



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Botucatu



MSc. REGIANE IOST

**CAFÉ ARÁBICA EM EXPERIMENTOTIPO FACE ("Free Air Carbon Dioxide
Enrichment"): INTENSIDADE DA FERRUGEM E DO BICHO-MINEIRO E
CRESCIMENTO DA PLANTA**

BOTUCATU-SP
Fevereiro – 2017

MSc. REGIANE IOST

**CAFÉ ARÁBICA EM EXPERIMENTO TIPO FACE (“Free Air Carbon Dioxide
Enrichment”): INTENSIDADE DA FERRUGEM E DO BICHO-MINEIRO E
CRESCIMENTO DA PLANTA**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutora em Agronomia (Proteção de Plantas).

Orientadora: Dra. Raquel Ghini

Co-orientador: Dr. Wagner Bettiol

BOTUCATU-SP
Fevereiro – 2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

I64c Iost, Regiane, 1983-
Café arábica em experimento tipo FACE ("Free Air Carbon Dioxide Enrichment"): intensidade da ferrugem e do bicho-mineiro e crescimento da planta / Regiane Iost. - Botucatu : [s.n.], 2017
81 p. : il. color., grafs., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2017
Orientador: Raquel Ghini
Coorientador: Wagner Bettiol
Inclui bibliografia

1. Café - Cultivo. 2. *Hemileia vastarix*. 3. Mudanças Climáticas. 4. Café - doenças e pragas. I. Ghini, Raquel II. Bettiol, Wagner. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

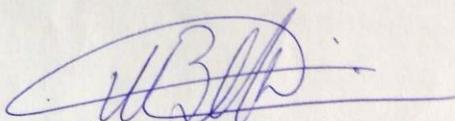
TÍTULO: "CAFÉ ARÁBICA EM EXPERIMENTO TIPO FACE ("FREE AIR CARBON DIOXIDE ENRICHMENT"): INTENSIDADE DA FERRUGEM E DO BICHO-MINEIRO E CRESCIMENTO DA PLANTA

AUTORA: REGIANE IOST

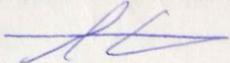
ORIENTADORA: RAQUEL GHINI

COORIENTADOR: WAGNER BETTIOL

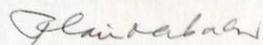
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (PROTEÇÃO DE PLANTAS), pela Comissão Examinadora:



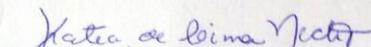
Prof. Dr. WAGNER BETTIOL
Microbiologia Ambiental / Meio Ambiente/ Embrapa



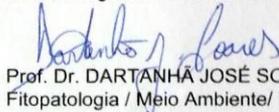
Prof. Dr. EDSON LUIZ FURTADO
Departamento de Proteção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP



Dra FLÁVIA RODRIGUES ALVES PATRÍCIO
Apta / INSTITUTO BIOLÓGICO



Profa. Dra. KÁTIA DE LIMA NECHET
Microbiologia Ambiental / Meio Ambiente / Embrapa



Prof. Dr. DARTANHA JOSÉ SOARES
Fitopatologia / Meio Ambiente/ Embrapa

Botucatu, 21 de fevereiro de 2017.

Aos meus pais, Maria Helena e Rodi Lial, pelo apoio incontestável e dedicação em
todos os momentos de minha vida.
Às minhas irmãs, Raquel e Rosilene, e aos meus cunhados, Kiko e Guilherme, pelo
apoio incondicional e amizade sincera.

AGRADECIMENTOS

Aos Espíritos de Luz pela conquista;

À minha orientadora Dra. Raquel Ghini e meu co-orientador Dr. Wagner Bettiol pela oportunidade e apoio incondicional;

À Dra. Michelli de Souza dos Santos pela amizade, apoio e pelo auxílio com a análise estatística preliminar;

Aos professores Dr. Edson Luís Furtado, Dra. Katia de Lima Nechet, Dr. Dartanha José Soares e Dra. Flávia Rodrigues Alves Patrício pela participação na banca;

À UNESP/FCA, pela chance de realização do curso;

À Embrapa Meio Ambiente pela infra estrutura na condução dos experimentos;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e

Tecnológico - CNPq, pela bolsa de estudos concedida durante a realização do curso;

Aos professores do Programa de Proteção de Plantas, pela amizade e aprendizado nas disciplinas;

Aos colegas da Pós-Graduação e do Laboratório de Microbiologia Ambiental da Embrapa Meio Ambiente, em especial, Michelli, Wallace, Dalton, Daniel, Cassiano, Adriana e Joyce, pelo convívio, amizade e incentivos em todos os momentos;

Aos técnicos do Laboratório de Microbiologia Ambiental da Embrapa Meio Ambiente (Anamaria, João, Roseli, Márcia e Elke) e do campo experimental da Embrapa Meio Ambiente, pela colaboração na condução dos experimentos;

Aos amigos que sempre me apoiaram;

Meu agradecimento em especial a todas as pessoas cujos nomes foram omitidos, mas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

“Você ganha força, coragem e confiança através de cada experiência em que você realmente para e encara o medo de frente.”

Eleanor Roosevelt

RESUMO

Nas últimas décadas o clima do planeta vem se alterando gradativamente em consequência da mudança climática, devido principalmente, à intensificação das atividades antrópicas, como a queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso da terra, as quais são responsáveis por alterações em diversos componentes do ambiente, como o dióxido de carbono (CO₂), o metano, o óxido nitroso e outros gases de efeito estufa. Considerando que o CO₂ é o gás de efeito estufa que tem maior importância devido ao maior volume de emissões, os efeitos do enriquecimento do ar com CO₂ [duas condições: concentração ambiente (nas faixas 360-450ppm) e concentração enriquecida (entre 490 ppm e 620 ppm)] foram avaliados sobre o desenvolvimento de plantas de café e sobre a ferrugem do cafeeiro e bicho-mineiro na cultivar “Catuaí Vermelho IAC 144” em experimento do tipo FACE (“Free Air Carbon Dioxide Enrichment”). O experimento foi composto por 12 parcelas octogonais com 10 metros de diâmetro, das quais seis foram enriquecidas com CO₂ e seis permaneceram na concentração ambiente. As avaliações foram realizadas nos anos de 2013, 2014 e 2015. Para o desenvolvimento da cultura foram avaliadas a altura das plantas, o diâmetro do colo das plantas e o número de folhas nos ramos. Para os problemas fitossanitários foram avaliados a ferrugem do cafeeiro e o bicho-mineiro, ambos por meio da incidência. Em condições de enriquecimento do ar com CO₂ a altura das plantas e o diâmetro do caule foram maiores, nos três anos avaliados. Não houve diferença estatística para o número de folhas em todo o período avaliado. A incidência de bicho-mineiro foi maior em condições ambientes, enquanto a incidência da ferrugem do cafeeiro foi semelhante em ambas as condições.

Palavras-chave: café, *Hemileia vastarix*, doenças, pragas, mudança climática.

ABSTRACT

COFFEE ARABIC IN FACE EXPERIMENT ("Free Air Carbon Dioxide Enrichment"): COFFEE LEAF RUST AND LEAF MINER INCIDENCE AND PLANT DEVELOPMENT

In recent decades the planet's climate has been gradually changing as a result of climate change, mainly due to the intensification of anthropogenic activities, such as the burning of fossil fuels and changes in land use, which are responsible for changes in various components of the environment, such as carbon dioxide (CO₂), methane, nitrous oxide and other greenhouse gases. Considering that CO₂ is the most important greenhouse gas due to higher emissions, the effects of CO₂ enrichment [two conditions: ambient concentration (between 360ppm and 490ppm) and enriched concentration (between 490ppm and 620ppm)] were evaluated on the development of coffee plants and on coffee leaf rust and leaf miner in the "Catuaí Vermelho IAC 144" cultivar in a Free Air Carbon Dioxide Enrichment (FACE) experiment. The experiment was composed of 12 octagonal plots with 10 meters in diameter, of which six were enriched with CO₂ and six remained in the ambient concentration. The evaluations were carried out in the years of 2013, 2014 and 2015. For the development of the crop were evaluated height of plants, stem diameter and number of leaves in the branches. For the phytosanitary problems, was evaluated the incidence of coffee leaf rust and leafminer incidence. In CO₂ enrichment conditions, plant height and stem diameter were higher in the three years evaluated. There was no statistical difference for the number of leaves throughout the evaluated period. The incidence of leaf miner was higher in environmental conditions, while the incidence of coffee leaf rust was similar in both conditions.

Keywords: coffee, *Hemileia vastatrix*, diseases, pests, climate change.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Parcela do experimento FACE no campo experimental da Embrapa Meio Ambiente com injeção de CO ₂	53
Figura 2: Estação meteorológica localizada no centro de cada parcela.....	53
Figura 3: Frequência relativa de concentrações de CO ₂ nas faixas 360-450 e 450-650 ppm [correspondentes a variação máxima de 20% em relação às concentrações alvo de 400 ppm (CO ₂ ambiente) e 550 ppm (CO ₂ +)] observada mensalmente nos anos 2013 (A), 2014 (B) e 2015 (C) no ClimapestFACE, Jaguariúna-SP, Brasil.....	54
Figura 4: Esquema de uma parcela com as marcações das plantas. Os círculos indicam as plantas que foram avaliadas.....	56
Figura 5: Área abaixo da curva de progresso da altura (AACPA) de plantas de café da variedade Catuaí Vermelho IAC 144 desenvolvidas em condições com e sem enriquecimento de CO ₂ em experimento tipo FACE (ClimapestFACE) ao longo do período avaliado.....	60
Figura 6: Área abaixo da curva de progresso da altura (AACPA) (total) de plantas de café da variedade Catuaí Vermelho IAC 144 desenvolvidas em condições com e sem enriquecimento de CO ₂ em experimento tipo FACE (ClimapestFACE) ao longo do período avaliado.....	61
Figura 7: Diâmetro médio do colo das plantas (mm) de plantas de café da variedade Catuaí Vermelho IAC 144 desenvolvidas em condições com e sem enriquecimento de CO ₂ em experimento tipo FACE (ClimapestFACE) ao longo do período avaliado	62
Figura 8: Número de folhas por planta de café da variedade Catuaí Vermelho IAC 144 desenvolvidas em condições com e sem enriquecimento de CO ₂ em experimento tipo FACE (ClimapestFACE) ao longo do período avaliado.....	63
Figura 9: Área abaixo da curva de progresso da incidência de ferrugem do cafeeiro (AACPIF) em cafeeiros da variedade Catuaí Vermelho IAC 144 desenvolvidos em condições com e sem enriquecimento de CO ₂ em experimento tipo FACE (ClimapestFACE) em 2014.....	67
Figura 10: Área abaixo da curva de progresso da incidência de ferrugem do cafeeiro (AACPIF) em cafeeiros da variedade Catuaí Vermelho IAC 144 desenvolvidos em	

condições com e sem enriquecimento de CO ₂ em experimento tipo FACE (ClimapestFACE) em 2015.....	67
Figura 11: Área abaixo da curva de progresso da incidência de bicho-mineiro (AACPIBM) em cafeeiros da variedade Catuaí Vermelho IAC 144 desenvolvidos em condições com e sem enriquecimento de CO ₂ em experimento tipo FACE (ClimapestFACE).....	71
Figura 12: Área abaixo da curva de progresso da incidência de bicho-mineiro (AACPIBM) (total) em cafeeiros da variedade Catuaí Vermelho IAC 144 desenvolvidos em condições com e sem enriquecimento de CO ₂ em experimento tipo FACE (ClimapestFACE).....	71

LISTA DE TABELA

Tabela 1: Cronograma das avaliações realizadas nos anos de 2013, 2014 e 2015.....	57
--	----

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1. Experimentos do tipo FACE.....	24
2.2. Mudanças climáticas e problemas fitossanitários.....	28
2.3. Efeito do CO ₂ sobre doenças e pragas de plantas.....	35
2.4. Cultura do café.....	41
2.5. Ferrugem do cafeeiro.....	44
2.6. Bicho-mineiro do cafeeiro.....	47
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	50
3.1. Caracterização do experimento ClimapestFACE.....	50
3.2. Avaliações.....	56
3.2.1. Desenvolvimento do cafeeiro.....	57
3.2.2. Ferrugem do cafeeiro.....	58
3.2.3. Bicho-mineiro do cafeeiro.....	58
4. RESULTADO E DISCUSSÃO.....	59
4.1. Efeito do enriquecimento do ar com CO ₂ sobre o desenvolvimento de plantas de café.....	59
4.2. Efeito do enriquecimento do ar com CO ₂ sobre a ferrugem do cafeeiro.....	65
4.3. Efeito do enriquecimento do ar com CO ₂ sobre o bicho-mineiro do cafeeiro.....	69
5. CONCLUSÕES.....	72
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

1. INTRODUÇÃO

As causas e consequências das mudanças climáticas vêm sendo estudadas mais intensamente por diversos segmentos da sociedade nas últimas décadas, pois representam uma das maiores ameaças para a humanidade. Essas mudanças poderão gerar graves problemas sociais, econômicos e ambientais. E, é possível que, mesmo que as emissões de gases de efeito estufa sejam reduzidas drasticamente nas próximas décadas, as mudanças ocorridas pelas emissões do passado já sejam suficientes para alterar o clima global no futuro (GHINI et al., 2011).

Os primeiros estudos sobre o assunto tiveram início nas geleiras polares a partir de pesquisas realizadas em bolhas de ar que foram retiradas de diversas profundidades para análise dos gases presentes. Os dados obtidos demonstraram alta correlação entre mudanças na temperatura do planeta e concentração de gases de efeito estufa na atmosfera (GHINI et al., 2005).

As principais causas da alteração no balanço radiativo que causa o aquecimento global são a queima de combustíveis fósseis e a mudança no uso da terra, que por sua vez contribuem para o aumento da concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera (IPCC, 2007). É sabido que a sociedade terá que rever o seu padrão de consumo, atualmente insustentável e baseado na elevada emissão de gases de efeito estufa. A economia também precisará ter outros alicerces do que aqueles baseados no crescimento econômico, a todo custo e insaciável, o que resulta em muitas vezes na exaustão de recursos naturais, estes finitos.

Durante o período de 2002-2011, a concentração de CO₂ atmosférico apresentou uma taxa de crescimento média de $2 \pm 0,1$ ppm ano⁻¹, o que, de acordo com Ciais e Sabine (2013), representa o maior aumento já observado desde que a concentração de CO₂ atmosférico começou a ser medida em 1958. De acordo com o IPCC (2007), a concentração de CO₂ era de 390 ppm com projeções de aumento variando de 500 a 1000 ppm em 2100. Recentemente, os níveis de gases de efeito estufa na atmosfera atingiram recordes. De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (OMM), agência especializada da ONU, as concentrações de dióxido de carbono vêm subindo de forma constante para o nível de 400 ppm, tendo atingido novos recordes a cada ano, desde que começaram a ser feitos registros

confiáveis, em 1984. E, de acordo com a Agência Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA), a concentração mensal deste gás de efeito estufa ultrapassou 400 ppm em março de 2015. O impacto do aumento da concentração de CO₂ em ecossistemas e agroecossistemas vêm sendo amplamente pesquisado visando prever a resposta desses sistemas ao novo cenário de condição ambiental.

Alguns indícios já foram observados, como o aumento na frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, alteração no regime de chuvas, secas e outros padrões do tempo, perturbações nas correntes marítimas, derretimento de geleiras, menor quantidade de neve no globo, alteração na composição da água, aquecimento e elevação do nível dos oceanos e mudanças na fisiologia e morfologia de diversos animais e plantas (IPCC, 2014).

Essas mudanças afetam direta e indiretamente as doenças e pragas de plantas. A agricultura depende diretamente dos fatores climáticos, assim mudanças no clima podem afetar o zoneamento agrícola, a produtividade das culturas e as técnicas de manejo. Conseqüentemente, forçando os seres vivos a se adaptarem. Porém, como essas mudanças estão ocorrendo em um curto espaço de tempo, é preciso considerar se as espécies não serão eliminadas antes mesmo de se adaptarem às novas condições (GHINI et al., 2011).

A elevação da concentração do CO₂ provoca efeitos benéficos no desenvolvimento das plantas, por promover alterações no metabolismo, crescimento e processos fisiológicos. Essa mudança pode ocasionar um efeito positivo, negativo ou neutro na ocorrência e severidade de doenças e pragas de plantas e também nas plantas invasoras. O manejo das mesmas também pode ser alterado devido às modificações na microbiota, distribuição geográfica e interação com outros microrganismos que interagem direta ou indiretamente com as plantas (GHINI, 2005). A maioria dos estudos se voltou para o entendimento do metabolismo, crescimento e processos fisiológicos da planta, com poucos resultados sobre os efeitos na fitossanidade (GHINI et al., 2011).

Para melhorar a forma como o efeito do aumento da [CO₂] é avaliado foram desenvolvidos os experimentos do tipo FACE (Free Air Carbon-dioxide Enrichment). Esse tipo de experimento permite o estudo do aumento da concentração de CO₂ em plantas e ecossistemas em condições naturais, em campo, nos quais as plantas se desenvolvem sem grande interferência de outros artefatos, como casas de vegetação e câmaras de crescimento, que alteram, por exemplo, a luminosidade,

umidade e a temperatura (LEAKEY et al., 2004). A maioria dos experimentos desse tipo foi instalada em ecossistemas temperados na América do Norte e Europa (JONES et al., 2014). Os mesmos autores avaliaram a atual extensão geográfica e os limites de conhecimento inerentes, após duas décadas de pesquisas sobre elevadas concentrações de CO₂ em comunidades de plantas, quantificando os limites de captação compensatória de CO₂ nos principais biomas. De acordo com os autores, as localizações destas experiências têm sido espacialmente tendenciosas, visando principalmente os ecossistemas temperados do norte da América e da Europa. Portanto, limita a capacidade da pesquisa de entender como as principais comunidades de plantas do mundo responderão às elevadas concentrações de CO₂. Na América Latina, o primeiro experimento do tipo FACE (ClimapestFACE) foi instalado em agosto de 2011 na Embrapa Meio Ambiente, em Jaguariúna-SP, com a cultura do café e apresentou como foco principal a fitossanidade. A instrumentação foi baseada na tecnologia de rede de sensores sem fio desenvolvida pela Embrapa Instrumentação, em São Carlos, SP. A liberação de CO₂ ocorre por injeção direta e está programada para ocorrer entre 7:00 e 17:00 horas até atingir a concentração de 550 ppm no centro dos anéis (TORRE-NETO et al., 2014).

Experimentos do tipo FACE consistem na liberação de CO₂ em áreas relativamente extensas, permitindo o estudo das respostas de ecossistemas intactos. O aumento da concentração de CO₂ do ar é obtido com a sua contínua liberação no campo. As parcelas experimentais normalmente são grandes para reduzir o efeito de borda, com até 30 m de diâmetro, e até 20 m de altura, como por exemplo, para os experimentos florestais. As distâncias entre as parcelas, tratadas ou não, é grande, para evitar a interferência entre os tratamentos. Subparcelas podem ser distribuídas dentro das parcelas para as diversas avaliações (TORRE-NETO et al., 2014). As principais vantagens desses experimentos são os estudos dos efeitos do aumento da concentração de CO₂ em ecossistemas e agroecossistemas sem alteração das condições do microclima. Também uma intensiva e extensiva amostragem devido ao grande porte das parcelas e o caráter interdisciplinar do trabalho pode ser realizada. No entanto, experimentos desse tipo são extremamente caros e difíceis de serem conduzidos, limitando a sua realização em diversas regiões. Outro aspecto a ser notado é a longa duração dos testes. Segundo Idso e Idso (1994), para culturas anuais, os experimentos para avaliar os

efeitos do enriquecimento com CO₂ no desenvolvimento de plantas apresentam duração média de dois meses e meio. Por isso, as avaliações destrutivas devem ser evitadas. O longo tempo se deve a necessidade de se avaliar os efeitos no ciclo completo da cultura. No caso de culturas perenes esse tempo é ainda maior. A maioria dos estudos realizados em FACE dura anos.

