem interagir com os efeitos resultantes do enriquecimento da atmosfera com CO₂, promovendo alterações na ocorrência ou severidade das doenças. Aplicações de N, por exemplo, aumentam a suscetibilidade do trigo a *Erysiphe graminis*, agente causal do oídio, que é a mais importante doença foliar da cultura na Inglaterra, e à ferrugem causada por *Puccinia graminis*. Isto se deve à redução da quantidade de fenóis nos tecidos do hospedeiro, causada pela aplicação de N. O estresse hídrico reduz a esporulação de *Erysiphe graminis*, dificultando a ocorrência de epidemias em períodos secos (Thompson *et al.*, 1993). Para

estudar os efeitos do aumento da concentração de CO_2 nessas relações, dois experimentos foram realizados por Thompson *et al.* (1993), em casas de vegetação com trigo de inverno (*Triticum aestivum* cv. Cerco), com $350 \mu\text{L.L}^{-1}$ (ambiente) e $700 \mu\text{L.L}^{-1}$ de CO_2 . No primeiro ensaio, as plantas foram cultivadas em cinco níveis de fertilização com N, na forma de KNO_3 (10, 20, 40, 80 e 160 mg de nitrogênio solúvel, na forma de nitrato, aplicado por semana) e, no segundo ensaio, foram cultivadas em três regimes de irrigação (1,8; 3,6 e 5,4 mm por dia). Todas as plantas foram inoculadas com *Erysiphe graminis*. Em alta concentração de CO_2 , as plantas apresentaram redução do teor de N, e a severidade da doença foi significativamente reduzida. Quanto maior a quantidade de N aplicado, maior foi a incidência da doença e a redução do teor do nutriente nas plantas. Com irrigação moderada, as plantas cultivadas na maior concentração de CO_2 apresentaram redução de 9,9% do teor de N e aumento de 4% do teor de água, sendo que a incidência da doença permaneceu inalterada. Com o maior suprimento de água, o enriquecimento da atmosfera com CO_2 aumentou a porcentagem de área foliar infectada, ao passo que, com menor suprimento de água, a doença foi reduzida pelo tratamento. Os efeitos contrários dos dois fatores estudados podem ter sido os responsáveis pelo resultado. Porém, os autores comentam que a severidade da doença provavelmente é mais sensível ao conteúdo de água do hospedeiro que ao teor de N. A infestação com afídeos foi significativamente menor com aumento do CO_2 , o que pode estar relacionado com a redução do N. Mas, mecanismos diversos podem estar agindo para a redução da praga e da doença com o enriquecimento com CO_2 . Os afídeos respondem diretamente à alteração na concentração de N, enquanto o fungo, além disso, pode ser influenciado pelo teor de fenóis produzidos com o aumento do N.

As alterações nos tecidos das plantas, induzidas pela mudança na concentração de CO_2 , podem afetar as interações planta-inseto. A redução da concentração de N diminui o valor nutricional das plantas para os

consumidores, e a maior taxa fotossintética pode resultar no aumento de compostos de defesa da planta. As larvas de insetos herbívoros respondem à redução da concentração de N com o aumento do consumo de tecidos para manter o consumo total do nutriente, ou reduzindo o crescimento (Thompson & Drake, 1994). Quanto às doenças, a severidade de oídios e ferrugens tende a aumentar com a fertilização das plantas com N. Dessa forma, tais doenças fúngicas tendem a ter a severidade reduzida com o aumento do CO₂, já que ocorre a redução do teor de N nos tecidos das plantas. Inversamente, as doenças fúngicas tendem a ser mais severas com o aumento do teor de água das plantas hospedeiras, como ocorre quando há o enriquecimento da atmosfera com CO₂. Esse aumento de doença pode ser compensado pela redução do teor de N nas plantas C3, mas o mesmo não ocorre com as C4, pois o teor de N dessas plantas geralmente não é afetado pela elevação do teor de CO₂. Para comparar a severidade de ferrugem, causada por *Puccinia sparganioides*, e outros fungos e insetos (larva minadora), em *Scirpus olneyi* (C3) e *Spartina patens* (C4), Thompson & Drake (1994) utilizaram dez estufas de topo aberto para o tratamento das plantas em Chesapeake Bay (Estados Unidos). Cinco estufas, com 10 plantas cada uma, receberam 340 µL.L⁻¹ de CO₂, outras cinco permaneceram sem tratamento, e também foram avaliadas plantas fora das estufas. Não ocorreu infestação de *Spartina patens* com insetos, possivelmente devido ao alto teor de sais da planta. As plantas de *Scirpus olneyi* (C3) tratadas com CO₂ apresentaram redução de 32% na incidência de infestação com insetos minadores, e 37% de redução da severidade das doenças fúngicas, quando comparadas com as cultivadas sem tratamento. Também ocorreu redução na concentração de N nos tecidos de *Scirpus olneyi*, que foi positivamente correlacionada com a severidade das infestações fúngicas e de insetos. Por outro lado, *Spartina patens* (C4) apresentou aumento do teor de água dos tecidos, mas não apresentou alteração da concentração de N, e a severidade das doenças fúngicas aumentou. Para insetos, avaliados somente em *Scirpus*

olneyi, a infestação foi menos severa e as larvas consumiram menos tecido vegetal, com o aumento do CO₂. A redução da infestação com insetos pode ser consequência de alteração no comportamento da praga, aumento da eficiência de uso de N ou restrição do desenvolvimento em alguma fase do ciclo de vida do inseto devido ao aumento de mecanismos de defesa da planta. Os resultados obtidos diferem de outros, possivelmente devido ao método utilizado, pois, nos testes realizados por Thompson & Drake (1994), os insetos não estavam restritos a nenhum tratamento, e a praga completou o ciclo de vida nas plantas dentro das estufas de topo aberto; já em outros trabalhos, os insetos foram alimentados com tecidos de plantas crescidas em atmosfera com maior teor de CO₂. Outra explicação é o fato de o maior teor de água nos tecidos da planta ter reduzido a disponibilidade de aminoácidos livres, que constituem importante fonte de nutrição para os insetos.

Thompson & Drake (1994) também obtiveram resultados diferentes quanto à severidade de doenças fúngicas, em plantas C3 e C4. A elevação do teor de CO₂ resultou em redução da concentração de N em *Scirpus olneyi* (C3), mas não em *Spartina patens* (C4). O teor de água da planta C3 permaneceu o mesmo, enquanto houve aumento na planta C4, o que provocou, nesta, aumento da severidade da doença e redução, na primeira, devido à restrição do N. O efeito compensador dos dois fatores (teor de água e de N) torna difícil fazer previsões sobre os efeitos da mudança climática em plantas C3. Por outro lado, para o grupo de plantas C4, o efeito predominante de aumento do teor de água, quando submetidas a elevadas concentrações de CO₂, com pouca ou nenhuma redução no teor de N dos tecidos, sugere que a severidade de doenças fúngicas deve certamente aumentar.

Em experimento fatorial do tipo FACE ("Free Air Carbon Dioxide Enrichment"), Mitchell *et al.* (2003) avaliaram os efeitos do aumento da concentração de CO₂ (368 µL.L⁻¹ e 560 µL.L⁻¹), adição de nitrogênio (0 e 4 g N m⁻¹ ano⁻¹) e diversidade de espécies do ecossistema (1, 4, 9 ou 16 espécies)

sobre a ocorrência de doenças fúngicas foliares de plantas do tipo C3 e C4. As doenças foram avaliadas segundo um índice obtido com as médias ponderadas da severidade das doenças de cada espécie de planta presente no ecossistema e as respectivas biomassas. A redução da diversidade de espécies apresentou os efeitos mais pronunciados no aumento da ocorrência das doenças, pois facilitou a disseminação dos patógenos. Além do número de espécies, a composição das comunidades, com espécies apresentando diferentes graus de suscetibilidade, também teve efeitos significativos. A maior concentração de CO₂ resultou no aumento da incidência das doenças das gramíneas do tipo C3, devido possivelmente à redução do estresse hídrico, maior longevidade das folhas e taxa fotossintética. A redução da diversidade de espécies acentuou os efeitos do aumento do CO₂ nas gramíneas do tipo C3, demonstrando haver interação entre esses fatores. A adição de N aumentou a incidência de doenças nas gramíneas do tipo C4, pois houve aumento da concentração do N foliar, resultando em estímulo da infecção, crescimento e reprodução dos patógenos. Segundo os autores, esses resultados demonstram que as mudanças globais podem afetar as doenças de plantas, que são um dos principais fatores que interferem nos processos dos ecossistemas.

Hibberd *et al.* (1996a) observaram maior crescimento de plantas sadias de cevada quando submetidas a 700 $\mu\text{L.L}^{-1}$ de CO₂. A inoculação com oídio (*Erysiphe graminis*) resultou na redução da taxa de crescimento, a qual foi transitória, para plantas cultivadas com 350 $\mu\text{L.L}^{-1}$ de CO₂, e altamente significativa para as cultivadas em 700 $\mu\text{L.L}^{-1}$ de CO₂. O aumento na taxa de crescimento da cevada, com o enriquecimento da atmosfera com CO₂, e a redução, com a inoculação do fitopatógeno, foram acompanhados de alterações na taxa de fotossíntese, isto é, aumento e redução da taxa, respectivamente.

Para a compreensão dos mecanismos que são induzidos nos patossistemas com a elevação da concentração de CO₂ atmosférico, é necessário o estudo detalhado de estádios específicos dos processos envolvidos

no desenvolvimento de doenças. Com esse objetivo, Hibberd *et al.* (1996b) estudaram diversas etapas do processo de infecção de cevada com oídio, causado por *Erysiphe graminis*, com 350 ou 700 $\mu\text{L.L}^{-1}$ de CO_2 atmosférico. Não foi observada diferença quanto à porcentagem de germinação de conídios, nos dois ambientes. Mas, houve redução do número de conídios que penetraram nas células da epiderme do hospedeiro, formaram hifas primárias e produziram colônias, devido à interrupção do desenvolvimento no estágio de apressório. A redução da penetração não foi devida ao efeito direto do CO_2 no patógeno, nem a mudanças ontogenéticas nos tecidos do hospedeiro, nem ao aumento das ceras epicuticulares. O aumento da taxa fotossintética, induzido pelo aumento da concentração de CO_2 , permitiu maior mobilização de recursos para o aumento da resistência da planta à penetração inicial do oídio, como a produção de papilas e acúmulo de silício nos locais de penetração do apressório. Esses mecanismos de resistência são induzidos (pós-formados), isto é, são aqueles produzidos ou ativados em resposta à presença dos patógenos. As papilas, por exemplo, são caracterizadas pela deposição de material heterogêneo entre a membrana plasmática e a parede celular no sítio de infecção, sob a hifa de penetração (Pascholati & Leite, 1995). Porém, nove dias após a inoculação, a área das colônias de plantas cultivadas com 700 $\mu\text{L.L}^{-1}$ de CO_2 foi significativamente maior do que com 350 $\mu\text{L.L}^{-1}$. Isso demonstra que as colônias estabelecidas de oídio apresentaram maior desenvolvimento com 700 $\mu\text{L.L}^{-1}$ de CO_2 , o que coincide com o acúmulo de carboidratos nos tecidos da planta hospedeira. Os resultados indicam que os diferentes estádios de desenvolvimento das doenças devem ser estudados para a obtenção de conclusões sobre os efeitos das mudanças climáticas na ocorrência de doenças de plantas.

