

A fitopatologia nos cenários de aquecimento global

Carlos Alberto Lopes

Introdução

A íntima associação do clima com doenças de plantas provavelmente tenha sido observada desde os primórdios da agricultura. Seu primeiro registro, entretanto, parece ser o de Teofrasto, quando relatou, há mais de dois mil anos, que lavouras de cereais cultivadas em localidades altas e ventiladas eram menos afetadas por doenças do que aquelas cultivadas em terras baixas (AGRIOS, 1997). Foi na metade do século 20, no entanto, que o fator clima passou a ser mais explorado em estudos de epidemias, explicitada por Gäumann (1950) na definição de doenças de plantas e ao ocupar um dos vértices do “triângulo da doença” (patógeno, hospedeiro, ambiente) na representação de Stevens (1960), que é a base da disciplina de fitopatologia. O fator “ambiente” ganha novo destaque com o assunto “mudanças climáticas”, exaustivamente comentado na mídia e em debates políticos nos últimos anos.

O aumento da temperatura no planeta, embora ainda saudavelmente questionado por alguns (a ciência evolui a partir de questionamentos), é cada vez mais aceito pela sociedade diante da robustez de observações contextualizadas em diversos artigos científicos coordenados por equipes de respeito internacional. O modismo do tema, entretanto, é ambiente fértil para a proliferação de matérias opinativas, desprovidas de rigor científico, portanto de pouca valia

para a orientação de pesquisas e de políticas públicas, conforme alertado por Amorim et al. (2011).

Se no final do século passado, mesmo com escassez de dados científicos, os fitopatologistas da época já afirmavam que mudanças climáticas poderiam exercer forte influência na sanidade de plantas (MANNING; TIEDEMANN, 1995), novas e confiáveis evidências baseadas em dados científicos em sistemas agrícolas e florestais fortalecem a hipótese de que os ecossistemas prevalentes no futuro sofrerão maiores pressões por doenças (CHAKRABORTY et al., 2011a, 2011b; GHINI et al., 2007, 2008a, 2008b, 2011a, 2011b; WOODS, 2011). No entanto, a resposta não é linear: para alguns patossistemas, o incremento da temperatura poderá aumentar, não influenciar ou até mesmo reduzir os riscos de epidemias e/ou danos causados por elas (Figura 1), com seu efeito atuando diretamente no patógeno, no hospedeiro e nas interações entre eles (Figura 2).

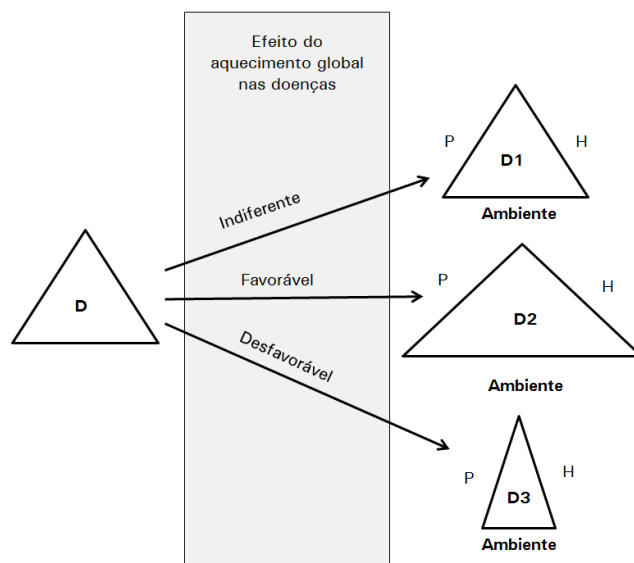


Figura 1. Em relação à intensidade de doenças de plantas na atualidade (D), o aquecimento global terá efeito neutro ($D1=D$), favorável ($D2>D$) ou desfavorável ($D3<D$) no futuro ao afetar o componente "ambiente" do triângulo. D=Doença; P= Patógeno; H= Hospedeiro.

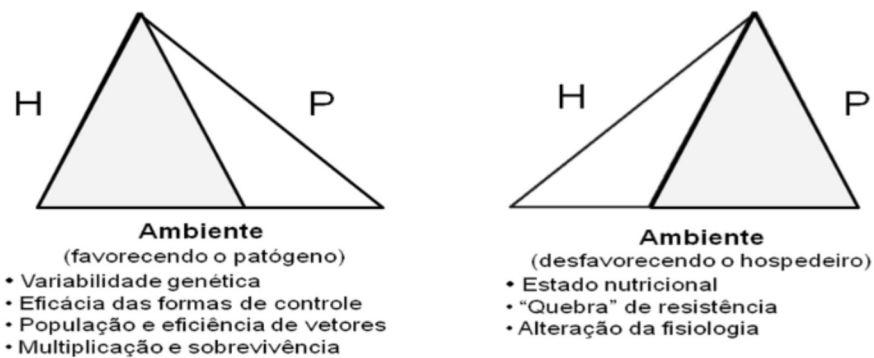


Figura 2. O aquecimento global modifica o ambiente que, por sua vez, afeta tanto o patógeno (P) como o hospedeiro (H), no exemplo representando um aumento na intensidade da doença de D para D+D'. D=Doença; P= Patógeno; H= Hospedeiro.

Incertezas à parte, uma previsão segura é a de que “as mudanças climáticas aumentarão a taxa de aparecimento de surpresas desagradáveis” (SHAW, 2009). Pode-se especular que a sigatoka negra, a ferrugem da soja, o amarelinho dos citros e as begomoviruses transmitidas pela mosca branca, só para citar algumas relativamente recentes no Brasil, ganharam proporções preocupantes em função de um clima excepcionalmente favorável a elas. E os impactos da ocorrência de doenças, de modo geral, são percebidos em três áreas ligadas à segurança alimentar: perdas diretas, eficácia das estratégias de controle e distribuição geográfica de patógenos e vetores (CHAKRABORTY et al., 2000).