No Brasil, há relatos sobre os impactos das mudanças climáticas no cafeeiro, referentes ao zoneamento agroclimático (ASSAD et al., 2004) e às doenças e pragas (POZZA, 2008; ALVES, 2003; GHINI et al., 2008, GHINI et al., 2015). Diante das ameaças que representam as mudanças climáticas à proteção de plantas, da complexidade dos patossistemas envolvidos e da falta de estudos mais detalhados, tornam-se necessários novos estudos sobre o assunto.

O café é considerado um dos principais produtos agrícolas do Brasil, o qual é o maior produtor e exportador (CONAB, 2016). O cafeeiro está sujeito a incidência de várias doenças e pragas, entre elas, a ferrugem causada pelo fungo biotrófico *Hemileia vastatrix* Berk. & Broome e o bicho-mineiro, *Leucoptera coffeella* Guérin & Méneville, que são, respectivamente, a principal doença e a principal praga da cultura. Sendo assim, o estudo dos impactos do aumento da [CO₂] sobre a cultura do café é indispensável para garantir altas produtividades.

Os danos causados por doenças no cafeeiro podem ser devido à desfolha e redução da área fotossinteticamente ativa, o que normalmente torna necessária a aplicação de fungicidas para o controle (BEDENDO, 2011) e redução na produtividade. No Brasil, a perda de produção em decorrência da doença varia de 30 a 50% (ZAMBOLIM, 2016).

Diante do exposto, o presente trabalho teve por objetivo estudar os efeitos do enriquecimento do ar com CO₂ sobre a cultura do café, no seu desenvolvimento e na incidência da ferrugem do cafeeiro e do bicho-mineiro, em condições de campo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Experimentos do tipo FACE

O aumento da concentração de dióxido de carbono atmosférico é uma das principais mudanças atmosféricas globais documentadas no último meio século (PRENTICE, 2001). Muitas pesquisas foram realizadas para compreender como as plantas e ecossistemas, tanto naturais como manipulados, responderão ao aumento da concentração de CO₂.

Inicialmente muitos trabalhos foram conduzidos em condições controladas, como em experimentos do tipo OTC (Open Top Chamber). As OTCs foram usadas pela primeira vez para estudos de enriquecimento com CO₂ por Rogers et al. (1983). Os pesquisadores usaram uma modificação de um desenho de Heagle et al. (1973) para utilização com gases tóxicos. As OTCs são caixas plásticas com estrutura em alumínio, com uma parte superior aberta, construída de um frame de alumínio coberto por painéis de película plástica do cloreto de polivinil. O ar é puxado para o fundo da câmara, enriquecido com CO₂ e, em seguida, é soprado através da parte superior aberta da câmara. A construção e a manutenção das mesmas é relativamente barata, no entanto, não são adequadas para estudos de vegetação de grande porte (por exemplo, ecossistemas florestais). O controle de temperatura é afetado pelo movimento do ar. Heagle et al. (1979) encontraram menos de 1 °C de diferença entre a temperatura interna e externa, em condições temperadas. A umidade relativa dentro dos topos abertos está diretamente relacionada à taxa de transpiração e é sempre maior do que o ar externo (OLSZYK et al., 1982).

Nesse tipo de experimentos existem sérias limitações potenciais para o seu uso, como por exemplo, alterações na regulação da fotossíntese e da produção (MORGAN et al., 2001), e pode, através de modificação ambiental, produzir uma efeito "que excede o efeito da elevação da [CO₂]". As câmaras também são limitadas em tamanho e podem não acompanhar as árvores e culturas até a maturidade (MCLEOD e LONG, 1999). Outro aspecto a ser analisado é o uso de vasos; plantas em vasos restringem o volume de enraizamento e suprime as respostas das plantas a níveis elevados da [CO₂] (ARP, 1991). De acordo com Ainsworth e Long (2004), esse tipo de experimento mascara o real efeito do aumento de CO₂ do ar.

Para melhorar a forma como o efeito do aumento da concentração de CO₂ é avaliado, foram desenvolvidos os experimentos do tipo FACE (“Free Air Carbon Dioxide Enrichment”) que permitem o estudo do aumento da concentração de CO₂ em plantas e ecossistemas em condições naturais, em campo, nos quais as plantas se desenvolvem sem grande interferência de outros artefatos, como casas de vegetação e câmaras de crescimento, que alteram, por exemplo, a luminosidade e a temperatura (LEAKEY et al., 2004).

Experimentos do tipo FACE consistem na liberação de consideráveis quantidades de CO₂ em áreas relativamente extensas, permitindo o estudo das respostas de ecossistemas intactos.

As liberações de gás ao ar livre para tratar parcelas de grande escala vem sendo realizada desde a década de 1970. O nome Free Air Dioxide Enrichment e a sigla FACE para descrever uma série de experimentos que usaram liberações ao ar livre para estudar os efeitos ecológicos do aumento das concentrações atmosféricas de dióxido de carbono foram propostos por Allen (1992). Os projetos iniciais usavam fontes de liberação em linha e dependiam da velocidade e direção consistentes do vento ou da média de longo prazo para obter um tratamento uniforme. Na década de 1980, os sistemas circulares com controle de realimentação assistido por computador foram projetados para permitir exposições ao ar livre com dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio e ozônio (MOOI e VAN DER ZALM, 1985; HENDREY e MIGLIETTA, 2006).

Pesquisadores do Brookhaven National Laboratory (BNL) estudaram essas tecnologias emergentes e acrescentaram várias melhorias. O BNL incorporou uma segunda coleta de dados com feedback rápido para o hardware de controle usando algoritmos ajustáveis, filtrados por tempo, com componentes de feed-forward adicionais para a velocidade do vento otimizar o desempenho do sistema. A variabilidade espacial e temporal dentro do volume da plotagem foi reduzida pela pré-diluição do gás de tratamento antes de liberá-lo na parcela de tratamento. O número de tubos de ventilação abertos nas extremidades do arco de tratamento foi ajustado para reduzir concentrações elevadas de gás próximo às bordas transversais das parcelas, e foi desenvolvido um padrão de liberação alternativo para fumigação sob condições de vento baixo. Este trabalho resultou em um novo projeto FACE que poderia fornecer exposições uniformes de CO₂ e outros gases para grandes parcelas de campo (HENDREY et al., 1992). A primeira experiência

em grande escala utilizando este desenho foi realizada num campo de algodão em Yazoo City, MS, USA em 1987. Este desenho foi expandido para utilização com algodão e outras culturas de campo em Maricopa, AZ (LEWIN et al., 1994, NAGY et al., 1994), e para estudar níveis elevados de ozônio e CO₂ em espécies florestais (DICKSON et al., 2000).

Os efeitos primários sobre as plantas foram bem documentados e inclui a redução da condutância e transpiração, maior eficiência na utilização da água, taxas mais altas de fotossíntese e maior eficiência na utilização de luz (DRAKE et al., 1997).

Jones et al. (2014) avaliaram a atual extensão geográfica e os limites de conhecimento inerentes, após duas décadas de pesquisas sobre elevadas concentrações de CO₂ em comunidades de plantas, quantificando os limites de captura compensatória de CO₂ nos principais biomas. De acordo com os autores, as localizações destas experiências, de têm sido espacialmente tendenciosas, visando principalmente os ecossistemas temperados do norte da América e da Europa; o que limita a capacidade da pesquisa de entender como as principais comunidades de plantas do mundo responderão às elevadas concentrações de CO₂.

Uma experiência bem sucedida com estudos em FACE foi realizada na Universidade de Duke, USA com início em 1994. A Divisão Blackwood da Duke Forest contém a instalação de transferência e armazenamento de carbono da floresta-atmosfera. Trata-se de quatro parcelas de enriquecimento de CO₂ livre que proporcionam níveis mais elevados de concentração de CO₂ atmosférico e quatro parcelas com CO₂ ambiental. Houve 253 publicações relatando os resultados da experiência (JONES et al., 2014). Outros experimentos tipo FACE em florestas temperadas existem nos Estados Unidos e na Itália. Ainda com espécie florestal um FACE na Austrália estuda os efeitos em eucaliptos.

O método também é utilizado para pesquisa agrícola, como por exemplo, o experimento FACE existente na Universidade de Illinois em Urbana-Champaign para estudar os efeitos do aumento da [CO₂] em plantas de soja. No entanto, as tecnologias FACE ainda não foram implementadas em florestas antigas, ou biomas-chave para sequestro de carbono, como florestas tropicais ou florestas boreais e, a identificação de futuras prioridades de pesquisa para essas regiões é considerada uma preocupação urgente.

Na América Latina, o primeiro experimento do tipo FACE (ClimapestFACE) foi instalado em agosto de 2011 na Embrapa Meio Ambiente, em Jaguariúna-SP, com a cultura do café e apresentou como foco principal a fitossanidade.

2.2 Mudanças climáticas e problemas fitossanitários

A ideia do “Efeito estufa”, surgiu em 1896, e já relacionava mudanças na temperatura do planeta com a queima de combustíveis fósseis. No entanto, esse fenômeno por si só não poderia ser o responsável por tantas mudanças, mas os estudos da época ainda não possibilitavam maiores conhecimentos.

Somente na década de 1950, devido a um aumento acentuado de financiamento do governo, especialmente de agências militares, os cientistas puderam estudar a questão com técnicas mais avançadas. Esses novos estudos mostraram que, ao contrário do que se imaginava, o CO₂ poderia sim contribuir com o aquecimento do planeta. Meticulosas medições, em 1961, demonstraram que o nível do gás, de fato, era crescente, ano a ano (AVILA, 2007).

No início dos anos 70, com o aumento das discussões sobre os problemas ambientais, diversas dúvidas sobre os benefícios das atividades humanas para o planeta passaram a ser questionadas. Curiosidades sobre o clima se transformaram em preocupação. Ao lado do efeito estufa, alguns cientistas apontaram que a atividade humana estava aumentando a quantidade de partículas de poeira e fumaça na atmosfera, o que poderia bloquear a luz solar e esfriar o planeta. Análises meteorológicas do Hemisfério Norte mostravam uma tendência de resfriamento desde 1940. Os meios de comunicação estavam confusos, às vezes prevendo um mundo agradável, por vezes, alertando para a perspectiva de uma nova Idade do Gelo catastrófica. Diversos estudos, primeiro nos EUA e depois em outros países, começaram a alertar que um ou outro tipo de futuras mudanças climáticas poderia representar uma grave ameaça. A única coisa que a maioria dos cientistas concordava era que pouco se conhecia sobre o sistema climático, e que mais pesquisas eram necessárias. Os estudos seguintes passaram a considerar o clima como um sistema complexo, que responde a um grande número de influências. E, que os ecossistemas interagem com o clima e com a atmosfera (WEART, 2008).

Ao final dos anos 1970 foi descoberto que os níveis de outros gases de efeito estufa também estavam aumentando, como o metano, óxido nitroso e ozônio. Alguns destes gases também degradavam a camada de ozônio. Os cientistas alertavam que o mundo deveria tomar medidas ativas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Muitas especulações sobre os efeitos da agricultura e do desmatamento na adição ou subtração de CO₂ do ar passaram a ser recorrentes entre o mundo científico (LANDA et al., 2001).

Em 1988, foi criado o Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC), com o objetivo de estudar e divulgar informações técnicas e socioeconômicas e os impactos relevantes aos riscos à humanidade, visando criar mecanismos para a adaptação e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas globais (AVILA, 2007). O quarto relatório do IPCC foi divulgado em 2007 e alertava para um aumento médio global das temperaturas entre 1,8°C e 4,0°C até 2100. Esse aumento pode ser ainda maior (6,4°C) se a população e a economia continuarem crescendo rapidamente e se for mantido o consumo intenso dos combustíveis fósseis (IPCC, 2007). Entretanto, a estimativa mais confiável aponta um aumento médio de 3°C, assumindo que os níveis de CO₂ se estabilizem em 45% acima da taxa atual (AVILA, 2007). O relatório aponta também, com mais de 90% de confiabilidade, que as atividades humanas são as responsáveis por grande parte do aumento de temperatura observado nos últimos 50 anos (IPCC, 2007).

O impacto da mudança climática sobre doenças de plantas pode se expressar, principalmente, na relação patógeno-hospedeiro-ambiente, na distribuição geográfica e temporal dos problemas fitossanitários e nas modalidades de controle (GHINI et al., 2008).

Na interação entre o hospedeiro suscetível, o patógeno virulento e o ambiente favorável, que estabelece as condições necessárias e indispensáveis para o desenvolvimento de doenças, um determinado fator climático poderá ter efeitos positivos e negativos, em cada um desses fatores ou mesmo neutro (GHINI, 2005).

A relação planta hospedeira e patógeno será afetada de acordo com algumas características inerentes a cada um. Como por exemplo, a natureza da planta hospedeira (anual ou perene; metabolismo do tipo C₃ ou C₄) e do patógeno (veiculado pelo solo ou da parte aérea, biotrófico ou necrotrófico). Os mecanismos de resistência de cultivares melhoradas poderão ser alterados devido às possíveis alterações na fisiologia das plantas. Alguns exemplos dessas alterações são:

aumentos nas taxas de fotossíntese, produção de papilas, acúmulo de silício em locais de penetração dos apressórios, maior acúmulo de carboidratos nas folhas, maior quantidade de cera, camadas adicionais de células da epiderme, aumento da quantidade de fibras, redução da concentração de nutrientes e alteração na produção de enzimas relacionadas com a resistência (MANNING; TIEDMANN, 1995). As alterações fisiológicas causadas pelo aumento da concentração de CO₂ do ar nas plantas incluem mudança no teor de proteínas solúveis e lipídeos da membrana, da estrutura e das propriedades químicas da superfície foliar, como alterações no teor das ceras e flavonoides (EASTBURN et al., 2011).

A resposta das plantas às doenças poderá ser alterada nos cenários climáticos futuros devido ao aumento da temperatura, seja devido à própria composição genética do hospedeiro, sejam por alterações causadas na comunidade de organismos que induzem resistência, bem como na estrutura da planta (GHINI et al., 2008).

No que diz respeito aos patógenos, de modo geral, os mais afetados são os patógenos de plantas que necessitam suportar longos períodos de tempo sem tecido da planta hospedeira disponível, que corresponde a sua fase de sobrevivência. É essa fase que garante a presença de inóculo para o ciclo seguinte da doença. O sucesso da sobrevivência saprofítica de diversos patógenos depende das condições durante a estação de inverno ou mesmo durante o período com ausência de hospedeiros (GHINI, 2005). A temperatura do solo, por exemplo, afeta diversos microrganismos, tanto patogênicos quanto benéficos, como aqueles que conferem supressividade de solos a patógenos. Os fungos micorrízicos, os microrganismos endofíticos e os fixadores de nitrogênio também poderão sofrer os efeitos da mudança climática, o que pode acarretar alterações na severidade de doenças (GHINI, 2005).

Segundo Pritchard (2011), vários estudos são necessários para desenvolver uma compreensão mais holística dos efeitos da mudança climática sobre os processos subterrâneos, visto que o aquecimento do solo associado à elevação de CO₂ atmosférico pode influenciar organismos do solo tanto direta quanto indiretamente. A entrada de carbono no solo poderá ser alterada qualitativa e quantitativamente, podendo ocasionar mudanças no crescimento, na estrutura e na fisiologia das plantas. De acordo com o autor, por um lado, a atmosfera com elevada concentração de CO₂ normalmente estimula o fluxo de carbono orgânico no sistema

do solo, aumenta a produção de raiz e exsudação, mas, por outro lado, diminui a qualidade da serapilheira. Além da entrada de C, há a necessidade de considerar os teores de N e P existentes no solo.

Com o aquecimento global, Brasier (1996) previu que a ocorrência de *Phytophthora cinnamomie* a sobrevivência do patógeno em carvalho (*Quercus* spp.) vão aumentar, assim como a gama de plantas hospedeiras. De acordo com o autor, poderá haver aumento da atividade patogênica e das áreas contaminadas. O aumento da importância da doença em virtude da mudança climática está relacionado com 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. Também trabalhando com o patossistema carvalho x *Phytophthora* e utilizando um modelo que relaciona a temperatura do floema e a probabilidade de infecção de árvores durante o inverno, Bergot et al. (2004) simularam os impactos potenciais da mudança climática sobre a disseminação de *P.cinnamomi* em carvalho. O modelo simula o impacto da temperatura na sobrevivência de *P. cinnamomi* no interior da casca de árvores infectadas. Esta sobrevivência por hibernação é considerada um pré-requisito para a capacidade do agente patogênico em causar um cancro perene em troncos de carvalho. Os autores concluíram que haverá um aumento na taxa anual de sobrevivência do patógeno, resultando em maior disseminação da doença devido a uma tendência de aquecimento de aproximadamente 1,8°C para a temperatura média durante o período de inverno.

Assad et al. (2004), a partir das indicações do segundo relatório do IPCC, simularam e avaliaram os impactos do aumento na temperatura média do ar de 1°C, 3°C e 5,8°C e um incremento de 15% na precipitação pluvial que teriam na potencialidade da cafeicultura brasileira. Os resultados indicaram uma redução de área apta para a cultura superior a 95% em Goiás, Minas Gerais e São Paulo, e de 75% no Paraná, no caso de um aumento na temperatura de 5,8°C. No entanto, os autores ressaltam que esses resultados são válidos somente se as atuais características genéticas e fisiológicas das cultivares de café arábica utilizadas no Brasil, que têm como limite de tolerância temperaturas médias anuais entre 18°C e 23°C, sejam mantidas.

Rezácová et al. (2005), avaliando os efeitos da mudança climática sobre fungos saprófitas, observaram que *Clonostachys rosea*, um agente de controle biológico de

Botrytis outros patógenos, e *Metarhizium anisopliae*, entomopatógeno usado no controle de insetos-praga, estavam mais associados com a cultura do trevo em ambiente com alta concentração de CO₂. De acordo com os autores, a abundância dessas espécies de fungos pode indicar aumento da supressividade do solo a fungos fitopatogênicos e outras pragas.

Bradshaw e Holzapfel (2006) afirmaram que o aquecimento climático é responsável por alterações nas populações quanto aos ciclos de vida, ou seja, desenvolvimento, reprodução, dormência e migração. Provavelmente, os microrganismos com ciclos de vida curtos e grandes populações se adaptarão rapidamente. Entretanto, a forma que será a nova estrutura e funcionamento das interações entre hospedeiro-patógeno-agentes de biocontrole-ambiente não é conhecida.

No tocante à distribuição geográfica, a mudança climática afetará diretamente os microrganismos fitopatogênicos na sua ocorrência, dispersão de propágulos e sobrevivência (GHINI et al., 2011). O aumento da umidade pode favorecer a produção de esporos; por outro lado, condições de baixa umidade podem favorecer doenças como os oídios. A dispersão de propágulos pode ser afetada pelo aumento da precipitação pluviométrica. Os ventos também exercem importante papel na disseminação de propágulos, tanto à curtas como à longas distâncias. Fatores relacionados à turbulência do ar, intensidade e direção dos ventos podem influenciar a liberação, o transporte e a deposição do inóculo (BROWN; HOVMOLLER, 2002).

O zoneamento agroclimático da planta hospedeira e a forma que os patógenos e outros microrganismos relacionados com o processo de doença poderão ser alterados. Assim, por exemplo, se a planta hospedeira migrar para novas áreas em determinadas regiões, novas doenças poderão surgir e outras poderão perder a importância econômica (GHINI, 2005; GHINI et al., 2011).

Ghini et al. (2007), por meio da elaboração de mapas de distribuição de doença, analisaram o risco da mudança climática sobre a sigatoka-negra da bananeira, causada por *Mycosphaerella fijiensis*. Os autores concluíram que haverá redução da área favorável à doença no Brasil. No entanto, segundo os autores, extensas áreas ainda continuarão favoráveis. Ghini et al. (2008), utilizando o mesmo banco de dados climáticos usado por Ghini et al. (2007), avaliaram os impactos potenciais da mudança climática sobre a distribuição espacial de nematoides (raças 1 e 2 de *Meloidogyne incognita*) e do bicho-mineiro (*Leucoptera coffeella*) da cultura de café.

Os resultados indicaram que poderá haver aumento na infestação, tanto do nematoide quanto da praga, pelo maior número de gerações por mês quando se compara com a normal climatológica de 1961-1990.

