

RAQUEL COUTO EVANGELISTA BAESSO

**EFEITO DO CO₂ NA EFICIÊNCIA QUÂNTICA DO EUCALIPTO E SUA
UTILIZAÇÃO NA MODELAGEM DE SEU CRESCIMENTO PELO 3-PG**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

B142e
2011

Baesso, Raquel Couto Evangelista, 1980-
Efeito do CO₂ na eficiência quântica do eucalipto e sua
utilização na modelagem de seu crescimento pelo 3-PG /
Raquel Couto Evangelista Baesso. – Viçosa, MG, 2011.
x, 118f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Aristides Ribeiro.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Meteorologia agrícola. 2. Mudanças climáticas.
3. Eucalipto - Crescimento - Efeito do dióxido de carbono.
4. Eucalipto - Efeito de temperatura 5. Dióxido de carbono -
Concentração. 6. Plantio (Cultivo de plantas). I. Universidade
Federal de Viçosa. II. Título.


CDD 22. ed. 630.2515

RAQUEL COUTO EVANGELISTA BAESSO

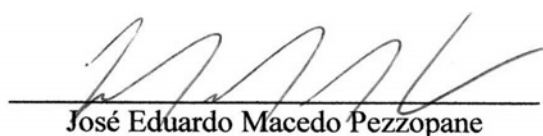
EFEITO DO CO₂ NA EFICIÊNCIA QUÂNTICA DO EUCALIPTO E SUA UTILIZAÇÃO NA MODELAGEM DE SEU CRESCIMENTO PELO 3-PG

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 21 de março de 2011.



Júlio César Lima Neves




José Eduardo Macedo Pezzopane



Rodolfo Araújo Loos



Carlos Alberto Martinez y Huaman
(Coorientador)



Aristides Ribeiro
(Orientador)

*Aos meus amados pais
PEDRO e SÔNIA, que por
intermédio de carinho e
perseverança me mostraram o
caminho da vida. Meu muito
obrigado.*

DEDICO

*Ao meu esposo Murilo
Mesquita Baesso, fonte de todo
amor. À minha amada filha
Antônia, que está se comportando
muito bem dentro da barriga da
mamãe. E aos meus sobrinhos
Victoria, Pedro Lucas, Dante e
Davi, pela inocência e doçura.*

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter-me guiado até aqui, por ter-me sustentado e me dado força para superar as dificuldades e vencer os obstáculos da vida, por ter se manifestado de formas variadas, dando-me a paz que excede todo o entendimento.

Aos meus pais, por terem-me ensinado os maiores valores da vida.

Ao meu amado esposo, por ter estado do meu lado nos momentos difíceis, mostrando toda sua paciência, compreensão, carinho e cumplicidade.

A toda a minha família, por ter sempre me apoiado.

Ao professor, orientador e amigo Aristides Ribeiro, pela dedicação, pela paciência, pela amizade e, principalmente, pela confiança em mim depositada, sempre me incentivando e contribuindo com suas valiosas sugestões durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus conselheiros professores Carlos Alberto Martinez e Huamán e Nairam Félix de Barros, pelas ideias e sugestões.

À empresa Fibria S.A., pelo apoio e pela parceria.

À coordenação do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), pelo apoio durante a realização do Curso.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudo.

Aos meus amigos e colegas da Meteorologia e Engenharia Agrícola, pelo apoio.

A todos que, diretamente ou indiretamente, contribuíram para a realização e concretização deste trabalho.

BIOGRAFIA

RAQUEL COUTO EVANGELISTA BAESSO, filha de Pedro Evangelista Filho e Sônia Elisabete Couto Evangelista, nasceu no dia 9 de agosto de 1980, em Vitória, Espírito Santo.

Em abril de 1999, iniciou o Curso de Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), concluindo-o em julho de 2004.

Em agosto de 2004, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Meteorologia Agrícola da UFV, submetendo-se à defesa da dissertação em agosto de 2006.

Em outubro de 2006, deu início ao Programa de Pós-Graduação, em nível de Doutorado, em Meteorologia Agrícola da UFV, submetendo-se à defesa da tese em março de 2011.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REFERÊNCIAS	5
CAPÍTULO I.....	7
TROCAS GASOSAS E FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA	7
RESUMO	7
ABSTRACT	9
1. INTRODUÇÃO	11
2. MATERIAL E MÉTODOS	14
2.1. Caracterização da área de estudo	14
2.2. Condições experimentais	15
2.3. Medições das trocas gasosas	16
2.4. Curva de resposta à luz	18
2.5. Fluorescência.....	19
2.6. Análise estatística.....	20
3. RESULTADOS.....	21
3.1. Trocas Gasosas.....	21
3.2. Fluorescência da Clorofila	41

	Página
4. DISCUSSÃO	47
5. CONCLUSÕES	51
6. REFERÊNCIAS	52
CAPÍTULO II	55
ESTIMATIVA DA EFICIÊNCIA QUÂNTICA DO DOSSEL EM PLANTIO DE CLONES DE EUCALIPTO SOB DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE CO ₂	55
RESUMO	55
ABSTRACT	57
1. INTRODUÇÃO	59
2. MATERIAL E MÉTODOS	65
2.1. Estimativa da eficiência quântica do dossel	65
3. RESULTADOS	67
4. DISCUSSÃO	74
5. CONCLUSÕES	76
6. REFERÊNCIAS	77
CAPÍTULO III	79
SIMULAÇÃO DO EFEITO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO	79
RESUMO	79
ABSTRACT	81
1. INTRODUÇÃO	83
2. MATERIAL E MÉTODOS	86
2.1. Área de estudo	86
2.2. O modelo 3-PG	86
2.3. Dados climáticos	91
2.4. Simulações	93
3. RESULTADOS	97
4. DISCUSSÃO	108
5. CONCLUSÕES	113
6. REFERÊNCIAS	114
CONCLUSÃO GERAL	118

RESUMO

BAESSO, Raquel Couto Evangelista, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2011. **Efeito do CO₂ na eficiência quântica do eucalipto e sua utilização na modelagem de seu crescimento pelo 3-PG.** Orientador: Aristides Ribeiro. Coorientadores: Carlos Alberto Martínez y Huamán e Nairam Félix de Barros.

Nas últimas décadas tem sido crescente a preocupação mundial quanto às mudanças no clima devido ao aumento de emissão global de gases de efeito-estufa, principalmente o dióxido de carbono (CO₂). Sabe-se, por experimentação, que as plantas reagem a aumentos na concentração de CO₂ crescendo mais e demandando menos água. Da mesma forma, sabe-se também que as mudanças climáticas serão condições ambientais resultantes de modificações na frequência e intensidade dos processos de clima e, conseqüentemente, de tempo. Diante de um potencial de novo sistema climático com agravamento de eventos extremos, o objetivo deste trabalho consistiu em analisar o comportamento das variações das trocas gasosas em plantios clonal jovem e adulto de eucalipto, sob elevadas concentrações de CO₂ (570 e 760 $\mu\text{mol mol}^{-1}$); estimar a eficiência quântica (α) do dossel; e simular a produtividade do eucalipto, por meio do modelo de crescimento 3-PG, baseada em cenários climáticos de mudanças previstas. As maiores taxas fotossintéticas foram registradas em plantio jovem de eucalipto, quando ocorreram aumentos na concentração de CO₂ no inverno, com uma diferença de até 30% em comparação com o plantio adulto. Houve redução na condutância estomática e na transpiração nas altas concentrações de CO₂. A

resposta dos estômatos (redução) ao aumento da concentração intercelular (C_i) de CO_2 , seguido do aumento da fotossíntese e redução da transpiração (E), favoreceu a eficiência instantânea da transpiração. Os resultados de α apresentaram aumento de 17% no plantio jovem e 27% no plantio adulto sob elevada concentração de CO_2 , comparado à concentração-controle ($\sim 380 \mu\text{mol mol}^{-1}$). A eficiência quântica teve variação relativamente pequena entre o inverno e o verão. Na simulação da redução da respiração no plantio florestal, o incremento médio anual (IMA, $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) apresentou tendência de aumento, e nisso o IMA apresentou tendência de redução. Sobre a transpiração, a variação no uso eficiente do carbono não promoveu grandes diferenças. Na maioria dos cenários futuros, a transpiração manteve-se abaixo da transpiração-controle, sendo esse comportamento esperado, em que o aumento da concentração intercelular de CO_2 provocou redução na transpiração. O modelo de crescimento florestal foi coerente na estimativa da produtividade de plantios de eucalipto, em cenários de mudanças climáticas.

ABSTRACT

BAESSO, Raquel Couto Evangelista, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2011. **Effect of CO₂ on the quantum efficiency of the eucalyptus and its use in the modeling of its growth by 3-PG.** Adviser: Orientador: Aristides Ribeiro. Co-advisers: Carlos Alberto Martinez y Huamán and Nairam Félix de Barros.

The world concern regarding to climate changes due to global emission of greenhouse-effect gases, especially carbon dioxide (CO₂) has increased in the last few decades. It is known, through experimentation, that plants react to increases in CO₂ concentration by growing more and requiring less water. Similarly, it is also known that climate changes will be environment conditions resulting from modification in frequency and intensity of climate process, and therefore of time processes. By facing a potential new climate system with aggravation of extreme events, the objective of this study was to analyze the behavior of variations of gas exchanges in young and adult eucalyptus clonal plantations under high concentrations of CO₂ (570 and 760 $\mu\text{mol mol}^{-1}$); to estimate Quantum efficiency of the canopy; and to simulate eucalyptus production by 3-PG growth mode, based in climate scenarios of predicted changes. The highest photosynthetic rates were recorded in young eucalyptus plantation, when concentrations of CO₂ increased in the winter, with a difference of up to 30% in comparison to adult plantation. Stomatal conductance and transpiration were reduced at high CO₂ concentrations.

Stomatal response (reduction) to the increase of CO₂ intercellular concentration (C_i) followed by increase of photosynthesis and reduction of transpiration (E), favored transpiration instantaneous efficiency. Results of α presented an increase of 17% in the young plantation and 27% in the adult plantation under high CO₂ concentration, compared to control-concentration ($\sim 380 \mu\text{mol mol}^{-1}$). Quantum efficiency presented a relatively small variation from winter to summer. In the simulation of respiration reduction in the forest plantation, annual average increment (AAI, $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{year}^{-1}$) presented an increase trend, that is why AAI presented a reduction trend. Concerning transpiration, variation in the carbon efficient use did not cause great differences. Transpiration was kept below control- transpiration in most scenarios, which was expected, in which the increase in intercellular concentration of CO₂ reduced transpiration. The model of forest growth was in agreement with estimation of eucalyptus plantation productivity in scenarios of climate changes.

1. INTRODUÇÃO GERAL

Embora só recentemente o problema do aquecimento global tenha aparecido na agenda internacional como um dos mais importantes problemas ambientais que a humanidade está enfrentando, já em meados do século XVIII o efeito-estufa foi observado pela primeira vez pelo matemático francês Jean-Baptiste Fourier. Ele foi o primeiro a conceber o planeta Terra como uma estufa gigante, que viabilizava a existência de vida (FIELD, 2001). O químico Arrhenius foi quem primeiro previu que a atividade industrial poderia levar ao aquecimento do clima por aumento da absorção da radiação térmica pela elevada concentração de CO₂ atmosférico (RAMANATHAN; FENG, 2009). O problema do aquecimento global, embora esteja intimamente relacionado ao aumento do efeito-estufa é um fenômeno essencialmente diferente. Enquanto o primeiro é fundamental para garantir a vida no planeta, o segundo reflete, na verdade, um desequilíbrio no sistema climático devido ao volume de emissões dos gases de efeito-estufa decorrentes das atividades humanas, desde o início da revolução industrial. A capacidade que os gases de efeito-estufa têm de mudar o clima depende das propriedades radiativas dos gases envolvidos e das concentrações de outros gases já presentes na atmosfera.