A literatura sobre o efeito das mudanças climáticas no desenvolvimento de doenças de plantas, bastante escassa antes da década de 1990, é hoje vasta e em crescimento acelerado. E, face aos recentes, abrangentes e bem elaborados livros dedicados às mudanças climáticas impactando as doenças, inclusive no Brasil (GHINI et al., 2011b; GHINI; HAMADA, 2008; GUEDES, 2009), o objetivo deste capítulo não é de ser mais uma revisão sobre o tema em patossistemas específicos, e sim de comen-

tar informações sobre assuntos relacionados à epidemiologia e controle de doenças de plantas diante da eventual perspectiva do aquecimento global.

O desenvolvimento do tema é organizado, para fins didáticos, nos conceitos da epidemiologia, definida como “qualquer mudança na intensidade da doença, numa população de hospedeiros, no tempo e no espaço” (AMORIM et al., 2011). Dessa maneira, os fatores “patógeno” e “hospedeiro” são influenciados pelo componente “ambiente”, conforme ilustrado na figura do triângulo da doença, amplamente conhecido nas ciências agrárias (Figura 1).

Ao discutirem os intrincados efeitos das mudanças climáticas e as mudanças globais em relação à sanidade das plantas, Savary et al. (2011) dividiram as doenças de plantas em três categorias: 1. doença crônica, que é aquela que ocorre de forma constante em grandes áreas, afetando o comportamento do sistema, inclusive comprometendo a produtividade; 2. doença aguda, que ocorre de maneira irregular, no tempo e no espaço, e que, quando ocorre, afeta sensivelmente o comportamento do sistema; e 3. doença emergente, que é aquela em que os limites estão em expansão para novas áreas.

Exemplificando esta última, verifica-se com certa frequência o relato de novas epidemias, como as causadas pelos begomovírus em tomateiro em consequência do aumento da população de mosca-branca, inseto de pouca expressão até poucas décadas atrás, cuja população é altamente regulada pelo clima. Com isso, as begomoviroses transmitidas pela mosca-branca passaram de doença emergente e assumiram o status de doença crônica. Este fenômeno tem sido atribuído por especialistas à expansão de áreas de soja e algodão - ótimas hospedeiras da mosca-branca - à rápida adaptação do inseto ao tomateiro e ao efeito seletivo dos inseticidas e inimigos naturais (INOUE-NAGATA, 2012; MICHEREFF FILHO et al., 2012).

As mudanças climáticas se manifestam de diferentes maneiras, com especial destaque para o aquecimento global. Embora esses termos sejam muitas vezes usados simplificarmente para representar os mesmos fenômenos, são considerados no fator “ambiente” os efeitos da temperatura, concentrações de CO₂ e ozônio, precipitação e seca na biologia dos patógenos e na sua habilidade de infectar as plantas e de sobreviver na natureza ou em sistemas agrícolas. Em adição, consideram-se ainda os efeitos na reação das plantas à infecção, bem como os microclimas determinantes do processo infeccioso.

Pelo fato de ambos, patógeno e hospedeiro, serem claramente afetados pelas mudanças climáticas, espera-se, com elas, substanciais mudanças na magnitude da expressão de doenças nos distintos patossistemas, na distribuição geográfica de doenças, na importância de uma doença em uma determinada região e no conjunto de doenças que ameaçam uma cultura. Como consequência, essas mudanças terão grande efeito no conjunto de medidas de controle a ser adotado pelos produtores, bem como na viabilidade econômica de determinadas culturas em uma região. (ELAD; PERTOT, 2014; GHINI et al., 2011a, 2011b).

Dentre os fatores climáticos do “ambiente”, a temperatura é o que está mais associado à intensidade da doença de plantas pelo fato de interferir direta e indiretamente em cada componente biológico dos patossistemas, afetando a invasão, a colonização, a reprodução, a dispersão e a sobrevivência dos patógenos (ROSENZWEIG et al., 2001; VALE; ZAMBOLIM, 1996). Ênfase será dada, portanto, a este componente nos comentários a seguir.

Quando se discute o clima em relação a epidemia de doenças de plantas, é necessário lembrar que, em uma determinada região, as doenças podem ser mais afetadas por fatores microclimáticos do que pelos macroclimáticos, estes obtidos por meio de estações

meteorológicas. Há também de se considerar sistemas não convencionais, como a produção de alimentos orgânicos e o uso de controle biológico, com todas as dificuldades a eles impostas por um ambiente em modificação. A favor dos pesquisadores, a coleta e o armazenamento desses dados estão hoje muito facilitados pelos avanços na automação e na tecnologia da informação.

A temperatura e as mudanças climáticas na epidemiologia de doenças de plantas

De um modo geral, as doenças se desenvolvem mais rapidamente quando a temperatura prevalecente está próxima à temperatura ótima do patógeno e abaixo ou acima da ótima para a planta. Neste contexto, a temperatura é um dos principais componentes nos sistemas de previsão de doenças de plantas (COLHOUN, 1973).

É complicado analisar os efeitos do aquecimento global esperado de até 5°C em um século, nas doenças de plantas (GHINI et al., 2011b), em especial em países tropicais de dimensões continentais, como o Brasil. Nestes, a média de temperatura pode variar em mais de 30°C de uma estação para outra, com variações acima de 20°C em um mesmo dia. Por isso, trabalhar com as médias de temperatura, como em muitos modelos de previsão, não é suficiente; amplitudes térmicas geralmente são mais importantes que a temperatura média (SCHERM; BRUGGEN, 1994). Além disso, os regimes de temperatura e precipitação afetados pelas mudanças climáticas interagem com os gases atmosféricos, fertilizantes, defensivos, doenças, plantas daninhas e matéria orgânica do solo, produzindo efeitos de difícil previsão (PIMENTEL, 1993).

Em termos práticos, o impacto do aquecimento global, inclusive na adaptação do hospedeiro nas doenças de plantas, pode ser analisado a qualquer tempo em países de climas diversos como o Brasil.