A mudança climática também afetará outros organismos que interagem com o patógeno e a planta hospedeira. Doenças que requerem insetos ou outros vetores poderão apresentar uma nova distribuição geográfica ou temporal, resultado da múltipla interação ambiente-planta-patógeno-vetor. A área de ocorrência de certas doenças poderá aumentar com o aumento na temperatura ou incidência de secas, pois, o vetor poderá atuar em regiões onde não atuava e, onde o patógeno e as plantas já estão presentes. No caso das viroses que possuem insetos vetores toda alteração climática que favoreça ao aumento da população de insetos vetores em uma região propiciará uma maior chance de transmissão de viroses (GHINI et al., 2011).

De acordo com Barbosa e Paguio (1982), alterações climáticas que favoreçam o aumento da população de afídeos deverão implicar em aumento na incidência do mosaico do mamoeiro que é causado pelo vírus da mancha anelar do mamoeiro (Papaya ringspot virus, PRSV-p). A temperatura ambiente é o principal fator que afeta o ciclo de vida de afídeos, como relatado para a espécie *Aphis gossypii* em crisântemo, que teve seu período ninfal reduzido de 13,5 dias a 15 °C para 5 dias a 30 °C (SOGLIA et al., 2002). No caso da meleira, doença do mamoeiro causada por um vírus que é disseminado por mosca-branca (*Bemisia tabaci*, biótipo B) (VIDAL et al., 2005), a taxa de desenvolvimento da praga está relacionada com a temperatura (BUTLER et al., 1983). De acordo Gerling (1990), temperaturas mais altas favorecem uma maior longevidade do adulto, aumentando a taxa de reprodução (maior número de ovos com menor período de incubação) e redução no ciclo de vida. O desenvolvimento mínimo e máximo da mosca branca se dá entre 11 °C e 33 °C, com uma taxa máxima de reprodução a 28 °C. Diante do cenário proposto por Ghini et al. (2011), que prevê um aumento na temperatura média brasileira, espera-se que o clima futuro seja mais favorável à reprodução da mosca-branca.

Contudo ainda são poucos os casos comprovados de alteração na ocorrência de problemas fitossanitários em decorrência da mudança climática. O principal motivo para isso é a ausência de séries históricas de problemas fitossanitários e a necessidade de registro de mudança na ocorrência de pragas ou doenças por um período relativamente longo e que deve ter correlação com alguma variável climática

alterada em decorrência da mudança climática. Além disso, outros fatores como tratamentos culturais, nutrição das plantas, cultivares utilizadas, entre outros podem causar flutuações nas populações de patógenos e pragas dificultando a correlação entre mudança climática e problemas fitossanitários.

Em estudos sobre *Dothistroma septosporum*, agente causal da queima-das-acículas em *Pinus contorta* var. *latifolia* nas florestas de British Columbia, Canadá, Woods et al. (2005) relataram que a epidemia da doença coincidiu com o aumento da frequência de chuvas de verão na região. A doença foi relatada pela primeira vez no início dos anos 1960, sendo que entre 1984 e 1986 foram observadas árvores com sintomas da queima-das-acículas em 10 ha. Os autores avaliaram posteriormente uma área de 40.898 ha e observaram que 37.664 ha apresentavam plantas infectadas, com árvores mortas em 2.741 ha, comprovando o efeito da mudança climática sobre a doença.

De acordo com Kurz et al. (2008), o aumento de emissões de gases de efeito estufa estão ocorrendo devido à redução da floresta, o que está diretamente relacionado com epidemias do besouro *Dendroctonus ponderosae*, causadas por alterações de precipitação pluviométrica e aumento da temperatura. O parasitismo que ocorre nas árvores acaba levando-as à morte e à decomposição, o que por consequência, libera carbono para a atmosfera. A área favorável ao desenvolvimento da praga aumentou com o aumento da temperatura e redução das chuvas provocadas pela mudança climática. Ainda segundo os autores, as projeções indicam que o crescimento da floresta não será suficiente para compensar a quantidade de emissões.

Dobbertin et al. (2007) relataram, com base em séries climáticas históricas da região e a incidência de declínio nas árvores nos Alpes italianos e suíços, que o declínio do *Pinus sylvestris* está relacionado com a seca que predispôs as árvores ao ataque de besouros e às altas temperaturas da primavera e do verão que favoreceram o desenvolvimento dos insetos, os quais foram responsáveis pela alta taxa de mortalidade das árvores.

Hannukkala et al. (2007), utilizando dados de 69 anos de incidência de *Phytophthora infestans*, agente causal da requeima da batata na Finlândia, associaram epidemias da doença com as mudanças no clima (temperatura e precipitação), presença de inóculo no solo, agressividade das populações do patógeno e ausência de rotação de culturas. Os autores concluíram que o clima se

tornou mais favorável à doença no final da década de 90, devido à maior frequência de chuvas e temperaturas mais elevadas. E, que a falta de rotação de culturas agravou o problema, resultando em um aumento na venda de fungicidas de, aproximadamente, quatro vezes, de 1980 a 2002.

Os impactos negativos da mudança climática poderão ser minimizados devido à plasticidade de alguns sistemas agrícolas e com a adoção de novas cultivares ou outras práticas de manejo. No entanto, a adaptação às mudanças climáticas será mais difícil para os países em desenvolvimento devido ao menor desenvolvimento tecnológico e aos poucos recursos disponíveis para a adoção de medidas.

De acordo com Ghini et al. (2011), devido à complexidade dos processos envolvidos e suas inter-relações, as pesquisas de avaliação dos efeitos de mudança climática sobre doenças e pragas de plantas devem ser realizadas de forma interdisciplinar e, preferencialmente, em programas internacionais.

2.3.Efeito do CO₂sobre doenças e pragas de plantas

O dióxido de carbono (CO₂) é o gás de efeito estufa que tem maior destaque devido ao maior volume de emissões. O CO₂ além de atuar como gás de efeito estufa aumentando a temperatura terrestre, pode causar impactos diretos e indiretos nos agroecossistemas e, em particular, na incidência e severidade de doenças e pragas de plantas. O aumento da concentração de CO₂ pode modificar a estrutura da parte aérea da planta, alterando a fisiologia e a morfologia da planta hospedeira e atuar de maneira isolada no patógeno ou no hospedeiro, como também na sua interação (GHINI, 2005).

Em geral, a capacidade fotossintética, o uso da água, a eficiência no crescimento e a produção são positivamente afetadas pela elevação de CO₂. A maior eficiência fotossintética promove um fornecimento adicional de hidratos de carbono, que resulta em maiores níveis de amido e de açúcar no tecido foliar. O número de estômatos, a abertura estomática e a produção e composição da cera foliar também são afetadas pelo nível de CO₂, sendo que essas mudanças provavelmente alteram a relação patógeno-hospedeiro. Em condições de elevado CO₂ há um maior acúmulo de biomassa, aumento do número de folhas, área foliar, tamanho e densidade da copa, o que pode alterar a temperatura do dossel e unidade do microclima o que pode promover doenças fúngicas (HIBBERD et al.,

1996; CHAKRABORTY et al., 2000; OSSWALD et al. 2006). Embora o aumento da concentração de CO₂ promova benefícios às plantas, as alterações na morfologia e na fisiologia das plantas podem alterar os mecanismos de resistência, favorecendo a ocorrência de insetos-praga e doenças (EASTBURN et al., 2011).

Segundo Manning e Tiedemann (1995), o aumento da concentração de CO₂ promove aumento da taxa fotossintética, que possibilita maior mobilização de recursos para o aumento da resistência da planta à penetração inicial do patógeno, como a produção de papilas e acúmulo de silício nos locais de penetração do apressório.

Paoletti e Leonardo (2001) estudaram os efeitos do aumento da concentração de CO₂ no controle de doenças por meio do uso de variedades resistentes. Os autores estudaram um clone de cipreste, *Cupressus sempervirens*, resistente ao cancro, causado por *Seiridium cardinalee* concluíram que a resistência genética da planta não é alterada mesmo quando a mesma é cultivada em ambiente com elevado teor de CO₂, visto que, condição de aumento de CO₂ pode aumentar o tamanho e a densidade do dossel da planta, resultando em uma biomassa maior e de alta qualidade nutricional, combinada com um microclima com maior umidade relativa do ar, que pode promover doenças de plantas.

Um trabalho com oídio em *Arabidopsis thaliana* (planta herbácea) resultou no aumento do estabelecimento de colônias do patógeno em folhas em ambiente com aumento de CO₂. No entanto, as respostas foram diferentes para cada tipo de hospedeiro: resistente ou suscetível. Em condições de CO₂ elevado, a densidade de estômatos aumentou nos hospedeiros resistentes e diminuiu nos suscetíveis (LAKE; WADE, 2009).

Em experimentos com plantas sadias de cevada, Hibberd et al. (1996) demonstraram que as mesmas quando submetidas a 700 ppm de CO₂ apresentavam maior crescimento. A inoculação de *Erysiphe graminis*, agente causal do oídio, resultou em redução da taxa de crescimento, a qual foi transitória, para plantas cultivadas com 350 ppm de CO₂ e altamente significativa para as cultivadas em 700 ppm de CO₂. Em condição de atmosfera enriquecida com CO₂ houve aumento nas taxas de crescimento e fotossintética da cevada, e redução das mesmas com a inoculação do fitopatógeno.

Chakraborty et al. (2000) realizaram um estudo em *Stylosanthes scabra* sobre o efeito de 350 e 700 ppm de CO₂ sobre a produção e dispersão de esporos de

Colletotrichum gloeosporioides, agente causal da antracnose, doença de grande importância para a Austrália. Em condições controladas e no campo os autores avaliaram os componentes epidemiológicos da doença em duas cultivares, uma parcialmente resistente e outra suscetível. Em ambiente controlado, o aumento da concentração de CO₂ promoveu maior crescimento das plantas, mas, na cultivar resistente, não compensou a redução de crescimento resultante da ocorrência da antracnose. De acordo com os autores, os benefícios da fertilização com CO₂ no crescimento dependem da natureza da resistência da planta. Em condições de aumento da concentração de CO₂ houve atraso no crescimento do tubo germinativo e do apressório; redução na porcentagem de germinação de conídios em folhas e maior período de incubação. Como consequência a severidade da doença foi reduzida, o que segundo os autores pode estar relacionado com a redução da densidade de estômatos nas folhas, uma vez que a penetração do patógeno se dá através dos estômatos. Não houve efeito no período latente e a produção de esporos foi maior. No experimento realizado em campo, o aumento da concentração de CO₂ resultou em aumento da severidade da doença, com maior número de lesões por folha. A umidade relativa na parte aérea da planta foi a variável que apresentou maior correlação com a dispersão e infecção de esporos do patógeno. De acordo com os autores, plantas crescidas em ambiente rico em CO₂ têm maior desenvolvimento, favorecendo a deposição de maior quantidade de conídios e criando um microclima favorável para o rápido desenvolvimento da doença. Os resultados mostram que há diferenças entre os ensaios conduzidos em ambientes controlados e no campo.

O efeito do CO₂ na relação patógeno-hospedeiro tem sido bastante estudado em experimentos do tipo FACE e OTC. Os resultados mostram que as respostas a elevados níveis de CO₂ variam de acordo com o sistema patógeno-hospedeiro. Em alguns casos, há previsões de níveis mais altos de doenças resultantes de plantas que apresentaram maior crescimento, principalmente para patógenos necrotróficos. No entanto, existem alguns exemplos de ambos patógenos necrotróficos e biotróficos mostrando menores níveis da doença, maiores níveis da doença ou nenhum efeito do aumento concentrações de CO₂ sobre a doença (EASTBURN et al., 2011).

Em um experimento de três anos com soja, no SoyFACE em Illinois, foram estudados os níveis de severidade do míldio da soja, causado por *Peronospora*

manshurica. Foram encontrados níveis menores de severidade em plantas cultivadas sob condições de elevada concentração de CO₂ do que nas cultivadas em condição ambiente (EASTBURN et al., 2010). Isso ocorreu porque este patógeno penetra através dos estômatos e há especulações de que elevados níveis de CO₂ podem reduzir o número de estômatos por unidade de área foliar, proporcionando assim menos sítios de infecção, o que de acordo com o estudo varia de acordo com a suscetibilidade da planta hospedeira. Houve algumas mudanças na estrutura das ceras cuticulares nas folhas, as folhas de plantas cultivadas em ambiente de alto CO₂ apresentaram uma estrutura mais suave do que as folhas de outros tratamentos, embora a quantidade de ceras não fosse alterada. Os níveis mais elevados de CO₂ podem ter reduzido o tempo de abertura dos estômatos, o que deve ter reduzido o nível de infecção (EASTBURN et al., 2011). Em outro experimento no SoyFACE, a infecção de *Septoria glycines*, agente causal da mancha marrom em soja foi avaliada quanto ao seu desenvolvimento (EASTBURN et al., 2010). Plantas de soja cultivadas em ambiente com elevada concentração de CO₂ cresceram mais rapidamente do que as de concentração ambiente e apresentavam-se mais densas ao longo da temporada. Como resultado, a doença progrediu mais rapidamente nas parcelas enriquecidas com CO₂ do que nas em condição ambiente. A maior precipitação durante a estação de crescimento de 2006 foi associada com aumento da severidade (EASTBURN et al., 2011).

Em um estudo em FACE com arroz, Kobayashi et al. (2006) avaliaram os efeitos da alta concentração de CO₂ sobre o desenvolvimento de brusone em plantas inoculadas e com infecções naturais. Plantas cultivadas em condições de alta concentração de CO₂ mostraram um aumento da susceptibilidade para a fase de explosão da doença em dois dos três anos de estudo. O número de lesões foi maior em plantas cultivadas em parcelas enriquecidas com CO₂ em comparação às condições ambientais. Por outro lado, a elevação dos níveis CO₂ teve pouco ou nenhum efeito sobre a incidência da doença. Os níveis de incidência de ocorrência natural de queima da bainha foram maiores nas parcelas enriquecidas com CO₂. Plantas nas parcelas enriquecidas com CO₂ tiveram maior número de perfilhos, o que aumentou a probabilidade de propagação da doença.

A podridão da coroa de trigo (*Fusarium pseudograminearum*) foi estudada em um FACE e foi verificado que com elevados níveis de CO₂ houve aumento da biomassa vegetal, bem como aumento da biomassa do patógeno fúngica, aumentando o

escurecimento da haste em algumas situações (MELLOY et al., 2010). Assim, os resultados do estudo demonstraram que concentrações elevadas de CO₂ promoveram maior crescimento de plantas, e que o crescimento levou a aumento dos níveis de doença de patógenos necrotróficos.

Em um sub-bosque no Duke FACE, em Durham, Carolina do Norte, Estados Unidos, McElrone et al. (2005) avaliaram como as condições de elevada concentração de CO₂ afetam *Phyllosticta mínima*, um patógeno foliar. As pesquisas realizadas entre 2002-2004 revelaram que a elevação concentração CO₂ reduziu significativamente a incidência da doença, com menos plantas e folhas infectadas por planta, em três anos consecutivos. Em condições de elevada concentração de CO₂ a severidade da doença também foi reduzida significativamente (menor número de lesões/área) em plantas infectadas em todos os anos. Segundo os autores, a severidade da doença diminuiu em condição de elevada concentração de CO₂ provavelmente devido a alterações químicas na folha e qualidade nutritiva reduzida, como redução do nitrogênio foliar e aumento da razão C: N, fenóis totais e taninos.

Goria et al. (2013), trabalhando em OTC com brusone do arroz, avaliaram o impacto do aumento do CO₂ do ar sobre três cultivares de arroz (Agulha Precoce, Caloro e ShaoTiaoTsao). Os resultados demonstraram que o aumento da concentração de CO₂ não influenciou a massa seca da parte aérea das plantas, de grãos e de panículas; na incidência de fungos nas sementes de arroz; sobre características químicas e microbiológicas da rizosfera e na ocorrência de bactérias diazotróficas endofíticas nas raízes. Para as cultivares Caloro e Agulha Precoce a severidade da doença foi maior e a altura de plantas de arroz da cultivar Agulha Precoce foi maior em ambiente enriquecido com CO₂.

Tozzi e Ghini (2016), trabalhando em experimento com estufas de topo aberto (Open Top Chamber - OTC) com duas cultivares de café, uma resistente, Obatã IAC 1669-20 e outra suscetível, Catuaí Vermelho IAC 144, avaliaram o efeito do aumento da concentração de CO₂ atmosférico sobre o crescimento de plantas e a severidade da ferrugem. Os autores concluíram que, com o aumento da concentração de CO₂ atmosférico, as duas cultivares apresentaram maior área foliar e taxa de crescimento em altura e em diâmetro. Só houve alterações na doença para a cultivar Catuaí Vermelho IAC 144, com diminuição do número de lesões de ferrugem, a área lesionada, o número de lesões esporuladas, a área lesionada esporulada, a

percentagem de área lesionada, a área abaixo da curva de progresso da doença e a incidência de folhas lesionadas por planta.

MacLeod et al. (2014) avaliaram os efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico sobre a ferrugem do eucalipto, a razão C:N, o rendimento e composição química dos óleos essenciais e o crescimento de mudas clonais de dois clones eucalipto em com diferentes níveis de resistência à ferrugem: *Eucalyptus urophylla* x *E. camaldulensis* e híbrido de *E. urophylla*. Os experimentos foram realizados em estufas de topo aberto (OTC) com concentrações médias de CO₂ variáveis ao longo das avaliações. Os autores concluíram que o aumento da concentração de CO₂ atmosférico sobre clones de eucalipto impactou favoravelmente o crescimento das plantas e reduziu a severidade da ferrugem; e não influenciou a produção de óleos essenciais. Em condições de sala climatizada, na qual o ambiente é controlado, a incidência e a severidade da murcha de *Ceratocystis* em clones de eucalipto (*E. urophylla* x *E. camaldulensis* e híbrido de *E. urophylla*) diminuíram com o aumento da concentração de CO₂ e a altura, o diâmetro, o peso da matéria fresca e seca da parte aérea e das raízes também aumentaram (SANTOS et al., 2013).

Silva e Ghini (2014), também trabalhando em condições de sala climatizada, avaliaram os efeitos do aumento da concentração de CO₂ do ar sobre o crescimento de plantas e sobre a mancha foliar causada por *Cylindrocladium candelabrum* em *Eucalyptus urophylla*. Os resultados evidenciam que o aumento da concentração de CO₂ atmosférico afetou favoravelmente o crescimento de plântulas de eucalipto e reduziu a incidência e a severidade da mancha foliar.

Como o desenvolvimento de cada doença depende de condições favoráveis específicas para cada patossistema, o efeito do aumento da concentração de CO₂ atmosférico na incidência e severidade de doenças não pode ser generalizado, podendo ser positivo, negativo ou neutro (GHINI, 2005). Ainda são poucos os trabalhos que estudam os impactos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico sobre os aspectos fitossanitários. A maioria está relacionada com a fisiologia das plantas (RAMALHO et al., 2013; BATISTA, 2015; GHINI et al., 2015; DAMATTA et al., 2016).

Segundo Ramalho et al. (2013) plantas de café cultivadas em ambiente com concentração de 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂ apresentaram maior assimilação de CO₂, um aumento de 34 a 49%, quando comparadas às cultivadas a 380 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂.

Em experimento realizado no ClimapestFACE com $550 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 , houve aumento da taxa fotossintética, aumento da eficiência do uso da água, maior crescimento de plantas e produção de grãos, e maior incidência de bicho-mineiro (*Leucoptera coffeella*). A incidência de ferrugem (*Hemileia vastatrix*) e de Cercosporiose (*Cercospora coffeicola*) foi baixa durante o experimento, com valores máximos de 5,8 e 1%, respectivamente, e não houve efeito significativo dos tratamentos com CO_2 na incidência das doenças. A comunidade fúngica associada à micotoxinas não foi afetada pelos tratamentos (GHINI et al., 2015).