A forçante radiativa, expressa em $W m^{-2}$, é a medida da influência de um fator para a alteração do balanço de energia do sistema atmosférico terrestre, indicando a importância desse fator para a mudança climática. Ela é positiva quando, pelo aumento dos gases de efeito-estufa, produz aquecimento na superfície terrestre. Uma força radiativa negativa pode surgir devido ao aumento de alguns tipos de

aerossóis e tende a esfriar a superfície terrestre. O comportamento dessas forças depende de mudanças na composição atmosférica, da alteração da superfície de reflexão de energia devido ao uso da terra e de variações na intensidade das emissões solares. O impacto das emissões de gases de efeito-estufa sobre a atmosfera está relacionado não só às propriedades radiativas, mas também à escala de tempo que caracterizam a remoção dessas substâncias da atmosfera. As propriedades radiativas controlam a absorção de radiação por unidade de massa de gás presente em qualquer instante, mas o tempo de vida controla quanto tempo um quilograma emitido é retido na atmosfera e é capaz de influenciar o balanço térmico (Le TREUT, 2007).

A melhor ferramenta para projetar cenários prováveis de alterações climáticas são os modelos matemáticos do sistema climático global, que levam em conta, de forma quantitativa (numérica), o comportamento dos compartimentos climáticos (atmosfera, oceanos, criosfera (áreas com gelo e neve), vegetação, ciclos biogeoquímicos etc.) e de suas interações. Modelos climáticos são representações matemáticas do sistema climático, expresso por códigos computacionais processados em super computadores. Uma fonte de confiança nos modelos vem do fato de eles serem fundamentados em leis físicas estabelecidas, como conservação da massa, energia e *momentum*. Porém, nenhum modelo climático pode fornecer uma previsão exata da mudança do clima.

Existe uma confiança em que os modelos climáticos possam fornecer estimativas credíveis das alterações climáticas futuras. Essa confiança é baseada na fundamentação de os modelos climáticos em princípios físicos e também na habilidade dos modelos em reproduzir as características do clima atual e as mudanças climáticas do passado. A confiança nas estimativas dos modelos é maior em algumas variáveis climáticas (ex. temperatura) do que para outras (ex. precipitação). Durante décadas de desenvolvimento, os modelos climáticos têm consistentemente previsto aquecimento climático em resposta ao aumento dos gases de efeito-estufa (RANDALL et al., 2007).

Os modelos climáticos permitem que se simulem prováveis cenários de evolução do clima para vários cenários de emissões dos gases de efeito-estufa (GEE). Porém, há duas grandes fontes de incertezas ao se utilizarem esses modelos. A primeira é que não se sabe precisamente a trajetória futura das emissões dos GEE e de aerossóis atmosféricos, que dependem de decisões humanas sobre o caminho socioeconômicoambiental desejado e que venha a ser efetivamente implantado. A

segunda fonte de incerteza advém do fato de que os modelos matemáticos são representações imperfeitas da natureza, e diferentes modelos climáticos diferem substancialmente em suas projeções para o clima, dado o mesmo cenário de evolução das concentrações de GEE e de aerossóis na atmosfera.

Uma forma de minimizar as incertezas dos modelos é o aumento da resolução espacial. A técnica mais aceita para traduzir a relativamente baixa resolução espacial dos modelos climáticos globais para escalas mais refinadas é a regionalização (“downscaling”) das projeções desses modelos. Modelos climáticos regionais de mais alta resolução sobre a área de interesse são utilizados como condições de fronteira dados provenientes de modelos climáticos globais (AMBRIZZI et al., 2007).

Apesar do aumento progressivo do conhecimento científico sobre mudança do clima, ainda restam incertezas significativas sobre como o clima regional vai mudar e quais os impactos regionais decorrerão de tal mudança. Isso porque ainda há incertezas quanto às emissões futuras, incertezas de como o clima responderá a essas emissões e sobre a variabilidade natural. A maneira de diminuir essas incertezas é utilizar vários cenários de emissões de GEE e diferentes modelos climáticos, para obtenção de um intervalo de valores em que se possam tomar decisões que mitiguem os efeitos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas. No caso das florestas, é importante a associação das saídas dos modelos climáticos a modelos de crescimento florestal.

Outra incerteza crítica é como as florestas (e outros sistemas biofísicos) responderão às mudanças climáticas principalmente quanto ao efeito de fertilização por CO₂. Sabe-se, por experimentação, que as plantas reagem a aumentos na concentração de CO₂ crescendo rapidamente e demandando menos água (AINSWORTH; ROGERS, 2007). Entretanto, os efeitos de longo prazo resultantes da fertilização por CO₂ na biomassa são incertos. Estudos em campo têm indicado a possibilidade de saturação das florestas para níveis crescentes de CO₂. Entretanto, esses estudos se limitaram a uma pequena fração do tempo de vida dos ecossistemas florestais, e essas questões somente podem ser entendidas através de experimentos de longo prazo.

O modelo *Physiological Principles in Predicting Growth* (3-PG) é baseado em processos ecofisiológicos, utilizando princípios fisiológicos para estimar a produtividade florestal, o que necessita de poucos ajustes para a obtenção de uma

estimativa realista do crescimento florestal. Também, pode ser facilmente parametrizado para um tipo definido de floresta plantada (LANDSBERG; WARING, 1997), sendo, portanto, um modelo bastante adequado para determinação do crescimento florestal.

Diante de um novo sistema climático com agravamento de eventos extremos, o uso de modelos de crescimento como o 3-PG permitirá a avaliação dos riscos da variação climática e a identificação de novas áreas aptas ao plantio florestal.

Para simular o efeito das mudanças climáticas na produtividade de plantios florestais utilizando o modelo 3-PG, além da entrada de dados climáticos previstos por cenários (do IPCC, por exemplo), é necessário considerar o efeito do aumento da concentração de CO₂ na eficiência quântica do dossel. Assim, mesmo que a árvore não tenha crescido sob concentração elevada de CO₂, é possível estabelecer curvas de fotossíntese (*A*) versus radiação fotossinteticamente ativa (RFA) para diferentes concentrações de CO₂ por meio de surtos instantâneos. Ao se obterem as curvas de fotossíntese em resposta à luz, é possível estimar a inclinação da parte linear das curvas, obtendo-se, assim, a eficiência quântica para determinada concentração de CO₂ e temperatura. Para estimar a produtividade futura do eucalipto, é possível parametrizar o modelo 3-PG com a eficiência quântica adequada ao cenário de mudanças climáticas utilizado como entrada de clima no modelo. O 3-PG, por sua vez, irá penalizar essa eficiência quântica, de acordo com as restrições ambientais impostas pelo déficit de pressão de vapor, temperatura, geada, disponibilidade hídrica, *status* nutricional e idade da população. Assim, ao incluir o efeito de fertilização do CO₂ no modelo de crescimento de eucalipto junto com os cenários de mudanças climáticas, será possível obter estimativas mais realistas de produtividade florestal futura.

2. REFERÊNCIAS

AINSWORTH, E.A.; ROGERS, A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. **Plant, Cell and Environment**, v. 30, p. 258-270, 2007.

AMBRIZZI, T.; DA ROCHA, R.P.; MARENGO, J.; PISNITCHENKO, I.; ALVES, L.M.; FERNANDEZ, J.P.R. **Cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI**: projeções de clima futuro usando três modelos regionais. Relatório 3, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA, SECRETARIA DE BIODIVERSIDADE E FLORESTAS – SBF, DIRETORIA DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE – DCBio Mudanças climáticas globais e efeitos sobre a biodiversidade – Subprojeto: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília, fevereiro 2007.

FIELD, C. Plant physiology of the “missing” carbon sink. **Plant Physiology**, v. 125, p. 25-28, 2001.

LANDSBERG, J.J.; WARING, R.H. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, v. 95, p. 209-228, 1997.

LE TREUT, H.; SOMERVILLE, R.; CUBASCH, U.; DING, Y.; MAURITZEN, C.; MOKSSIT, A.; PETERSON, T.; PRATHER, M. Historical overview of climate change. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.B.; TIGNOR, M.; MILLER, H.L. (Eds.). **Climate change**: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press; United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

RAMANATHAN, V.; FENG, Y. Air pollution, greenhouse gases and climate change: global and regional perspectives. **Atmospheric Environment**, v. 43, p. 37-50, 2009.

RANDALL, D.A.; WOOD, R.A.; BONY, S.; COLMAN, R.; FICHEFET, T.; FYFE, J.; KATTSOV, V.; PITMAN, A.; SHUKLA, J.; SRINIVASAN, J.; STOUFFER, R.J.; SUMI, A.; TAYLOR, K.E. Climate models and their evaluation. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.B.; TIGNOR, M.; MILLER, H.L. (Eds.). **Climate change: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press; United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

UNFCCC. A Guide to the climate change convention and its Kyoto protocol preliminary version. **Climate Change Secretariat**, Bonn, 2002.

CAPÍTULO I

TROCAS GASOSAS E FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA

RESUMO

Os fatores de mudanças globais, particularmente o aumento da concentração de CO₂ atmosférico e o conseqüente aumento da temperatura e mudanças na precipitação pluviométrica, são previstos como causadores de efeitos significativos no funcionamento futuro dos ecossistemas. Sendo a fotossíntese a principal via de entrada de carbono na biosfera e um dos principais processos fisiológicos através do qual as plantas percebem as alterações atmosféricas (LARCHER, 2000), qualquer processo que possa afetá-la deve ser cuidadosamente estudado e, na medida do possível, utilizado para deduzir eventos ocorridos e fazer previsões. Diante de um novo sistema climático com eventos extremos, o interesse deste trabalho consistiu em analisar o comportamento das variações das trocas gasosas (fotossíntese líquida (*A*), condutância estomática (*g_s*), transpiração (*E*), eficiência instantânea no uso da água (*EIT*) e Eficiência Intrínseca do Uso da Água (*EiUA*) em plantios jovem e adulto de clone de eucalipto, sob elevadas concentrações de CO₂, considerando-se a variação climática sazonal).

O estudo foi conduzido em dois povoamentos de mesmo clone (híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*), com dados coletados em duas

campanhas durante 2009, inverno e verão. Foi realizada a medição de trocas gasosas em resposta às três concentrações de CO₂ (380, 570 e 760 μmol mol⁻¹) em diferentes níveis de radiação e sob temperatura ambiente. Também foi realizada a medida da variação horária da razão entre fluorescência variável e fluorescência máxima (Fv/Fm) nas duas idades e em duas estações do ano. O plantio jovem apresentou as maiores taxas de fotossíntese em luz saturante, em comparação com o plantio adulto, tendo sido mais evidente quando ocorreram aumentos na concentração de CO₂ no inverno. Essa diferença de até 30% entre o plantio jovem e o adulto pode ser explicada como a maior capacidade das árvores jovens em utilizar o produto da fotossíntese. Houve redução na condutância estomática nas árvores submetidas a elevadas concentrações de CO₂. Também foi observado decréscimo na transpiração em altas concentrações de CO₂. A resposta dos estômatos (redução da abertura) ao aumento da concentração intercelular (C_i) de CO₂, seguido do incremento da fotossíntese e redução da transpiração, favoreceu a eficiência instantânea de *E* (*EIT*), que relaciona a taxa fotossintética com a condutância estomática (*A/E*). Pela relação *A/g_s*, que determina a eficiência intrínseca do uso da água (*EiUA*), é possível analisar melhor o efeito estomático sobre a fotossíntese. No plantio adulto, foi significativo o aumento da *EiUA* no inverno, independentemente da concentração de CO₂, que foi imposta. Apesar de esse plantio ter apresentado menores valores de fotossíntese, em comparação com o plantio jovem, a alta regulação estomática promoveu melhor desempenho nessa idade. Como os valores de Fv/Fm ficaram acima de 0,7, entende-se que não houve fotoinibição nas árvores de eucalipto, evidenciando que grande parte da energia luminosa absorvida pela planta foi utilizada para realizar fotossíntese.