Assim, embora vários outros fatores contribuam para a definição de um clima, o efeito da alta temperatura em doenças causadas por patógenos adaptados ao calor pode ser avaliado em regiões de clima quente, como muitos municípios da região Norte e de outras regiões de baixas altitudes. Por exemplo, o efeito do aumento de temperatura nas regiões de clima subtropical e temperado na manifestação da murcha bacteriana (*Ralstonia* spp.) poderá ser percebido quando se constata a dificuldade de se cultivar o tomateiro na região Amazônica (LOPES, 2015). Esta situação tem sido explorada, embora ainda timidamente, por melhoristas de plantas na seleção de genótipos de algumas espécies tolerantes ao calor.

Efeitos da temperatura nos componentes dos patossistemas

No patógeno

O aumento da temperatura pode afetar os patógenos de várias maneiras: alterando sua taxa de infecção, colonização e multiplicação; interferindo na sua sobrevivência em nichos específicos; promovendo variabilidade genética que permite sua adaptação a uma nova condição ambiental; modificando a quantidade de vetores, bem como sua eficiência de transmissão, e alterando a eficácia das diferentes formas de controle (GAUTAM et al., 2013).

Há que se considerar ainda que os efeitos da temperatura são distintos em se tratando de características intrínsecas dos patógenos, sejam estes associados ao solo ou à parte aérea, necrotróficos ou biotróficos, parasitas de hospedeiros de ciclos curto ou longo, produtores ou não de estruturas de resistência, etc. - isso tudo sujeito a uma diversidade de climas no planeta nos níveis micro, meso e macro.

Em um nível macro epidemiológico, regiões sujeitas a invernos rigorosos levam vantagens expressivas no controle de doenças, em relação a regiões de clima tropical. Nos trópicos, o aquecimento global facilita a sobrevivência do patógeno, em relação a climas frios e temperados, disponibilizando inóculo inicial de epidemias em futura estação de cultivo. Fuhrer (2003), por exemplo, afirma que um efeito marcante do aquecimento em regiões de clima temperado é a mudança da taxa de sobrevivência de pragas nas entressafras, já que “o inverno é responsável por mais de 99% da mortalidade anual de patógenos” (BURDON; ELMQUIST, 1996). A efetividade da baixa temperatura para o controle de doenças é bem explorada pelo uso da cadeia de frio em pós-colheita, lembrando que estas dependem diretamente da sanidade da lavoura, por sua vez afetada pelo clima.

A distribuição geográfica de patógenos em resposta às mudanças climáticas é um processo complexo e dinâmico. Suas formas de dispersão passiva (ventos, água, sementes/mudas, órgãos vegetais transportados legal e clandestinamente) são determinantes e merecem atenção dos fitopatologistas, em alguns casos envolvendo ações interinstitucionais, como no caso das medidas quarentenárias, cada vez mais demandadas em tempos de globalização. Em especial, os vírus transmitidos por vetores alados são ameaças constantes. Seu estabelecimento em uma determinada região requer disponibilidade em abundância de tecidos suscetíveis do hospedeiro, favorabilidade das condições ambientais e capacidade de se manter competitivamente, inclusive em termos evolutivos. Os efeitos das mudanças climáticas na distribuição geográfica de patógenos de plantas são discutidos em recente artigo de Shaw e Osborne (2011).

Além de proporcionar oportunidades para novos patógenos se estabelecerem, o aquecimento global pode estar associado à substituição de raças ou espécies de complexos patogênicos

prevalecentes por outras melhor adaptadas. Esta situação é exemplificada pela alternância da prevalência de espécies do complexo *Xanthomonas*, associado à mancha-bacteriana do tomateiro. Em lavouras cultivadas em temperaturas elevadas, *Xanthomonas perforans* é encontrada com mais frequência, em contraste com *Xanthomonas gardneri*, que predomina em climas de temperaturas mais amenas, embora ambas provoquem perdas sob alta umidade e temperaturas relativamente altas, de 25°C a 30°C (EUROPEAN AND MEDITERRANEAN PLANT PROTECTION ORGANIZATION, 2013; QUEZADO DUVAL; LOPES, 2010). Esta informação permite prever que *Xanthomonas perforans* deverá prevalecer em localidades e épocas de plantio sujeitas a temperaturas mais elevadas e, em caso de aquecimento global, substituir total ou parcialmente as populações de *Xanthomonas gardneri*.

Em outro exemplo, isolados do fungo *Auricularia auricula-judae*, apodrecedor de madeira, sofreram modificações nas últimas seis décadas no Reino Unido, adquirindo as seguintes características: frutificação mais precoce, período de frutificação mais longo e expansão do ciclo de hospedeiros. Interessante notar é que essas características refletem as respostas obtidas quando o fungo foi exposto a temperaturas elevadas (GANGE et al., 2011).

Estabelecido que temperaturas elevadas podem favorecer doenças, não se pode negligenciar, entretanto, que elas também podem ser deletérias aos patógenos. Sob o ponto de vista prático, o controle fitossanitário pela solarização é efetivo; porém, deve-se levar em conta que esta técnica proporciona um gradiente de temperatura a partir da superfície. Assim, se nas camadas superiores a temperatura chega a ser letal a um determinado fitopatógeno, ela pode permanecer favorável a ele em determinada faixa de profundidade, resultando, assim, no controle da doença somente nas camadas mais superficiais do solo. Daí a necessidade de se conhecer a bio-

logia do patógeno (por exemplo sua temperatura letal e a formação de estruturas de resistência) e sua distribuição no solo para o estabelecimento do controle de doenças por meio de solarização (PRITCHARD, 2011).

No hospedeiro

É natural que a preocupação primária com danos provocados por doenças seja com as culturas de maior importância alimentar no mundo, como arroz, trigo, milho, soja e batata, para as quais são estimadas perdas preocupantes que se devem a fatores climáticos atuando direta ou indiretamente na planta (LUCK et al., 2011). Traz preocupação também a situação das florestas e árvores urbanas, expostas por longos períodos a estresses bióticos e abióticos, diferentemente das hortaliças, por exemplo, que podem ser exploradas em “janelas” sazonais de escape a doenças. Na prática, essa situação é levada em conta por olericultores, que optam por conduzir suas safras em períodos de maior risco de perdas associadas ao clima, como as doenças, somente mediante a expectativa de preços compensadores. Em geral, no entanto, o custo de desrespeito às limitações climáticas é alto, que o digam os produtores que convivem com pesadas perdas de produção ao insistirem em cultivar batata e tomate durante o verão chuvoso.