2.4. Cultura do café

Existem inúmeras espécies de café cultivadas no mundo, mas no Brasil apenas duas: o café Arábica (*Coffea arabica*) e Café Robusta (*Coffea canephora*). Cada espécie, por sua vez, tem um grande número de variedades e linhagens. O Arábica produz cafés de melhor qualidade, mais finos e requintados. Tem grãos de cor esverdeada, é cultivado em regiões com altitude acima de 800m e é originário do Oriente, de onde resulta seu nome (Etiópia, Yemem). O robusta é originário da África, é mais rústico e pode ser cultivado ao nível do mar, não possuindo sabores variados e refinados como o arábica, dizendo-se que tem um “sabor típico e único”. Sua acidez é mais baixa e, por ter mais sólidos solúveis, é utilizado intensamente nos cafés solúveis. Seu teor de cafeína é maior do que nos arábicas. O *Coffea arabica* é uma espécie de grande significado econômico para as Américas e demais regiões que a cultivam. Seu produto é de qualidade superior e de maior aceitação em todos os mercados. Aproximadamente 75% da produção mundial exportável de café é desta espécie (TOLEDO & BARBOSA, 1997). É uma espécie tetraplóide com $2n = 44$ cromossomos, auto-fértil, apresentando de 7 a 15% de fecundação cruzada, devido a insetos, ventos e outros agentes. No Brasil, as grandes lavouras formaram-se, a princípio, com sementes do café "Nacional" ou "Comum" (*C. arabica* I. variedade arábica), derivadas em parte da primeira leva de sementes introduzida no país. O *Coffea canephora* é diploide com $2n = 22$ cromossomos e auto-fértil, produzindo o café robusta. Devido a sua ampla distribuição geográfica na África, é capaz de adaptar-se a variadas condições climáticas. Apresenta um desenvolvimento inicial mais lento que o *C. arabica*, mas pode atingir até 5 metros de altura, nas regiões quentes e úmidas. O robusta atualmente faz concorrência aos cafés de maior qualidade, pois embora de qualidade inferior, vem tendo aceitação no

mercado norte-americano e europeu em virtude do seu preço mais reduzido e emprego na indústria de café solúvel (TOLEDO & BARBOSA, 1997).

A cultivar Catuaí Vermelho IAC 144 resultou do cruzamento inicial entre as cultivares Caturra Amarelo e Mundo Novo de *C. arabica*, aliando a rusticidade e a produção do Mundo Novo ao porte reduzido do Caturra (CARVALHO; MÔNACO, 1972). Essa cultivar modificou os sistemas de produção, pois permitiu a utilização de novas áreas para a cafeicultura, aumentou a lucratividade e viabilizou o cultivo em regiões improdutivas, como extensas áreas dos cerrados em São Paulo, Minas Gerais e Goiás. As plantas apresentam porte baixo, o que permite maior densidade de plantio tornando mais fácil a colheita e mais eficientes os tratamentos fitossanitários; internódios curtos; ramificação secundária abundante; frutos vermelhos de maturação média a tardia; sementes de tamanho médio e suscetibilidade à ferrugem.

Os elementos climáticos que influenciam no processo de produção do café são, principalmente, a temperatura do ar e a precipitação, e em menor escala, os ventos, a umidade relativa do ar e a insolação. As temperaturas do ar, tanto altas como baixas, influenciam o crescimento, os processos fisiológicos e a produtividade do cafeeiro. As temperaturas médias anuais do ar mais favoráveis ao cultivo do café arábica estão entre 18 e 22°C, a ideal entre 19 e 21°C, desde que sejam regiões livres ou pouco sujeitas a geadas. As regiões que possuem temperatura média anual inferior a 18°C e superior a 23°C são consideradas inaptas para o café arábica. Se for cultivado em condições de temperaturas médias elevadas, acima de 23°C, apresentará frutos com desenvolvimento e maturação demasiadamente precoces. Esse fato acarretará vários inconvenientes, inclusive a perda da qualidade do produto, pois sua colheita e secagem irão ocorrer precocemente em estação muito quente e úmida. Temperaturas do ar elevadas na fase de florescimento dificultam o pegamento das floradas e provocam a formação de “estrelinhas”, ou seja, de flores abortadas, o que implica na quebra de produção, principalmente nos anos em que a estação seca se mostra mais longa ou atrasada. Temperaturas médias anuais muito baixas, inferiores a 18°C, provocam atrasos demasiados no desenvolvimento dos frutos, cuja maturação pode sobrepor-se ou ultrapassar a florada seguinte, prejudicando a vegetação e a produção do cafeeiro. Quanto às exigências hídricas do cafeeiro, torna-se difícil estabelecer um padrão ótimo anual de precipitação pluvial, pois depende também de outros fatores, principalmente da distribuição

dessas chuvas ao longo do ano. Porém, precipitações anuais acima de 1.200 mm são suficientes para o café (THOMAZIELLO et al., 2000; MATIELLO, 1991). O cafeeiro para vegetar e frutificar, normalmente, necessita encontrar umidade suficiente no solo durante o período vegetativo e frutificação. Na fase de colheita e abotoamento da planta, julho-setembro, a umidade do solo pode reduzir bastante e aproximar-se do ponto de murcha permanente, em alguns casos, sem maiores problemas à cafeicultura (CAMARGO, 1985). O cafeeiro arábica tolera bem e pode ser beneficiado por deficiências hídricas de até 150 mm/ano, principalmente se estas coincidirem com o período de dormência da planta, não se estendendo até a fase de floração e início da frutificação (THOMAZIELLO et al., 2000).

A natureza fisiológica da bienalidade da produção do cafeeiro pode ser explicada pela concorrência entre as funções vegetativas e reprodutivas. Nos anos de grande produção, o crescimento dos frutos absorve a maior parte da atividade metabólica da planta, reduzindo o desenvolvimento vegetativo. Como, no cafeeiro arábica, o fruto se desenvolve nas partes novas dos ramos do ano anterior, há, conseqüentemente, produção menor. O crescimento dos ramos novos depende da quantidade de frutos em desenvolvimento, e o volume de produção é proporcional ao vigor vegetativo, ao número de nós e gemas florais formadas na estação vegetativa anterior (CAMARGO e FAHL, 2001).

Atualmente o Brasil é o maior produtor e exportador de café, sendo responsável por aproximadamente 31% do mercado internacional (INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION, 2016). Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) a safra brasileira de café em 2017 deve ficar entre 43 milhões e 47 milhões de sacas 60 kg do produto beneficiado, somadas a espécie arábica e conilon.

Nos últimos anos, devido ao uso de variedades melhoradas, do controle fitossanitário e dos cuidados na pós-colheita, o café brasileiro melhorou em qualidade, o que agregou valor ao produto final e melhorou as estratégias de produção (PEREIRA, 2006). O aumento na produção melhora a rentabilidade do cafeicultor, a qual, segundo Matiello et al. (2002) está diretamente relacionada com o bom gerenciamento dos custos de produção, sendo necessário eliminar quaisquer fontes de perdas nas lavouras, onde se destaca a ocorrência de doenças.

A ocorrência de uma doença pode estar associada a perdas em larga escala, que vão desde a fase de viveiro até a produção final. Essas perdas variam de

acordo com a intensidade da doença, ou seja, incidência e severidade. As principais doenças que afetam o cafeeiro são a ferrugem, causada por *Hemileia vastatrix*, a cercosporiose causada por *Cercospora coffeicola*, as antracnoses, a seca de ponteiros e a mancha manteigosa, causadas por *Colletotrichum gloeosporioides*; a mancha-de-phoma causada por *Phomas* pp. (POZZA; CARVALHO; CHALFOUN, 2010; ZAMBOLIM; VALE; ZAMBOLIM, 2005). As doenças que atacam o cafeeiro são responsáveis pela redução do desenvolvimento vegetativo das plantas e perdas na produtividade. Em alguns casos quando as condições são favoráveis pode levar à planta a morte. Esses efeitos dependem do agente etiológico, das condições climáticas e da suscetibilidade da planta (SANTINATO et al., 2008). Os principais fatores climáticos envolvidos no processo de ocorrência e desenvolvimento das doenças são temperatura, umidade, vento, luz e radiação solar. Esses fatores podem influenciar na incidência e severidade das doenças.

Dentre as doenças, a ferrugem é considerada a de maior importância seguida pela cercosporiose. Outras doenças fúngicas incluem a mancha de foma, mancha de ascoquita, fusarioses, rizoctoniose e roseliniose; além das bacterioses como mancha aureolada e atrofia dos ramos e viroses como mancha anular (CoRSV). Os principais nematóides são os do gênero *Meloidogyne* (ZAMBOLIM et al., 2005).

Em referência às pragas, o bicho-mineiro é a mais importante, seguido pela broca e outras de importância secundária como cigarras, pulgões, cochonilhas e ácaros (SANTINATO et al., 2008).

2.5. Ferrugem do cafeeiro

Conhecida como ferrugem alaranjada, foi descrita no Ceilão (Sri Lanka) em 1868, por Berkeley, tendo como agente causal o fungo *Hemileia vastatrix* Berk. & Broome, e tem sido o principal problema da cultura do café em todas as regiões do mundo onde ele é cultivado (ZAMBOLIM et al., 2005). A ferrugem é uma doença muito destrutiva no café, causando, desde danos nas árvores, até redução na produção devido à queda prematura das folhas lesionadas (AGRIOS, 2005).

A ferrugem do cafeeiro é uma doença foliar que, inicialmente, causa manchas cloróticas translúcidas na face inferior das folhas. Em poucos dias, essas manchas crescem e apresentam aspecto pulverulento (urediniósporos) e coloração amarelo – alaranjada característica da doença. Na superfície superior da folha, aparecem

manchas cloróticas amareladas, que correspondem aos limites da pústula na face inferior, que posteriormente necrosam (AGRIOS, 2005). Com o tempo, essas lesões aumentam e ocorre necrose na região infectada, a esporulação diminui, com a produção de esporos de coloração mais branca, de menor viabilidade, chegando a cessar.

A formação de pústulas é uma característica distintiva para esta ferrugem, quando comparada com outra espécie, de menor importância, com ocorrência apenas na África Central em variedades de *Coffea arabica*, descrita como *Hemileia coffeicola*, que não as produz (ZAMBOLIM et al., 2005).

Hemileia vastatrix, pertence ao filo Basidiomycota, subfilo Pucciniomycotina, classe Urediniomycetes, ordem Uredinales, gênero *Hemileia* e espécie *H. vastatrix* (Índex fungorum, 2008). As características que distinguem o gênero *Hemileia* dos demais gêneros são: hábito de penetração e esporulação através de estômatos e urediniósporos reniformes equinulados dorsalmente e lisos ventralmente. Os teliosporos são unicelulares, globosos, lisos, que germinam *in situ* (ZAMBOLIM et al., 2005). *H. vastatrix* é um fungo biotrófico, com ciclo de vida incompleto, visto que até o momento não se conhece as fases de pécnio e écio. O fungo produz dois tipos de esporos morfologicamente diferentes e com função distinta. O primeiro, que é mais comum, é chamado urediniósporos e são produzidos em abundância na face inferior das folhas, pela germinação, produz micélio que, depois de se desenvolver nos tecidos da folha do cafeeiro, produz novos urediniósporos. O segundo tipo é o teliosporo, formado eventualmente em lesões velhas, geralmente 7 a 10 semanas depois de formados os primeiros urediniósporos, em geral na parte central das lesões, em tecido necrosado. Por germinação, produzem um pró-micélio de quatro células, uma das quais dará formação ao basidiósporo. Vários pesquisadores tentaram infectar o cafeeiro, e outras plantas, com basidiósporos, obtendo resultados negativos (AGRIOS, 2005; ZAMBOLIM et al., 2005).

Nas lesões em folhas velhas infectadas são produzidos os urediniósporos. Essas lesões constituem a fonte de inóculo da doença. O vento é o principal agente de disseminação da doença a longas distâncias. A curtas distâncias, a chuva tem papel primordial. No entanto, o homem, os animais e os insetos também funcionam como agentes disseminadores quando entram em contato com plantas infectadas. Depois de disseminados, os urediniósporos que caírem na face inferior das folhas germinarão em um período de 3 a 6 horas em condições de alta umidade ou água

livre e temperatura entre 21 e 25°C, na ausência de luz. Sendo 22°C a temperatura ótima, enquanto que abaixo de 15°C e acima de 28,5°C o processo é inibido (ZAMBOLIM et al., 2005).

Em condições de campo o desenvolvimento da doença está fortemente relacionado à ocorrência de chuvas. Praticamente em todos os locais de ocorrência da doença sua incidência aumenta do início para o fim das chuvas, atingindo o máximo no fim da estação. A redução na incidência ocorre durante a estação seca quando há uma grande perda de folhas na planta. Altitudes de 500 m até 850 m favorecem a ferrugem, acima de 1000 m a incidência e severidade da doença decrescem, devido ao abaixamento da temperatura. Com o decréscimo da severidade aumenta o período latente do fungo nos tecidos do cafeeiro.

Os fatores que favorecem o desenvolvimento de epidemias de ferrugem são: alta densidade foliar no início do período chuvoso e condições climáticas favoráveis, principalmente temperatura, umidade relativa e molhamento foliar prolongado (AGRIOS, 2005).

Os principais prejuízos ocasionados pela doença são: redução na área foliar, pela formação de lesões e queda precoce das folhas e a seca dos ramos laterais, provocando gradualmente a deformação das plantas. A desfolha provoca uma redução no florescimento e na frutificação, afetando a produtividade (CARVALHO et al., 2002; GUZZO, 2004). A presença das pústulas nas folhas reduz a área fotossintética da planta, além de uma abscisão prematura dessas folhas, algumas vezes precedida por uma clorose generalizada. A doença pode, ocasionalmente, atacar as extremidades de ramos das brotações novas e os frutos verdes. Quando ocorre a desfolha antes do florescimento, há interferência na formação dos botões florais e frutificação. Se ocorrer durante o desenvolvimento dos frutos acontecerá má formação dos grãos, comprometendo a produção da safra seguinte (BOLDINI, 2001; ZAMBOLIM et al., 2005).

A lavoura torna-se gradativamente antieconômica por causa de seca constante dos ramos, que reduz a longevidade dos cafeeiros (PEREIRA, 2003). Normalmente, a severidade da ferrugem e os prejuízos ocasionados na produção do cafeeiro variam de região para região e de ano para ano, e estão intimamente relacionados com a carga pendente dos cafeeiros e as condições climáticas prevalentes (POZZA, 2004).

2.6 Bicho-mineiro do cafeeiro

A região de origem do bicho-mineiro (*Leucoptera coffeella*) é a África, de onde se disseminou para os demais continentes. O inseto é praga de importância primária no Brasil, América Central, Índia e Quênia (GALLO et al., 1978). É considerado um inseto de metamorfose completa, passando pelas fases de ovo, lagarta, crisálida e mariposa (SOUZA et al., 1998). Trata-se de um inseto monófago, que ataca apenas o cafeeiro e é considerada praga exótica de origem africana (GALLO et al., 1978; REIS & SOUZA, 1986). Seu nome se deve às galerias, também denominadas minas, que constrói entre as epidermes da folha, em consequência à destruição do tecido paliçádico, utilizado pelas lagartas para sua alimentação (SOUZA et al., 1998). Essas galerias construídas pelo inseto possuem bordas irregulares com coloração amarelo-pálido no início e pardas com o centro escuro no final do desenvolvimento do inseto. A coloração escura é devido ao depósito de dejetos pelo inseto (CONCEIÇÃO, 2005).

No Brasil, as primeiras referências ao bicho-mineiro do cafeeiro são de 1860 e 1861. Nessa época, importantes surtos da praga foram observados em cafezais da província do Rio de Janeiro e do município de Juiz de Fora, em Minas Gerais. No entanto, o problema se agravou a partir de 1970 com a introdução do fungo *Hemileia vastatrix*, agente causal da ferrugem alaranjada do cafeeiro. Os ataques passaram a ser mais frequentes e contínuos, com níveis populacionais elevados. O uso intensivo de produtos químicos para o controle da ferrugem pode ter contribuído com esse fato (CONCEIÇÃO et al., 2005).

O inseto apresenta ovos com aspecto gelatinosos e pequenos, que são difíceis de visualizar a olho nu (MATOS, 2001). A postura ocorre normalmente ao entardecer com umidade relativa do ar baixa (KATIYAR; FERRER, 1968) e temperatura média de 27°C (PARRA, 1985), sendo que nessas condições há um aumento do número de ovos por postura. De modo geral, folhas do terceiro e quarto internódios na epiderme superior são preferidas para a ovoposição (WALKER; QUINTANA, 1969).

As lagartas apresentam aparelho bucal do tipo mastigador, três pares de patas torácicas e cinco falsas patas abdominais (SOUZA et al., 1998). As lagartas perfuram a cutícula e a epiderme superior da folha e penetram diretamente no parênquima paliçádico onde se alimentam das células desse tecido até se transformarem em crisálida. Os maiores danos às plantas são causados no período

larval (SOUZA et al., 1998). O desenvolvimento das lagartas é afetado por diversos fatores, como temperatura e umidade relativa do ar. Parra (1975) afirma que a duração da fase larval e a viabilidade das lagartas diminuem com o aumento da temperatura.

As lagartas ao completarem seu desenvolvimento deixam suas galerias por meio de um fio de seda que tecem até as folhas do terço inferior das plantas, que correspondem à “saia” do cafeeiro (GALLO et al., 1978). Espécies do gênero *Leucoptera* que atacam o cafeeiro apresentam casulo em forma de “X” localizados especialmente na superfície abaxial das folhas (MATOS, 2001).

As mariposas, que constituem o adulto do bicho-mineiro, apresentam coloração prateada e uma mancha circular de halo amarelo nas pontas das asas com aproximadamente 6,5 mm de envergadura e hábito crepuscular noturno (SOUZA et al., 1998). A temperatura e a umidade do ar também influenciam a duração e a viabilidade da fase adulta. De acordo com Parra (1975), não existe diferença na longevidade de machos e fêmeas em uma mesma temperatura. Os adultos vivem aproximadamente 12 dias em temperaturas entre 20°C e 27°C, enquanto que, em temperatura de 30°C, a longevidade é de aproximadamente oito dias. É consenso que a duração do ciclo total de *L. coffeella* é fortemente influenciada pela temperatura e possivelmente pela umidade, pois há controvérsias quanto à influência da umidade relativa do ar.

Em condições de campo, a incidência de bicho-mineiro é influenciada principalmente pela temperatura, face de exposição, espaçamento adotado e intensidade de ventos. Normalmente, espaçamentos maiores, que proporcionam maior arejamento às plantas e regiões com alta intensidade de ventos favorecem as infestações da praga (AMARAL, 1953; SOUZA et al., 1998). No entanto, quando as minas são muito grandes ou, em uma única mina, existam lagartas de *L. coffeella* de diferentes idades, o excesso de água pode causar maior mortalidade.

A intensidade de infestação do bicho-mineiro depende da região e de ano para ano. Segundo Almeida (1973), as condições favoráveis ao inseto são altas temperaturas, baixa umidade do ar e distribuição irregular das chuvas, com períodos secos prolongados. Nessas condições as populações evoluem mais rapidamente atingindo altíssimas infestações. No entanto, de acordo Conceição (2005), o clima não é o único fator que interfere no nível de infestação da praga. Outros fatores importantes são as práticas culturais adotadas, o uso inadequado de produtos

agrícolas e a dimensão dos talhões. Na maioria dos cafezais o uso incorreto de inseticidas reduz a eficiência do controle biológico, uma vez que, elimina predadores e parasitoides presentes na lavoura.

A redução da fotossíntese, causada pelo desenvolvimento das lesões e a queda prematura de folhas são os principais fatores que acarretam os prejuízos na produção (CIBES; PEREZ, 1957; MAGALHÃES, 1964; WALKER; QUINTANA, 1969). A intensidade de ataque da praga e o período a que ocorrem estão diretamente relacionadas com perdas de produtividade. De acordo com Nantes e Parra (1977), como a atividade fotossintética é maior em folhas do terceiro e quarto internódios e a oviposição ocorre preferencialmente nessas folhas, os prejuízos são potencializados.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização do experimento ClimapestFACE

O presente estudo foi realizado no experimento ClimapestFACE, localizado no campo experimental da Embrapa Meio Ambiente, em Jaguariúna - SP (latitude 22° 41' S, longitude 47° W, altitude de 570 m). O solo na área experimental é um Latossolo Vermelho distroférico típico. O clima é subtropical úmido, com verões quentes e chuvosos e invernos frios e secos (GHINI et al., 2015).