CHAPTER I

GAS EXCHANGE AND CHLOROPHYLL FLUORESCENCE

ABSTRACT

The factors of global change, particularly the increase in atmospheric CO₂ concentration and the consequent rise in temperature and changes in rainfall, are expected to cause significant effects on the future functioning of ecosystems. Because photosynthesis is the main route of carbon entry of carbon into the biosphere and a major physiological processes by which plants perceive atmospheric changes (Larcher, 2000), any process that may affect it must be carefully studied and, as far as possible used to deduce occurred events and make predictions. Faced with a new climate system with extreme events, the interest of this study was to analyze the behavior of the variations in gaseous exchange (net photosynthesis (A), stomatal conductance (g_s), transpiration (E), instantaneous efficiency of water use (ITE) and Intrinsic Efficiency of Water Use ($EiUA$) in adult and young plantations of eucalyptus clones under high CO₂ concentrations, considering the seasonal climatic variation. The study was conducted in two stands of the same clone (hybrid *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*), with data collected in two campaigns during 2009, winter and summer. Measurement of gaseous exchange in response to three concentrations of CO₂ (380, 570 and 760 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) at different levels of radiation and at room temperature were performed. It was also performed

measurement of hourly variation of the ratio between variable fluorescence and maximum fluorescence (F_v/F_m) in both ages and in two seasons. The young plantation had the highest rates of photosynthesis in saturating light, compared with the adult plantation, and it was more evident when there were increases in CO_2 concentration in the winter. This difference of up to 30% between young and adult plantations can be explained as the greater ability of young trees to use the product of photosynthesis. There was a reduction in stomatal conductance in trees submitted to high concentrations of CO_2 . It was also observed a decrease in transpiration at high concentrations of CO_2 . The response of the stomata (open reduction) to the increase in the intercellular concentration (C_i) of CO_2 , followed by increase in photosynthesis and reduction of transpiration, favored E instantaneous efficiency (ITE), which relates the photosynthetic rate to stomatal conductance (A/E). By the A/g_s ratio, which determines the intrinsic efficiency of water use ($EiUA$), it is possible to analyze better the stomatal effects on photosynthesis. The increase in $EiUA$ in the adult plantation in the winter was significant, regardless the CO_2 concentration which was imposed. Although this plantation had shown lower levels of photosynthesis, compared with the young plantation, high stomatal regulation improved performance at this age. Because values of F_v/F_m were above 0.7, it is understood that there was no photoinhibition in eucalyptus trees, showing that much of the light energy absorbed by the plant was used to perform photosynthesis.

1. INTRODUÇÃO

Os fatores de mudanças globais, particularmente o aumento da concentração de CO₂ atmosférico e consequente aumento da temperatura, mudanças na média e variância da precipitação regional e no uso do solo, são previstos como causadores de profundos efeitos no funcionamento futuro dos ecossistemas. A resposta das florestas ao aumento da concentração atmosférica de CO₂ pode ter significativo efeito no ciclo global de carbono. A resposta de grandes extensões de florestas às mudanças climáticas, nas diversas latitudes, é fundamental para determinar até que ponto as florestas atuam como sumidouros de carbono atmosférico (MEDHURST *et al.*, 2006).

É reconhecido que a pesquisa científica envolvendo florestas pode fornecer importantes informações relativas aos *feedbacks* entre atmosfera e biosfera e respostas do estoque de carbono no ecossistema florestal sob elevada concentração de CO₂. Contudo, experimentos com árvores em florestas envolvem sérias dificuldades logísticas devido à grande dimensão das árvores, sua estatura, longevidade, entre outros fatores (HENDREY *et al.*, 1999). As respostas das árvores ao aumento do CO₂ atmosférico têm sido investigadas por uma variedade de técnicas experimentais, incluindo câmaras de controle ambiental, casa de vegetação, *branch bags*, câmaras de topo aberto e fechado e sistemas de enriquecimento em ar livre (FACE).

As concentrações de CO₂ afetam diretamente diferentes processos da planta, como fotossíntese, respiração, condutância estomática, taxa de emergência foliar,

índice de área foliar, crescimento, senescência e fenologia da árvore (FREER-SMITH, 2001). Segundo Houghton *et al.* (1990), o aumento do CO₂ atmosférico pode afetar indiretamente a resposta da fotossíntese à luz, por promover aumento na temperatura do ar. Incrementos na temperatura até aproximadamente 25 °C geralmente aumentam a taxa de fotossíntese líquida em alta luz. Contudo, aumento na temperatura também aumenta a taxa de respiração da planta e, ainda, pode diminuir o ganho quântico em plantas C₃. Também como resultado do aumento da temperatura pode ocorrer redução da absorção de carbono em baixas condições de luz (LEWIS *et al.*, 1999).

A concentração atual de CO₂ na atmosfera é fator limitante para a fotossíntese, o crescimento e a produtividade de muitas espécies. Na folha, a taxa fotossintética é resultado direto da atividade da enzima ribulose-1-5 bifosfato carboxilase-oxigenase (Rubisco), que por sua vez é influenciada por vários fatores ambientais, incluindo CO₂, temperatura e luz. A atual concentração de CO₂ no ambiente (~380 μmol mol⁻¹) é insuficiente para saturar a Rubisco em plantas C₃. Conseqüentemente, num curto período em que se aumenta a disponibilidade desse substrato, verifica-se aumento na taxa fotossintética, devido ao incremento da atividade carboxilase, bem como a diminuição da atividade oxigenase da Rubisco, processo que promove perda de CO₂ através da fotorrespiração (BOWES, 1993).

Sendo a fotossíntese a principal via de entrada de carbono na biosfera e um dos principais processos fisiológicos pelo qual as plantas percebem as alterações atmosféricas (LARCHER, 2000), todo o processo que possa afetá-la deve ser cuidadosamente estudado e, na medida do possível, utilizado para deduzir eventos ocorridos no passado e fazer previsões. Os efeitos benéficos de elevadas concentrações de CO₂ no crescimento das plantas dependem do estado hídrico dessas concentrações. Assim, é importante considerar tanto o incremento atmosférico de CO₂ quanto a disponibilidade de água no solo para avaliar de fato os possíveis efeitos das mudanças climáticas na produção florestal.

Níveis elevados de CO₂ tendem a diminuir a abertura estomática nas folhas, reduzindo a condutância estomática (AINSWORTH; ROGERS, 2007). Por meio da variação da abertura estomática, a planta controla o influxo de CO₂ na folha – apesar de os estômatos reagirem a várias influências –, e o movimento estomático obedece principalmente ao controle de dois circuitos de trocas gasosas: o do CO₂ e o do H₂O. O circuito do CO₂ responde à pressão parcial do CO₂ nos espaços intercelulares. O

circuito da água opera em função do estresse hídrico, influenciando a osmorregulação das células fechadas. Assim, a capacidade de abertura estomática diminui progressivamente, e, sob forte estresse hídrico, os estômatos permanecem fechados, não mais respondendo aos fatores externos (LARCHER, 2000). De acordo com Ellsworth (1999), em elevada concentração de CO₂ é esperado redução no uso da água em florestas como resultado da indução do fechamento estomático pelo CO₂.

O aumento da concentração de gases de efeito-estufa na atmosfera causa efeito radiativo (aquecimento) e também é responsável por provocar o efeito fisiológico nas plantas do tipo C3, ou efeito “fertilizante”, uma vez que aumenta a fotossíntese e a eficiência no uso da água (AINSWORTH; ROGERS, 2007).

O processo fotossintético é a conversão da energia luminosa em energia química. Essa conversão é possível devido à sensibilidade das moléculas de clorofila à luz. Os sistemas de coleta de luz do fotossistema II (FSII) são compostos de numerosas moléculas de clorofilas aderidas a complexos proteicos que capturam a energia luminosa e a transferem para o centro de reação do FSII. Como qualquer outro processo de troca de energia, a conversão da energia luminosa em energia química no processo fotossintético não é perfeita. Nem todos os elétrons que estão num nível energético elevado são passados para os aceptores. Esses elétrons retornam ao estado inicial, estado anterior das moléculas ao receberem a energia dos fótons, sem a produção de ATP e NADPH₂. Ao retornar ao estado inicial, a energia é dissipada em forma de calor ou luz (fluorescência). A medição da fluorescência é muito utilizada para estimar o funcionamento do FSII (CAMPOSTRINI, 2010).

Da mesma forma, sabe-se também que as mudanças climáticas serão condições ambientais resultantes de modificações – na frequência e intensidade dos processos de clima e, conseqüentemente, de tempo. Diante de um potencial novo sistema climático com agravamento de eventos extremos, o objetivo deste trabalho consistiu em analisar o comportamento das variações das trocas gasosas (fotossíntese líquida, condutância estomática, transpiração e eficiência instantânea no uso da água) em plantio jovem e adulto de clone de eucalipto, sob elevadas concentrações de CO₂, considerando-se a variação climática sazonal.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo

O experimento foi realizado em áreas pertencentes à Empresa Fibria S.A., no município de Aracruz, Estado do Espírito Santo. Aracruz é caracterizada pelo clima tropical litorâneo com inverno seco, pouco acentuado. A altitude média é de 50 m acima do nível do mar, com temperatura média de 28 °C e precipitação média igual a 1.200 mm ano⁻¹. A Fibria possui base florestal própria com 210 mil ha de plantios de eucalipto para suprir o complexo industrial do Espírito Santo, intercalados com 134 mil há de florestas nativas preservadas nos Estados do Espírito Santo, Bahia e Minas Gerais.

Para melhor caracterização das respostas ecofisiológicas das plantações de eucalipto ao aumento da concentração CO₂, foram escolhidos dois talhões com idades distintas, sendo um plantio realizado em dezembro de 2004 (adulto) e outro em outubro de 2008 (jovem). Os plantios estavam localizados na mesma região, com as seguintes coordenadas geográficas: 19°43'59"S e 40°7'2"W (plantio adulto) e 19°43'4"S e 40°6'15"W (plantio jovem). Os talhões estavam situados em relevo plano, com solo classificado, de acordo com a Fibria S.A., como Latossolo Amarelo Podzólico textura franco-argiloarenosa.

2.2. Condições experimentais

O estudo foi conduzido em dois povoamentos de mesmo clone (híbrido *E. grandis* x *E. urophylla*), plantados com espaçamento de 3,0 x 3,0 m. No início do experimento, as árvores do plantio jovem tinham 11 meses de idade e as do plantio adulto, 4 anos e 9 meses. Os dados foram coletados em duas campanhas ecofisiológicas durante o ano de 2009, no inverno (31 de agosto e 1, 2 e 3 de setembro) e no verão (15, 16, 17 e 18 de dezembro), possibilitando a observação dos efeitos da disponibilidade de água no solo e das condições climáticas de acordo com a sazonalidade do local, determinando a magnitude desses fatores nas trocas gasosas entre o dossel vegetativo e a atmosfera em diferentes períodos.

Para realizar a coleta das variáveis fisiológicas, foi instalada uma torre em cada plantio no centro de quatro árvores (Figura 1). A localização das torres permitiu acesso a todo o dossel vegetativo, possibilitando amostrar os quatro quadrantes das quatro diferentes exposições das folhas à radiação solar.

Os dados meteorológicos procederam de estação automática pertencente à Empresa, localizada nas coordenadas geográficas 19°43'36"S e 40°09'51"W, com altitude de 61 m, em que foram coletados: temperatura do ar, precipitação, umidade relativa, direção e velocidade do vento, radiação global, radiação fotossinteticamente ativa e radiação líquida.



Figura 1 – Esquema da torre localizada no centro de quatro árvores.

2.3. Medições das trocas gasosas

As medições das trocas gasosas foram feitas em folhas saudáveis do terço médio do dossel das árvores, normalmente entre 8 e 14 h. Foram medidas a taxa de fotossíntese líquida (A), a taxa de transpiração por unidade de área foliar (E) e a condutância estomática (g_s), utilizando-se um analisador de gás no infravermelho (IRGA, modelo LI-6400, Licor Biosciences), acoplado a uma câmara foliar, uma fonte de luz e cápsulas de CO_2 (Figura 2).