Devido à importância econômica para a Austrália da antracnose, causada por *Colletotrichum gloeosporioides* em *Stylosanthes scabra*, Chakraborty *et al.* (2000b) estudaram o efeito de 350 e 700 $\mu\text{L.L}^{-1}$ de

CO₂ em componentes epidemiológicos da doença em duas cultivares, uma parcialmente resistente e outra suscetível, em condições controladas e no campo. Em ambiente controlado, o aumento do teor de CO₂ promoveu maior crescimento de plantas, mas não foi suficiente para compensar a redução de crescimento resultante da ocorrência da antracnose na cultivar mais resistente. Já na suscetível, houve a compensação. Assim, os autores concluíram que os benefícios da fertilização com CO₂ no crescimento dependem da natureza da resistência da planta. Em ambiente controlado com elevado teor de CO₂ também foi observado atraso no crescimento do tubo germinativo e apressório, a porcentagem de germinação de conídios em folhas foi reduzida e o período de incubação foi estendido. Por esse motivo, a severidade da doença foi reduzida. Além disso, a penetração do patógeno se dá através dos estômatos, e o aumento de CO₂ reduz a densidade de estômatos nas folhas. Por outro lado, o período latente não sofreu alteração e a produção de esporos foi significativamente superior. No experimento realizado em campo, o aumento do teor de CO₂ resultou em aumento da severidade da doença, com maior número de lesões por folha. A variável ambiental que apresentou maior correlação com a dispersão e infecção de esporos de *C. gloeosporoides* no campo foi a umidade relativa na parte aérea da planta. Dessa forma, plantas crescidas em ambiente rico em CO₂ têm maior desenvolvimento, o que favorece a deposição de maior quantidade de conídios e cria um microclima conducente para o rápido desenvolvimento da doença. Os resultados evidenciaram que há diferenças significativas entre os ensaios conduzidos em ambientes controlados e no campo.

Na maior parte dos trabalhos é avaliado somente o efeito do aumento da concentração de CO₂, sem a interferência de outros gases que também estão sofrendo alterações. O aumento da concentração de O₃ foi estudado por Tiedemann & Firsching (2000), em combinação com o aumento

de CO_2 , em plantas de trigo infectadas ou não com ferrugem, causada por *Puccinia recondita* f. sp. *tritici*. O ensaio, conduzido em câmara de crescimento, simulou a poluição com O_3 na região do norte da Alemanha, com as concentrações de 21,5 - 22,8 nL.L^{-1} e 61,5 - 62,4 nL.L^{-1} de O_3 , enriquecido com 374,1 - 380,2 $\mu\text{L.L}^{-1}$ e 610,6 - 615,0 $\mu\text{L.L}^{-1}$ de CO_2 . A ferrugem foi inibida pelo O_3 , mas não pelo CO_2 . Nas plantas doentes, as lesões de O_3 surgiram duas a quatro semanas antes e foram quatro vezes mais severas do que nas plantas saudáveis. O aumento do CO_2 não retardou o surgimento das lesões de O_3 , mas reduziu a severidade dos danos nas folhas. Além disso, o CO_2 aumentou a taxa fotossintética, a eficiência de uso da água e a produção de biomassa e de grãos. Esse aumento de crescimento e produção, induzido pelo CO_2 , foi significativamente mais acentuado nas plantas estressadas pelo O_3 . Dessa forma, o aumento do CO_2 compensou os efeitos negativos do O_3 na taxa de fotossíntese, crescimento e produção de plantas, mas não compensou os efeitos prejudiciais da doença.

Um dos poucos trabalhos realizados com o objetivo de verificar os efeitos do aumento da concentração de CO_2 no controle de doenças, por meio do uso de variedades resistentes, foi desenvolvido por Paoletti & Lonardo (2001). Os autores verificaram que um clone de cipreste, *Cupressus sempervirens*, resistente ao cancro causado por *Seiridium cardinale*, não perdeu a resistência genética quando cultivado em ambiente com elevado teor de CO_2 . O teste foi realizado em ambiente naturalmente enriquecido com CO_2 , na região de Siena, Itália, com as concentrações de 360, 680 e 1670 $\mu\text{L.L}^{-1}$ de CO_2 . No início, seis meses após a inoculação, árvores crescidas em 680 $\mu\text{L.L}^{-1}$ de CO_2 apresentaram cancos significativamente maiores do que as crescidas em 360 $\mu\text{L.L}^{-1}$. Porém, após 16 meses, as diferenças desapareceram. Além disso, não se observaram diferenças no crescimento das árvores.

5.2. *Fitopatógenos veiculados pelo solo*

As mudanças climáticas podem alterar o equilíbrio químico, físico e biológico dos solos, resultando em alterações na fertilidade e na incidência de doenças. A elevação da temperatura pode aumentar a taxa de decomposição da matéria orgânica. Mas, o aumento da relação C:N das plantas pode também ter importantes reflexos contrários nesse processo. As expectativas, segundo Siqueira (2001), 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.

O solo é um *habitat* microbiano por excelência, onde há inúmeras comunidades de microrganismos e, como conseqüência, constitui o principal reservatório de diversidade desses organismos. A presença dos organismos 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). Dessa forma, as alterações climáticas certamente acarretarão alterações de tais comunidades.

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 (Fig. 8). 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, podem surtir efeito direto na microbiota da rizosfera, como estímulo ou inibição de microrganismos promotores de crescimento ou fitopatógenos. Pouco se conhece sobre os efeitos do aumento da concentração de CO₂ e as interações planta-raiz-rizosfera-microbiota-fitopatógenos.



Fig. 8 Microbiota da rizosfera de plantas de arroz (Foto: Itamar Soares de Melo).

Runion *et al.* (1994) verificaram, em um experimento do tipo FACE, aumento da incidência de "damping-off" causado por *Rhizoctonia solani* em algodoeiros cultivados com o aumento da concentração de CO_2 atmosférico. As comunidades microbianas da rizosfera e da filosfera de plantas de algodão foram avaliadas em ambiente com o dobro da concentração de CO_2 , porém, os resultados não foram conclusivos devido à pequena amostragem.

Jwa & Walling (2001) realizaram estudos sobre os efeitos do aumento da concentração de CO_2 no desenvolvimento da podridão de raízes, causada por *Phytophthora parasitica*, em tomateiros. O aumento do teor de CO_2 de $350 \mu\text{L.L}^{-1}$ para $700 \mu\text{L.L}^{-1}$ não afetou o crescimento micelial do patógeno *in vitro*. Porém, por meio do uso de anticorpos específicos para o patógeno e quantificação pelo método ELISA, verificou-se que a infecção de raízes foi menor em plantas cultivadas com $700 \mu\text{L.L}^{-1}$ de CO_2 . Tanto as plantas sadias

como as doentes apresentaram aumento do peso de matéria seca de 30%, em média, e aumento no diâmetro do caule. O potencial de pressão do xilema também aumentou, nas plantas doentes e sadias, em resposta ao enriquecimento com CO₂, provavelmente, devido ao declínio na taxa de transpiração resultante de alterações na abertura de estômatos. Como a podridão radicular causada por *Phytophthora parasitica* reduz o potencial da água das folhas pelo aumento na resistência à absorção de água pelas raízes, o resultado obtido significa uma possível compensação desse efeito pelo aumento do CO₂, aliviando o estresse hídrico causado pela doença. Tal compensação foi confirmada pela menor taxa de infecção e maior desenvolvimento de plantas doentes cultivadas em 700 µL.L⁻¹ de CO₂. O efeito foi mais acentuado nos estádios iniciais do processo de infecção, sendo que, após um dia, as plantas crescidas com 700 µL.L⁻¹ de CO₂ apresentavam 37,5% menos doença que as cultivadas em 350 µL.L⁻¹, mas, com oito dias, a diferença foi de apenas 7%. Como não houve efeito do CO₂ no crescimento micelial *in vitro* de *Phytophthora parasitica*, estudou-se a possibilidade de haver correlação entre a menor ocorrência da doença e alterações nos mecanismos de defesa da planta, com estudos genéticos para verificar respostas locais (nas raízes) e sistêmicas (nas folhas). Porém, não foram observadas diferenças na expressão dos genes estudados das plantas cultivadas em diferentes concentrações de CO₂. Os autores explicam que o aumento do crescimento vegetativo da planta com 700 µL.L⁻¹ de CO₂ pode ter compensado a perda de crescimento causada pela podridão radicular, mas outros estudos são necessários para a elucidação dos resultados obtidos.

Poucos trabalhos foram desenvolvidos com a finalidade de verificar o efeito do CO₂ no ar do solo na incidência de doenças. A ordem de grandeza dessa concentração é naturalmente muitas vezes superior à da atmosfera. Bueno & Souza (2002), com o objetivo de desenvolver uma sonda para avaliar gases *in situ* no solo, registraram valores de até 4% de CO₂ no solo sem tratamento a 10 cm de profundidade. As alterações dessas

características do ar do solo podem promover diversas mudanças nesse compartimento do agroecossistema, que podem resultar em aumento ou redução da supressividade a fitopatógenos veiculados pelo solo. Solos supressivos são definidos como aqueles nos quais o desenvolvimento da doença é suprimido mesmo quando o patógeno é introduzido na presença do hospedeiro suscetível (Baker & Cook, 1974). A supressividade pode ser resultante de fatores bióticos ou abióticos, sendo diversos e complexos os mecanismos envolvidos.

Em face desse problema, Osozawa *et al.* (1994) realizaram um estudo com o objetivo de avaliar os efeitos do CO₂ da fase gasosa em um solo supressivo e um conducente à hérnia das crucíferas, causada por *Plasmodiophora brassicae* em repolho, devido à importância que essa doença tem no Japão e às dificuldades para o seu controle. A hérnia das crucíferas é afetada por vários fatores ambientais, como umidade, temperatura, pH e tipo de solo, fotoperíodo, além da densidade de propágulos do patógeno no solo. Os autores verificaram que a concentração de CO₂ no ar do solo conducente era duas a quatro vezes maior que a do solo naturalmente supressivo, durante todo o ciclo de cultivo do repolho.

Em seguida, Osozawa *et al.* (1994) conduziram ensaios em vasos e verificaram que o aumento da concentração de CO₂, associado à alta umidade do solo, promovia maior incidência da doença no solo conducente. Em solos com baixa umidade não foi verificado esse resultado, possivelmente devido à menor mobilidade de propágulos do patógeno em solo seco. Tanto nos ensaios em campo quanto em vasos, o acúmulo de CO₂ resultou em redução do pH, sendo essa alteração na ordem de 0,5. Assim, os autores concluíram que o aumento da concentração de CO₂ no ar do solo resulta no aumento da condutividade a *Plasmodiophora brassicae*, devido à redução do pH, que é o responsável pela indução da germinação de esporos de resistência do patógeno e pode prejudicar a atividade das raízes das

crucíferas, predispondo a planta hospedeira à ocorrência da doença. Por outro lado, no solo supressivo, as alterações não foram significativas, haja vista que outros mecanismos físicos e químicos atuam para conferir a supressividade.

5.3. Vírus

Para estudar o efeito do aumento da concentração de CO₂ atmosférico em viroses de plantas, Malmström & Field (1997) escolheram o vírus causador do nanismo-amarelo da cevada ("barley yellow dwarf virus", BYDV), que é de ocorrência cosmopolita e transmitido por afídeos para mais de 150 espécies de plantas, incluindo a maioria dos cereais. Os testes foram realizados em vasos profundos (10, 16 cm de diâmetro e 30,5 cm de altura) para evitar restrições de espaço ao desenvolvimento das raízes, mantidos em câmara de crescimento, com luz natural e CO₂ na concentração ambiente, ou seja, 350 µL.L⁻¹ e o dobro. A inoculação do vírus foi feita permitindo-se que afídeos contaminados se alimentassem das plantas de aveia (*Avena sativa* cv. California Red), já que o patógeno não pode ser transmitido mecanicamente. Afídeos não contaminados foram usados como testemunha para verificar os efeitos dos vetores nas plantas. O enriquecimento com CO₂ estimulou o desenvolvimento de plantas infectadas com o vírus, amenizando o sintoma de nanismo. A resposta ao CO₂ avaliada pela produção de biomassa foi significativamente superior com as plantas doentes que com as sadias. Sessenta dias após o início dos tratamentos, as plantas sadias apresentaram aumento de 12% na biomassa total em relação às plantas desenvolvidas na menor concentração de CO₂, ao passo que para as plantas doentes esse aumento foi de 36%. Quanto à biomassa radicular, o aumento foi de 37 a 60% para as plantas doentes. Apesar disso, as plantas doentes ainda apresentaram uma senescência precoce de folhas. O estímulo de crescimento é provavelmente devido ao efeito direto do CO₂ na produção de

carboidratos, e indireto, devido à maior eficiência de uso da água pelas plantas, permitindo maior absorção e transporte de carbono.