Para o plantio, o solo foi preparado por meio de aração e gradagem, a adubação foi realizada de acordo com a análise de fertilidade do solo e as mudas foram transplantadas em espaçamento de 3,5 m entre linhas e 0,6 m entre plantas (GHINI et al., 2015). Na adubação de plantio foram aplicados 400 g/m de superfosfato simples (1111 Kg/ha), 50 g/m de KCl (140 Kg/ha) e 100 g/m de Yorin Master (278 Kg/ha). A calagem foi realizada com 400 g/m de calcário dolomítico PRNT 85% (1111 Kg/ha). As mudas de café da espécie *C. arabica* cultivar Catuaí Vermelho IAC 144 foram transplantadas em fevereiro de 2010 em área total de aproximadamente 7ha (35 mil plantas). No campo, 12 parcelas foram instaladas (Figura 1), das quais, seis com injeção de CO₂ e seis sem injeção do gás. Cada parcela foi delimitada por um octógono de perfilados de aço com laterais de 4 m de comprimento com 10 m de diâmetro, espaçados por pelo menos 70 m para evitar contaminação entre as parcelas com e sem injeção do gás. Em fevereiro de 2011, a fim de obter maior uniformidade de plantas, foram retiradas as plantas das linhas internas das parcelas e, novas mudas de café das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144 (porte baixo, internódios curtos e suscetíveis à ferrugem) e Obatã IAC 1669-20 (porte baixo, internódios curtos e resistentes à ferrugem, exigente em nutrição e mais sensível à seca do que a cultivar Catuaí) foram transplantadas. O espaçamento foi de 1,75 m nas linhas localizadas dentro das parcelas e 0,60 m entre plantas da mesma linha, sendo que o Obatã foi cultivado entre as linhas de Catuaí. A injeção do gás iniciou-se em 25 de agosto de 2011.

A fumigação de CO₂ puro foi programada para ocorrer entre 7:00 e 17:00 horas, período de atividade fotossintética mais intensa, e com velocidades de ventos entre 0,2 e 4 m/s, faixa na qual é possível atingir a concentração alvo de 550 ppm de CO₂ no centro da parcela (TORRE-NETO et al., 2014). A injeção de gás foi feita

diariamente em seis parcelas por meio de válvulas instaladas em tubos fixados nos perfilados das parcelas e espaçadas 15 cm e 0,5 m acima do solo, que abriam e fechavam conforme a direção e velocidade dos ventos na região. O gás foi injetado para o lado de fora das parcelas, contrário à direção dos ventos, de modo que, o vento misturasse o CO₂ injetado com o ar atmosférico e o carregasse para dentro das parcelas. O gás só foi injetado durante o dia, período em que as plantas são fotossinteticamente mais ativas. Ao longo do experimento a altura das barras de injeção do gás acompanhou o crescimento das plantas. O registro da concentração de CO₂ dentro das parcelas é feito entre 6:00 e 18:00 horas. O monitoramento e controle do sistema são realizados por uma tecnologia de rede de sensores sem fio que mantém as concentrações nos níveis prescritos. Sensores ambientais (analisadores de gás infravermelho, anemômetros, sensores para a temperatura do ar e do solo, umidade, radiação solar e precipitação) foram adaptados aos módulos ZigBee (TORRE-NETO et al., 2014)(Figura 2). Em cada parcela há uma bateria de chumbo-ácido associada a um painel fotovoltaico que fornece energia aos instrumentos. O controle da fumigação é realizado por um sistema que usa uma interface de adaptador USB-to-ZigBee. O uso de energia solar e instrumentação sem fio para coletar dados e controlar a injeção de CO₂ foi devido à grande incidência de relâmpago ser um problema no Brasil. Esse sistema de instrumentação melhorou a resistência às interferências (GHINI et al., 2015).

O manejo da cultura foi realizado de forma convencional, seguindo-se as recomendações estabelecidas para a região. O controle de pragas e doenças foi realizado com a aplicação de inseticidas e fungicidas (Agrofit, 2012), quando necessário, evitando que seja atingido o nível de dano econômico. As capinas das plantas invasoras nas entrelinhas foram mecanizadas fora das parcelas e manual dentro das parcelas e nas linhas o controle foi realizado com herbicidas. A cultura foi cultivada sem irrigação suplementar. Em 2013 as práticas culturais incluíram fertilização anual (duas toneladas/ha de adubo NPK 20-5-15) em janeiro, fevereiro, outubro e dezembro), aplicações de herbicidas (19 l de glifosato) + 11,8 kg de boro em março, 3,27 l/ha de oxifluorfem em junho; zinco em agosto e setembro e 3,27 kg/ha de oxifluorfen + 1,75 kg/ha de boro em setembro; aplicação de fungicidas (1,3 l/ha de piraclostrobina + epoxiconazol) + zinco em abril e 0,5 l/ha de azoxistrobina + ciproconazol + 1,7 kg/ha de hidróxido de cobre em dezembro e, aplicação do inseticida clorantraniliprole (90 kg/ha) em agosto e outubro). Em 2014, as práticas

culturais incluíram fertilização anual (duas toneladas/ha de adubo NPK 20-5-15 em fevereiro e março; 1,6 ton de NPK 20-5-15/ha e 0,45 ton/ha de NPK 20-5-10 em setembro, outubro e dezembro), aplicação de herbicidas (15 l de glifosato (N-(fosfometil) glicina) em março, 60 l de oxifluorfem em setembro, 0,75 kg de glifosato em novembro e 15,5 l glifosato + 1,75 kg/ha de boro em novembro. Em 2014, não houve aplicação de fungicidas e inseticidas. Em 2015, as práticas culturais incluíram fertilização anual (duas toneladas/ha de adubo NPK 20-5-15 e 74 kg de NPK 20-5-10 em fevereiro, 2,77 toneladas/ha de NPK 20-5-15 em outubro, 2,75 toneladas/ha de NPK 20-5-15 em novembro e 41,5 kg em dezembro); aplicação do fungicida thiamethoxam em janeiro e hidróxido de cobre e 2,4 kg de zinco em agosto e outubro.

A frequência relativa das concentrações de CO₂ obtidas nos anos avaliados (2013, 2014 e 2015), em ambos os tratamentos, encontra-se na Figura 3.

O experimento segue delineamento em blocos casualizados com dois tratamentos (com e sem injeção de CO₂) e seis repetições. Cada bloco é composto por duas parcelas experimentais, uma de cada tratamento.

Figura 1 - Parcela do experimento FACE no campo experimental da Embrapa Meio Ambiente com injeção de CO₂.



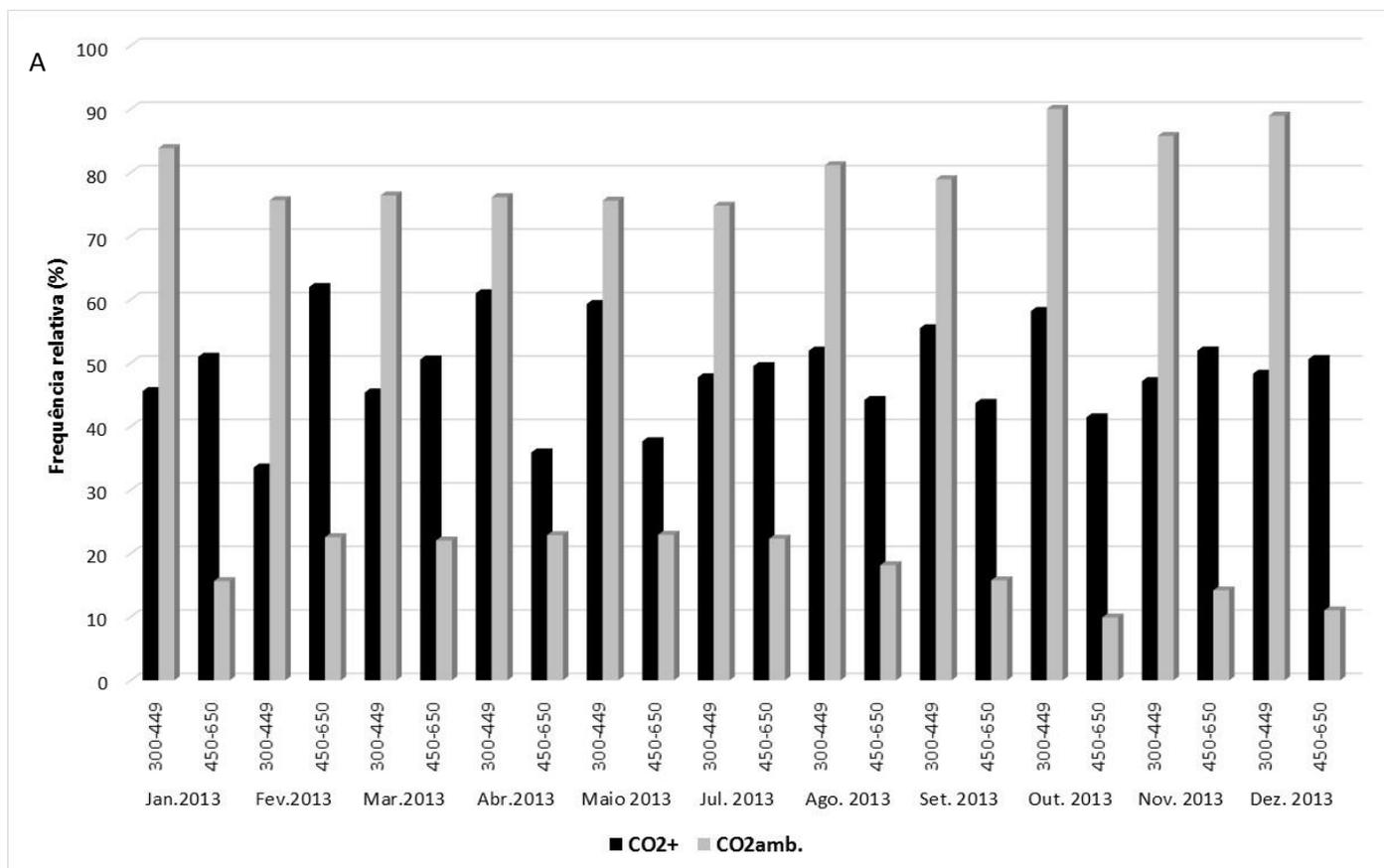
Foto: Regiane Iost

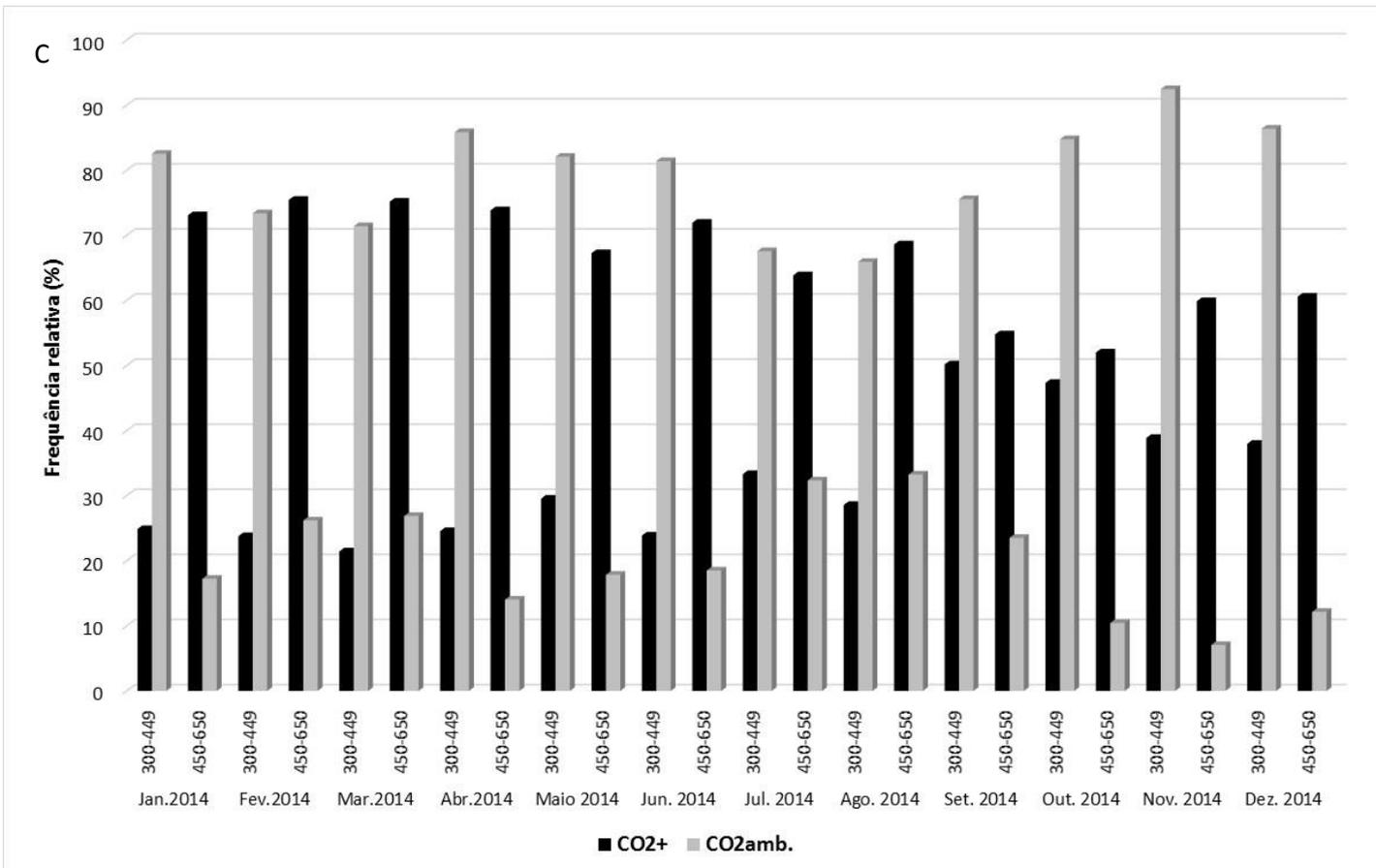
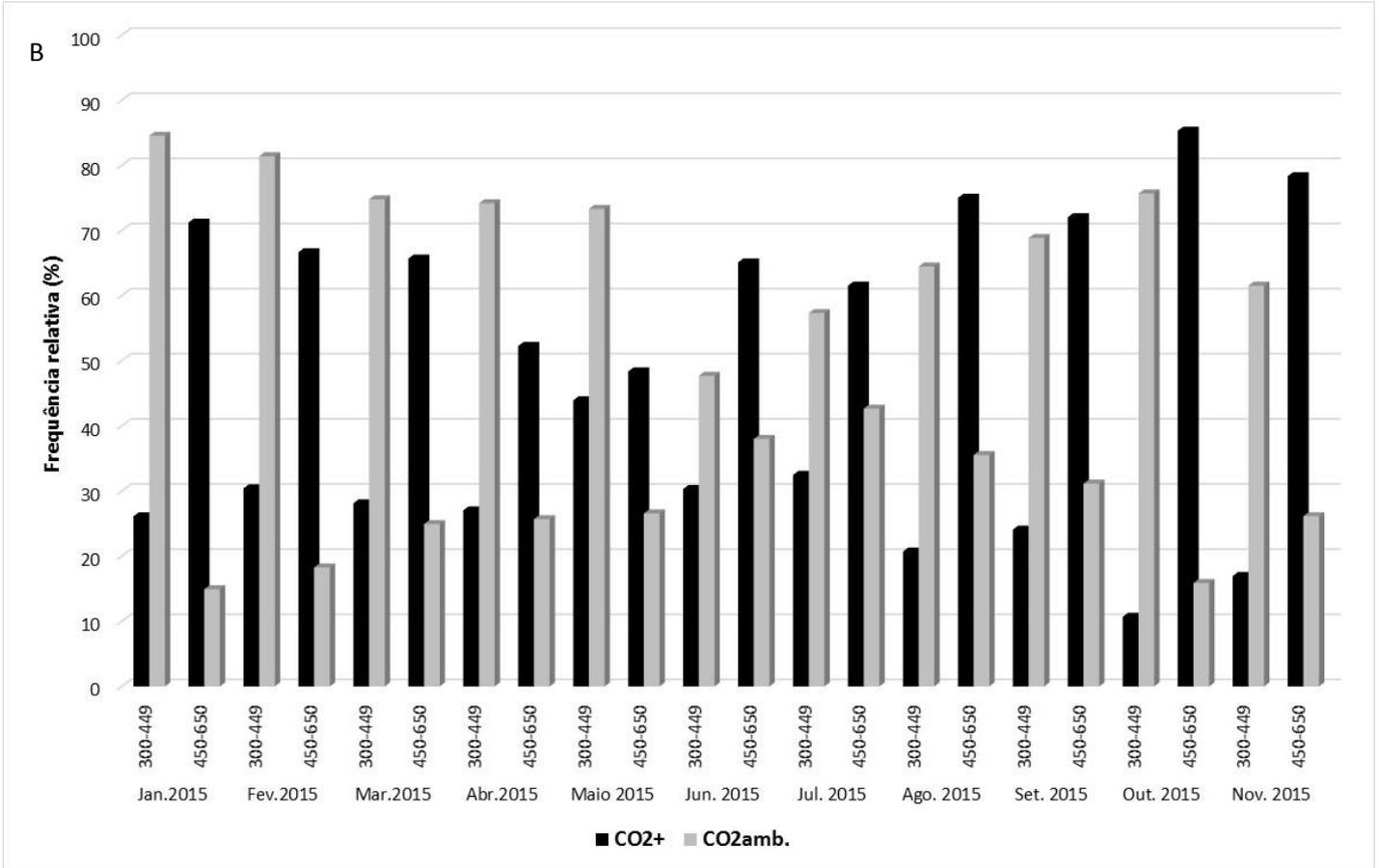
Figura 2 - Estação meteorológica localizada no centro de cada parcela com injeção de CO₂.



Foto: Regiane Iost

Figura 3: Frequência relativa de concentrações de CO₂ nas faixas 360-450 e 450-650 ppm [correspondentes a variação máxima de 20% em relação às concentrações alvo de 400ppm(CO₂ ambiente) e 550 ppm (CO₂+)] observada mensalmente nos anos 2013 (A), 2014 (B) e 2015 (C) no ClimapestFACE, Jaguariúna-SP, Brasil.





3.2. Avaliações

Com o objetivo de avaliar o efeito do enriquecimento do ar com CO₂ sobre o desenvolvimento de plantas de café e a ocorrência de problemas fitossanitários, foram realizadas avaliações em 16 plantas de cada uma das 12 parcelas. As plantas foram escolhidas ao acaso e devidamente marcadas para que as avaliações fossem realizadas sempre nas mesmas plantas (Figura 4). Para a avaliação dos problemas fitossanitários foram marcados ramos no terço médio das plantas com orientação nos pontos cardeais (Norte, Sul, Leste e Oeste). Ao longo das avaliações foram realizadas duas marcações para atender ao terço médio das plantas. As avaliações foram realizadas nos anos de 2013, 2014 e 2015 (Tabela 1).

Figura 4 - Esquema de uma parcela com as marcações das plantas. Os círculos indicam as plantas que foram avaliadas.