Para obter respostas às trocas gasosas ao efeito do aumento da concentração de CO_2 nas plantas, as folhas das árvores foram submetidas a surtos instantâneos de diferentes concentrações de CO_2 . Para isso, fixaram-se três diferentes valores de concentração atmosférica de CO_2 (C_a) na câmara foliar do IRGA: 380, 570 e 760 μmolmol^{-1} , sendo a concentração de 380 μmolmol^{-1} a medição-controle, representando a concentração atual de CO_2 na atmosfera.

Após a medição das trocas gasosas, foram determinadas a eficiência instantânea da transpiração (EIT) e a eficiência intrínseca do uso da água ($EiUA$). O cálculo dos parâmetros citados anteriormente foi realizado pelas seguintes equações:

Taxa Fotossintética

$$A = u_s \Delta c \quad (1)$$

em que:

A = taxa de fotossíntese líquida, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$;

u_s = massa de fluxo de ar por m^2 de área foliar, $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$;

Δc = diferença de concentração de CO_2 na câmara, $\mu\text{mol mol}^{-1}$.

Taxa de transpiração

$$E = \frac{\Delta e u_s}{p} \quad (2)$$

em que:

E = taxa de transpiração, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$;

Δe = concentração de vapor de água diferencial, mbar, diluição Corrigida;

u_s = massa de fluxo de ar por m^2 de área foliar, $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; e

p = pressão atmosférica, mbar.

Condutância estomática de vapor de água

$$g_s = \frac{1}{r_s} \quad (3)$$

em que:

g_s = condutância estomática, $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; e

r_s = resistência estomática ao vapor de água, $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{mol}^{-1}$.

Eficiência Instantânea da Transpiração

$$EIT = \frac{A}{E} \quad (4)$$

em que:

A = taxa de fotossíntese líquida, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; e

E = taxa de transpiração, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Eficiência Intrínseca do Uso da Água

$$EiUA = \frac{A}{g_s} \quad (5)$$

em que:

A = taxa de fotossíntese líquida, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; e

g_s = condutância estomática, $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.



Figura 2 – Equipamentos usados em medições das trocas gasosas em clone de eucalipto.

2.4. Curva de resposta à luz

Como o processo fotossintético pode ser bem interpretado a partir da curva de resposta à luz (Figura 3), o ajuste dos valores das curvas de Fotossíntese (A) versus radiação fotossinteticamente ativa (RFA) foi realizado pela equação a seguir (PRADO; MORAES, 1997), variando o fluxo de fótons fotossinteticamente ativos de $2.000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ até $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

$$A = A_{\max} \left[1 - e^{-k(RFA-PCR)} \right] \quad (6)$$

em que:

A = fotossíntese líquida momentânea, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$;

A_{\max} = fotossíntese líquida máxima, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$;

E = base do logaritmo natural ($e = 2,718$);

K = constante de proporcionalidade associada à concavidade da curva ($0,001 - 0,009$);

PCR = ponto de compensação à radiação, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; e

RFA = radiação fotossinteticamente ativa, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

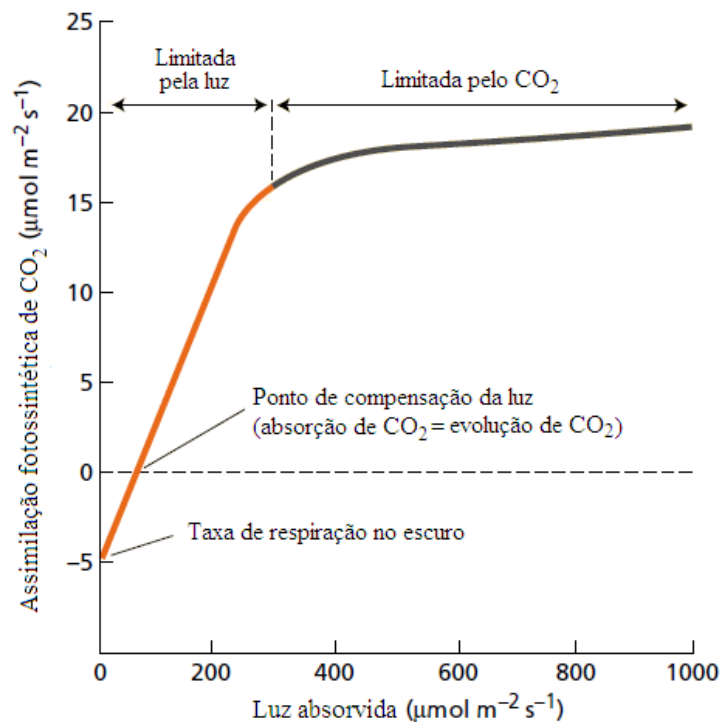


Figura 3 – Curva fotossintética de resposta à luz.
Fonte: TAIZ; ZEIGER, 2002.

A parte inicial da curva representada na Figura 3 mostra uma condição de ausência de luz (escuro), em que não existe assimilação de CO_2 e a quantidade de CO_2 liberada pela respiração excede aquela produzida pela fotossíntese, proporcionando balanço negativo, que é indicado pela parte negativa da curva. Quando ocorre aumento do fluxo de radiação e o processo fotossintético fixa exatamente a mesma quantidade de CO_2 liberado pela respiração, ou seja, não existe troca de CO_2 entre a folha e a atmosfera, diz-se que o processo atingiu o ponto de compensação por luz. O aumento do fluxo de radiação, além desse ponto, resulta num relacionamento linear entre o fluxo de radiação e a velocidade fotossintética. Nessa situação, o processo é limitado pela disponibilidade de radiação. A declividade da região linear dessa curva representa o rendimento quântico máximo da fotossíntese, ou seja, expressa a relação de moles de carbono (C) assimilados e moles de fótons absorvidos. Após a região de linearidade, o processo fotossintético passa a ser limitado pela disponibilidade de CO_2 (LARCHER, 2000; TAIZ; ZEIGER, 2002).

2.5. Fluorescência

Os parâmetros de fluorescência F_0 (fluorescência inicial) e F_m (fluorescência máxima) e a razão F_v/F_m , em que F_v é a fluorescência variável, foram medidos pelo fluorômetro *Handy PEA Chlorophyll Fluorimeter*, marca *Hansatech Instruments* (Figura 4). Antes da medição dos parâmetros de fluorescência, a área de folha que seria usada para medição foi mantida no escuro por 15 min, para que fossem “abertos” os fotossistemas. Passados os 15 min de escuro, aplicou-se um pulso de luz saturante. As medições da fluorescência foram realizadas em intervalos de 30 min, das 8h30 até as 16h30, e em cada árvore foi medida a fluorescência de quatro folhas. Assim, foi possível construir o curso diurno da fluorescência tanto para plantio jovem quanto para plantio adulto, nas estações seca e úmida, do clone de eucalipto estudado.



Figura 4 – Fluorômetro *Handy PEA Chlorophyll Fluorimeter* marca *Hansatech Instruments*.

2.6. Análise estatística

O experimento foi realizado num esquema fatorial 3 x 2 x 2, combinando três níveis de CO₂ (380, 570, 760 μmolmol^{-1}), duas idades (jovem e adulto) e duas épocas (inverno e verão), montado num delineamento inteiramente casualizado, em que foram estudadas as possíveis interações entre os fatores. Os resultados foram submetidos a análises de variância e testes F, para mostrar interações entre os tratamentos.

3. RESULTADOS

3.1. Trocas Gasosas

Nas Figuras (5 a 8) estão caracterizadas as condições climáticas no ano de estudo. Por meio da Figura 5, observa-se o extrato do balanço hídrico na área de estudo de 2005 a 2009. Em geral, verifica-se ao longo dos anos um período mais úmido entre os meses de outubro a março, bem como um período mais seco de abril a setembro. Em 2009, notou-se que em setembro e dezembro, meses das coletas de dados, ocorreu déficit hídrico, sendo o déficit em setembro de 44,8 mm e em dezembro, de 22,4 mm. O armazenamento de água no solo (ARM) em setembro e dezembro ficou abaixo da capacidade de água disponível (CAD), com valores de 23,6 mm em setembro e 44,1 mm em dezembro (Figura 6). Quando se observa o comportamento da precipitação na Figura 7, constata-se que um mês antes da coleta de dados, nas duas campanhas (I e II), ocorreram precipitações com valores aproximados de 42,9 mm e 41,7 mm, respectivamente. Pela Figura 8a, verifica-se que no verão a temperatura média foi aproximadamente 3 °C acima da encontrada no inverno. A umidade relativa apresentou ligeira tendência de redução (~2%) em seus valores no verão, em comparação com o inverno (Figura 8b).

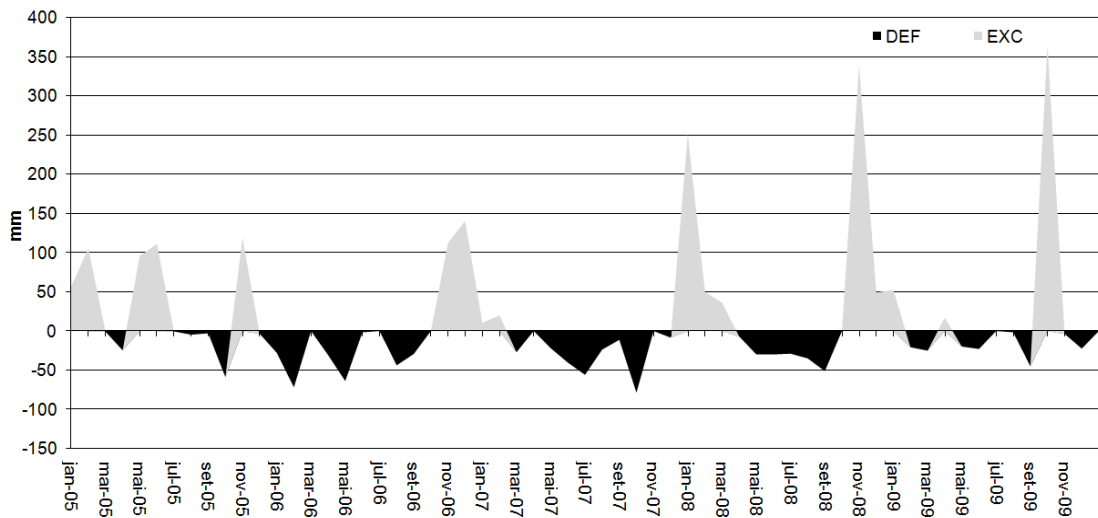


Figura 5 – Extrato do balanço hídrico de 2005 a 2009, na área de estudo.

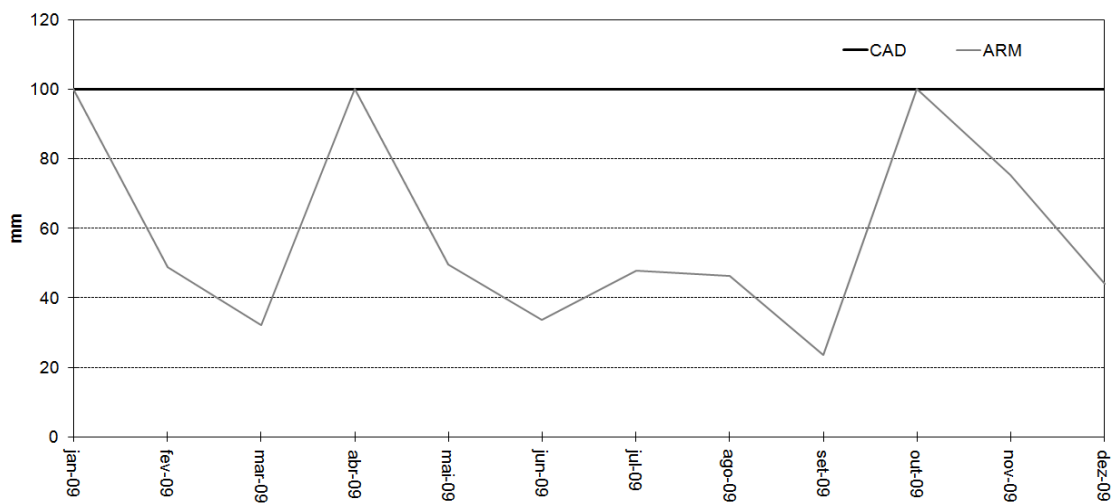


Figura 6 – Capacidade de água disponível (CAD) e armazenamento mensal (ARM) de água no solo durante o ano de coleta de dados na área de estudo.