Com os resultados obtidos, Malmström & Field (1997) analisaram as consequências epidemiológicas das alterações desencadeadas pelo enriquecimento da atmosfera com CO₂. A epidemiologia do vírus do nanismo-amarelo da cevada é dependente do reservatório de inóculo do patógeno, constituído por plantas infectadas, e da taxa com a qual o vetor adquire e transmite o vírus, já que os afídeos são os únicos vetores e não ocorre transmissão por meio das sementes. Os resultados conseguidos por estes autores demonstraram que o enriquecimento com CO₂ pode aumentar o reservatório do vírus no agroecossistema, aumentando o tamanho e a persistência das plantas infectadas. Esse efeito pode ser notado, por exemplo, devido ao aumento da biomassa de raízes e da eficiência de uso da água pelas plantas doentes, o que pode reduzir a perda de plantas infectadas com a seca, que é a principal causa de morte. Além disso, o enriquecimento com CO₂ pode permitir a competição entre plantas saudáveis e doentes, já que ocorreu redução nas diferenças dos tamanhos das plantas. Assim, apesar de não ser conhecida a resposta do vetor a essa mudança ambiente, a ocorrência da doença tende a aumentar, mas com redução da severidade.

5.4. *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.

Epichloë é um fungo endofítico freqüentemente encontrado nas raízes de gramíneas, sem causar sintomas visíveis. Em alguns casos, durante o ciclo sexual do microrganismo, pode haver o desenvolvimento de doença na planta hospedeira e, assim, os efeitos negativos podem predominar. Dessa forma, o ciclo sexual do fungo impõe um custo ecológico à planta, e a interação entre o endofítico e a gramínea pode ser caracterizada por mutualismo ou parasitismo, dependendo da reprodução sexual do fungo. Com a finalidade de verificar os efeitos da elevação do teor de CO₂ na expressão da doença causada por *Epichloë sylvatica* em *Brachypodium sylvaticum*, Meijer & Leuchtman (2000) utilizaram as instalações do FACE, em Eschikon (Suíça). O experimento constou de três blocos com duas parcelas de 18m de diâmetro, sendo uma tratada com CO₂ (60 Pa) e a outra não (35 Pa). As parcelas foram distanciadas por 100m para evitar alteração da atmosfera das parcelas testemunhas. Com relação ao crescimento, as plantas cultivadas em solo fertilizado responderam positivamente à elevação do CO₂, visto que nenhum nutriente encontrava-se em níveis limitantes, ao passo que as não fertilizadas apresentaram resposta contrária. Quanto ao desenvolvimento da doença, não foi observado efeito do CO₂. Segundo os autores, a associação poderia ser indiretamente afetada se ocorressem alterações com competidores ou outros parasitas. Entretanto, as conseqüências 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. *Epichloë bromicola* é um fungo endofítico que coloniza sistemicamente os espaços intracelulares da parte aérea dessas gramíneas, mas também pode ser fitopatogênico. Em um experimento fatorial, conduzido em estufa de topo aberto, foi estudada a combinação de níveis de

CO₂ (testemunha sem estufa, estufas com CO₂ ambiente, isto é, 360 µL.L⁻¹, e com 600 µL.L⁻¹) e três tipos de diversidade de plantas (alta diversidade conferida por 31 espécies; média, com 12 espécies, e baixa, com 5 espécies). 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 epichloe*, respectivamente. As duas gramíneas utilizadas nos testes foram escolhidas devido às diferenças em suas relações simbióticas com os endofíticos. O azevém infectado apresenta maior crescimento, resistência a insetos, e o microrganismo não causa danos ao florescimento da planta hospedeira. Sendo uma planta do tipo C3, apresenta resposta ao enriquecimento com CO₂, como observado por outros autores; também possui importância agrícola e requer elevados níveis de nutrientes para o desenvolvimento. Já *Balansia epichloe*, apesar de conferir maior sobrevivência, crescimento e resistência a herbívoros, reduz o florescimento de *Tridens flavus*. Como *Tridens flavus* é uma planta do tipo C4, de ocorrência em comunidades naturais em solos pobres, não responde ao aumento de CO₂ e de nutrientes. A alteração das relações dessas plantas com os respectivos endofíticos pode alterar as vantagens competitivas, assim como a persistência e a dominância dessas plantas nas comunidades. Em experimento conduzido em câmara de crescimento com ambiente controlado a 350 ± 15 µL.L⁻¹ e 650 ± 20 µL.L⁻¹ de CO₂, também foram estudados, além desses tratamentos, dois níveis de nutrientes regados diariamente nas plantas. Para o azevém, a

adição de nutrientes teve um maior efeito no desenvolvimento das plantas que o enriquecimento com CO_2 . Por exemplo, a área foliar aumentou 120% com o maior nível de nutrientes, ao passo que esse aumento foi de 35% com a maior concentração do gás. Além disso, a biomassa e a área foliar de plantas infectadas com o endofítico foram maiores com o aumento do CO_2 . Por outro lado, o crescimento do *Tridens flavus* não respondeu aos tratamentos, tanto com a adição de nutrientes quanto de CO_2 . Também não foram observadas diferenças entre as plantas infectadas ou não, para a maioria das variáveis avaliadas, exceto para área foliar, que foi maior nas plantas infectadas. 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 CO_2 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 CO_2 , 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 CO_2 nas interações entre gramíneas, microrganismos endofíticos e insetos herbívoros, por se tratar de um excelente 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 significativamente maior (32%) na concentração de CO_2 de

700 $\mu\text{L.L}^{-1}$, quando comparado com 400 $\mu\text{L.L}^{-1}$, 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 CO_2 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 CO_2 , resultando na mais baixa taxa de conversão. Isto significa que os insetos foram negativamente afetados pelo endofítico em presença de maior concentração de CO_2 , o que pode ser de grande importância na nova condição climática. Com aumento do CO_2 pode ter ocorrido diluição do alcalóide tóxico produzido pelo endofítico, mas isto pode ter sido compensado pelo maior consumo de folhas. Não se verificou alteração no teor de N das folhas.

5.5. *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 CO₂ pode causar estresse por deficiência de nutrientes minerais, 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 simbionte 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 simbionte, 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 CO₂ atmosférico em micorrizas foi muito pouco estudado.

Provavelmente, os fungos micorrízicos apresentam diferentes respostas à elevação da concentração de CO₂, 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 CO₂. 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 CO₂ 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*

strobis. 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 CO₂ e de ectomicorrizas no crescimento da planta. A elevação da concentração de CO₂ 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.

Norby *et al.* (1987) verificaram que plântulas de *Pinus echinata*, cultivadas em ambiente controlado com CO₂ na concentração de 695 µL.L⁻¹, não apresentaram diferenças na alocação de ¹⁴C marcado no sistema radicular. Entretanto, houve uma alteração no modelo de alocação nas raízes, com aumento significativo do carbono alocado nas radículas das plântulas tratadas com CO₂. O resultado foi associado ao aumento da massa dessas raízes e da quantidade de micorrizas. A exsudação de compostos solúveis contendo ¹⁴C marcado pelas raízes também foi maior quando aplicado o CO₂ por 34 semanas, mas os efeitos não persistiram até 41 semanas.

Quanto às micorrizas arbusculares, os resultados também têm sido variáveis (Staddon & Fitter, 1998). A elevação do CO₂ causou estímulo de micorrizas vesículo-arbusculares em *Bouteloua gracilis*, *Prunella vulgaris* e *Beilschmieda pendula*; e não foi observado efeito em *Pascopyrum smithii*, *Trifolium repens*, *Bromus madritensis*, *Gossypium hirsutum*, *Populus tremuloides* e várias gramíneas. Em solos pobres, observou-se um aumento da porcentagem de raízes de *Artemisia tridentata* colonizadas e, em solos ricos em nutrientes, um decréscimo. Assim, segundo os autores, a elevação do teor de CO₂ pode alterar o funcionamento das micorrizas e outros fatores do ambiente, como

fertilidade do solo, podem interferir nesse processo. Entretanto, os autores alertam para o fato de que a metodologia científica empregada nos estudos com micorrizas não consegue distinguir os efeitos indiretos causados pelo aumento do crescimento da planta, que podem ser os mais significativos. Assim, as comparações são realizadas, geralmente em uma única data, entre plantas de diferentes tamanhos e estádios de desenvolvimento. Mais estudos sobre as alterações nas comunidades e no funcionamento das micorrizas com a elevação do teor de CO₂ atmosférico são necessários, pois tais mudanças podem ser as responsáveis por alterações na estrutura das comunidades de plantas e, conseqüentemente, de outros grupos de organismos dos ecossistemas.

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.

Diversos estudos têm demonstrado o aumento da fixação simbiótica de nitrogênio com o enriquecimento da atmosfera com CO₂ (Idso & Idso, 2001). Finn & Brun (1982) verificaram aumento da atividade total de nódulos de *Bradyrhizobium japonicum* por planta de soja submetida a tratamento em atmosfera enriquecida com CO₂ (1020 ± 30 μL.L⁻¹), por 16 dias, em câmara de crescimento. Entretanto, a atividade específica, por grama de peso de matéria seca de nódulos, não foi alterada, indicando que o aumento da atividade total foi consequência do maior crescimento da planta nessas condições. Quando se realizou o tratamento por curto período de tempo (36 horas), não foram observadas diferenças entre as plantas quanto à atividade dos nódulos. Norby (1987) obteve resultados semelhantes com espécies arbóreas submetidas a 700 μL.L⁻¹, em solo pobre em nutrientes. Houve aumento significativo no peso de matéria seca de plantas de *Robinia pseudoacacia* (32%), *Alnus glutinosa* (49%) e *Elaeagnus angustifolia* (61%), acompanhado de aumento da atividade total de nódulos por planta. O maior desenvolvimento do sistema radicular permite o estabelecimento de um maior número de nódulos, porém, a atividade específica não foi alterada.

5.6. Outros microrganismos

Entre os microrganismos que compõem a microbiota da rizosfera e da filosfera (Fig. 9), estão diversos antagonistas de fitopatógenos. Assim, a avaliação dos efeitos das mudanças climáticas sobre esse grupo de microrganismos é de grande importância para o manejo das doenças. No primeiro trabalho realizado para estudar o efeito do aumento de CO₂ e da temperatura na microbiota da filosfera de cereais, Magan & Baxter (1996) alertam para os

cuidados no procedimento de coleta das folhas. O material coletado deve ser acondicionado em sacos de polietileno esterilizados e processado no laboratório até uma hora após a coleta. Houve significativa diferença entre os resultados obtidos *in vitro* e em campo. Em experimentos em câmara fechada, por exemplo, *Aureobasidium pullulans* estava ausente e, como se trata de conhecido antagonista de patógenos foliares, essa ausência pode influenciar o desenvolvimento de doenças. Em geral, o fungo predominante foi *Cladosporium* spp., leveduras brancas (*Rhodotorula* spp.) e rosas (*Sporobolomyces roseus*), e ocasionalmente, *Alternaria alternata* e *Aureobasidium pullulans*.