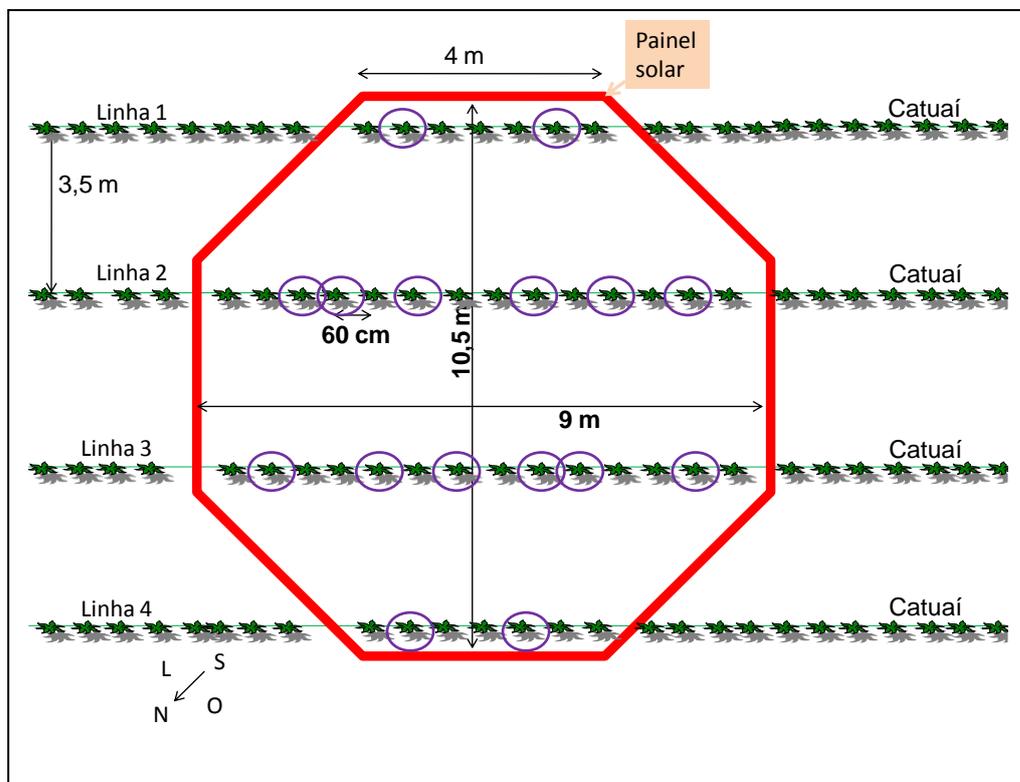


Tabela 1: Cronograma das avaliações realizadas nos anos de 2013, 2014 e 2015.

		2013											
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Crescimento de Plantas	Total de folhas por ramos	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	
	Altura (cm)			X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Diâmetro (mm)			X				X				X	
Problemas Fitossanitários	Incidência Ferrugem	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Incidência Bicho-mineiro	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	
		2014											
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Crescimento de Plantas	Total de folhas por ramos	X				X			X	X	X		
	Altura (cm)	X			X			X			X		
	Diâmetro (mm)			X				X				X	
Problemas Fitossanitários	Incidência Ferrugem	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	-	-
	Incidência Bicho-mineiro	X				X			X			X	
		2015											
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Crescimento de Plantas	Total de folhas por ramos	X			X		X	X	X				
	Altura (cm)	X			X			X			X		
	Diâmetro (mm)			X				X				X	
Problemas Fitossanitários	Incidência Ferrugem	-	-	-	-	-	X	X	X	-	-	-	-

3.2.1. Desenvolvimento do cafeeiro

O desenvolvimento do cafeeiro foi avaliado determinando-se o total de folhas por ramo, a altura de planta e o diâmetro do colo. O total de folhas por ramo foi avaliado em 2013 nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio, junho, julho, setembro, outubro e novembro; em 2014 nos meses de janeiro, maio, setembro e outubro e em 2015 nos meses de janeiro, abril, junho, julho e agosto por meio da contagem do número total de folhas por ramo em cada orientação.

A altura foi avaliada em 2013 nos meses de março, abril, maio, junho, julho, agosto, setembro, outubro e novembro; em 2014 nos meses de janeiro, abril, julho e outubro e em 2015 nos meses de janeiro, abril, julho e outubro com o auxílio de um metro rígido. A medida foi realizada a partir da superfície do solo até o ápice da haste principal. O diâmetro do colo das plantas foi determinado a 5 cm do solo com paquímetro digital e foi avaliado em 2013 nos meses de março, julho e novembro; em 2014 nos meses de março, julho e novembro e em 2015 nos meses de março, julho e outubro. A partir dos dados de altura foi calculada a taxa de crescimento da planta e a área abaixo da curva de progresso da altura (AACPA). Com esses dados e com os da altura foram realizadas análises de variância e a comparação de médias por meio do teste de Tukey a 5% de probabilidade. As análises foram realizadas com auxílio do programa estatístico R Studio. Os dados de diâmetro e número de folhas foram analisados de forma semelhante aos de altura.

3.2.2. Ferrugem do cafeeiro

A doença foi avaliada com base na incidência por ramo em cada orientação. A incidência foi mensurada por meio da porcentagem do número de folhas lesionadas. A doença foi avaliada nos meses de agosto, setembro e outubro de 2014 e nos meses de junho e julho de 2015. A partir dos dados obtidos foi calculada a área abaixo da curva de progresso da doença e realizada a comparação de médias por meio do teste de Tukey a 5% de probabilidade, pelo programa estatístico R Studio.

3.2.3. Bicho-mineiro do cafeeiro

A ocorrência do bicho-mineiro foi avaliada com base na incidência por ramo em cada orientação por meio da porcentagem do número de folhas minadas. Em 2013 as avaliações foram realizadas nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio, junho, julho, setembro, outubro e novembro e em 2014 nos meses de janeiro, maio, agosto e novembro. A partir dos dados obtidos foi calculada a área abaixo da curva de progresso da incidência do bicho mineiro e realizada a comparação de médias por meio do teste de Tukey a 5% de probabilidade, pelo programa estatístico R Studio.

4. RESULTADOSE DISCUSSÃO

4.1. Efeito do enriquecimento do ar com CO₂sobre o desenvolvimento de plantas de café

As plantas cultivadas em condições de aumento da concentração de CO₂ apresentaram maior altura e maior diâmetro do colo ao longo de todas as avaliações (Figuras 5, 6, 7), diferindo estatisticamente em, praticamente, todas as datas avaliadas. Na Figura 5 pode ser verificada que somente nas antepenúltima e penúltima avaliação a altura foi estatisticamente semelhante entre os tratamentos. Para o diâmetro, exceto a primeira avaliação em que não foi verificada diferença estatística, em todas as demais o enriquecimento com CO₂ apresentou resultados superiores ao sem o enriquecimento (Figura 7). Na Figura 7 observa-se que o total da área abaixo da curva do progresso da altura das plantas que receberam CO₂ foi estatisticamente superior às daquelas que não receberam o enriquecimento com o gás.

Figura 5: Área abaixo da curva de progresso da altura (AACPA) de plantas de café da variedade Catuaí Vermelho IAC 144 desenvolvidas em condições com e sem enriquecimento de CO₂ em experimento tipo FACE (ClimapestFACE) ao longo do período avaliado.

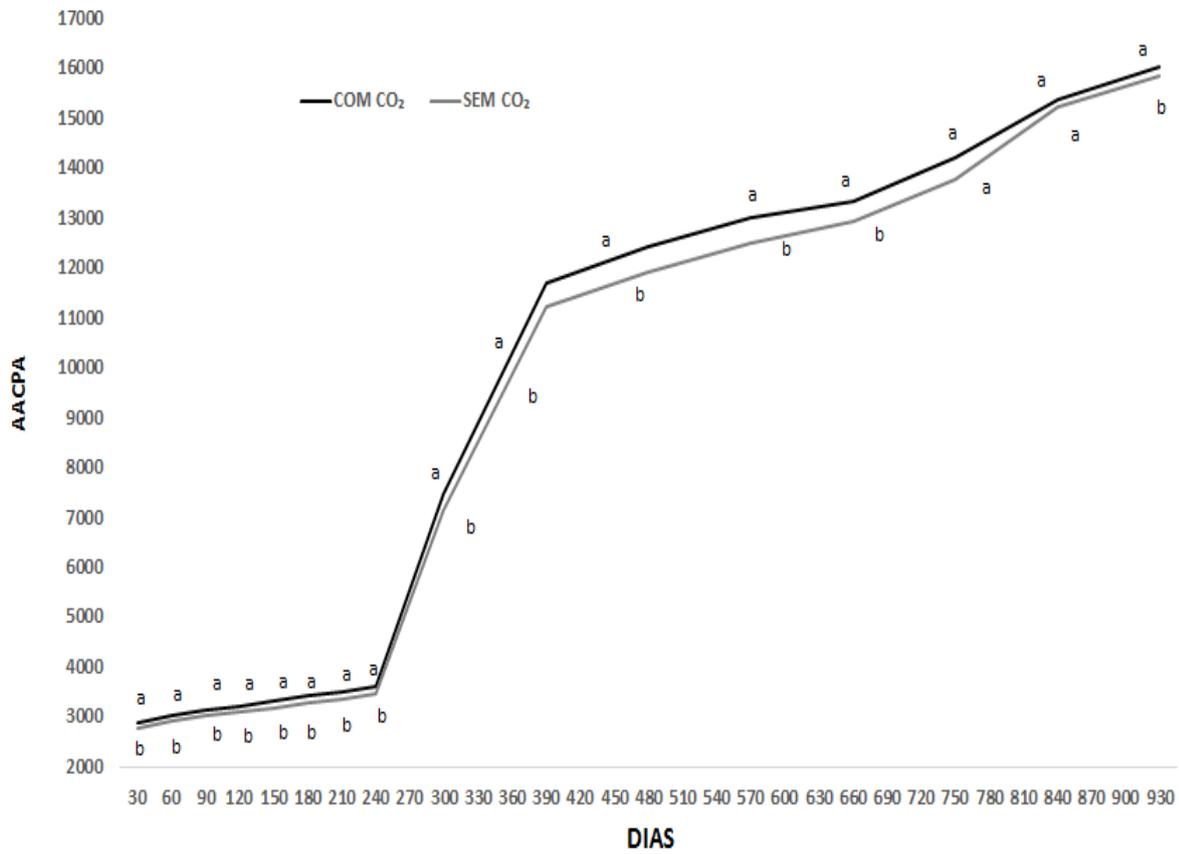


Figura 6: Área abaixo da curva de progresso da altura (AACPA) (total) de plantas de café da variedade Catuaí Vermelho IAC 144 desenvolvidas em condições com e sem enriquecimento de CO₂ em experimento tipo FACE (ClimapestFACE) ao longo do período avaliado.

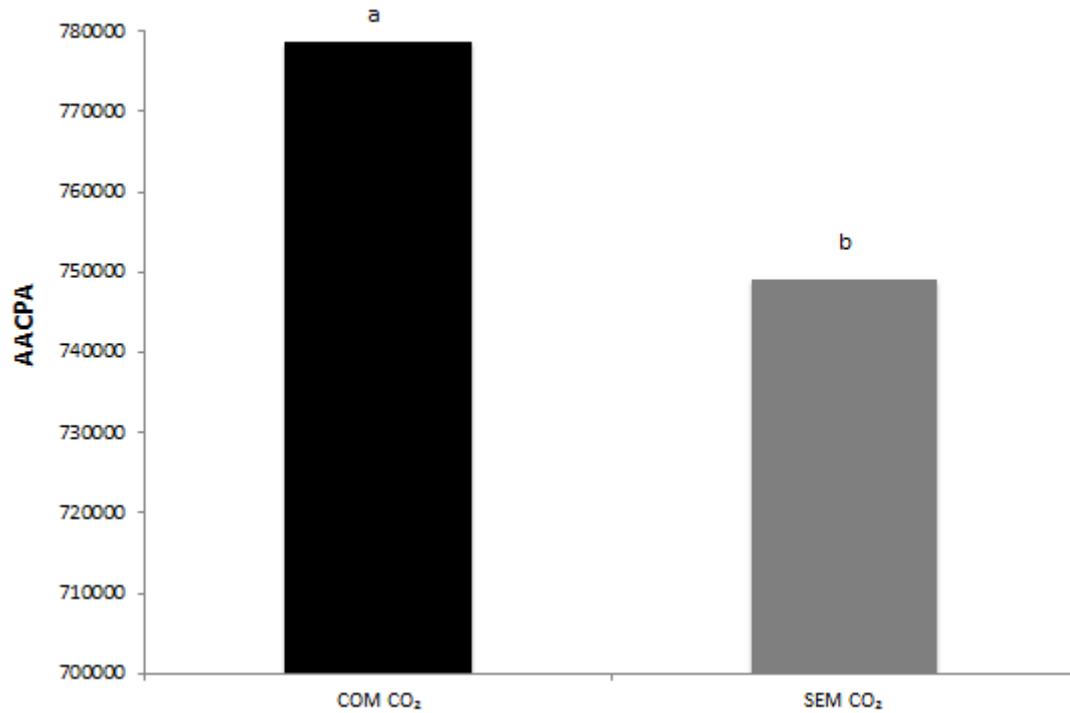


Figura 7: Diâmetro médio do colo das plantas (mm) de plantas de café da variedade Catuaí Vermelho IAC 144 desenvolvidas em condições com e sem enriquecimento de CO₂ em experimento tipo FACE (ClimapestFACE) ao longo do período avaliado.

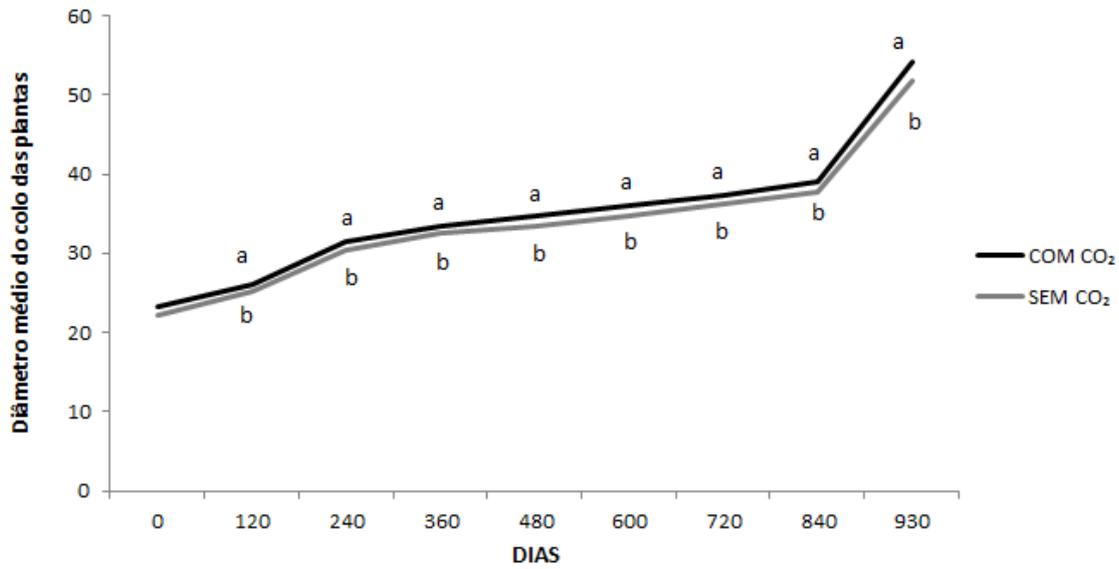
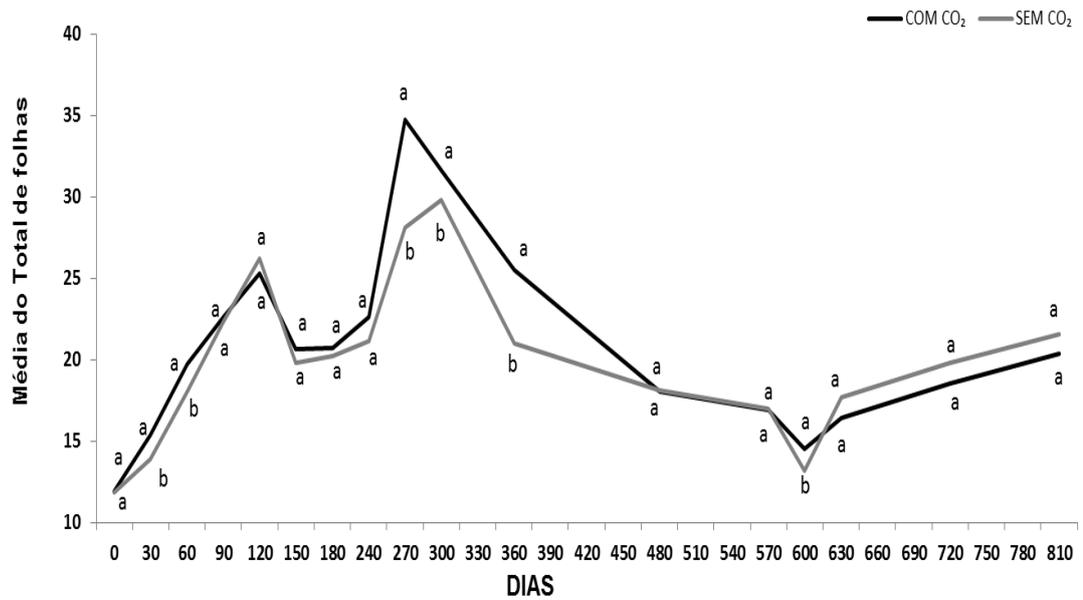


Figura 8: Número de folhas por planta de café da variedade Catuaí Vermelho IAC 144 desenvolvidas em condições com e sem enriquecimento de CO₂ em experimento tipo FACE (ClimapestFACE) ao longo do período avaliado.



O número de folhas por planta apresentou variação ao longo do período avaliado. Em alguns meses o número de folhas foi maior em condições de aumento da concentração de CO₂ e em outros ocorreu justamente o contrário (Figura 8), não demonstrando uma tendência tão clara quanto aos dados de altura e diâmetro das plantas. O número de folhas é muito dependente do momento da avaliação, pois como a colheita foi manual e por derriça há uma grande perda de folhas. Associado a isso, o cafeeiro perde folhas devido à incidência do bicho mineiro e da ferrugem do cafeeiro. Por outro lado, a altura e o diâmetro não sofrem a interferência da colheita como o número de folhas, conseqüentemente são indicadores mais adequados para a avaliação do desenvolvimento nesse ambiente com enriquecimento do ar com CO₂.

Para a maioria das espécies de plantas, o aumento da concentração de CO₂ do ar revela uma elevação da fotossíntese (AMTHOR, 1995) e uma maior eficiência no uso da água, o que pode resultar em incremento no crescimento das plantas (ROGERS; DAHLMAN, 1993). De acordo com Malhiet al. (2002), a duplicação da concentração de CO₂ na atmosfera favorece o crescimento de árvores entre 10% e 70% e aumenta a produção de biomassa. No presente estudo, em média as plantas de café que receberam CO₂ apresentaram a altura e o diâmetro 4% maiores do que as que não receberam.

Outros autores também observaram relação entre o estímulo à fotossíntese e o maior desenvolvimento de plantas de café. Ramalho et al. (2013) observaram maior assimilação de CO₂ pelas plantas de café em ambiente que continha 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂ quando comparadas com plantas cultivadas a 380 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂. As plantas assimilaram cerca de 34 a 49% mais CO₂. GHINI et al. (2015), em experimento realizado no ClimapestFACE, observaram que em condições de 550 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂ houve aumento da taxa fotossintética, aumento na eficiência do uso da água, maior crescimento de plantas e produção de grãos de café do em condições ambientes. Tozzi e Ghini (2016), trabalhando em experimento com estufas de topo aberto (Open Top Chamber - OTC) com duas cultivares, uma resistente, Obatã IAC 1669-20 e outra suscetível, Catuaí Vermelho IAC 144, avaliaram o efeito do aumento da concentração de CO₂ atmosférico sobre o crescimento de plantas e a severidade da ferrugem. Os autores concluíram que, com o aumento da concentração de CO₂ atmosférico, as duas cultivares apresentaram maior área foliar e taxa de crescimento em altura e em diâmetro. Assim, os dados

obtidos no presente estudo, em relação ao desenvolvimento das plantas, apresentam a mesma tendência dos relatados anteriormente.

Em geral, a capacidade fotossintética, o uso da água, a eficiência no crescimento e a produção são positivamente afetadas pela elevação de CO₂. A maior eficiência fotossintética promove um fornecimento adicional de hidratos de carbono, que resulta em maiores níveis de amido e de açúcar no tecido foliar. O número de estômatos, a abertura estomática e a produção e composição da cera foliar também são afetadas pelo nível de CO₂, sendo que essas mudanças provavelmente alteram a relação patógeno-hospedeiro. Em condições de elevado CO₂ há um maior acúmulo de biomassa, aumento do número de folhas, área foliar, tamanho e densidade da copa, o que pode alterar a temperatura do dossel e unidade do microclima o que pode promover doenças fúngicas (HIBBERD et al., 1996; CHAKRABORTY et al., 2000; OSSWALD et al. 2006). Embora o aumento da concentração de CO₂ promova benefícios às plantas, as alterações na morfologia e na fisiologia das plantas podem alterar os mecanismos de resistência, favorecendo a ocorrência de insetos-praga e doenças (EASTBURN et al., 2011).