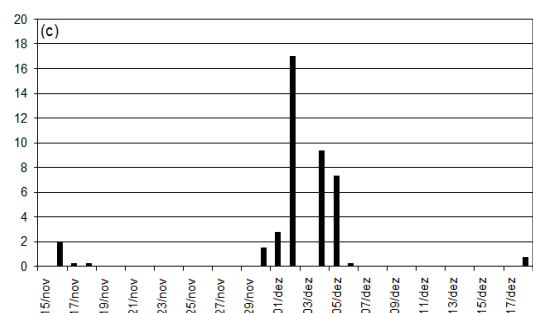
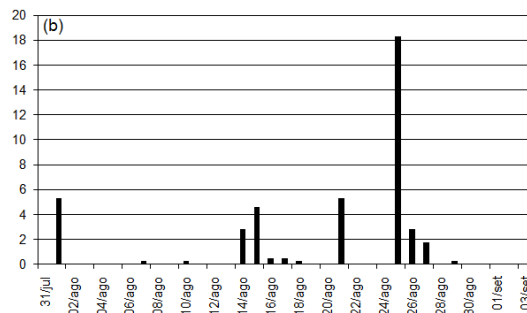
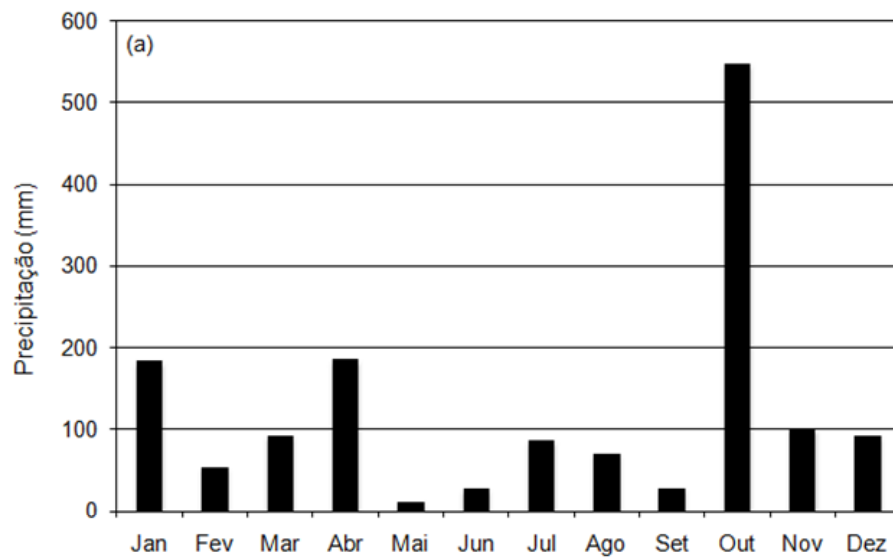


Figura 7 – Caracterização do clima durante as campanhas de coleta de dados: (a) precipitação no ano de 2009; (b) precipitação um mês antes da campanha I; e (c) precipitação um mês antes da campanha II.

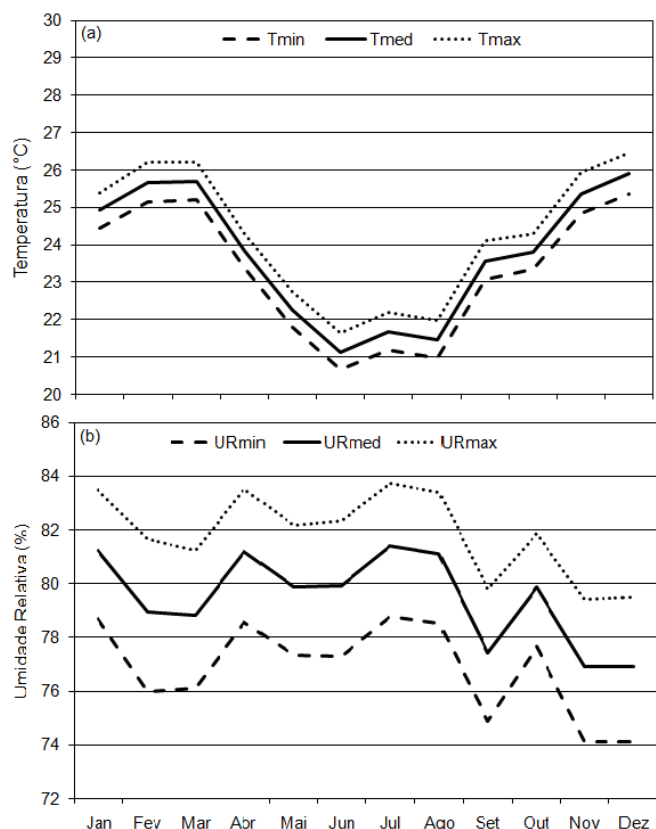


Figura 8 – Caracterização do clima durante as campanhas de coleta de dados: (a) temperatura no ano de 2009 e (b) umidade relativa no ano de 2009.

As curvas de resposta da fotossíntese em função da radiação em clones de eucalipto jovem e adulto, avaliados no inverno e verão, sob concentrações de CO_2 de 380, 570 e 760 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, estão apresentadas na Figura 9. Observa-se que o plantio jovem apresentou as maiores taxas de fotossíntese em luz saturante em comparação com o plantio adulto. Os valores máximos de fotossíntese alcançados por árvores jovens em C_a 380 foram, em média, 15% maior que em árvores adultas, tanto no inverno quanto no verão. No tratamento com C_a 570 e C_a 760, a fotossíntese máxima no plantio jovem foi 30% maior que no plantio adulto no inverno. Já no verão a fotossíntese máxima de árvores jovens foi 8% menor (C_a 570) e 6% maior (C_a 760), em comparação com as árvores adultas. Com o aumento da concentração de CO_2 , é possível observar que a diferença entre a fotossíntese máxima do plantio jovem e a do plantio adulto foi duas vezes maior que na concentração-controle, sendo isso observado no inverno. Já no verão não ocorreram grandes diferenças entre a fotossíntese máxima dos plantios jovem e adulto, quando submetidos ao aumento da concentração de CO_2 .

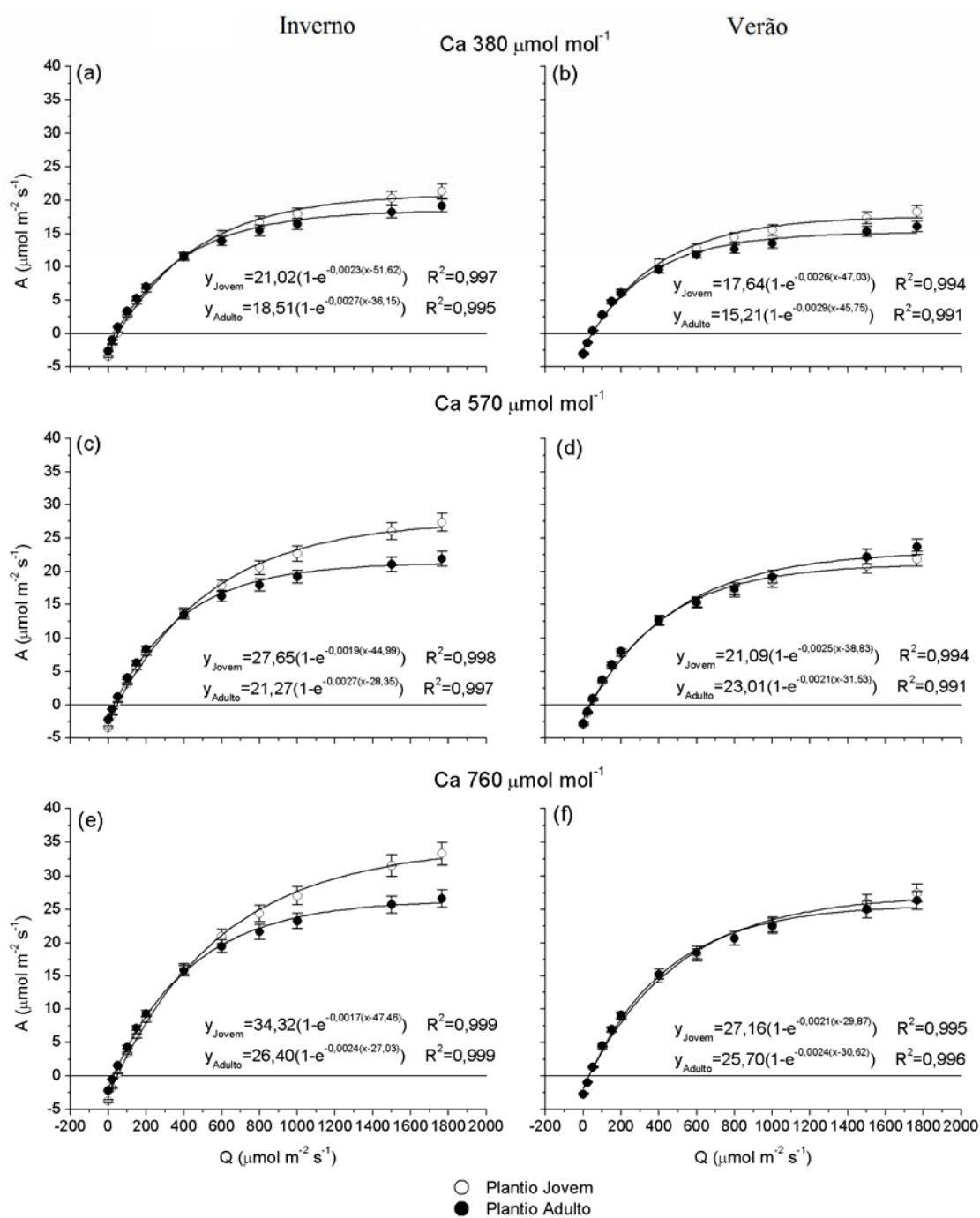


Figura 9 – Curvas de resposta da fotossíntese (A) em função da radiação (Q) em clones de eucalipto jovens e adultos sob diferentes concentrações de CO_2 e diferentes épocas do ano: (a) concentração de CO_2 de 380 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ no inverno; (b) concentração de CO_2 de 380 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ no verão; (c) concentração de CO_2 de 570 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ no inverno; (d) concentração de CO_2 de 570 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ no verão; (e) concentração de CO_2 de 760 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ no inverno; e (f) concentração de CO_2 de 760 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ no verão.

De acordo com as diferenças entre os tratamentos de CO₂ numa mesma idade e o comportamento da fotossíntese nas diferentes concentrações de CO₂ e épocas do ano, logo se notam maiores valores de fotossíntese nos plantios jovens no inverno quando submetidos à maior concentração de CO₂ (Figuras 10 e 11).

Na Tabela 1, observa-se que a fotossíntese máxima (A_{max}) e a fotossíntese média (A_{med}) foram significativamente diferentes nas concentrações de CO₂ e idade, sendo os maiores valores encontrados nas maiores concentrações de CO₂ e na idade jovem. Nesse período, somente A_{max} foi significativamente diferente, com maiores valores encontrados no inverno.