As espécies de plantas tropicais normalmente sofrem maiores perdas de produtividade na presença de massas de ar quente por já se encontrarem próximas ao seu limite fisiológico (CERRI et al., 2007). Assim, como a influência da temperatura nas taxas metabólicas não segue modelo linear, mesmo que as regiões tropicais sofram menores incrementos de temperaturas, as plantas sofrerão impactos até mais significativos com o aquecimento global do que aquelas que vegetam em regiões de climas mais amenos (DILLON et al., 2010). O efeito ambiental medido em longo prazo, no entanto,

pode ser mascarado por flutuações de temperatura (BEARCHELL et al., 2005) que, por sua vez, também afetarão de maneira distinta espécies perenes e de ciclo curto.

Para a elaboração de uma estratégia de adaptação aos efeitos do aquecimento global, o melhoramento genético pode ser uma importante ferramenta para trazer harmonia entre a agricultura e o ambiente. Uma efetiva parceria entre melhoristas, produtores, ecologistas, urbanistas e legisladores é necessária para tornar isso uma realidade (BRUMMER et al., 2011). O assunto melhoramento genético em tempos de mudanças climáticas é tema de capítulo específico deste livro, motivo pelo qual aqui ele é tratado de forma resumida.

É notório que a resistência genética a doenças causadas por agentes bióticos, em especial a resistência quantitativa (vertical, não-específica ou poligênica) seja inibida por uma elevação modesta da temperatura ideal para o desenvolvimento das plantas (KEANE, 2013). Mas, a temperatura também afeta a resistência qualitativa, de controle monogênico ou oligogênico, substancialmente menos afetada por fatores climáticos do que a resistência quantitativa. Por exemplo, há oito décadas Samuel (1931) já havia observado que a resistência ao vírus do mosaico do tabaco (TMV) conferida pelo gene *N* em tabaco era reversivelmente inativada por temperaturas acima de 28 °C, fenômeno também confirmado para o mesmo vírus em tomateiro (WHITHAM et al., 1996). Em tomateiro, a reação de hipersensibilidade (HR) mediada pelos genes *Cf4* e *Cf9* que conferem resistência à mancha de cladospório (*Cladosporium fulvum* = *Fulvia fulva*) é suprimida a partir de 33 °C (JONG et al., 2002).

Também a resistência conferida pelo gene *Mi-1*, derivado de *Solanum peruvianum*, muito usada para o controle do nematoide das galhas (*Meloidogyne* spp.) do tomateiro (*Solanum lycopersicum*) não é efetiva a temperaturas acima de 28 °C (JABLONSKA et al., 2007).

Estes autores, entretanto, mapearam o gene *Mi-9* em *Solanum arcanum*, homólogo ao gene *Mi-1*, que confere resistência estável mesmo à temperatura de 32°C.

Em melhoramento genético, este fenômeno significa que uma determinada resistência pode ser “quebrada” sob altas temperaturas (WANG et al., 2009). Em termos evolucionários, não se dispõe de uma clara explicação da inibição da resistência pela temperatura elevada. Certamente isso tem a ver com as características intrínsecas do patógeno e da planta, e das complexas interações entre eles, levando ainda em conta a co-evolução das plantas e seus respectivos patógenos.

Um aspecto que merece destaque nas discussões de temperatura afetando processos metabólicos nas plantas, inclusive ligados à resistência genética, é o fato de que temperaturas elevadas, como 28°C ou 32°C, podem ocorrer em um período curto do dia. Se esse período de temperatura alta é ou não suficiente para inibir a resistência (ou qualquer outro processo), necessita ser mais esclarecido, já que a grande maioria dos estudos é realizada sob temperaturas constantes e, frequentemente, não levando em conta outras variáveis, tais como idade da planta, umidade, luminosidade, suprimento de água, fertilização, comprimento do dia e taxa de multiplicação do patógeno. Além disso, há de se elucidar se a temperatura afeta diretamente o processo de reconhecimento ou se seu efeito é na atividade dos componentes de sinalização da defesa (WANG et al., 2009).

Na interação patógeno x hospedeiro

Como, de fato, as interações patógeno-hospedeiro são influenciadas pela temperatura, as mudanças climáticas apresentam-se como um desafio a mais aos programas de melhoramento genético

para resistência a doenças. Isso implica em ser altamente desejável que qualquer espécie melhorada para resistir a temperaturas elevadas deveria também conter genes que confirmem resistência a doenças causadas por patógenos adaptados às altas temperaturas, como *Ralstonia* spp., *Pectobacterium* spp. e *Sclerotium rolfsii*.

Como a resistência quantitativa (ou poligênica) normalmente pode não se expressar adequadamente quando a planta é exposta a altas temperaturas (VALE; ZAMBOLIM, 2011), há necessidade de se aumentar as buscas de fontes de resistência que confirmem proteção climaticamente estável, de preferência com suporte de estudos das bases moleculares associadas à resposta de defesa da planta. Deve-se considerar, entretanto, que os patógenos têm muito maior capacidade de ajuste para provocar doença do que o homem para preparar a planta para resisti-la. É a eterna luta dos melhoristas contra os efeitos deletérios dos patógenos. De um lado, as crescentes dificuldades burocráticas impostas aos melhoristas para coleta e intercâmbio de germoplasma, e as incertezas para o estabelecimento de parcerias público-privadas para viabilizar o financiamento das pesquisas; de outro, a dinâmica movimentação de patógenos tradicionais e suas novas variantes. O balanço adaptativo não nos parece muito favorável, embora o rápido desenvolvimento das biotecnologias permita acelerar o processo de seleção de plantas superiores pelo melhoramento assistido por marcadores moleculares, por exemplo.