Segundo Manning e Tiedemann (1995), o aumento da concentração de CO₂ promove aumento da taxa fotossintética, que possibilita maior mobilização de recursos para o aumento da resistência da planta à penetração inicial do patógeno, como a produção de papilas e acúmulo de silício nos locais de penetração do apressório.

4.2. Efeito do enriquecimento do ar com CO₂ sobre a ferrugem do cafeeiro

A área abaixo da curva de progresso da incidência da ferrugem foi estatisticamente semelhante entre os tratamentos com e sem enriquecimento do ar com CO₂ nos anos de 2014 e 2015 (Figuras 9 e 10). Esses resultados foram semelhantes aos verificados por Ghini et al. (2015) nos anos agrícolas anteriores na mesma área experimental, onde não verificaram efeito do aumento da concentração de CO₂ sobre a incidência da ferrugem e da cercosporiose do cafeeiro.

Por outro lado, Tozzi e Ghini (2016), trabalhando em experimento com estufas de topo aberto (Open Top Chamber - OTC), com duas cultivares de café (uma resistente à ferrugem, Obatã IAC 1669-20 e outra suscetível, Catuaí Vermelho IAC 144), verificaram para a cultivar Catuaí Vermelho IAC 144, diminuição do número de

lesões de ferrugem, a área lesionada, o número de lesões esporuladas, a área lesionada esporulada, a percentagem de área lesionada, a área abaixo da curva de progresso da doença e a incidência de folhas lesionadas por planta no tratamento com enriquecimento de CO₂. Entretanto, há necessidade de se considerar que nesse experimento os autores realizaram a inoculação do patógeno, enquanto que no presente estudo a inoculação ocorreu de forma natural. Outro fator importante a ser considerado é que a concentração de CO₂ utilizada por Tozi e Ghini (2016) foi superior à do presente estudo. Assim, pode ser que nessas condições os efeitos tenham sido mais pronunciados.

Schummann e D' Arcy (2006) mostraram que fungos biotróficos, como o agente etiológico da ferrugem, alimentam-se de células vivas do hospedeiro, o que leva a um extenso período de interação fisiológica com o hospedeiro. Um exemplo simples do efeito do aumento da concentração de CO₂ na fisiologia da planta é o aumento da quantidade de cera epicuticular, que pode refletir no estabelecimento do patógeno na planta. Entretanto, no presente estudo não houve efeito do enriquecimento com o gás sobre a incidência da doença. Por outro lado, Lake e Wade (2009) trabalhando com um patógeno biotrófico, o oídio em *Arabidopsis thaliana*, verificaram aumento do estabelecimento de colônias do patógeno em folhas em ambiente com aumento de CO₂. No entanto, as respostas foram diferentes para cada tipo de hospedeiro, resistente ou suscetível, pois em condições de CO₂ elevado, a densidade de estômatos aumentou nos hospedeiros resistentes e diminuiu nos suscetíveis.

O impacto das doenças nas culturas pode ser alterado com a mudança climática, uma vez que, as taxas de desenvolvimento e sobrevivência do patógeno e a susceptibilidade do hospedeiro também se alteram (ELAD e PERTOT, 2014). Esses autores ainda evidenciam que os efeitos dessas mudanças serão diferentes para cada patossistema e região geográfica.

Figura 9: Área abaixo da curva de progresso da incidência de ferrugem do cafeeiro (AACPIF) em cafeeiros da variedade Catuaí Vermelho IAC 144 desenvolvidos em condições com e sem enriquecimento de CO₂ em experimento tipo FACE (ClimapestFACE) em 2014.

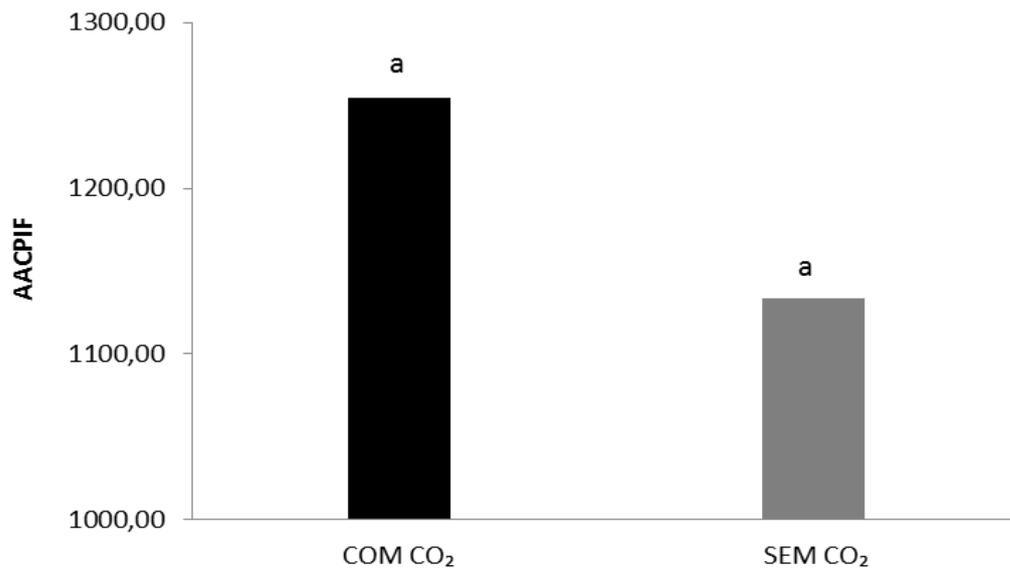
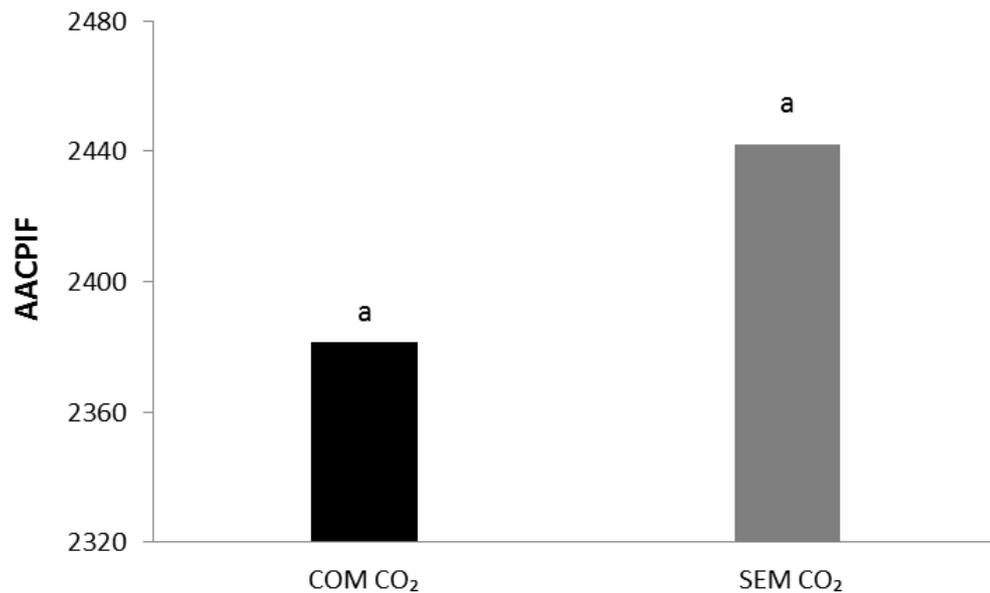


Figura 10: Área abaixo da curva de progresso da incidência de ferrugem do cafeeiro (AACPIF) em cafeeiros da variedade Catuaí Vermelho IAC 144 desenvolvidos em condições com e sem enriquecimento de CO₂ em experimento tipo FACE (ClimapestFACE) em 2015.



Um dos possíveis efeitos do CO₂ é na fisiologia da planta, o que pode causar alterações na colonização de um patógeno biotrófico nos tecidos do hospedeiro (EASTBURN et al., 2011). Em algumas interações patógeno x hospedeiro ocorre o aumento da biomassa vegetal e densidade do dossel como resultado de níveis mais elevados de CO₂. Essa alteração foi relacionada com níveis mais elevados de algumas doenças, principalmente aquelas causadas por patógenos necrotróficos. A abertura estomática reduzida também pode estar associada com menores taxas de infecção para algumas doenças. No presente estudo, mesmo sendo observado aumento na altura e no diâmetro das plantas em ambiente enriquecido com CO₂, não foram evidenciados efeitos sobre a incidência da ferrugem do cafeeiro devido a esse fato.

Em condições de alta concentração de CO₂ as plantas de cafeeiro apresentaram maior altura e, na maior parte das avaliações, maior número de folhas, podendo essas alterações facilitarem a dispersão de urediniósporos do patógeno e alterar o ciclo da ferrugem, facilitando a infecção de plantas sadias próximas às plantas infectadas. Entretanto, os dados do presente estudo não indicaram para esse fato.

As mudanças no clima interferem na morfologia, fisiologia e metabolismo das plantas resultando em variações na ocorrência e intensidade das doenças, uma vez que, o desenvolvimento de uma planta é resultante da interação entre o seu genótipo e o ambiente (CHAKRABORTY et al., 1998). Entretanto, no presente estudo não foi possível confirmar o efeito da ferrugem sobre o desenvolvimento das plantas, uma vez que não foram verificados efeitos dos tratamentos sobre as doenças, mas com efeitos positivos no desenvolvimento das plantas crescidas em ambiente enriquecido com CO₂. Também precisa ser considerada a concentração de CO₂, pois em concentração superior Tozi e Ghini (2016), em estufa de topo aberto, verificaram efeito sobre esses parâmetros.

Entretanto, há necessidade de se considerar a afirmação de Sturrock et al. (2011), para os quais as mudanças climáticas poderão beneficiar os patógenos, visto que eles apresentam maior capacidade de adaptação a novas condições do ambiente que seus hospedeiros. Como no presente estudo no ClimapestFACE o tempo avaliado foi relativamente curto para causar esse benefício à ferrugem, pode ser que ao longo do tempo o fungo se adapte melhor às novas condições e os problemas com esse patógeno seja maior do que os observados no período estudado.

Os patógenos poderão apresentar ciclo de vida mais longos e serão capazes de migrar mais rápido para locais onde o clima for mais favorável à sobrevivência e à reprodução. Ghini et al. (2011), simulando temperaturas máximas e mínimas para os cenários futuros, previram uma diminuição do período de incubação para a ferrugem do cafeeiro, o que pode levar a um aumento dos problemas da doença. Esse fato não foi possível de ser confirmado no presente estudo, pois as temperaturas se mantiveram semelhantes nas duas concentrações do gás.

A infecção por patógenos obrigatórios é favorecida por uma área de superfície maior, o que geralmente ocorre em plantas cultivadas em condições de alta concentração de CO₂, as quais apresentam um maior crescimento. Além disso, o aumento no crescimento da planta pode vir acompanhado por uma diluição dos nutrientes, o que a tornaria mais suscetível ao ataque de patógenos. Entretanto, apesar da maior altura, os efeitos não foram significativos sobre a ferrugem do cafeeiro.

Em suma, o efeito do aumento da concentração de CO₂ do ar pode ser bastante variável, visto que, tanto a suscetibilidade da planta hospedeira quanto a multiplicação, a sobrevivência e as atividades do patógeno podem ser influenciados pelas condições ambientes. Como o clima e as alterações climáticas podem afetar e alterar os padrões de incidência de muitas doenças de plantas, a avaliação de possíveis padrões futuros pode ajudar tanto nos estudos de melhoramento da cultura, como no manejo das doenças.

4.3. Efeito do enriquecimento do ar com CO₂ sobre a incidência do bicho-mineiro do cafeeiro

A incidência do bicho-mineiro, analisada pela área abaixo da curva de progresso da incidência do bicho-mineiro, foi superior nas plantas cultivadas em condições sem o aumento da concentração de CO₂ (Figuras 11 e 12), principalmente quando se considera o valor final da AACPIBM (Figura 12). Em relação à orientação dos ramos não foram verificadas diferenças entre os tratamentos (dados não apresentados).

Em resultados de dois anos anteriores do mesmo experimento, Ghini et al. (2015) verificaram que ocorreu maior incidência de bicho-mineiro nas plantas desenvolvidas em ambiente enriquecido com 550 ppm de CO₂. Essa mesma tendência pode ser verificada na Figura 11, onde nas primeiras seis avaliações as

AACPIBM foram superiores nas plantas desenvolvidas em ambiente enriquecido com CO₂. Esse fato pode ser atribuído ao menor espaçamento existente, pois nos primeiros anos foram mantidas, nas parcelas, tanto as plantas da variedade Catuaí IAC 144, como as da cultivar Obatã, pois segundo Amaral (1953) e Souza et al. (1998), maior espaçamento entre as plantas favorece o aumento do bicho-mineiro. Associado a isso, pode ser que nos períodos iniciais, com o aumento do desenvolvimento das plantas, mais acentuado nas parcelas que receberam CO₂, tenha ocorrido alteração em compostos secundários das plantas, favorecendo a digestibilidade, palatabilidade e atratividade do inseto (GHINI, 2005). Assim, como as plantas desenvolvidas em ambiente enriquecido com o CO₂ estavam mais altas, pode ser que tenha desfavorecido a ocorrência da praga nos anos iniciais do estudo.

É consenso entre diversos autores (PARRA, 1975; ALMEIRA, 1973; SOUZA et al., 1998) que a duração do ciclo total de *L. coffeella* é fortemente influenciada pela temperatura. Ghini et al. (2008), utilizando modelos de desenvolvimento da praga, bem como as previsões de aumento de temperatura devido às mudanças climáticas, verificaram que poderá haver aumento na infestação do bicho-mineiro, pelo maior número de gerações por mês quando se compara com a normal climatológica de 1961-1990. Entretanto, há necessidade de se considerar que a temperatura foi semelhante para ambas nas condições estudadas.

Os resultados obtidos com os problemas fitossanitários indicam que há necessidade de continuação dos estudos nas condições do experimento ClimapestFACE, pois o período estudado é relativamente reduzido para uma cultura perene, e principalmente para o cafeeiro que é uma planta bienal. Também há necessidade de continuar os estudos com o desenvolvimento das plantas sob as condições de enriquecimento de CO₂ para verificar se em plantas mais velhas continuará sendo observado maior desenvolvimento.

Figura 11: Área abaixo da curva de progresso da incidência de bicho-mineiro (AACPIBM) em cafeeiros da variedade Catuaí Vermelho IAC 144 desenvolvidos em condições com e sem enriquecimento de CO₂ em experimento tipo FACE (ClimapestFACE).

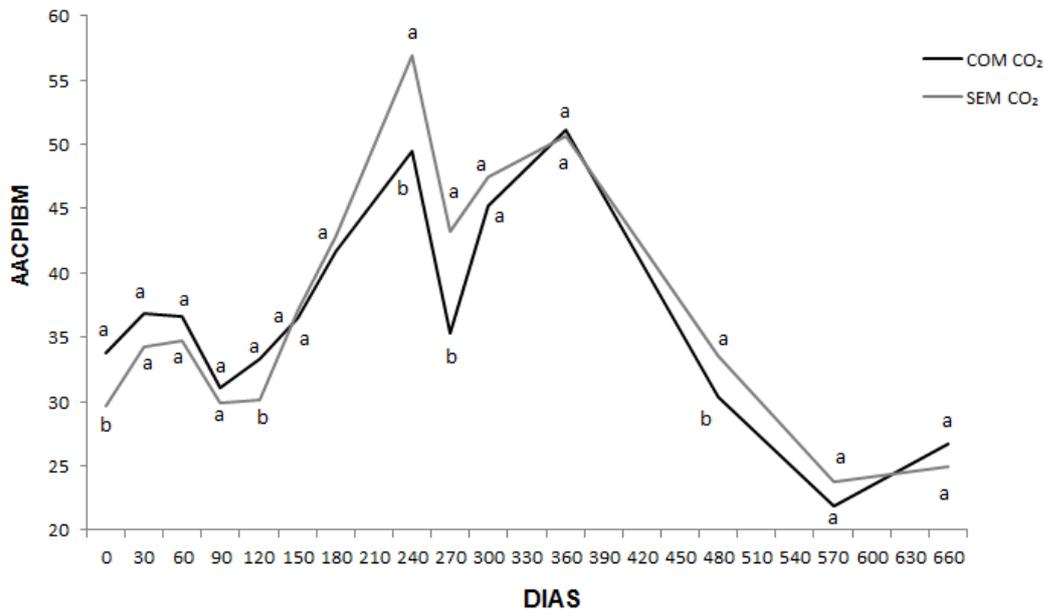
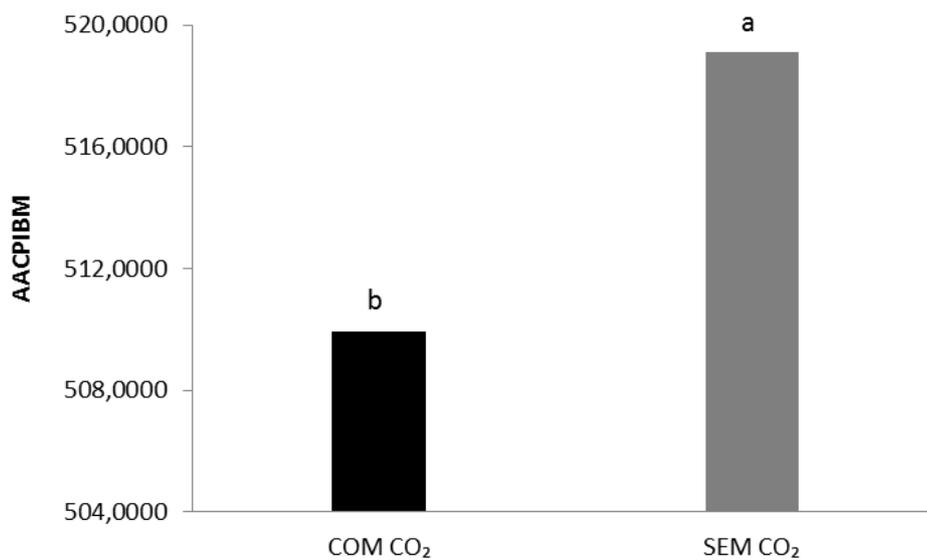


Figura 12: Área abaixo da curva de progresso da incidência de bicho-mineiro (AACPIBM) (total) em cafeeiros da variedade Catuaí Vermelho IAC 144 desenvolvidos em condições com e sem enriquecimento de CO₂ em experimento tipo FACE (ClimapestFACE)



5. CONCLUSÕES

O enriquecimento do ar com CO₂ promoveu aumento na altura e no diâmetro das plantas de café da cultivar “Catuaí Vermelho IAC 144”. Além disso, as plantas desenvolvidas nessas condições apresentaram menor incidência de bicho-mineiro. Em relação à ferrugem do cafeeiro não foram observadas diferenças entre as plantas desenvolvidas em ambiente com ou sem o enriquecimento do ar com CO₂.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRIOS, G. N. **Plant Pathology**. 5. ed. Gainesville: Elsevier, 2005. 922 p.
- AINSWORTH, E. A.; LONG, S. P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE): A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. **New Phytologist**, Cambridge, v. 165, n. 2, p. 351-372, 2004.
- ALMEIDA, P. R. O bicho mineiro do cafeeiro. *Perileucoptera coffeella* (Guérin-Méneville. 1842) (Lepidoptera-Lyonetiidae) como fator de restrição do cafeeiro. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE ENTOMOLÓGICA DO BRASIL. 1., 1973. **Resumos...** Viçosa: SEB, 1973, p. 31.
- ALLEN, L.H. Free-air CO₂ enrichment field experiments: an historical overview. **Critical Reviews in Plant Sciences** 11,121-134, 1992.
- ALVES, J. D.; LIVRAMENTO, D. E. **Morfologia e fisiologia do cafeeiro**. Lavras: UFLA, 2003. 46p.
- AMARAL, S. F. Considerações sobre o bicho-mineiro e sua importância econômica. **O Biológico**, São Paulo, v. 19, n. 5, p. 85-92, 1953.
- AMTHOR, J. S. Terrestrial higher-plant response to increasing atmospheric [CO₂] in relation to the global carbon cycle. **Global Change Biology**, Oxford, v. 1, p. 243-274, ago. 1995.
- ASSAD, E. D. et al. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 11, p. 1057-1064, nov. 2004.
- ASSISTAT, Assistência estatística. Versão 7.6 beta. Paraíba, 2012.
- BATISTA, E. R. **Respostas fisiológicas e metabólicas de duas cultivares de Coffea enriquecidas em CO₂ em câmaras de topo aberto e sistema FACE**. 2015. 142 p. Tese (Doutorado em Biodiversidade Vegetal e Meio Ambiente)-Instituto de Botânica da Secretaria de Estado do Meio Ambiente, São Paulo, 2015.
- BEDENDO, I. Ferrugens. In: AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIN FILHO, A. **Manual de fitopatologia: princípios e conceitos**. 4. ed. Piracicaba: Agronômica Ceres, 2011. p. 479-484.
- BERGOT, M. et al. Simulation of potential range expansion of oak disease caused by *Phytophthora cinnamomi* under climate change. **Global Change Biology**, Oxford, v. 10, p. 1539-1552, 2004.
- BIRECKA, H.; CATALFAMO, J. L.; URGAN, P. Cell wall and protoplast isoperoxidases in tobacco plants in relation to mechanical injury and infection with tobacco mosaic virus. **Plant Physiology**, Maryland, v. 55, p. 616-619, 1975.