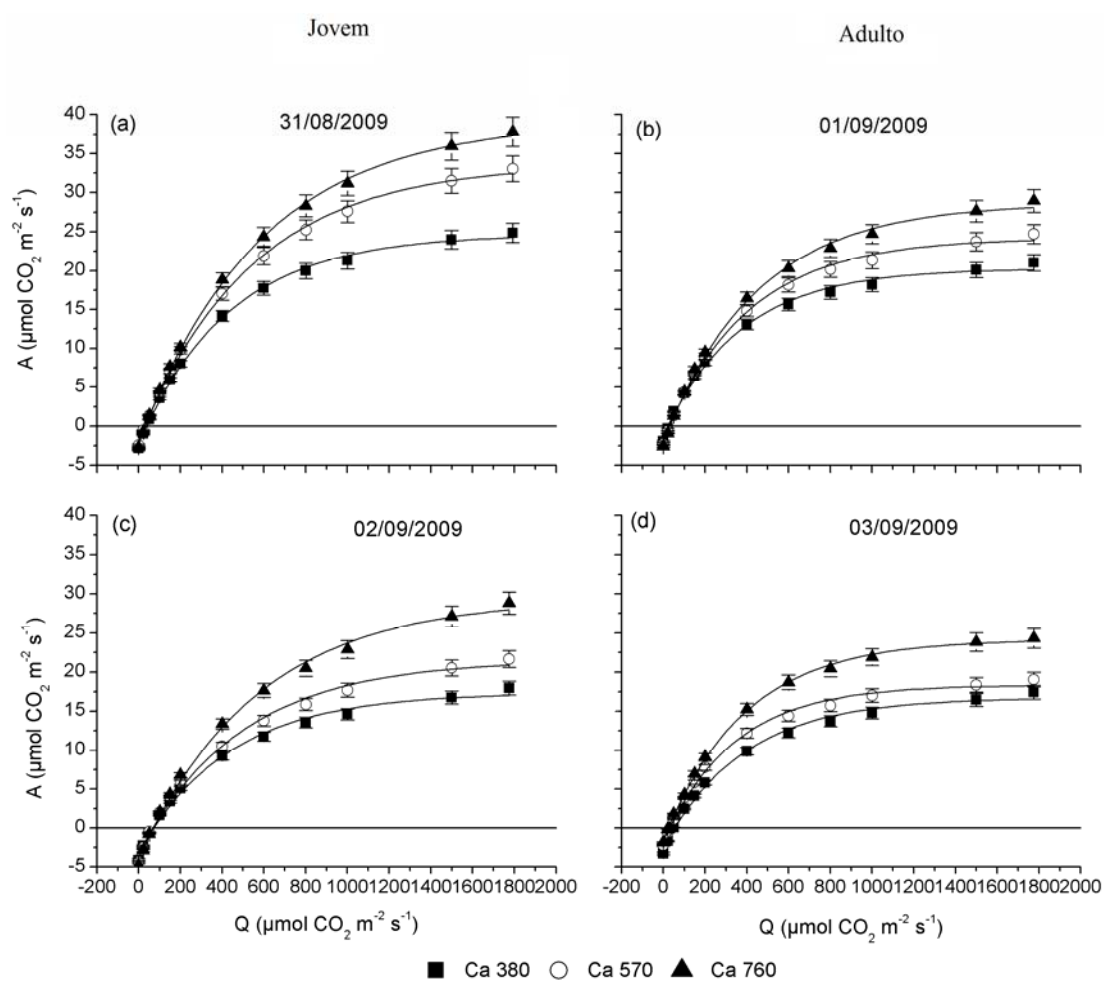


Figura 10 – Curvas de resposta da fotossíntese (A) em função da radiação (Q) em clones de eucalipto sob três concentrações de CO₂ no **inverno**: (a) plantio jovem; (b) plantio adulto; (c) plantio jovem; e (d) plantio adulto.

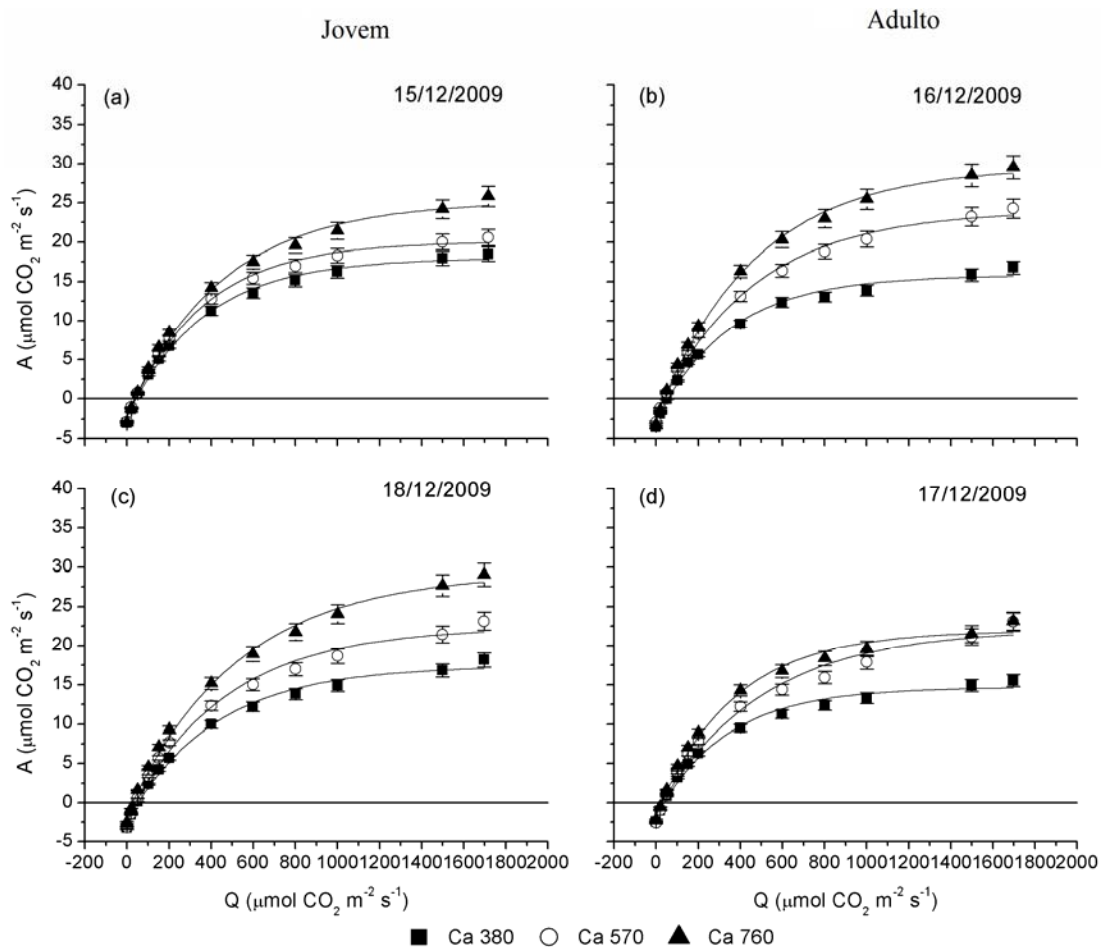


Figura 11 – Curvas de resposta da fotossíntese (A) em função da radiação (Q) em clones de eucalipto sob três concentrações de CO_2 no **verão**: (a) plantio jovem; (b) plantio adulto; (c) plantio jovem; e (d) plantio adulto.

A condutância estomática foliar apresenta comportamento crescente à medida que a radiação aumenta, mostrando influência direta da radiação na abertura estomática. As árvores submetidas à concentração de 380 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ apresentaram maiores valores de condutância em comparação com as árvores submetidas a 570 e 760 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ (Figura 12 e 13). Isso evidencia que as plantas respondem ao aumento da concentração por meio de incremento na fotossíntese e redução da condutância estomática. As maiores condutâncias foram observadas nos plantios jovens (Figuras 12ac e 13ac). No inverno, as condutâncias das folhas de árvores adultas submetidas às concentrações de 570 e 760 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 tiveram valores bem próximos, comportamento também observado no plantio jovem durante o verão. Já no plantio adulto durante o verão as condutâncias nos três níveis de CO_2

mantiveram-se bem próximas em todos os níveis de radiação. Por meio da Tabela 1, nota-se que os valores de condutância foram maiores no período de inverno.

Para a condutância estomática no nível de radiação de $1.500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, observaram-se no inverno maiores valores de g_s no plantio jovem, em comparação com o plantio adulto nos tratamentos de elevado CO_2 ; nas concentrações de 570 e $760 \mu\text{mol mol}^{-1}$, os valores de g_s tiveram diferença constante entre os plantios jovens e adultos (Figura 14a). No verão, apenas na concentração-controle o plantio jovem apresentou maior condutância estomática, sendo o plantio adulto maior na concentração de $570 \mu\text{mol mol}^{-1}$. Em $760 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 , os dois plantios apresentaram os mesmos valores de g_s (Figura 14b).

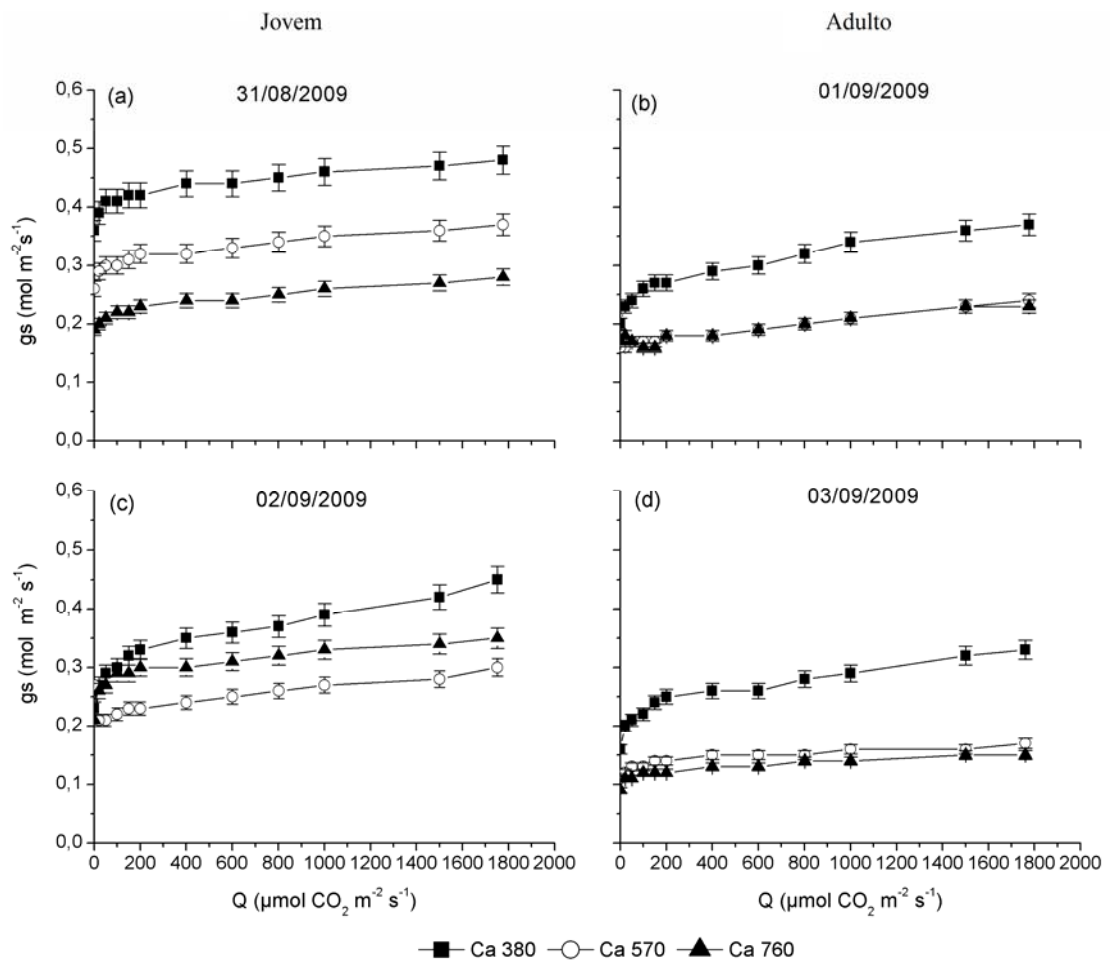


Figura 12 – Condutância estomática (g_s) em função da radiação (Q) medida no **inverno** em clones de eucalipto sob tratamentos de 380, 570 e $760 \mu\text{mol mol}^{-1}$: (a) plantio jovem; (b) plantio adulto; (c) plantio jovem; e (d) plantio adulto.