Microrganismos benéficos associados a plantas são conhecidos por estimular o desenvolvimento dessas plantas e induzir nelas resistência a estresses bióticos e abióticos. Os efeitos das mudanças climáticas nesses microrganismos e nas suas interações com as plantas hospedeiras têm sido pouco estudados, porém não totalmente negligenciados. Por exemplo, Compant et al. (2010) analisaram os resultados de 135 estudos neste tema e concluíram que o aumento da disponibilidade de CO₂ na atmosfera, diretamente

associada ao aquecimento global, era benéfico para as micorrizas, porém com efeito variável para bactérias promotoras de crescimento e fungos endofíticos. O aumento de temperatura em si apresentou resultados variáveis, com efeitos positivos, negativos e neutros, variando consideravelmente de acordo com o sistema estudado e os limites de temperatura considerados. Com isso, estabelece-se que microrganismos benéficos são importantes fatores que influenciam o comportamento das plantas às mudanças climáticas.

Menos discutida, porém sem poder ser negligenciada, é a questão da presença de micotoxinas em alimentos em função das mudanças climáticas. Embora as pesquisas neste tema sejam ainda escassas, Russell et al. (2010) antecipam maiores riscos em países desenvolvidos de clima temperado, como partes da Europa e EUA. Com o aquecimento global, temperaturas próximas de 33°C, ideais para a produção de aflatoxinas, por exemplo, podem se tornar cada vez mais frequentes nesses países.

Sistemas de previsão de doenças de plantas: fragilidades e perspectivas frente às mudanças climáticas

Acontecimentos recentes e análises de dados históricos têm mostrado que qualquer previsão de mudanças climáticas globais com base em fatos atuais é frágil face à dinâmica das mudanças que esta geração tem presenciado. Savary et al. (2011) caracterizaram essa preocupação ao atrelar as mudanças climáticas às mudanças globais, que levam em conta o aumento populacional do planeta, as alterações dos recursos naturais e o mercado, este fortemente atingido pela globalização. A associação das mudanças climáticas com as mudanças globais é didaticamente ilustrada por Hamada et al. (2011) ao caracterizarem as famílias de cenários de mudanças climáticas do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas

(IPCC). Assim, se somente as mudanças climáticas - com todos seus efeitos diretos e indiretos (interações) nos patossistemas - impõem grande dificuldade na confecção de modelos de previsão de doenças, a complexidade aumenta ao incorporarmos as variáveis de mudanças globais. Isso implica que, de alguma maneira, toda a sociedade, diretamente representada por produtores e consumidores, terão interferência nos fatores que compõem o triângulo da doença e nas suas interações. É a figura do tetraedro na representação das doenças de plantas pela ação do homem nas variáveis do triângulo, conforme sugerido por alguns autores (ZADOKS; SCHEIN, 1979).

Embora não haja dificuldade em se aceitar que as mudanças climáticas venham a afetar a intensidade das doenças de plantas, previsões devem ser feitas com cautela, pois as diversas interações de fatores requerem uma análise individual dos patossistemas por região, levando ainda em conta as variações sazonais.

Scherm (2004) e Shaw (2009) retratam de maneira clara as dificuldades de se tentar prever as mudanças em sistemas agrícolas, inclusive aquelas diretamente afetadas pelas doenças, levando-se em conta apenas mudanças climáticas e alterações na distribuição da planta hospedeira. A complexidade é alta devido às muitas interações de fatores componentes do processo “doença”: o clima, o patógeno e a hospedeira, nos diferentes patossistemas, nas diferentes regiões, em distintos microclimas. Como consequência, a falta de confiança nos modelos atuais de previsão leva à necessidade de esforços em direção ao estabelecimento de estratégias multidisciplinares que possam cobrir a carência de informação dos fatores individuais e das interações.

Ao serem concebidos dentro da ciência exata, os modelos de previsão são normalmente muito rígidos e não possibilitam ajustes na mesma velocidade com que o clima, em especial o microclima, se

modifica. Qualquer produtor ou extensionista sabe que não há duas lavouras iguais, mesmo se a mesma cultivar e a mesma época de plantio forem usadas. Essas diferenças são atribuídas principalmente às variações climáticas. Variações podem ocorrer mesmo em sistemas fechados, em ambientes protegidos, onde ocorre rigoroso controle das variáveis climáticas.

A importância da modelagem com base em dados de muitos anos é evidenciada por Jeger e Pautasso (2008). Esses autores também alertam para o fato de que os modelos só serão úteis se as previsões de longo prazo não forem frustradas por novos eventos na dinâmica co-evolutiva afetando as interações patógeno-hospedeira.

A previsão de doenças, que já é complexa, portanto, deverá se tornar ainda menos precisa (“expect the unexpected”) com as mudanças climáticas (WEBBER, 2010). Isso, entretanto, não deve desestimular as pesquisas envolvendo os processos biológicos nos sistemas de produção de sistemas agrônômicos e florestais sujeitos a essas mudanças. De fato, o entendimento desses processos permitirá um aprendizado nas interferências no processo de forma interativa, contribuindo para a construção de estratégias de manejo adaptativo indicada por Yousefpour et al. (2012).

Como as alterações metabólicas estão diretamente associadas a distúrbios fisiológicos e, direta ou indiretamente, a doenças parasitárias, a presença e/ou a intensidade de doenças poderá ser usada como indicador de mudanças climáticas; entretanto, outros indicadores devem ser buscados por serem mais fáceis de monitorar (GARRETT et al., 2009; LOGAN et al., 2003).

Generalizações baseadas em modelos podem e devem ser feitas com fins didáticos e para orientar estratégias de pesquisas. Entretanto, estudos precisos de casos, providos de rigor científico, são necessários para substituir empirismos que podem levar a previsões equivocadas. Como exemplo, não se pode simplesmente to-

mar a temperatura do ar e verificar seus efeitos em patógenos protegidos em bolsões de umidade a diferentes profundidades do solo (*Ralstonia* spp.), nos espaços intercelulares (fungos biotróficos) ou no sistema vascular (fitoplasmas). Além disso, não se pode desprezar a amplitude térmica e seus efeitos no patógeno e na hospedeira, diante da facilidade de estudos normalmente realizados em temperaturas constantes.