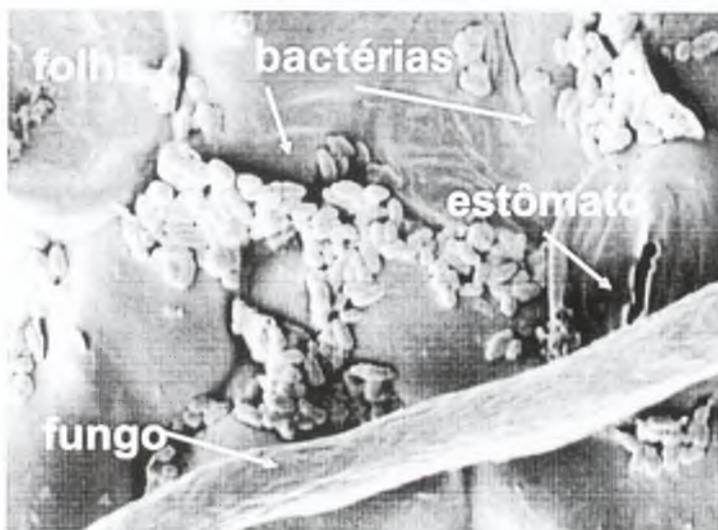


Fig. 9. Microbiota da filosfera de abobrinha (Foto: Raquel Ghini).

Para tentar solucionar os problemas encontrados por Magan & Baxter (1996), Runion *et al.* (1994) avaliaram microrganismos da filosfera e da rizosfera de algodoeiros cultivados em experimento do tipo FACE, com a liberação de CO₂ até a concentração de 550 µL.L⁻¹, em comparação com a atmosfera ambiente (370 µL.L⁻¹), no Arizona (Estados Unidos). As comunidades

de bactérias e actinomicetos da filosfera não sofreram alterações com o enriquecimento de CO_2 . Apesar dos algodoeiros apresentarem um maior número de folhas por planta e uma maior área foliar, o número desses microrganismos por mm^2 não foi afetado, indicando que a colonização do tecido foliar adicional não foi afetada. A comunidade de fungos da filosfera variou quanto aos gêneros encontrados nos dois tratamentos. O número de *Penicillium* spp. foi menor, o de *Aspergillus* não foi alterado, enquanto o de outros gêneros não classificados foi maior, com o enriquecimento com CO_2 . Para fungos da rizosfera não foram observadas diferenças, indicando que apresentaram a capacidade de colonizar os maiores sistemas radiculares das plantas tratadas com CO_2 , assim como ocorreu com a filosfera. Quanto à comunidade de nematóides saprófitas, houve interação significativa entre a concentração de CO_2 e a umidade do solo, sendo que as populações diferiram entre níveis de CO_2 somente em solo seco, com maiores números sob as condições de FACE. Provavelmente, a fonte adicional de biomassa e carbono orgânico das plantas tratadas com CO_2 favoreceu os nematóides saprófitas nos solos sem elevação da umidade. Nos solos irrigados, a umidade pode ter sido excessiva, fazendo com que o tratamento com CO_2 não apresentasse diferenças nessas comunidades. Associado ao aumento dos nematóides saprófitas, houve redução dos parasitas de plantas, possivelmente devido à competição por espaço ou outros fatores. O número de microartrópodos foi pequeno, entretanto, houve uma tendência de as populações de Collembola serem maiores nas parcelas com enriquecimento de CO_2 . A atividade microbiana total do solo foi maior com o aumento do CO_2 , em todas as coletas realizadas, assim como a ocorrência de *Rhizoctonia solani*. Os autores discutem que, devido à dinâmica das comunidades microbianas, somente dois períodos amostrais podem não ter sido suficientes para detectar as alterações provocadas pela mudança na composição da atmosfera. A variabilidade encontrada dentro das amostras foi alta, em muitos casos. Assim, o tamanho das amostras pode não ter sido suficiente para avaliar os efeitos dos tratamentos. Apesar dos

problemas observados, os autores concluíram que, com o aumento da concentração de CO₂, ocorrem mudanças quantitativas e qualitativas dos microrganismos associados às plantas, o que pode significar alterações na produtividade e nos aspectos fitossanitários.

6. Métodos de experimentação

A avaliação dos efeitos de gases sobre doenças de plantas é, de modo geral, realizada em ambientes controlados, nos quais a composição do gás atmosférico pode ser manipulada. As câmaras são fumigadas, com diferentes concentrações do gás, e as testemunhas são constituídas por câmaras com atmosfera não modificada.

As avaliações devem ser realizadas com métodos científicos que permitam que somente a variável em estudo seja alterada, enquanto as demais permanecem constantes. Esse tipo de experimento geralmente é dificultado pela inabilidade de se criar um ambiente livre de artefatos introduzidos pelas estruturas e equipamentos necessários para expor o patossistema-alvo ao gás a ser testado. Tais alterações indesejáveis incluem mudanças na velocidade do vento, umidade, temperatura, qualidade e intensidade da luz, além de características do solo. Por esse motivo, os estudos com gases estão deixando de ser conduzidos em câmaras ou estufas fechadas e controladas (Lewin *et al.*, 1992). Apesar disso, esses equipamentos constituem uma importante ferramenta para o estudo de interações específicas e para a comprovação de hipóteses sobre os possíveis efeitos verificados (Coakley & Scherm, 1996).

A busca de condições mais realísticas tem levado ao uso de estufas de topo aberto ("open-top chambers", OTC) ou a experimentos de campo (Lewin *et al.*, 1992). Em câmaras fechadas, diversos autores recomendam, por exemplo, a rotação dos vasos para evitar a interferência do local nos tratamentos (Malmström & Field, 1997). Apesar desses cuidados, somente os ensaios conduzidos em campo permitem a obtenção das respostas das plantas ao aumento da concentração de CO₂, devido às interações com outros fatores ambientes, como a temperatura e disponibilidade de nutrientes e água (Leadley & Drake, 1993).

As estufas de topo aberto são adequadas para estudos com aumento do teor de CO_2 devido à possibilidade de conduzir ensaios em todos os estádios de desenvolvimento de plantas, com menor interferência de artefatos, já que elas podem ser cultivadas diretamente no solo. Os testes em vasos devem ser evitados, pois podem prejudicar as avaliações devido à limitação do crescimento das raízes e à destruição da estrutura do solo. Além disso, a condução de experimentos em estufas de topo aberto permite a obtenção de respostas ao gás em condições naturais, que incluem as flutuações diárias e sazonais do clima. Diversos tipos de estufas de topo aberto estão descritas e constituem uma importante ferramenta para estudos sobre mudanças climáticas (Fig. 10) (Aidar *et al.*, 2002; Norby *et al.*, 1997; Stiling *et al.*, 1999).

Estufa de topo aberto

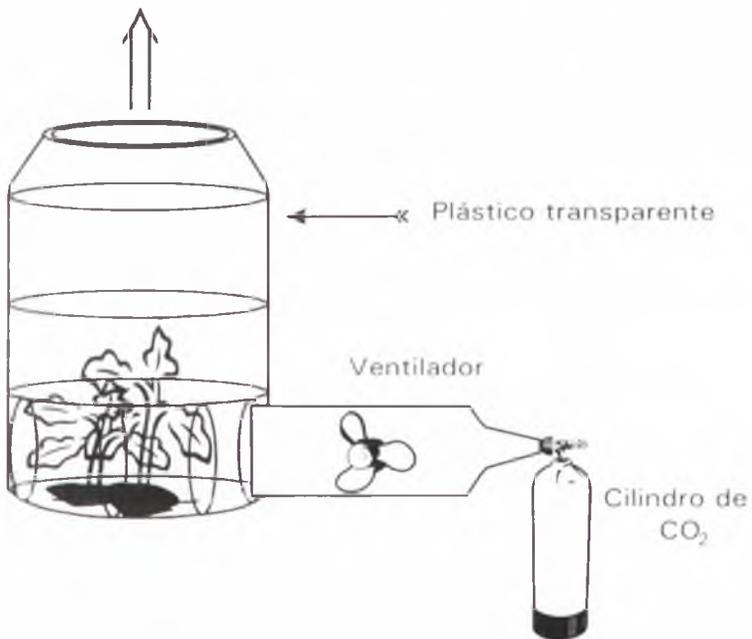


Fig. 10. Esquema simplificado de estufa de topo aberto, baseado em Aidar *et al.* (2002), Norby *et al.* (1997) e Leadley & Drake (1993).

A estufa de topo aberto mais comumente utilizada possui estrutura de alumínio, coberta com filme de PVC ("polyvinyl chloride") e equipada com um redutor de abertura do topo para deflexionar o ar e prevenir a diluição da concentração desejada de CO_2 dentro da câmara. As estufas diferem em relação ao tamanho, método de introdução e monitoramento do gás, além dos materiais usados na construção. O tamanho depende do patossistema a ser estudado. Para diferentes culturas, de modo geral, o diâmetro de 3m e a altura de 2,4m têm sido adequados (Leadley & Drake, 1993). As estufas podem ter uma entrada lateral ou a estrutura pode ser suspensa para a realização das avaliações. O monitoramento da concentração de CO_2 é feito com auxílio de um analisador infravermelho de gás (IRGA, "infrared gas analyzer"), que fornece as informações para controladores programáveis que regulam a abertura de válvulas para injeção de CO_2 na estufa. O CO_2 puro é injetado contra o ventilador para assegurar uma mistura adequada e atingir a concentração visada. Estufas semelhantes à descrita, sem injeção de CO_2 , são utilizadas para as comparações, fornecendo as condições de atmosfera atual. Além disso, áreas próximas, sem a estufa, são monitoradas quanto aos parâmetros climáticos para verificar os efeitos da estrutura da estufa (Stiling *et al.*, 1999).

Apesar de inúmeras vantagens, as estufas de topo aberto alteram o microclima no seu interior. O maior problema na confecção desse equipamento é reduzir, ao máximo, os efeitos no microambiente, mantendo o controle da concentração de CO_2 . O controle das variáveis físicas é complexo, e a manipulação de uma determinada variável freqüentemente entra em conflito com outra. Além disso, uma dificuldade adicional é a ocorrência de gradientes dos diversos fatores dentro da câmara (Leadley & Drake, 1993). Aumento na temperatura ambiente de até 3°C pode ocorrer dentro da estufa, devido à sua estrutura, mas não como consequência do enriquecimento com CO_2 . Uma maior ventilação pode amenizar o problema, mas possui um custo adicional de CO_2 . A cobertura plástica deve ser

trocada anualmente, devido ao amarelecimento do filme e às rachaduras. A escolha do filme plástico deve ser cuidadosa, para evitar a redução da radiação recebida no interior da estufa. De modo geral, a velocidade do vento é menor e mais constante no interior das estufas de topo aberto, e a umidade relativa é maior.

Apesar de todos os problemas apontados, o impacto da estufa no microambiente e no desenvolvimento da planta pode ser considerado pequeno. A estufa de topo aberto também permite que ocorram as variações horárias na concentração de CO₂, como ocorre na natureza, pois com o aumento da temperatura, isto é, nas horas mais quentes do dia, há uma redução natural da concentração (Fig. 11) (Cabral, 2001; Tiedemann & Firsching, 2000). As vantagens, como as relativamente fáceis construção, operação e manutenção, fazem com que as estufas de topo aberto tenham um uso freqüente em estudos com gases. Além disso, quando comparadas com estufas fechadas, apresentam menor custo unitário, menor gasto com energia e controles menos artificiais, especialmente de umidade e luminosidade. Estufas fechadas raramente podem ser usadas para estudos *in situ* e, quando podem, o custo por unidade e a complexidade de montagem limitam o número de repetições. A principal vantagem das estufas fechadas é o controle mais rigoroso da concentração do gás (Leadley & Drake, 1993).