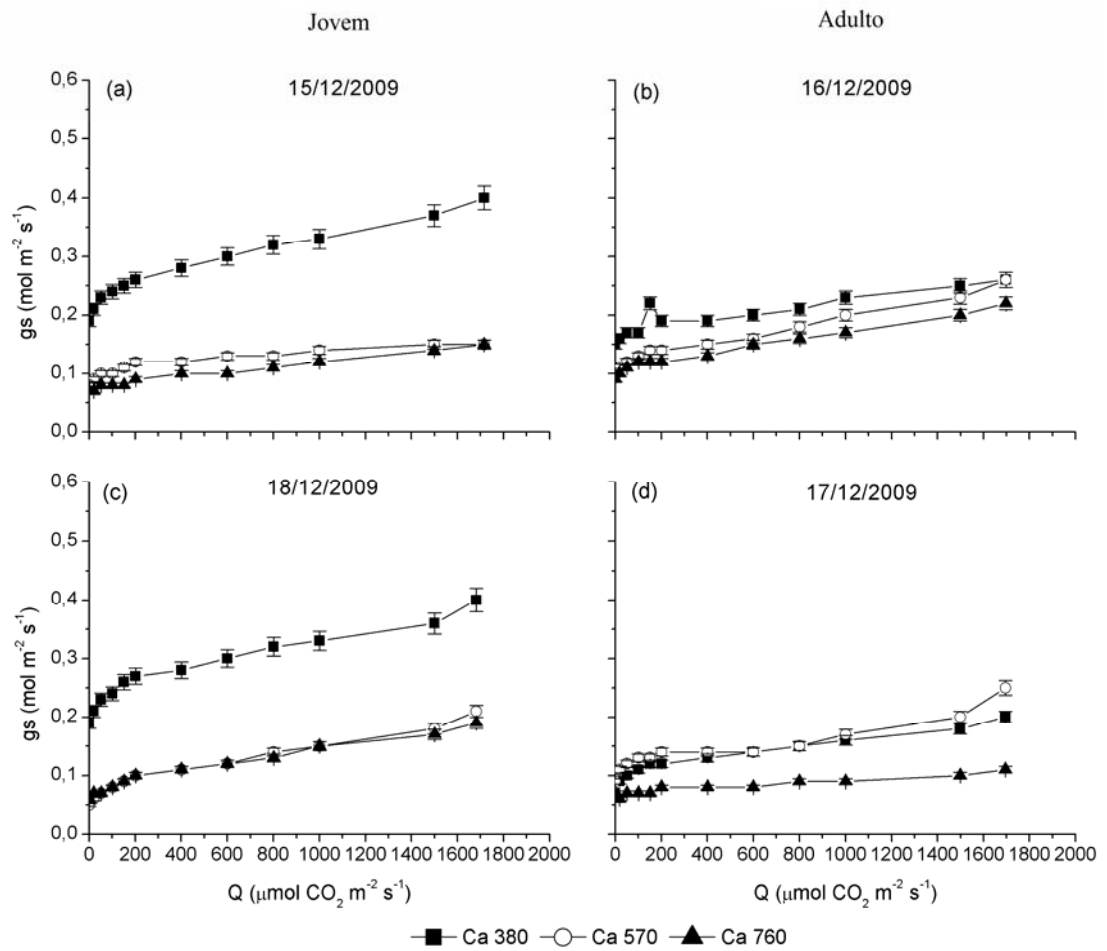


Figura 13 – Condutância estomática (g_s) em função da radiação (Q) medida no **verão** em clones de eucalipto sob tratamentos de 380, 570 e 760 $\mu\text{mol mol}^{-1}$: (a) plantio jovem; (b) plantio adulto; (c) plantio jovem; e (d) plantio adulto.

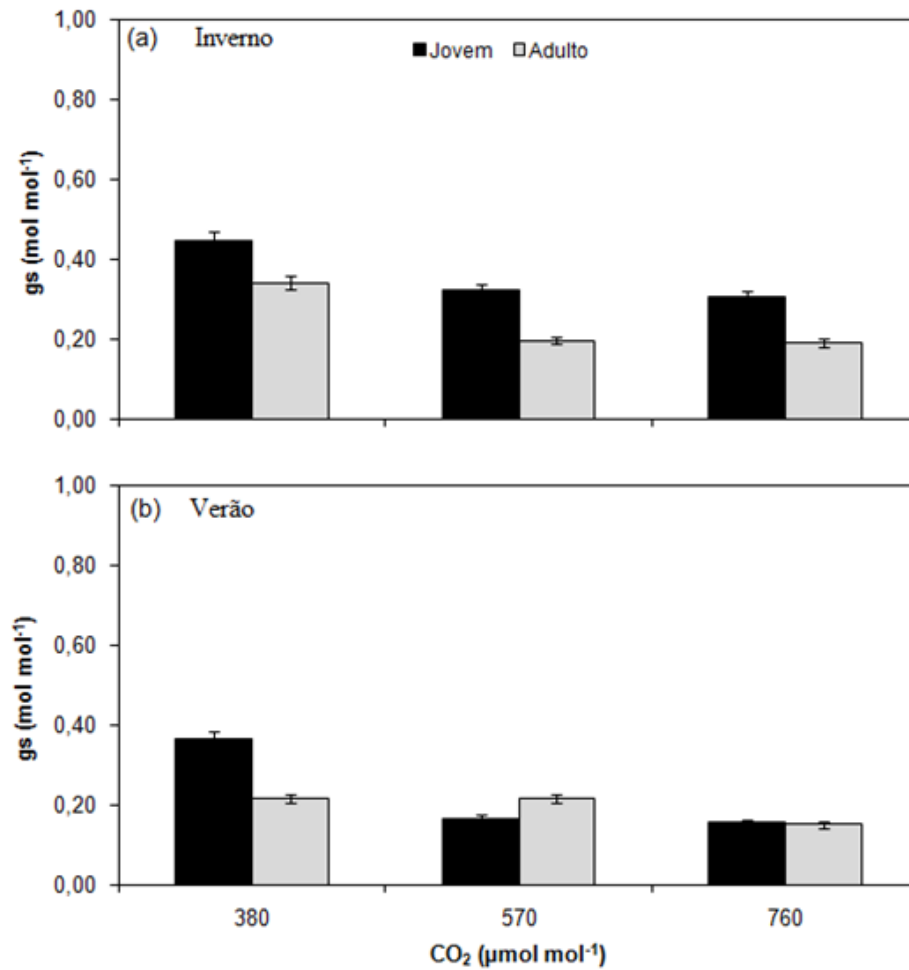


Figura 14 – Condutância estomática (g_s) medida em nível de radiação (Q) de $1.500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, em clones de eucalipto sob tratamentos de 380, 570 e 760 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 : (a) inverno e (b) verão.

A eficiência intrínseca do uso da água ($EiUA$) que relaciona a taxa fotossintética com a condutância estomática (A/g_s) foi maior nas árvores submetidas a altas concentrações de CO_2 . Tanto nas árvores jovens quanto nas adultas a $EiUA$ foi maior em C_a 760 e menores em C_a 380, em todas as radiações (Figuras 15 e 16). Por meio da Figura 17, no nível de radiação de $1.500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, observa-se que as árvores apresentaram maior eficiência intrínseca do uso da água no verão, sendo o plantio jovem o que apresentou maiores diferenças na $EiUA$ entre os diferentes períodos. Entretanto, as árvores adultas foram as que apresentaram as maiores eficiências intrínsecas de uso da água nos dois períodos, apesar de as idades não terem sido significativamente diferentes a 5% de probabilidade (Tabela 1).

Quando foi comparada a *EiUA* média entre as diferentes épocas do ano, verificou-se no verão que o plantio jovem na concentração-controle apresentou aumento de 36%, que em C_a 570 ocorreu acréscimo de 64% e sob C_a 760 o valor de *EiUA* dobrou, todos em comparação com o inverno. O plantio adulto sob a concentração de CO_2 controle apresentou 32% de acréscimo na *EiUA* no verão e aumentos de 9% e 22% nas concentrações de 570 e 760 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, respectivamente, comparados aos do período do inverno.

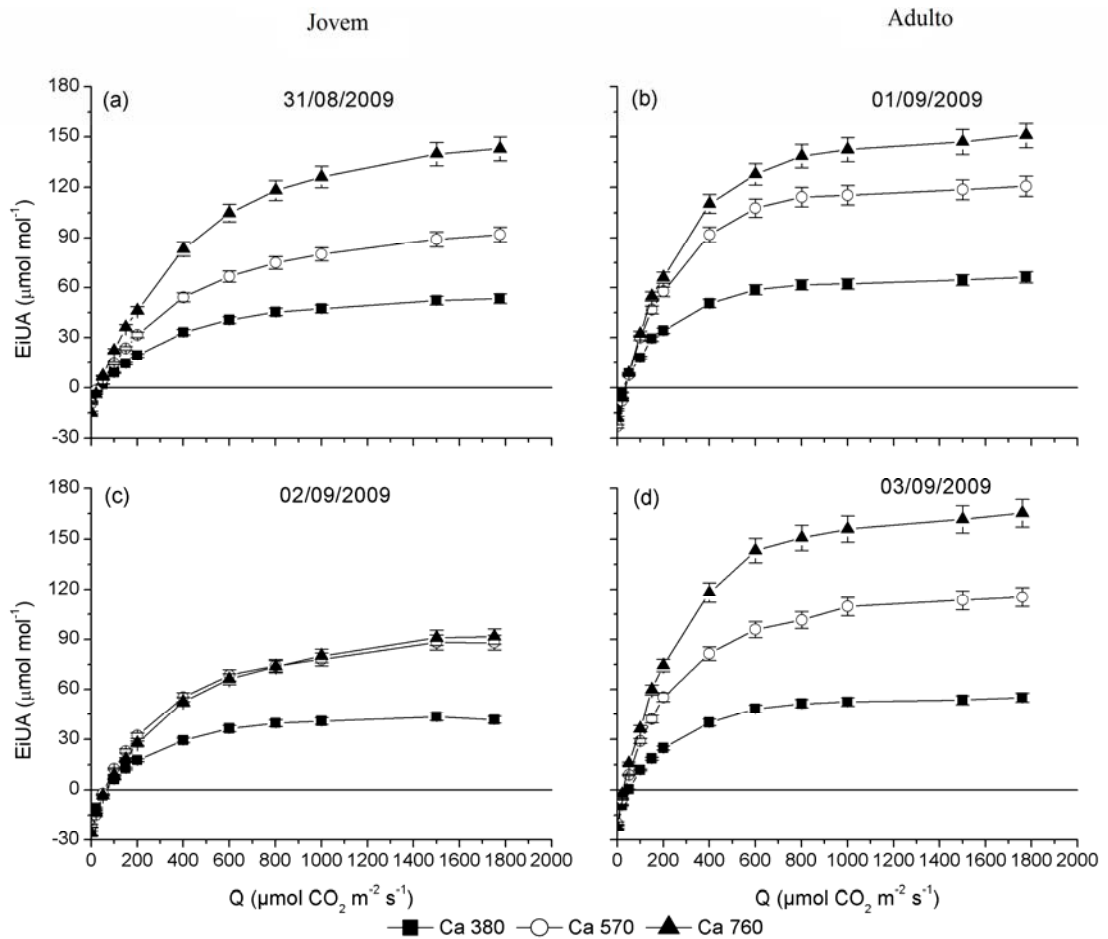


Figura 15 – Eficiência intrínseca do uso da água (*EiUA*) em função da radiação (Q) medida no **inverno** em clones de eucalipto sob tratamentos de 380, 570 e 760 $\mu\text{mol mol}^{-1}$: (a) plantio jovem; (b) plantio adulto; (c) plantio jovem; e (d) plantio adulto.