Em estudo recente e bem direcionado ao efeito de amplitude térmica em relação ao desenvolvimento de epidemias, Bonde et al. (2013) analisaram a frequência com que ocorreram as temperaturas extremas mais altas no sul dos EUA em relação à produção de urediniósporos e de lesões da ferrugem da soja. Concluíram que a combinação dos efeitos de redução dos números de lesões e de urediniósporos por lesão causados por temperaturas máximas extremas (acima de 35 °C) explica a ausência ou o retardamento da doença até o outono, no período de 2005 a 2012. Essa informação é relevante ao considerar que as epidemias de ferrugem nas principais regiões produtoras americanas dependem da produção de urediniósporos no sul do País que, por sua vez, depende da frequência das temperaturas máximas.

Não se pode negar a importância de modelos matemáticos para se prever e avaliar os efeitos das mudanças climáticas nas doenças de plantas. O que se espera, entretanto, é que esses modelos evoluam de tal maneira a simular com fidelidade os distintos cenários de mudanças climáticas em associação com previsão de diferentes intensidades de doenças. Dessa maneira, integrados com outros modelos interdisciplinares, serão ferramentas fundamentais para auxiliar nas tomadas de decisões sobre as táticas mais efetivas de controle sob os aspectos econômico, ambiental e social, interferindo, assim, em níveis maiores de produção, produtividade e segurança alimentar (GHINI et al., 2008a; NEWTON et al., 2011).

O desenvolvimento e o aperfeiçoamento de modelos, por outro lado, requerem a coleta de dados precisos de clima e de desenvolvimento de epidemias específicas nos diferentes ecossistemas (EVANS et al., 2008). A carência desses registros, em especial em países de clima tropical, leva a discussões com base em observações empíricas, facilmente contestáveis. Felizmente, o empirismo vem sendo rapidamente substituído por resultados de pesquisa providos de adequado rigor científico, com destaque para alguns realizados no Brasil (GHINI et al., 2007, 2008a, 2008b, 2011a, 2011b).

Considerações finais

É muito provável que as mudanças climáticas que estamos vivenciando venham a influenciar significativamente a ocorrência, prevalência e intensidade (severidade e incidência) em doenças de plantas. Ao mesmo tempo em que se reconhece a relevância das estratégias potenciais e os requerimentos futuros para o manejo de doenças de plantas neste cenário (JUROSZEK; TIEDEMANN, 2011), alerta-se para o fato de que o manejo integrado, que hoje se recomenda, seja muito dependente do domínio de informações sobre as condições climáticas locais e de suas expectativas de mudanças, geralmente de difícil extrapolação para outras regiões, em especial em países de clima tropical, onde o conhecimento é limitado e fragmentado.

Estrategicamente, as instituições públicas é que devem estar preocupadas com as pesquisas nas doenças emergentes em função das mudanças climáticas; e as doenças crônicas e agudas (SAVARY et al., 2011) o setor privado, ligado às cadeias produtivas mais evoluídas, saberá como lidar, mesmo que seja em forma de cobranças ao setor público. A importância da antecipação de riscos baseados em modelos de nichos ecológicos, em complementação aos modelos de simulação de doenças, é reforçada por Savary et

al. (2011), tendo em vista, principalmente, a introdução de plantas exóticas e a capacidade adaptativa dos patógenos.

Modelos teóricos de previsão, embora sujeitos a críticas, apresentam o grande mérito de permitir identificar e quantificar individualmente a relevância das diversas variáveis componentes do sistema em patossistemas específicos. Isso destaca também que, para que tenhamos informações suficientes para uma avaliação confiável do impacto das doenças na produção vegetal, há muita pesquisa a ser feita, conforme alerta de Ghini et al. (2012).

Ao se reforçar a importância da fitopatologia nos estudos de mudanças climáticas ou qualquer outra disciplina, direta ou indiretamente ligada ao controle das doenças de plantas, merece registro a preocupação da diminuição do interesse de estudantes de agronomia (talvez até pautada por diretrizes departamentais) pela disciplina de epidemiologia. Tida como pouco atraente em cursos de pós-graduação por requerer dados só obtidos com repetição em pesquisas de campo ao longo de anos, tem sido visivelmente negligenciada no sistema competitivo universitário. Sem esses profissionais, dificilmente poderemos dispor, no futuro, de conjuntos de informações coletados ao longo de muitos anos, essenciais e atualmente raros, em especial em países de clima tropical (SCHERM, 2004). Além disso, essas experimentações são de extrema complexidade.

Em um momento que são cobradas ações para mitigar os efeitos das mudanças climáticas, os pesquisadores precisam refletir bem sobre que tipo de pesquisa deve merecer prioridade. Não basta aproveitar o momento e se valer de mais um “modismo” institucional regado com recursos fáceis, que às vezes são impostos diante de políticas governamentais que costumam cobrar resultados imediatos, como se projetos de pesquisa por si já fossem resultados. O que se necessita é de projetos robustos, com equipes interinstitucionais e multidisciplinares coesas, institucionalmente apoiadas

em longo prazo, tarefa complicada especialmente neste ambiente competitivo por recursos financeiros e de busca de formação rápida de currículo que resulta em discriminação involuntária de pesquisadores em áreas menos especializadas e menos glamorosas.

Maiores desafios trazidos pelo aquecimento global exigirão medidas inovadoras de controle.

Os avisos para tomadas de providências estão aí, com a urgência poética do verso de Clímério Ferreira:

“As crateras do tempo engolem horas.

Os vulcões dos séculos expelem anos.

Não sobra espaço para as demoras,

Nem a calma necessária para os planos.”

Referências

- AGRIOS, G. N. **Plant pathology**. 4. ed. San Diego: Academic Press, 1997. 636 p.
- AMORIM, L.; GASPAROTO, M. C. G.; BERGAMIN FILHO, A. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre epidemias de doenças de plantas. In: GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. (Ed.). **Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2011. p. 75-86.
- BEARCHELL, S. J.; FRAAIJE, B. A.; SHAW, M. W.; FITT, B. D. L. Wheat archive links long-term fungal pathogen population dynamics to air pollution. **Procedures of the National Academy of Science**, v. 102, n. 15, p. 5438-5442, 2005.
- BONDE, M. R.; NESTER, S. E.; BERNER, D. K. Effects of frequency of “extreme” temperature highs on development of soybean rust. **Phytopathology**, v. 103, n. 7, p. 708-716, 2013.
- BRUMMER, E. C.; BARBER, W. T.; COLLIER, S. M.; COX, T. S.; JOHNSON, R.; MURRAY, S. C.; OLSEN, R. T.; PRATT, R. C.; THRO, A. M. Plant breeding for harmony between agriculture and the environment. **Frontiers in Ecology and the**

Environment, v. 9, n. 10, p. 561-568, 2011.