Experimentos em campo têm sido conduzidos com a liberação de consideráveis quantidades de CO₂ em áreas relativamente extensas, permitindo o estudo das respostas de ecossistemas intactos. Nesses experimentos, denominados FACE, o aumento da concentração de CO₂ para, geralmente, o dobro da concentração ambiente é obtido com a sua contínua liberação no campo. As parcelas experimentais são grandes, com até 30m de diâmetro, e até 20m de altura (para florestas, por exemplo), o que reduz os efeitos de borda. A distância entre as parcelas, tratadas ou não, é grande, para evitar a interferência entre os tratamentos. Subparcelas podem ser distribuídas dentro das parcelas para as

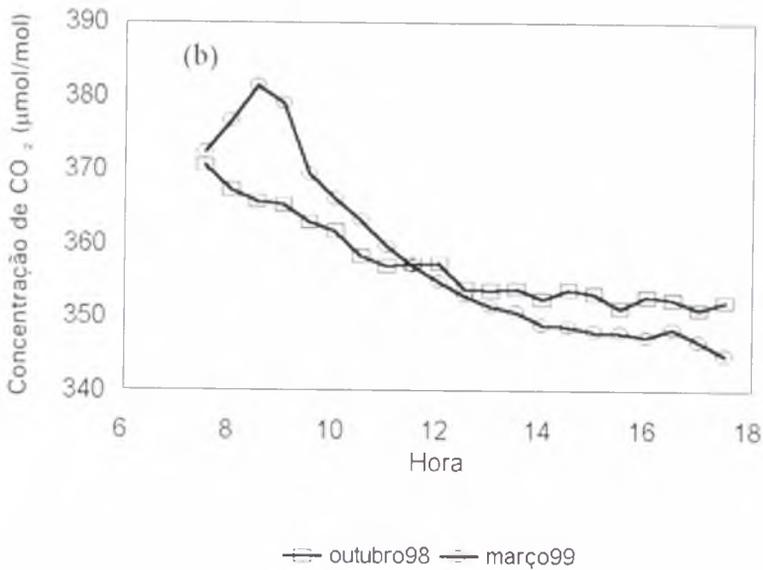


Fig. 11. Ciclos diurnos médios da concentração de CO₂ no ar sobre cultivo de cana-de-açúcar observado em outubro de 1998 e março de 1999 (Cabral, 2001, reprodução com autorização).

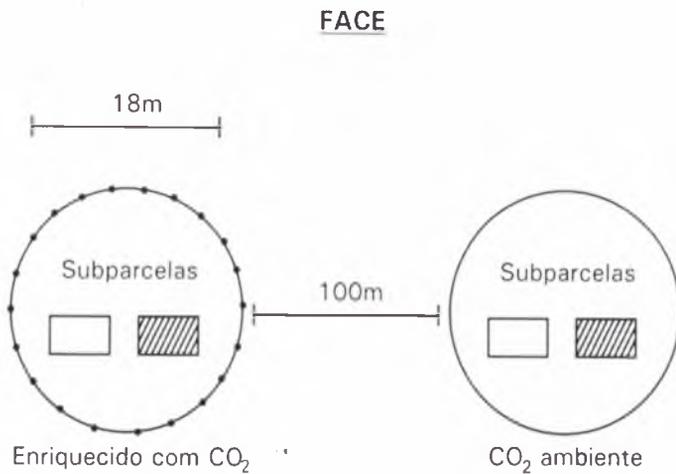


Fig. 12. Esquema de um bloco de experimento FACE ("Free Air Carbon Dioxide Enrichment"). Os pontos no círculo indicam locais de liberação de CO₂. Baseado em Meijer & Leuchtman (2000) e Lewin *et al.* (1992).

diversas avaliações (Fig. 12).

Há instalação de experimentos do tipo FACE em pelo menos 32 países, em diversas localidades do planeta (Loladze, 2002). O projeto FACE conduzido na Universidade do Arizona (Estados Unidos) procurou solucionar os problemas referentes à falta de representatividade dos resultados obtidos em câmaras ou estufas controladas (Lewin *et al.*, 1992; Senft, 1995). Após examinar os diferentes métodos usados para realizar experimentos de campo com gases, Lewin *et al.* (1992) concluíram que o arranjo cilíndrico de emissão de gás foi o mais adequado. Quatro áreas tratadas, com 22m de diâmetro, foram localizadas à distância de 100m das áreas-testemunha. O tanque de CO₂ líquido tinha capacidade para 48 ton. O controle da liberação do gás foi baseado na velocidade e direção do vento e na concentração de CO₂ no centro das parcelas, em intervalos de um segundo. Segundo Senft (1995), os dados obtidos demonstraram que as respostas ao CO₂ foram similares no ensaio FACE e em estufas de topo aberto. As culturas estudadas foram algodão e trigo. As populações microbianas apresentaram grande variação, mas a atividade total, avaliada pela edafo-respiração, foi aumentada. Houve aumento significativo da temperatura da parte aérea das plantas, o que pode ter contribuído para o seu maior desenvolvimento.

Na Suíça (Eschikon), um experimento FACE foi conduzido para verificar a resposta de diferentes espécies vegetais ao aumento da concentração de CO₂ (Lüscher *et al.*, 1998). O experimento foi iniciado com 894 plantas, correspondendo a 12 espécies, 9 a 14 genótipos e duas concentrações de CO₂, totalizando 298 tratamentos. Seis parcelas com formato circular (18m de diâmetro), sendo três tratadas e três não tratadas, foram localizadas a uma distância de 100m, para evitar contaminações. O grupo de leguminosas apresentou maior resposta na produção quando cultivado em ambiente enriquecido com o gás, seguido pelo grupo de

dicotiledôneas não leguminosas e gramíneas. Os autores explicam que a fixação simbiótica de N pode ser o fator responsável pelo resultado, já que um crescimento acelerado, promovido pela elevação do teor de CO₂, aumenta a demanda por nutrientes. Em solos férteis, como no caso do ensaio, os níveis de P e K são geralmente elevados e, assim, o N é considerado o principal nutriente limitante para o crescimento. Além disso, pode ocorrer imobilização de N no sistema solo-planta sob condições de elevado teor de CO₂, devido ao aumento da relação C:N nos exsudatos das raízes e na matéria orgânica, que são mecanismos que podem aumentar a limitação de N em não leguminosas.

A principal vantagem dos experimentos FACE é permitir estudar os efeitos do aumento da concentração de CO₂ em ecossistemas, sem alterar as condições do microclima. As parcelas de grande porte permitem uma intensiva e extensiva amostragem, tornando possível o estudo, por exemplo, da biodiversidade e dos processos reguladores dos ecossistemas. Apesar disso, áreas intocadas são reservadas para estudos de longo prazo. O caráter interdisciplinar do trabalho é outra vantagem, pois os resultados das diversas áreas do conhecimento podem ser correlacionados. Porém, esse tipo de experimento é extremamente caro e difícil de ser conduzido, o que limita a realização em diversas regiões.

Vários cuidados devem ser tomados na condução dos ensaios com efeito de gases sobre doenças de plantas. Malmström & Field (1997) tentaram avaliar em laboratório as trocas gasosas de folhas de aveia cultivadas em ambiente controlado com enriquecimento de CO₂. Porém, os estômatos das plantas contaminadas com o vírus do nanismo-amarelo da cevada foram particularmente sensíveis à mudança de ambiente, apresentando oscilações ou permanecendo fechados por horas, o que limitava as avaliações. A solução foi realizar a avaliação nas câmaras, sem remover as plantas, mas o técnico realizou o trabalho respirando em um

tubo que conduziu o CO₂ para fora da câmara. Além disso, para minimizar os problemas com o aquecimento, as folhas foram posicionadas na corrente de ventilação do ar condicionado e submetidas a breves períodos de avaliação.

Os tratos culturais, como irrigação e fertilização, são aspectos de extrema importância na condução dos testes, pois podem ter grande influência nos resultados obtidos. Como há efeito da irrigação, as plantas precisam ser cultivadas com a mesma tensão de água. A irrigação não pode ser monitorada pela quantidade total de água aplicada, pois, geralmente, as plantas se desenvolvem mais com o enriquecimento de CO₂ e, assim, apresentam maiores necessidades hídricas (Thompson *et al.*, 1993).

A “Lei do Mínimo”, de Justus von Liebig, que afirma que o recurso presente em menor quantidade determina o crescimento da planta, foi inicialmente aplicada a fertilizantes. Tal conceito foi rapidamente ampliado para outros recursos, incluindo-se luz e água (Norby *et al.*, 1986). Por esse motivo, diversos autores alertam para o fato de que, na condução de ensaios com enriquecimento com CO₂, o solo precisa ser fértil para não haver falta de nutrientes e limitar o efeito do CO₂ no crescimento das plantas. Entretanto, mais de um recurso pode limitar o crescimento da planta simultaneamente, ou o suprimento de um recurso pode aumentar o suprimento ou a deficiência de outro. Além disso, deve ser considerada a variação temporal e espacial das limitações dentro das necessidades das plantas.

Hibberd *et al.* (1996a,b) realizaram testes em culturas hidropônicas para verificar os efeitos do aumento da concentração de CO₂ no crescimento de plantas de cevada. Esse método foi escolhido com a finalidade de evitar a restrição de espaço para o crescimento de raízes, como ocorre em vasos, e a limitação de nutrientes disponíveis. Outras alternativas são o uso de vasos grandes, como sugerem Malmström & Field (1997), ou plantio no solo.

A análise estatística dos resultados é outro aspecto que deve

ser observado na condução dos estudos. A maioria dos trabalhos possui apenas dois ambientes, com e sem CO₂, sem repetições, o que impede a realização de testes convencionais. As concentrações de CO₂ testadas geralmente são 350 (sem tratamento) e 700 µL.L⁻¹. A limitação de espaço também reduz a possibilidade de cultivo de maior número de plantas dentro dos ambientes controlados. Outro aspecto a ser notado é a longa duração dos testes. Segundo Idso & Idso (1994), de modo geral, os experimentos para verificar os efeitos do enriquecimento com CO₂ no desenvolvimento de plantas apresentam duração média de dois meses e meio. Assim, as avaliações destrutivas devem ser evitadas. O longo tempo se deve à necessidade de se avaliarem os efeitos no ciclo completo da cultura, sendo considerado o peso de matéria seca de plantas.

7. Modelagem matemática

A modelagem pode servir como um instrumento para integrar os diferentes processos que podem ser influenciados pela elevação do teor de CO_2 atmosférico. Goudriaan & Zadoks (1995) usaram técnicas de modelagem para ilustrar os efeitos das mudanças climáticas na produção, no dano causado por pragas, doenças e plantas daninhas e na distribuição de culturas, pragas e doenças. Os autores discutem como os efeitos podem interagir, já que alguns deles apresentam resultados contrários. Por exemplo, freqüentemente, o aumento de CO_2 é acompanhado de queda na concentração de N nos tecidos da planta, o que pode afetar pragas e doenças de forma adversa. Cada patógeno requer um determinado teor de N nos tecidos do hospedeiro para causar doença. Insetos sugadores, como afídeos, utilizam o N e secretam açúcares da seiva. Com baixos teores de N, há mais excreção e, conseqüentemente, mais fumagina, que pode causar danos às plantas. Ao mesmo tempo, as plantas podem se tornar menos atraentes para os insetos. Assim, o mesmo efeito, isto é, o menor teor de N, pode significar resultados contrários quanto às pragas. Além disso, ainda é questionável se o efeito de fumigação com CO_2 será observado em locais onde outros fatores encontram-se em níveis limitantes.