BOLDINI, J. M. **Epidemiologia da ferrugem e da cercosporiose em cafeeiro irrigado e fertirrigado**. 2001. 67 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitopatologia)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

BRADSHAW, W. E.; HOLZAPTEL, C. M. Evolutionary response to rapid climate change. **Science**, Washington, v. 312, p. 1477-1478, jun. 2006.

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

BROWN, J. K. M.; HOVMOLLER, M. S. Aerial dispersal of pathogens on the global and continental scales and its impacts on plant disease. **Science**, Washington, v. 297, p. 537-541, 2002.

CARVALHO, A. M. et al. Correlação entre crescimento e produtividade de cultivares de café em diferentes regiões de Minas Gerais, Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 269-275, 2010. DOI: 10.1590/ S0100-204X2010000300006.

CARVALHO, V. L.; CUNHA, R. L.; CHALFOUN, S. M. Manejo ecológico das principais doenças do cafeeiro. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 23, n. 214/215, p. 101-114, 2002.

CARVALHO, A.; MONACO, L.C. Transferência do fator caturra para o cultivar Mundo Novo de *Coffea arabica*. **Bragantia**, Campinas, v. 31, p. 379-399, 1972.

CHAKRABORTY, S. et al. Production and dispersal of *Colletotrichum gloeosporioides* spores on *Stylosanthes scabra* under elevated CO₂. **Environmental Pollution**, Kidlington, v. 108, p. 381-387, 2000.

CHAKRABORTY, S. et al. Potential impact of climate change on plant diseases of economic significance to Australia. **Australasian Plant Pathology**, Dordrecht, v. 27, p. 15-35, 1998.

CIAIS, P.; SABINE, C. Carbon and other biogeochemical cycles. In: CAMBRIDGE: STOCKER, T. F.; et al., (Ed.). **Climate change 2013: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. p. 465-570.

CIBES, H. R.; PEREZ, M. Minador de La hoja disminuye en grado considerable el vigor de los cafetales. **El café de El Salvador**, El Salvador, v. 28, p. 325-326, 1958.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira café safra 2016, terceiro levantamento, setembro/2016**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_09_22_09_06_12_boletim_cafe_setembro_2016.pdf>. Acesso em: 18 out. 2016.

CONCEIÇÃO, C. H. C. **Biologia, dano e controle do bicho-mineiro em cultivares de café arábica**. 2005. 105 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical – Área de Concentração em Tecnologia da Produção Agrícola)-Instituto Agrônômico de Campinas, Campinas, 2005

CONCEIÇÃO, C. H. C.; GUERREIRO-FILHO, O; GONÇALVES, W. Flutuação populacional do bicho-mineiro em cultivares de café arábica resistentes à ferrugem. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 4, p. 625-631, jan. 2005.

CONCEIÇÃO, C. E. C. **Biologia, dano e controle do bicho-mineiro em cultivares de café arábica**. 2005. 105 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical)-Departamento de Tecnologia da Produção Agrícola, Instituto Agrônômico, Campinas, 2005.

DAMATTA, F. M. et al. Sustained enhancement of photosynthesis in coffee trees grown under free-air CO₂ enrichment conditions: disentangling the contributions of stomatal, mesophyll, and biochemical limitations. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 67, p. 341-352, 2016. DOI: 10.1093/jxb/erv463.

DICKSON, R.E.; LEWIN, K.F.; ISEBRANDS, J.G.; COLEMAN, M.D.; HEILMAN, W.E.; RIEMENSCHNEIDER, D.E.; SOBER, J.; HOST, G.E.; ZAK, D.F.; HENDREY, G.R.; PREGITZER, K.S.; KARNOSKY, D.F. Forest atmosphere carbon transfer and storage-II (FACTS II) - The aspen free-air CO₂ and O₃ enrichment (FACE) project: an overview. USDA Forest Service North Central Research Station. General Tech. Rep. NC-214.St Paul, MN, USA 68 pp., 2000.

DOBBERTIN, M. et al. Linking increasing drought stress to scots pine mortality and bark beetle infestations. **The Scientific World Journal**, New York, v. 7, p. 231-239, 2007.

EASTBURN, D. M.; MCELRONEB. A. J., BILGIN, D. D. Influence of atmospheric and climatic change on plant–pathogen interactions. **Plant Pathology**, Oxford, v. 60, p. 54-69, 2011.

EASTBURN, D. M. et al. Elevated atmospheric carbon dioxide and ozone alter soybean diseases at SoyFACE. **Global Change Biology**, Oxford, v. 16, p. 320–30, 2010.

ELAD, Y.; PERTOT, I. Climate Change Impacts on Plant Pathogens and Plant Diseases, **Journal of Crop Improvement**, v. 28, n. 1, p. 99-139, 2014.

GALLO, D. et al. **Manual de entomologia agrícola**. São Paulo: Ceres, 1978. 531 p.

GORIA, M. M.; GHINI, R.; BETTIOL, W. Elevated atmospheric CO₂ concentration increases rice blast severity. **Tropical Plant Pathology**, Brasília, DF, v. 38, n. 3, p. 253-257, June 2013 .

GUZZO, S. D. **Aspectos bioquímicos e moleculares da resistência sistêmica adquirida em cafeeiro contra *Hemileia vastatrix***. 2004. 236 f. Tese (Doutorado em

Ciências/ Energia Nuclear na Agricultura)-Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

GHINI, R. et al. Coffee growth, pest and yield responses to free-air CO₂ enrichment. **Climatic Change**, London, v. 132, p. 307-320, 2015. DOI: 10.1007/s10584-015-1422-2.

GHINI, R. et al. Increased atmospheric carbon dioxide concentration: effects on eucalypt rust (*Puccinia psidii*), C:N ratio and essential oils in eucalypt clonal plantlets. **Forest Pathology**, v. 44, p. 409-416, 2014.

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

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

GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. Climate change and plant diseases. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, p. 98-107, dez. 2008. Special number.

GHINI, R. et al. Risk analysis of climate change on coffee nematodes and leaf miner in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 43, n. 2, p. 187-94, fev. 2008.

GHINI, R. et al. Análise de risco das mudanças climáticas globais sobre a sigatoka-negra da bananeira no Brasil. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, DF, v. 32, n. 3, p. 197-204, maio/jun. 2007.

GHINI, R. **Mudanças climáticas globais e doenças de plantas**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2005. 104 p.

GRÜTER, D.; SCHMID, B.; BRANDL, H. Influence of plant diversity and elevated atmospheric carbon dioxide levels on belowground bacteria diversity. **BMC Microbiology**, London, v. 6, p. 1-8, 2006.

HANNUKKALA, A. O. et al. Late-blight epidemics on potato in Finland, 1933–2002; increased and earlier occurrence of epidemics associated with climate change and lack of rotation. **Plant Pathology**, Oxford, v. 56, p. 167-176, 2007.

HENDREY, G.R.; ELLSWORTH, D.S.; LEWIN, K.F.; NAGY, J. A free-air CO₂ enrichment system for exposing tall forest vegetation to elevated atmospheric CO₂. **Global Change Biology**, v.5, p. 293-309, 1999.

HENDREY, G.R.; LEWIN, K.F.; KOLBER, Z.; EVANS, L. Controlled enrichment system for experimental fumigation of plants in the field with sulfur dioxide. **Journal Waste Management Assoc**, v. 42, p. 1324-1327, 1992.

HENDREY, G.R.; MIGLIETTA, F. **FACE Technology: Past, Present, and Future**. In: **Managed Ecosystems and CO₂**. In: NÖSBERGER, J.; LONG, S.P.; NORBY,

R.J.; STITT, M.; HENDREY, G.R.; BLUM, H. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp.15-43, 2006.

HIBBERD, J. M.; WHITBREAD, R.; FARRAR, J. F. Effect of elevated concentrations of CO₂ on infection of barley by *Erysiphe graminis*. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, London, v. 48, p. 37-53, 1996.

INDEX Fungorum, 2008. Disponível em: <<http://www.indexfungorum.org/names/names.asp>>. Acesso em: 18 fev. 2011.

IDSO, K. E.; IDSO, S. B. Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment in the face of environment constraints: a review of the last 10 years' research. **Agricultural Forest Meteorology**, v. 69, p. 153-203, 1994.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). **Climate Change 2007: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 996 p. (IPCC Assessment Report, 4).

JONES, A. G.; SCULLION, J.; OSTLE, N.; LEVY, P. E.; GWYNN-JONES, D. Completing the FACE of elevated CO₂ research. **Environment International**, Amsterdam, v. 73, p. 252-258, 2014.

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

KATIYAR, K. P.; FERRER, F. **Technique biology and sterelization of the coffee leaf miner**. *Leucoptera coffeella* Guér (Lepidoptera-lyonetiidae). Viena: Internacional Atomic Energy, 1968. p.165-175.

KOBAYASHI, T. et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on the infection of rice blast and sheath blight. **Phytopathology**, St. Paul, v. 96, n. 4, p. 425-431, 2006.

KURZ, W. A. et al. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. **Nature**, London, v. 452, n. 24, p. 987-990, abr. 2008.

LAKE, J.A.; WADE, R. N. Plant-pathogen interactions and elevated CO₂: morphological changes in favour of pathogens. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 60, n. 11, p. 3123-3131, 2009.

LEAKEY, A. D. B. et al. Will photosynthesis of maize (*Zea mays*) in the US Corn Belt increase in future [CO₂] rich atmospheres? An analysis of diurnal courses of CO₂ uptake under free-air concentration enrichment (FACE). **Global Change Biology**, Oxford, v. 10, n. 6, p. 951-962, 2004.

LEWIN, K.F.; HENDREY, G.R.; NAGY, J.; LAMORTE, R. Design and application of free-air carbon dioxide enrichment facility. **Agricultural and Forest Meteorology**, 70, 15-29, 1994.

LÜTHI, D. et al. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. **Nature**, London, v. 453, n. 15, p. 379-382, maio 2008.

MAGALHÃES, A. C. N. Efeito da redução da superfície foliar sobre o desenvolvimento de cafeeiros. **Bragantia**, Campinas, v. 23, p. 337-342, 1964.

MALHI, Y.; MEIR, P.; BROWN, S. Forests, carbon and global climate. Philosophical Transaction of the Royal Society of London Series A – Mathematical. **Physical and Engineering**, v. 360, p. 1567-1591, 2002.

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**, Kidlington, v. 88, p. 219-245, 1995.

MATIELLO, J. B. et al. Cultura de café no Brasil. In: MATIELLO, J. B. (Ed.). **Novo manual de recomendação**. Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFÉ, 2002. p. 387.

MATOS, J. W. **Expressão da resistência ao bicho mineiro em *C. canephora* e *C. congensis***. 2001. 75 f. Dissertação (Mestrado em **Agronomia/Fitotecnia, área de concentração Produção Vegetal**)-Instituto Agronômico, Campinas, 2001.

MELLOY, P. et al. Production and fitness of *Fusarium pseudograminearum* inoculum at elevated carbon dioxide in FACE. **Global Change Biology**, Oxford, v. 16, p. 3363–3373, 2010.

MOOI, J.; VAN DER ZALM, A.J.A. Research on the Effects of Higher than Ambient Concentrations of SO₂ and NO₂ on Vegetation Under Semi-natural Conditions: The Development and Testing of a Field Fumigation System: Execution. Second Interim Report. Instituut voor Plantenziektenkundig Onderzoek I.P.O. Binnenhaven 12, Wageningen, Netherlands. 19 pp., 1985.

MCELTRONE, A. J. et al. Combined effects of elevated CO₂ and natural climatic variation on leaf spot diseases of redbud and sweetgum trees. **Environmental Pollution**, v. 158, p. 108-114, 2010.

MCELTRONE, A. J. et al. Elevated CO₂ reduces disease incidence and severity of a red maple fungal pathogen via changes in host physiology and leaf chemistry. **Global Change Biology**, Oxford, v. 11, p. 1828-1836, 2005.

NANTES, J. F. D.; PARRA, J. R. P. Avaliação de danos causados por *Perileucoptera coffeella* (Guérin-Méneville, 1842) (Lepidoptera-Lyonetiidae), em três variedades de café (*Coffea* spp.). **O Solo**, Cidade, v. 69, n. 2, p. 26-29, 1977.

NAGY, J., LEWIN, K.F., HENDREY, G.R., HASSINGER, E., LAMORTE, R. FACE facility CO₂ concentration control and CO₂ use in 1990 and 1991. **Agricultural and Forest Meteorology** v. 70, p. 31-48, 1994.

NOSENGO, N. Fertilized to death. *Nature*, London, v. 425, p. 894-895, 2003.

OSSWALD, W. F.; FLEISCHMANN, F.; HEISER, I. Investigations on the effect of ozone, elevated CO₂ and nitrogen fertilization on host-parasite interactions. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v. 32, p. S111-S113, 2006.

PAOLETTI, E.; LONARDO, V. Di. *Seiridium cardinale* cankers in a tolerant *Cupressus sempervirens* clone under naturally CO₂ -enriched conditions. **Blackwell Wissenschafts**, Berlin, v. 31, p. 307-311, 2001.

PARRA, J. R. P. Biologia comparada de *Perileucoptera coffeella* (Guérin-Meneville, 1842) (Lepidoptera - Lyonetiidae) visando ao seu zoneamento ecológico no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Entomologia**, São Paulo, v. 29, p. 245-76, 1985.

PARRA, J. R. P. **Bioecologia de *Perileucoptera coffeella* (GUÉRIN-MENEVILLE, 1842) (Lepidoptera: Lyonetiidae) em condições de campo.** 1975. 114 f. Tese (Doutorado em Entomologia Agrícola) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo - ESALQ/USP, Piracicaba, 1975.

PEREIRA, R. B. **Extrato de casca de café e óleo de tomilho no controle de *Cercospora coffeicola* Berk & Cooke em cafeeiro.** 2006. 96 p. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

PEREIRA, A. A. Uso da resistência genética no manejo integrado de doenças do cafeeiro. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, DF, v. 28, p. 129-137, 2003.

POZZA, E. A.; CARVALHO, L. V.; CHALFOUN, S. M. Sintomas de injúrias causadas por doenças em cafeeiro. In: GUIMARÃES, R. J.; MENDES, A. N. G.; BALIZA, D. P. (Ed.). **Semiologia do cafeeiro: sintomas de desordens nutricionais, fitossanitárias e fisiológicas.** Lavras: UFLA, 2010. p. 67-106.

POZZA, E. A.; ALVES, M. C. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre doenças fúngicas do cafeeiro no Brasil. In: GHINI, R. HAMADA, E. (Ed.). **Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil.** Brasília, DF: Embrapa/SCT, 2008. p. 215-233.

POZZA, E. A. **Manejo integrado de doenças do cafeeiro.** UFLA: Lavras, 2004. 111 p. Apostila curso Lato Sensu.

PRITCHARD, S. G. Soil organisms and global climate change. **Plant Pathology**, London, v. 60, p. 82-99, 2011.

PRITCHARD, S. G.; AMTHOR, J. S. **Crops and environmental change.** Binghamton: Food Products Press, 2005. 421p.

REIS, P. R.; SOUZA, J. C. Pragas do Cafeeiro. In: RENA, A. B. et al. (Ed.). **Cultura do Cafeeiro: fatores que afetam a produtividade.** Piracicaba: Potafós, 1986. 447 p.

REZÁCOVÁ, V. et al. Saprobic microfungi under *Lolium perenne* and *Trifolium repens* at different fertilization intensities and elevated atmospheric CO₂ concentration. **Global Change Biology**, Oxford, v. 11, p. 224-230, 2005.

ROGERS, H. H.; DAHLMAN, R. C. Crop responses to CO₂ enrichment. **Vegetatio**, Belgium, v. 104/105, p.117-131, 1993.

SANTINATO, R.; FERNANDES, A. L. T.; FERNANDES, D. R. **Irrigação na cultura do Café**: tratos fitossanitários. 2. ed. Belo Horizonte: O Lutador, 2008. cap. 6, p. 307-345.

SANTOS, M. S.; GHINI, R.; FERNANDES, B.V. Increased carbon dioxide concentration in the air reduces the severity of *Ceratocystis* wilt in *Eucalyptus* clonal plantlets. *Australasian Plant Pathology*, v. 42, p. 595-599, 2013.

SIEGENTHALER, U. et al. Stable carbon cycle-climate relationship during the late Pleistocene. **Science**, Washington, DC, v. 310, n. 25, p. 1313-1317, nov. 2005.

SILVA, C. E. O.; GHINI, R. Plant growth and leaf-spot severity on eucalypt at different CO₂ concentrations in the air. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 49, n. 3, p. 232-235, Mar. 2014.

SOUZA, J. C.; REIS, P. R.; RIGITANO, R L. **O bicho mineiro do cafeeiro**: biologia, danos e manejo integrado. Belo Horizonte: EPAMIG, 1998, 48 p. (Boletim Técnico, 54).

SCHUMMANN G. L.; D' ARCY C. J. **Essential plant pathology**. St. Paul: APS Press, 2006. 338 p.

STURROCK, R. N. et al. Climate change and forest diseases. **Plant Pathology**, London, v. 60, p. 133-149, 2011.

TORRE NETO, A.; GHINI. R.; DENTZIEN. A.; NECHET, K. Rede de sensores sem fio para estudo dos impactos das mudanças climáticas no cafeeiro. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 2014, São Carlos, SP. **Ciência, inovação e mercado 2014**: anais... São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2014. p. 353-356.

TOZZI, F. R. O.; GHINI, R. Impact of increasing atmospheric concentration of carbon dioxide on coffee leaf rust and coffee plant growth. **Pesquisa agropecuária brasileira.**, Brasília , DF, v. 51, n. 8, p. 933-941, ago. 2016.

ZAMBOLIM, L. Current status and management of coffee leaf rust in Brazil. **Tropical Plant Pathology**, Brasília, v. 41, p. 1-8, 2016. DOI: 10.1007/s40858-016-0065-9.

ZAMBOLIM, L.; VALE, F. X. R.; ZAMBOLIM, E. M. Doenças do cafeeiro. In: KIMATI, H. et al. **Manual de fitopatologia**: doenças das plantas cultivadas. 4. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 2005. p. 165-180.

WALKER, D. W.; QUINTANA, V. Mating and ovipositon behavior of the coffee miner. *Leucoptera coffeella* (Lepidoptera - Lyonetiidae). **Proceedings of the Entomologocal Society of Washington**, Washington, v. 71, n. 1, p. 88-90, 1969.

WOODS, A.; COATES, K. D.; HAMANN, A. Is an unprecedented *Dothistroma* needle blight epidemic related to climate change? **BioScience**, Washington, v. 55, n. 9, p. 761-769, Sept. 2005.