BURDON, J. J.; ELMQVIST, T. T. Selective sieves in the epidemiology of *Melampsora lini*. **Plant Pathology**, v. 45, n. 5, p. 933-943, 1996.

CERRI, C. E. P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W. E.; MELILLO, J. M.; CERRI, C. C. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, v. 64, n. 1, p. 83-99, 2007.

CHAKRABORTY, S.; LUCK, J.; HOLLAWAY, G.; FITZGERALD, G.; WHITE, N. Rust-proofing wheat for a changing climate, **Euphytica**, v. 179, n. 1, p. 19-32, 2011a.

CHAKRABORTY, S.; NEWTON, A. C. Climate change, plant diseases and food security: an overview. **Plant Pathology**, v. 60, n. 1, p. 2-14, 2011b.

CHAKRABORTY, S.; TIEDEMANN, A.V.; TENG, P. S. Climate change: potential impact on plant diseases. **Environmental Pollution**, v. 108, n. 3, p. 317-26, 2000.

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

COMPANT, S.; VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; SESSITSCH, A. Climate change effects in beneficial plant-microorganism interactions. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 73, n. 2, p. 197-214, 2010.

JONG, C. F. de; TAKKEN, F. L. W.; CAI, X.; DE WIT, P. J. G. M.; JOOSTEN, M. H. A. J. Attenuation of *Cf*-mediated defense responses at elevated temperatures correlates with a decrease in elicitor-binding sites. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, v. 15, n. 10, p.1040-1049, 2002.

DILLON, M. E.; WANG, G.; HUEY, R.B. Global metabolic impacts of recent climate warming. **Nature**, v. 467, n. 7316, p. 704-706, 2010.

ELAD, Y.; PERTOT, H. Climate change impacts on plant pathogens and plant diseases. **Journal of Crop Improvement**, v. 28, n. 1, p. 99-139, 2014.

EUROPEAN AND MEDITERRANEAN PLANT PROTECTION ORGANIZATION. **PM 7/110 (1):** *Xanthomonas* spp. (*Xanthomonas euvesicatoria*, *Xanthomonas gardneri*, *Xanthomonas perforans*, *Xanthomonas vesicatoria*) causing bacterial spot of tomato and sweet pepper. **Bulletin OEPP/EPPO Bulletin**, v. 43, n. 1, p. 7-20, 2013.

EVANS, N.; BAIERL, A.; SEMENOV, M. A.; GLADDERS, P.; FITT, B. D. Range and severity of a plant disease increased by global warming. **Journal of the Royal Society Interface**, v. 5, n. 22, p. 525-531, 2008.

FUHRER, J. Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 97, n. 1-3, p.1-20, 2003.

GANGE, A. C.; GANGE, E. G.; MOHAMMAD, A. B.; BODDY, L. Host shifts in fungi caused by climate change? **Fungal Ecology**, v. 4, n. 2, p. 184-190, 2011.

GARRETT, K. A.; NITA, M.; DE WOLF, E. D.; GOMEZ, L.; SPARKS, A. H. Plant pathogens as indicators of climate change. In: LETCHER, T. (Ed.). **Climate change: observed impacts on planet earth**. Dodrecht: Elsevier, 2009. p. 425-437.

GÄUMANN, E. **Principles of plant infection**. London: Crosby Lockwood & Son, 1950. 543 p.

GAUTAM, H. R.; BHARDWAJ, M. L.; KUMAR, R. Climate change and its impact on plant diseases. **Current Science**, v. 105, n. 12, p. 1685-1691, 2013.

GHINI, R.; BETTIOL, W.; HAMADA, E. Diseases in tropical and plantation crops as affected by climate changes: current knowledge and perspectives. **Plant Pathology**, v. 60, n. 1, p. 122-132, 2011a.

GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. (Ed.). **Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2011. 356 p.

GHINI, R.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; COSTA, L. B.; BETTIOL, W. Research approaches, adaptation strategies, and knowledge gaps concerning the impacts of climate change on plant diseases. **Tropical Plant Pathology**, v. 37, n. 1, p. 5-24, jan./fev. 2012.

GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. Climate change and plant diseases. **Scientia Agricola**, v. 65, n. esp., p. 98-107, 2008a.

GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. (Ed.). **Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2011b. 356 p.

GHINI, R.; HAMADA, E.; GONÇALVES, R. R. V.; GASPAROTTO, L.; PEREIRA, J. C. R. Análise de risco das mudanças climáticas globais sobre a sigatoka-negra da bananeira no Brasil. **Fitopatologia Brasileira**, v. 32, n. 3, p. 197-204, 2007.

GHINI, R.; HAMADA, E.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; MARENGO, J. A.; GONÇALVES, R. R. V. Risk analysis of climate change on coffee nematodes and leaf miner in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 2, p. 187-194. 2008b.

GUEDES, I. M. R. (Ed.). **Mudanças climáticas globais e a produção de hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa, 2009. 132 p.

HAMADA, E.; GHINI, R.; MARENGO, J. A.; THOMAZ, M. C. Projeções de mudanças climáticas para o Brasil no final do século XXI. In: GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. (Ed.) **Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2011. p. 41-74.

INOUE-NAGATA, A. K. Doenças causadas por vírus. In: CLEMENT, F. M. V. T.; BOITEUX, L. S. (Ed.). **Produção de tomate para processamento industrial**. Brasília, DF: Embrapa, 2012. p. 225-236.