Luo *et al.* (1995) realizaram um estudo de análise de risco de epidemias de brusone do arroz associadas com as mudanças climáticas globais em alguns países da Ásia, em virtude da importância da produção de arroz e das perdas ocasionadas pela doença, causada por *Magnaporthe grisea*. Nas simulações, os fatores climáticos considerados foram alterações de temperatura e radiação UV-B. Os resultados mostraram que mudanças na quantidade de chuvas não afetam a ocorrência de epidemias, por terem pouco efeito no período de molhamento de folhas. Nas zonas subtropicais frias, o aumento da temperatura causou aumento da severidade e da área abaixo da curva de progresso da doença. Isso se deve ao maior risco de epidemias em temperaturas

elevadas. Nas zonas tropicais úmidas e subtropicais quentes úmidas, como o sul da China, Filipinas e Tailândia, houve efeito contrário. Isto é, a redução da temperatura aumentou o risco de epidemias de brusone, pois as temperaturas atuais nessas regiões estão acima das favoráveis para a ocorrência da doença. Porém, nem sempre uma maior área abaixo da curva de progresso da doença resultou em menor produção de arroz, pois também há o efeito no desenvolvimento da planta. Os efeitos do aumento da radiação UV-B foram altamente significativos para a ocorrência de epidemias.

Segundo Luo *et al.* (1995), a confiabilidade de modelos de simulação depende da sua validação, da qualidade dos dados que os alimentam e da representatividade dos locais selecionados para fornecer dados climáticos. Embora o modelo tenha sido construído a partir de dados extraídos de experimentos, novos trabalhos em campo precisam ser realizados para aumentar a confiabilidade dos resultados. Porém, tais experimentos são de difícil realização, pois os equipamentos e a metodologia para a condução dos testes requerem amplos conhecimentos de diversas áreas. Os efeitos do UV-B foram considerados somente no número e tamanho de lesões e esporulação, enquanto outros componentes fundamentais para a ocorrência de epidemias, como o período latente e período de infecção, não foram considerados por falta de informações. Outras variáveis importantes, como tipo de variedade de arroz, que afetam o desenvolvimento da cultura e das doenças, precisariam ser incluídas no modelo. Da mesma forma, maior número de localidades deveria participar do estudo, mas em diversos países não há informações climáticas suficientes.

Modelos para previsões dos impactos das mudanças climáticas sobre doenças de plantas alimentados com dados médios, por exemplo, de temperatura, devem ser analisados com cautela, pois as interações patógeno-hospedeiro ocorrem em escala de tempo, em muitos casos, inferior a 24 horas. A germinação de conídios de muitos fungos e a infecção podem ocorrer em menos de 12 horas. Além disso, o crescimento e o desenvolvimento dos

patógenos podem não apresentar resposta linear ao fator climático estudado. As mudanças no clima podem estar mais associadas à frequência de ocorrência de eventos meteorológicos extremos, como ondas de frio, que surtem poucas alterações na média das variáveis estudadas em longos períodos de tempo. A baixa resolução temporal e espacial dos modelos de circulação global, nos quais as avaliações são baseadas, torna difícil ligar os cenários previstos com os modelos de respostas biológicas, como o crescimento de plantas ou doenças, que requerem informações diárias ou até mesmo horárias. Um dos grandes desafios é conciliar as exigências dos modelos de processos biológicos à disponibilidade dos modelos de circulação global, com abordagens de longo prazo (Scherm & van Bruggen, 1994).

Outro problema dos modelos é assumir como premissa o aumento constante de temperatura nos diferentes períodos. Por exemplo, o aumento de temperatura previsto para o período de verão poderá não ser o mesmo para o período de inverno, assim como para durante o dia e a noite. As condições de umidade também são de extrema importância para a ocorrência de doenças e nem sempre estão consideradas adequadamente. Diversos processos são influenciados pela umidade atmosférica, precipitação e período de molhamento foliar. Os modelos geralmente consideram alterações na precipitação em escalas globais, o que pode conduzir a equívocos nos resultados (Coakley & Scherm, 1996).

Os modelos de circulação global, geralmente, possuem resolução espacial na ordem de 2,5° de latitude (250 km) e 3,73° de longitude (350 km), ou até 0,5° (50 km), e os eventos locais requerem a ordem de 1 a 10 km. A resolução temporal também consiste em décadas de médias mensais nos modelos de circulação global, ao passo que na escala local é necessário operar com informações diárias ou horárias. Para tentar solucionar o problema, Seem *et al.* (2000) desenvolveram um método para definir hierarquicamente as condições atuais e previstas de clima ao nível da planta ("Hierarchical

Weather System”, HWS), utilizando saídas de modelos climáticos globais e modelos de mesoescala. O trabalho utilizou a videira, como modelo biológico, e o período de molhamento foliar, como principal variável, devido à sua importância para a previsão de inúmeras doenças. Essa variável sofre grande influência do microclima, especialmente, do tamanho e estrutura da parte aérea da planta, e de características das folhas, como tamanho e área foliar, capacidade de estocar água, molhabilidade e propriedades térmicas, além de fatores ambientes, como temperatura, umidade, velocidade do vento, radiação e precipitação. A medição pode ser feita por sensores eletrônicos ou por modelos matemáticos baseados na correlação entre período de molhamento foliar e outras variáveis mais facilmente avaliadas, as quais foram utilizadas no trabalho. Resultados de uma simulação foram semelhantes aos dados registrados numa plantação local, indicando a possibilidade de utilização do modelo em estudos de previsão dos efeitos de mudanças climáticas globais e doenças de plantas.

Apesar de inúmeras dificuldades, os modelos constituem uma importante ferramenta para o estudo de mudanças climáticas e doenças de plantas. O grande potencial dessa ferramenta reside na capacidade de simular os cenários das mudanças climáticas globais, os diferentes níveis de severidade de doenças e de determinar a produção resultante, o que permite o desenvolvimento de táticas de controle e estratégias, facilitando a tomada de decisões (Teng *et al.*, 1996). Maiores esforços devem ser dispensados nesse tipo de estudo, que pode resultar em significativa economia de tempo e recursos.

8. Necessidade de novas pesquisas

A manutenção da sustentabilidade dos sistemas agrícolas é diretamente dependente da proteção de plantas. Em poucos anos, as mudanças climáticas podem alterar o cenário atual de doenças de plantas e o seu manejo. Essas alterações certamente terão efeitos na produtividade. Dessa forma, é fundamental o estudo dos impactos em importantes doenças de plantas, com a finalidade de minimizar perdas de produção e de qualidade, auxiliando a escolha de estratégias para contornar os problemas (Chakraborty *et al.*, 2000a).

O controle de pragas, doenças e plantas invasoras na agricultura brasileira constitui um sério problema, responsável por perdas significativas, e que vem se agravando nos últimos anos. Um estudo da evolução do consumo de agrotóxicos no Brasil, segundo Campanhola & Bettiol (2003), mostrou que houve aumento de 16 mil toneladas em 1964 para 60,2 mil toneladas em 1991, enquanto a área ocupada com lavouras agrícolas expandiu-se de 28,4 para 50,0 milhões de ha, no mesmo período. Isso significa aumento de 276,2% no consumo de agrotóxicos para um aumento comparado de 76% em área. Apesar do aumento no emprego desses produtos, as perdas atribuídas a pragas e doenças não sofreram reduções drásticas, e os ganhos de produtividade foram relativamente restritos. Na década de 90, o consumo de agrotóxicos por unidade de área aumentou significativamente, apesar do surgimento de produtos mais eficientes e com menor quantidade de ingrediente ativo aplicado por área. Tal consumo atingiu 2,5 bilhões de dólares em 2000 (Campanhola & Bettiol, 2003), evidenciando a importância da proteção de plantas para o setor agrícola e a magnitude dos problemas que podem surgir com a alteração das relações que governam esse compartimento do agroecossistema.

As mudanças climáticas representam um desafio para a Fitopatologia sob diversos aspectos. Historicamente, a pesquisa de doenças de plantas tem focado o conhecimento específico de um determinado

patossistema para compreender, prever e manejar as doenças. As variáveis ambientais relacionadas ao microclima têm sido utilizadas nessa escala espacial. O novo enfoque faz com que haja uma alteração dessa forma de trabalho, já que os sistemas climáticos operam em escalas globais, que permitem tal nível de resolução. Além disso, as mudanças climáticas podem ter um efeito positivo, negativo ou neutro nas doenças, e a pesquisa precisa estar preparada para identificar novas oportunidades, assim como para minimizar os impactos negativos.

Outro aspecto importante é que as doenças constituem um dos componentes do agroecossistema que podem ser gerenciados. Há uma necessidade imediata de se determinarem os impactos das mudanças nas doenças economicamente importantes. As bactérias fitopatogênicas, por exemplo, são responsáveis por sérios prejuízos em diversas culturas, e não há na literatura nenhum trabalho avaliando os efeitos do aumento da concentração de CO₂ sobre as doenças causadas por esse grupo. As doenças secundárias também precisam ser estudadas, pois podem assumir maior importância. Mas, além disso, os especialistas em doenças de plantas precisam ir além de suas disciplinas e posicionar os impactos em doenças no contexto mais amplo, que envolve todo o sistema.

O zoneamento de doenças com uso de parâmetros climáticos permite avaliar a possível distribuição geográfica nos cenários climáticos previstos. Esse tipo de estudo pode ser particularmente apropriado para patógenos exóticos, pois possibilita a avaliação de sua distribuição geográfica em novas regiões e a intensidade da importância que o patógeno pode assumir (Coakley, 1995). Entretanto, a falta de informações disponíveis sobre os efeitos do ambiente na ocorrência de doenças dificulta o uso desse tipo de trabalho. Pouco se sabe a respeito dos fatores ambientais que governam comunidades de patógenos secundários, que podem passar a assumir significativa importância nos cenários futuros (Clifford *et al.*, 1996).

Coakley & Scherm (1996) listaram algumas das principais dificuldades encontradas nos estudos sobre efeitos de mudanças climáticas globais e doenças de plantas. Dentre elas, destacam-se: a contínua incerteza sobre a exata magnitude das alterações climáticas que ocorrerão nos próximos 25 a 50 anos; a possibilidade de ocorrerem complexas interações entre os componentes da mudança climática; a limitação do conhecimento sobre como essas mudanças em larga escala e a longo prazo afetarão os processos biológicos que ocorrem em escalas regionais ou locais, em curto espaço de tempo; e o problema da separação dos efeitos diretos (por exemplo, sobre o patógeno) dos efeitos indiretos (por exemplo, pelo efeito em agentes de controle biológico ou mudanças na fisiologia da planta hospedeira).

As doenças de plantas representam sérios impactos econômicos para o agronegócio, devido às perdas na produtividade e aos custos do manejo fitossanitário. Diante desses problemas, Chakraborty *et al.* (1998) realizaram um "workshop" para avaliar os efeitos das mudanças climáticas globais sobre doenças de plantas cultivadas na Austrália. A alteração prevista para o país é de aumento de temperatura entre 1 a 3°C no ano de 2100. O documento gerado apresenta uma avaliação sobre os possíveis efeitos dessa alteração climática nas doenças de trigo e outros cereais, da cana-de-açúcar, das espécies frutíferas, da uva, das hortaliças e espécies florestais. Os impactos gerados incluem alteração da distribuição geográfica e perdas ocasionadas pelas doenças. Prevê-se que a resistência genética de algumas cultivares seja perdida mais rapidamente devido à rápida e acelerada multiplicação e disseminação de determinados patógenos. O aumento da concentração de CO₂ atmosférico e da radiação UV-B favorece a multiplicação dos patógenos, criando condição para o desenvolvimento de sérias epidemias. Uma das principais metas alcançadas do "workshop" foi a conscientização dos fitopatologistas australianos sobre a importância do problema. As incertezas sobre as mudanças climáticas que efetivamente ocorrerão e a escassez de conhecimentos detalhados sobre

os efeitos do ambiente na ocorrência de doença foram alguns dos problemas encontrados, pois limitam a previsão dos impactos potenciais nas doenças de plantas.