JABLONSKA, B.; AMMIRAJU, J. S.; BHATTARAI, K. K.; MANTELIN, S.; MARTINEZ DE ILARDUYA, O.; ROBERTS, P. A.; KALOSHIAN, I. The Mi-9 gene from *Solanum arcanum* conferring heat-stable resistance to root-knot nematodes is a homolog of *Mi-1*. **Plant Physiology**, v. 143, n. 2, p. 1044-1054, 2007.

JEGER, M. J.; PAUTASSO, M. Plant disease and global change - the importance of long-term data sets. **New Phytologist**, v. 177, n. 1, p. 8-11, 2008.

JUROSZEK, P.; TIEDEMANN, A. von. Potential strategies and future requirements for plant disease management under a changing climate. **Plant Pathology**, v. 60, n. 1, p. 100-112, 2011.

KEANE, P. J. **Horizontal or generalized resistance to pathogens in plants**. In: CUMAGUN, C. J. R. Plant pathology. Rijeka, Croatia: Intech, 2012. p. 327-362.

LOGAN, J.A.; RÉGNIÈRE, J.; POWELL, J.A. Assessing the impacts of global warming on forest pest dynamics. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 1, n. 3, p. 130-137, 2003.

LOPES, C. A. **Bacterial wilt: a threatening disease of tomato cultivated under warm temperatures**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2015. 4 p. (Embrapa Hortaliças. Comunicado técnico, 109).

LUCK, J.; SPACKMAN, M.; FREEMAN, A.; TREBICKI, P.; GRIFFITHS, W., FINLAY, K.; CHAKRABORTY, S. Climate change and diseases of food crops. **Plant Pathology**, v. 60, n. 1, p. 113-121, 2011.

MANNING, W. J.; TIEDEMANN, A. von. 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. 219-45, 1995.

MICHEREFF FILHO, M.; GUIMARÃES, J. A.; MOURA, A. P.; LIZ, R. S. Pragas. In: CLEMENTE, F. M. V. T.; BOITEUX, L. S. (Ed.). **Produção de tomate para processamento industrial**. Brasília, DF: Embrapa, 2012. p. 265-300.

NEWTON, A. C.; JOHNSON, S. N.; GREGORY, P. J. Implications of climate change for diseases, crop yields and food security. **Euphytica**, v. 179, n. 1, p. 3–18, 2011.

PIMENTEL, D. Climate changes and food supply. **Forum for Applied Research and Public Policy**, v. 8, n. 4, p. 54-60, 1993.

PRITCHARD, S. G. Soil organisms and global climate change. **Plant Pathology**, v. 60, n. 1, p. 82-89, 2011.

QUEZADO DUVAL, A. M.; LOPES, C. A. **Mancha bacteriana**: uma atualização para o sistema de produção integrada de tomate indústria. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2010. 28p. (Embrapa Hortaliças. Circular Técnica, 84).

ROSENZWEIG C.; IGLESIUS, A.; YANG, X. B.; EPSTEIN P. R.; CHIVIAN E. Climate change and extreme weather events implications for food production, plant diseases, and pests. **Global Change & Human Health**, v. 2, p. 89-104, 2001.

RUSSELL, R.; PATERSON, R. R. M.; LIMA, N. How will climate change affect mycotoxins in food? **Food Research International**, v. 43, n. 7, p. 1902-1914, 2010.

SAMUEL, G. Some experiments on inoculating methods with plant viruses, and on local lesions. **Annals of Applied Biology**, v. 18, n. 4, p. 494-507, Nov. 1931.

SAVARY, S.; NELSON, A.; SPARKS, A. H.; WILLOCQUET, L.; DUVEILLER, E.; MAHUKU, G.; FORBES, G.; GARRET, K. A.; HODSON, D.; PADGHAM, J.; PANDE, S.; SHARMA, M.; YUEN, J.; DJURIE, A. International agricultural research tackling the effects of global and climate changes on plant diseases in the developing world. **Plant Disease**, v. 95, n. 10, p.1204-1216, 2011.

SCHERM, H. Climate change: can we predict the impacts on plant pathology and pest management? **Canadian Journal of Plant Pathology**, v. 26, n. 3, p. 267-273, 2004.

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

SHAW, M. W. Preparing for changes in plant disease due to climate change. **Plant Protection Science**, v. 45, n. esp., p. S3-S10, 2009.

SHAW, M. W.; OSBORNE, T. M. Geographic distribution of plant pathogens in response to climate change. **Plant Pathology**, v. 60, n. 1, p. 31-43, 2011.

STEVENS, R. B. Cultural practices in disease control. P. 357-429 in: HORSFALL, J. G.; DIMOND, A. E. (Ed.). **Plant pathology, an advanced treatise**. New York: Academic Press, 1960. v. 3.

VALE, F. X. R.; ZAMBOLIM, L. Influência da temperatura e da umidade nas epidemias de doenças de plantas. **Revisão Anual de Patógenos de Plantas**, v. 4, p.149-207, 1996.

WANG, Y.; BAO, Z.; ZHU, Y.; HUA, J. Analysis of temperature modulation of plant defense against biotrophic microbes. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, v. 22, p. 498-506, May 2009.

WEBBER, J. Pest risk analysis and invasion pathways for plant pathogens. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 40, p. S45-S56, 2010. Supplement.

WHITHAM, S.; MCCORMICK, S.; BAKER, B. The N gene tobacco confers resistance to Tobacco mosaic virus in transgenic tomato. **Procedures of the National Academy of Science**, v. 93, n. 16, p. 8776-8781, 1996.

WOODS, A. Is the health of British Columbia's forests being influenced by climate change? If so, was this predictable? **Canadian Journal of Plant Pathology**, v. 33, n. 2, p. 117-126, 2011.

YOUSEFPOUR, R.; JACOBSEN, J. B.; THORSEN, B. J.; MEILBY, H.; HANEWINKEL, M.; OEHLER, K. A review of decision-making approaches to handle uncertainty and risk in adaptive forest management under climate change. **Annals of Forest Science**, v. 69, n. 1, p. 1-14, 2012.

ZADOKS, J. C; SCHEIN, R. D. **Epidemiology and plant disease management**. Oxford University Press, 1979. 427 p.