Discussão semelhante foi realizada por Clifford *et al.* (1996), para as condições do Reino Unido. As principais mudanças climáticas previstas incluem o do aumento da temperatura média, aumento da concentração de CO₂, alteração da distribuição espacial e temporal de chuvas, mudanças na evapotranspiração no verão e aumento da incidência de eventos climáticos extremos. Para a discussão, foram considerados os efeitos da elevação da temperatura média em 2°C e do aumento ou redução de 10% da precipitação média anual. Segundo os autores, os efeitos das mudanças climáticas sobre as doenças de culturas, como espécies forrageiras, batata, beterraba açucareira, cereais, uva e outras espécies frutíferas, devem ser avaliados, para evitar perdas.

Pesquisas de avaliação dos efeitos de mudanças climáticas globais sobre doenças de plantas devem ser realizadas de forma interdisciplinar e, preferencialmente, em programas internacionais. A complexidade dos processos envolvidos e suas inter-relações tornam necessária a comunicação de profissionais das diversas áreas. Redes de comunicação via internet têm sido formadas com interessados no assunto e, como consequência, diversos benefícios diretos e indiretos têm sido alcançados (Scherm *et al.*, 2000). Assim, evita-se a duplicidade de esforços e facilitam-se a divulgação de informações e o estabelecimento de parcerias.

9. Literatura citada

AGRIOS, G.N. **Plant pathology**. 3.ed. New York: Academic Press, 1988. 803p.

AIDAR, M. P. M.; MARTINEZ, C. A.; COSTA, A. C.; COSTA, P. M. E.; DIETRICH, S. M. C.; BUCKERIDGE, M. S. Effect of atmospheric CO₂ enrichment on the establishment of seedlings of jatobá, *Hymenaea courbaril* L. (Leguminosae, Caesalpinioideae). **Biota Neotropica**, v. 2, n. 1, p. 1-10, 2002.

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.

BAKER, R.; COOK, J. **Biological control of plant pathogens**. San Francisco: W.H. Freeman, 1974. 433 p.

BELL, J. N. B.; McNEILL, S.; HOULDEN, G.; BROWN, V. C.; MANSFIELD, P. J. Atmospheric change: effect on plant pests and diseases. **Parasitology**, v. 106, p. S11-S24, 1993.

BENATO, E. A.; CIA, P.; SOUZA, N. L. de. Manejo de doenças de frutas pós-colheita. **Revisão Anual de Patologia de Plantas**, v. 9, p. 403-440, 2001.

BERGAMIN FILHO, A.; AMORIM, L. **Doenças de plantas tropicais: epidemiologia e controle econômico**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1996. 289 p.

BERGAMIN FILHO, A.; KIMATI, H.; AMORIM, L. **Manual de Fitopatologia: princípios e conceitos**, vol. 1, 3ª ed., 1995. 919 p.

BOAG, B.; CRAWFORD, J. W.; NEILSON, R. The effect of potential climatic changes on the geographical distribution of the plant-parasitic nematodes *Xiphinema* and *Longidorus* in Europe. **Nematologica**, v. 37, p. 312-323, 1991.

BRASIER, C. M. *Phytophthora cinnamomi* and oak decline in southern Europe. Environmental constraints including climate change. **Annales des Sciences Forestières**, v. 53, p. 347-358, 1996.

BRASIER, C. M.; SCOTT, J. K. European oak declines and global warming: a theoretical assessment with special reference to the activity of *Phytophthora cinnamomi*. **Bulletin OEPP/EPPO Bulletin**, v. 24, p. 221-232, 1994.

BUENO, C. J.; SOUZA, N. L. de. Sonda para gases de subsolo. **Summa Phytopathologica**, v. 28, p. 215-218, 2002.

CABRAL, O. M. R. **O sistema solo-vegetação-atmosfera: observação e modelagem da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo**. 2001. Tese (Doutoramento) - USP. São Paulo. 97 p.

CALFAPIETRA, C.; GIELEN, B.; GALEMA, A. N. J.; LUKAC, M.; DE ANGELIS, P.; MOSCATELLI, M. C.; CEULEMANS, R.; SCARASCIA-MUGNOZZA, G. Free-air CO₂ enrichment (FACE) enhances biomass production in short-rotation poplar plantation. **Tree Physiology**, v.23, n. 12, p.805-814, 2003.

CAMPANHOLA, C.; BETTIOL, W. **Métodos alternativos de controle fitossanitário**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2003. 279p.

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.

CARTER, T. R.; SAARIKKO, R. A.; NIEMI, K. J. Assessing the risks and uncertainties of regional crop potential under a changing climate in Finland. **Agricultural and Food Science in Finland**, v. 5, n. 3, p. 329-350, 1996.

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.; MURRAY, G. M.; MAGAREY, P. A.; YONOW, T.; O'BRIEN, R. G.; CROFT, B. J.; BARBETTI, M. J.; SIVASITHAMPARAM, K.; OLD, K. M.; DUDZINSKI, M. J.; SUTHERST, R. W.; PENROSE, L. J.; ARCHER, C.; EMMETT, R. W. Potential impact of climate change on plant diseases of economic significance to Australia. **Australasian Plant Pathology**, v. 27, p. 15-35, 1998.

CHAKRABORTY, S.; TIEDEMANN, A. V.; TENG, P. S. Climate change: potential impact on plant diseases. **Environmental Pollution**, v. 108, p. 317-326, 2000a.

CHAKRABORTY, S.; PANGGA, I. B.; LUPTON, J.; HART, L.; ROOM, P. M.; YATES, D. Production and dispersal of *Colletotrichum gloeosporioides* spores on *Stylosanthes scabra* under elevated CO₂. **Environmental Pollution**, v. 108, p. 381-387, 2000b.

CLIFFORD, B. C.; DAVIES, A.; GRIFFITH, G. UK climate change models to predict crop disease and pest threats. **Aspects of Applied Biology**, v. 45, p. 269-276, 1996.

COAKLEY, S. M. Biospheric change: will it matter in plant pathology? **Canadian Journal of Plant Pathology**, v. 17, p. 147-153, 1995.

COAKLEY, S. M.; SCHERM, H. Plant disease in a changing global environment. **Aspects of Applied Biology**, v. 45, p. 227-238, 1996.

COLHOUN, J. Effects of environmental factor on plant disease. **Annual Review of Phytopathology**, v. 11, p. 343-364, 1973.

COLPAERT, J. V.; VAN TICHELEN, K. K. Mycorrhizas and environmental stress. In: ERANKLAND, J.C.; MAGAN, N.; GADD, G.M. (Ed.). **Fungi and environmental change**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. p. 109-128.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **The potential effects of global climate change on the United States**. Washington: EPA, 1989. Chapter 6. Agriculture (EPA-230-05-89-050), p. 93-121.

EPSTEIN, E. **Nutrição mineral das plantas**: princípios e perspectivas. São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 1975. 341 p.

FINN, G. A.; BRUN, W. A. Effect of atmospheric CO₂ enrichment on growth, nonstructural carbohydrate content, and root nodule activity in soybean. **Plant Physiology**, v. 69, n. 2, p. 327-331, 1982.

FRANCL, L. J. The disease triangle: a plant pathological paradigm revisited. Disponível: <http://www.apsnet.org/education/InstructorCommunication/TeachingArticles.../Top.htm>. 2001. Acesso em: 05 fev. 2003.

FURLAN, R. A.; REZENDE, F. C.; ALVES, D. R. B.; FOLEGATTI, M. V. Lâmina de irrigação e aplicação de CO₂ na produção de pimentão cv. Mayata, em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, v. 20, n. 4, p. 547-550, 2002.

GALLI, F. **Manual de Fitopatologia**: princípios e conceitos. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, vol. 1, 2ª ed., 1980. 373 p.

GÓMEZ, G.; PADRÓN, J.; MEULENERT, A. Influencia del evento meteorológico el niño-oscilación sur sobre Epifitotias del Tizón Tardío de la papa y el Moho Azul del Tabaco em Cuba. **Fitosanidad**, v. 3, n. 3, p. 21-26, 1999.

GOUDRIAAN, J.; ZADOKS, J. C. Global climate change: modelling the potential responses of agro-ecosystems with special reference to crop protection. **Environmental Pollution**, v. 87, n. 2, p. 215-224, 1995.

GROPPE, K.; STEINGER, T.; SANDERS, I.; 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.

HIBBERD, J. M.; WHITBREAD, R.; FARRAR, J. F. Effect of 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ CO_2 and infection with powdery mildew on the growth and carbon partitioning of barley. **New Phytologist**, v. 134, p. 309-315, 1996a.

HIBBERD, J. M.; WHITBREAD, R.; FARRAR, J. F. Effect of elevated concentrations of CO_2 on infection of barley by *Erysiphe graminis*. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v. 48, n. 1, p. 37-53, 1996b.

IDSO, K. E.; IDSO, S. B. Plant responses to atmospheric CO_2 enrichment in the face of environmental constraints: a review of the past 10 years' research. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 69, n. 3-4, p. 153-203, 1994.

IDSO, S. B.; IDSO, K. E. Effects of atmospheric CO_2 enrichment on plant constituents related to animal and human health. **Environmental and Experimental Botany**, v. 45, p. 179-199, 2001.

JONES, M. H.; CURTIS, P. S. Bibliography on CO₂ effects on vegetation and ecosystems: 1990-1999 literature. ORNL/CDIAC-129. Disponível: <http://cdiac.esd.ornl.gov/epubs/cdiac/cdiac129/cdiac129.html>. 2000. Acesso em: 04 abr. 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.

KRUPA, S.; McGRATH, M. T.; ANDERSEN, C. P.; BOOKER, F. L.; BURKEY, K. O.; CHAPPELKA, A. H.; I., C. B.; PELL, E. J.; ZILINSKAS, B. A. Ambient ozone and plant health. **Plant Disease**, v. 85, n. 1, p. 4-12, 2001.

LaDEAU, L.; CLARK, J. S. Rising CO₂ levels and the fecundity of forest trees. **Science**, v.292, p.95-98, 2001.

LANDA, B. B.; NAVAS-CORTÉS, J. A.; HERVÁS, A.; JIMÉNEZ-DÍAZ, R. M. Influence of temperature and inoculum density of *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* on suppression of Fusarium wilt of chickpea by rhizosphere bacteria. **Phytopathology**, v. 91, n. 8, p. 807-816, 2001.

LEADLEY, P. W.; DRAKE, B. G. Open top chambers for exposing plant canopies to elevated CO₂ concentration and for measuring net gas exchange. **Vegetatio**, v. 104/105, p. 3-15, 1993.

LEWIN, K. F.; HENDREY, G. R.; KOLBER, Z. Brookhaven National Laboratory Free-air carbon dioxide enrichment facility. **Critical Reviews in Plant Science**, v. 11, n. 2-3, p. 135-141, 1992.

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.

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. 397 p.

LOLADZE, L. Rising atmospheric CO₂ and human nutrition: toward globally imbalanced plant stoichiometry? **Trends in Ecology & Evolution**, v. 17, n. 10, p. 457-461, 2002.

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, 1994. p. 1-19.

LUO, Y.; TEBEEST, D. O.; TENG, P. S.; FABELLAR, N. G. Simulation studies on risk analysis of rice leaf blast epidemics associated with global climate change in several Asian countries. **Journal of Biogeography**, v. 22, p. 673-678, 1995.

LÜSCHER, A.; HENDREY, G. R.; NÖSBERGER, J. Long-term responsiveness to free air CO₂ enrichment of functional types, species and genotypes of plants from fertile permanent grassland. **Oecologia**, v. 113, p. 37-45, 1998.

MAGAN, N.; BAXTER, E. S. Effect of increased CO₂ concentration and temperature on the phyllosphere mycoflora of winter wheat flag leaves during ripening. **Annals of Applied Biology**, v. 129, p. 189-195, 1996.

MAKINO, A. Rubisco and nitrogen relationships in rice: leaf photosynthesis and plant growth. **Soil Sci. Plant Nutr.**, v.49, n.3, p.319-327, 2003.

MALMSTRÖM, C. M.; FIELD, C. B. Virus-induced differences in the response of oat plants to elevated carbon dioxide. **Plant, Cell and Environment**, v. 20, n. 2, p. 178-188, 1997.

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.

MARENGO, J.A. Mudanças climáticas globais e regionais: avaliação do clima atual do Brasil e projeções de cenários climáticos do futuro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 16, p. 1-18, 2001.

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.

MARTINS, R. A.; RODRIGUES, G. S. Efeitos potenciais do ozônio troposférico sobre as plantas e o biomonitoramento ambiental. 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. 143-165.

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.

MITCHELL, C.E.; REICH, P.B.; TILMAN, D.; GROTH, J.V. Effects of elevated CO₂, nitrogen deposition, and decreased species diversity on foliar fungal plant disease. **Global Change Biology**, v. 9, p.438-451, 2003.

NORBY, R. J. Nodulation and nitrogenase in nitrogen-fixing woody plants stimulated by CO₂ enrichment of the atmosphere. **Physiologia Plantarum**, v. 71, n. 1, p. 77-82, 1987.

NORBY, R. J.; O'NEILL, E. G.; LUXMOORE, R. J. Effects of atmospheric CO₂ enrichment on the growth and mineral nutrition of *Quercus alba* seedlings in nutrient-poor soil. **Plant Physiology**, v. 82, n. 1, p. 83-89, 1986.

NORBY, R. J.; O'NEILL, E. G.; HOOD, W. G.; LUXMOORE, R. J. Carbon allocation, root exudation and mycorrhizal colonization of *Pinus echinata* seedlings grown under CO₂ enrichment. **Tree Physiology**, v. 3, p. 203-210, 1987.

NORBY, R. J.; EDWARDS, N. T.; RIGGS, J. S.; ABNER, C. H.; WULLSCHLEGER, S. D.; GUNDERSON, C. A. Temperature-controlled open-top chambers for global change research. **Global Change Biology**, v. 3, p. 259-267, 1997.

ORTH, A. B.; TERAMURA, A. H.; SISLER, H. D. Effects of ultraviolet-B radiation on fungal disease development in *Cucumis sativus*. **American Journal of Botany**, v.77, n.9, p.1188-1192, 1990.

OSOZAWA, S.; IWAMA, H.; KUBOTA, T. Effect of soil aeration on the occurrence of clubroot disease of crucifers. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 40, n. 3, p. 445-455, 1994.

PAOLETTI, E.; LONARDO, V. di. Seiridium cardinale cankers in a tolerant *Cupressus sempervirens* clone under naturally CO₂-enriched conditions. **Forest Pathology**, v. 31, n. 5, p. 307-311, 2001.

PASCHOLATI, S.F.; LEITE, B. Hospedeiro: mecanismos de resistência. In: BERGAMIN FILHO, A.; KIMATI, H.; AMORIM, L. (Ed.) **Manual de Fitopatologia: princípios e conceitos**, vol. 1, 3ª ed., 1995. p. 417-453.

PATTERSON, D. T.; WESTBROOK, J. K.; JOYCE, R. J. V.; LINGREN, P. D.; ROGASIK, J. Weeds, insects, and diseases. **Climatic Change**, v. 43, n. 4, p. 711-727, 1999.

PAUL, N. D. Stratospheric ozone depletion, UV-B radiation and crop disease. **Environmental Pollution**, v. 108, p. 343-355, 2000.

RUNION, G. B.; CURL, E. A.; ROGERS, H. H.; BACKMAN, P. A.; RODRÍGUEZ-KÁBANA, R.; HELMS, B. E. Effects of free-air CO₂ enrichment on microbial populations in the rhizosphere and phyllosphere of cotton. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 70, n. 1-4, p. 117-130, 1994.

SANDERMANN JR, H. Ozone and plant health. **Annual Review of Phytopathology**, v. 34, p. 347-366, 1996.

SANDERS, G. E.; COLL, J. J.; CLARK, A. G.; GALAUP, S.; BONTE, J.; CANTUEL, J. *Phaseolus vulgaris* and ozone: results from open-top chamber experiment in France and England. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 38, p. 31-40, 1992.

SCHERM, H.; SUTHERST, R. W.; HARRINGTON, R.; INGRAM, J. S. I. Global networking for assessment of impacts of global change on plant pests. **Environmental Pollution**, v. 108, p. 333-341, 2000.

SCHERM, H.; van BRUGGEN, A. H. C. Global warming and nonlinear growth: how important are changes in average temperature? **Phytopathology**, v. 84, n. 12, p. 1380-1384, 1994.

SCHERM, H.; YANG, X. B. Interannual variations in wheat rust development in China and the United States in relation to the El Niño/southern oscillation. **Phytopathology**, v. 85, n. 9, p. 970-976, 1995.

SCHOENEWEISS, D. F. Predisposition, stress, and plant disease. **Annual Review of Phytopathology**, v. 11, p. 193-211, 1975.

SEEM, R. C.; MAGAREY, R. D.; ZACK, J. W.; RUSSO, J. M. Estimating disease risk at the whole plant level with General Circulation Models. **Environmental Pollution**, v. 108, p. 389-395, 2000.

SENF, D. FACE-ing the future: it's the largest experiment ever to measure CO₂ effect. **Agricultural Research**, v. 43, n. 4, p. 4-6, 1995.

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.

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.

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.

STILING, P.; ROSSI, A. M.; HUNGATE, B.; DIJKSTRA, P.; HINKLE, C. R.; KNOTT III, W. M.; DRAKE, B. Decreased leaf-miner abundance in elevated CO₂: reduced leaf quality and increased parasitoid attack. **Ecological Applications**, v. 9, n. 1, p. 240-244, 1999.

SUTHERST, R.W.; INGRAM, J.S.I.; SCHERM, H. Global change and vector-borne diseases. **Parasitology Today**, v. 14, p. 297-299, 1998.

TENG, P. S.; HEONG, K. L.; KROPFF, M. J.; NUTTER, F. W.; SUTHERST, R. W. Linked pest-crop models under global change. In: WALKER, B.; WILL, S. (Ed.). **Global change and terrestrial ecosystems**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. p. 291-316.

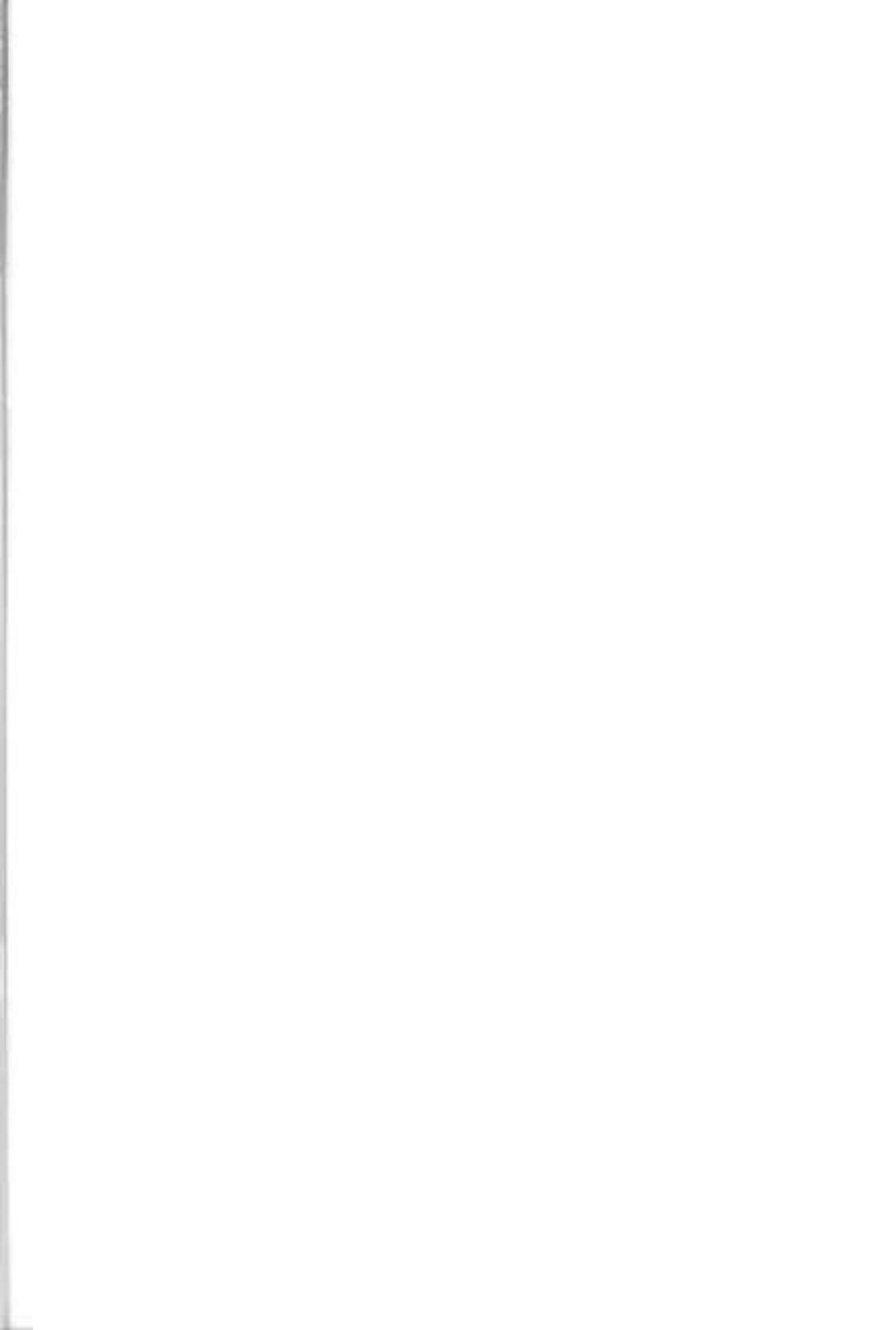
THOMPSON, G. B.; BROWN, J. K. M.; WOODWARD, F. I. The effects of host carbon dioxide, nitrogen and water supply on the infection of wheat by powdery mildew and aphids. **Plant, Cell and Environment**, v. 16, p. 687-694, 1993.

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.

TIEDEMANN, A. V.; FIRSCHING, K. H. Interactive effects of elevated ozone and carbon dioxide on growth and yield of leaf rust-infected versus non-infected wheat. **Environmental Pollution**, v. 108, p. 357-363, 2000.

TRESMONDI, A. C. C. de L. Qualidade do ar na área de influência do pólo industrial de Paulínia, SP: 2000-2002. 325p. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Faculdade de Engenharia Química, Unicamp, Campinas, 2003.

ZISKA, L. H. The impact of nitrogen supply on the potential response of a noxious, invasive weed, Canada thistle (*Cirsium arvense*) to recent increases in atmospheric carbon dioxide. **Physiologia Plantarum**, v. 119, n.1, 105-112, 2003.



As mudanças climáticas globais e suas conseqüências para o ambiente e para o homem constituem, atualmente, um dos temas mais polêmicos e de maior penetração no meio acadêmico. As alterações ocasionadas têm amplas proporções, afinal suas conseqüências são de escala mundial, tanto no campo econômico e agrícola, como no tecnológico e científico. Além de atual e preciso, o livro *Mudanças climáticas globais e doenças de plantas* torna-se multidisciplinar à medida que aborda clara e objetivamente esse rico e polêmico tema, desde as mais evidentes premissas às menos previsíveis conclusões, descrevendo suas relações com diversas áreas do conhecimento. Tal integração faz este ser leitura indispensável para especialistas, uma vez que desfruta de primorosa bibliografia e elucida muitas dúvidas acerca desse ainda pouco explorado assunto, certamente merecedor de maiores e mais profundos e detalhados estudos, como demonstra a autora.



Ministério da Agricultura,
Pecuária e Abastecimento