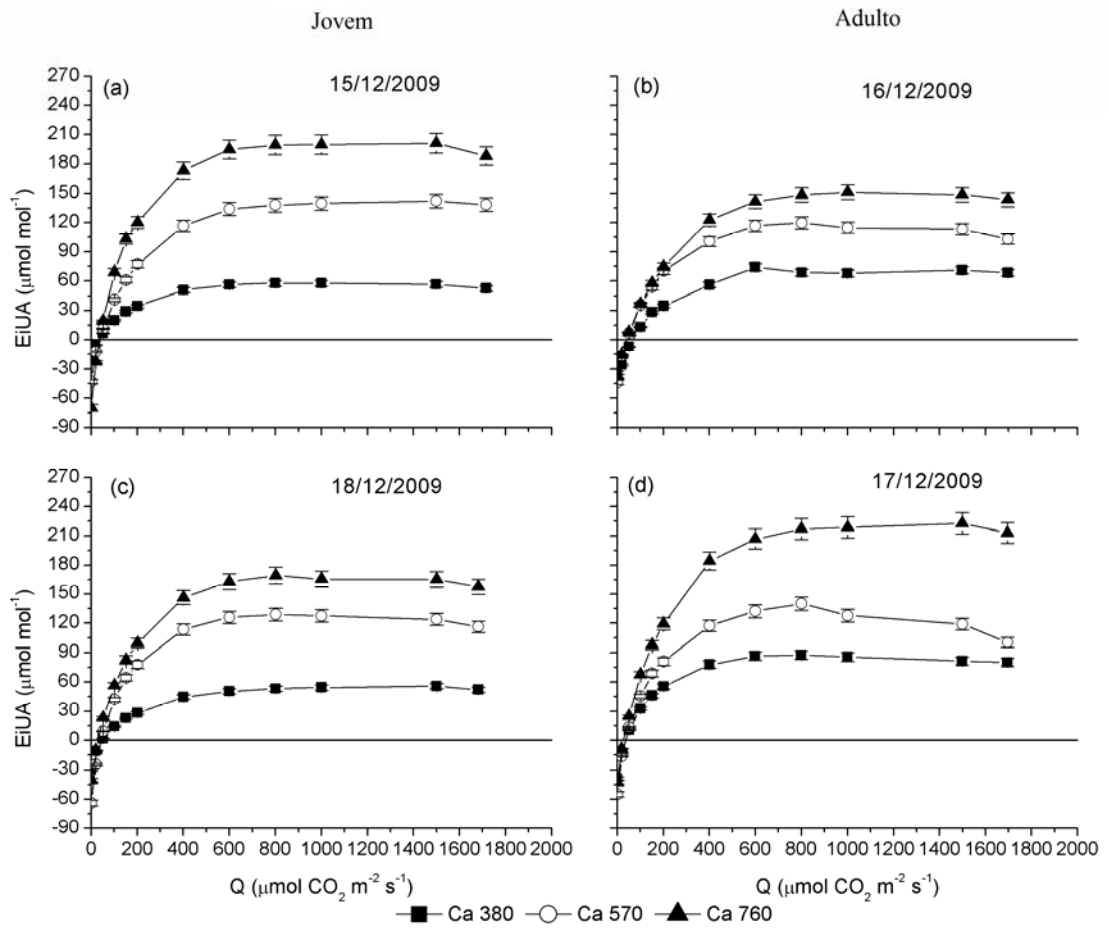


Figura 16 – Eficiência intrínseca do uso da água (*EiUA*) em função da radiação (*Q*) medida no **verão** em clones de eucalipto sob tratamentos de 380, 570 e 760 $\mu\text{mol mol}^{-1}$: (a) plantio jovem; (b) plantio adulto; (c) plantio jovem; e (d) plantio adulto.

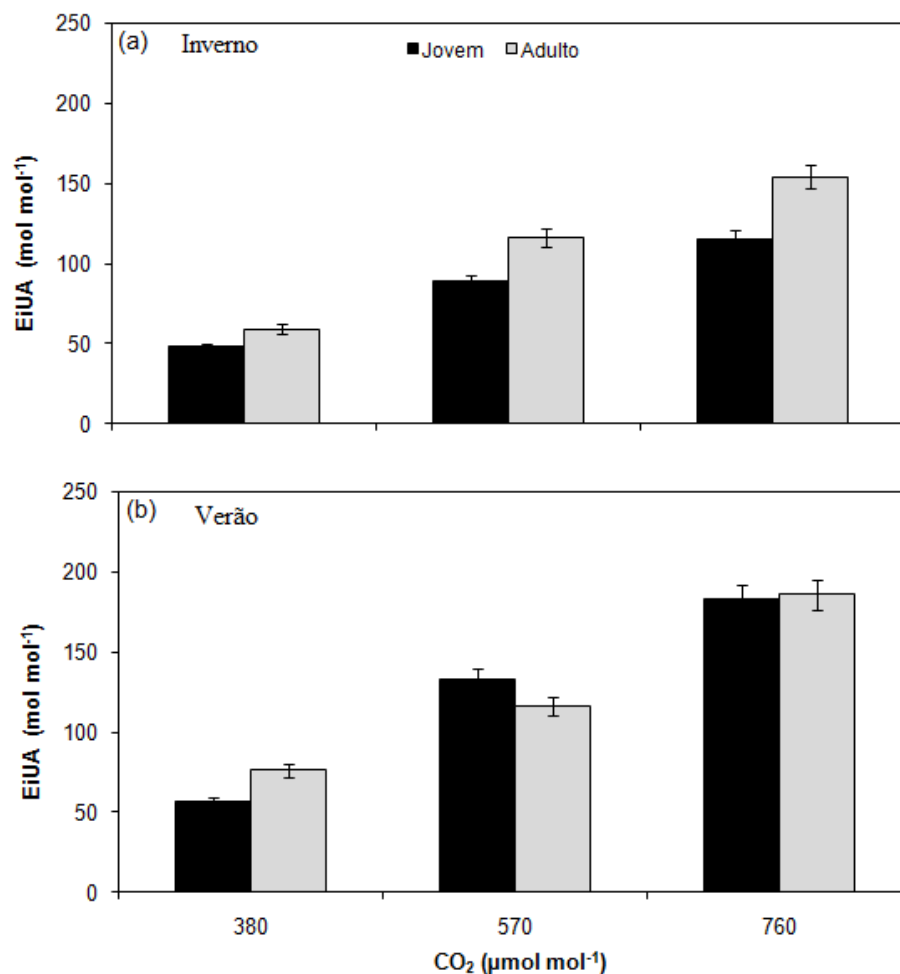


Figura 17 – Eficiência intrínseca do uso da água (*EiUA*), medida em nível de radiação (*Q*) de $1.500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, em clones de eucalipto sob tratamentos de 380, 570 e $760 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 : (a) inverno e (b) verão.

As árvores responderam ao incremento dos níveis de radiação aumentando a transpiração nas três concentrações de CO_2 analisadas. No plantio jovem, nos dois períodos a maior taxa transpiratória foi observada no tratamento-controle. Encontraram-se as maiores taxas transpiratórias no plantio adulto no tratamento-controle durante o inverno. No verão, os valores de *E* ficaram bem próximos nos três tratamentos com CO_2 (Figuras 18 e 19). É importante ressaltar que, independentemente do período, as maiores taxas transpiratórias foram observadas no plantio jovem (Tabela 1) e que em ambos os plantios e períodos os valores de *E*, na maioria das vezes, foi maior na concentração de $380 \mu\text{mol mol}^{-1}$, seguida pelas concentrações de $570 \mu\text{mol mol}^{-1}$ e $760 \mu\text{mol mol}^{-1}$.

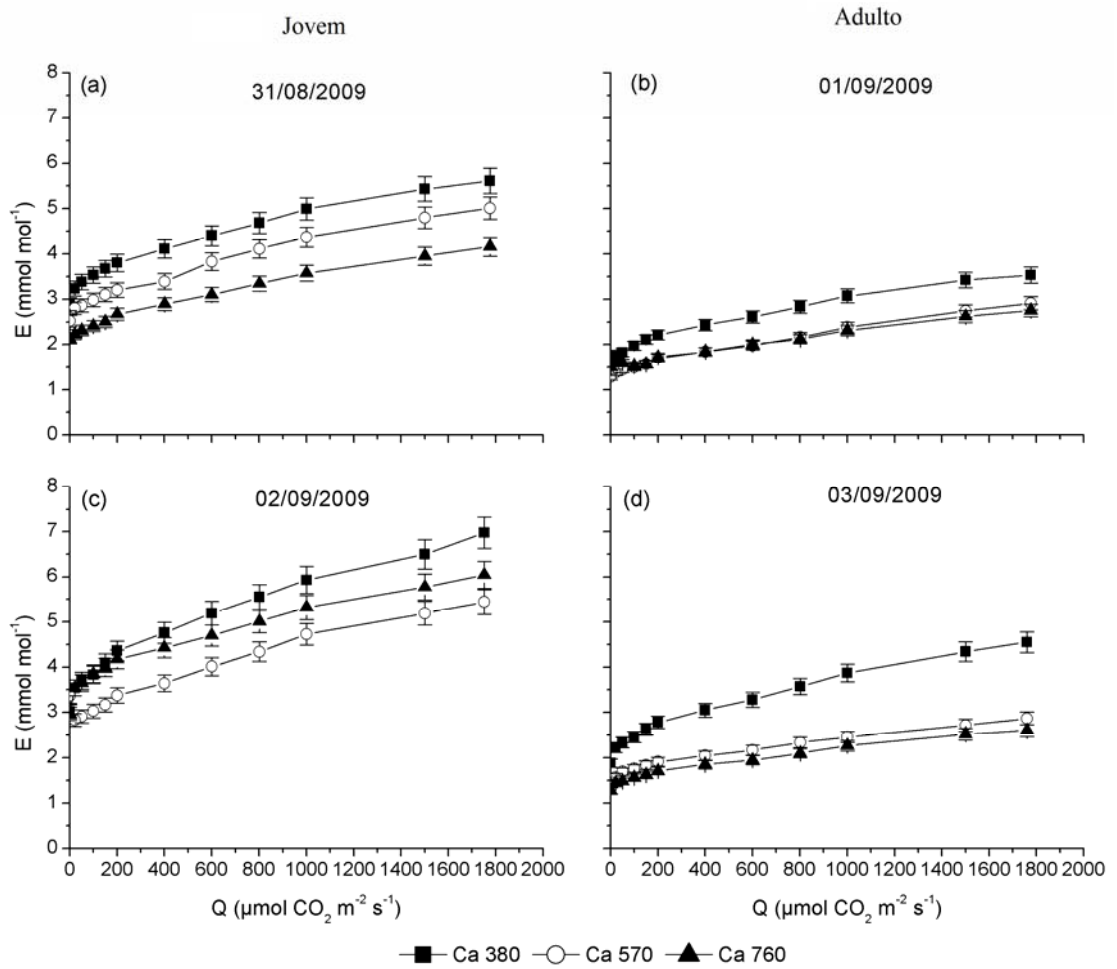


Figura 18 – Transpiração (E) em função da radiação (Q) medida no **inverno** em clones de eucalipto sob tratamentos de 380, 570 e 760 $\mu\text{mol mol}^{-1}$: (a) plantio jovem; (b) plantio adulto; (c) plantio jovem; e (d) plantio adulto.

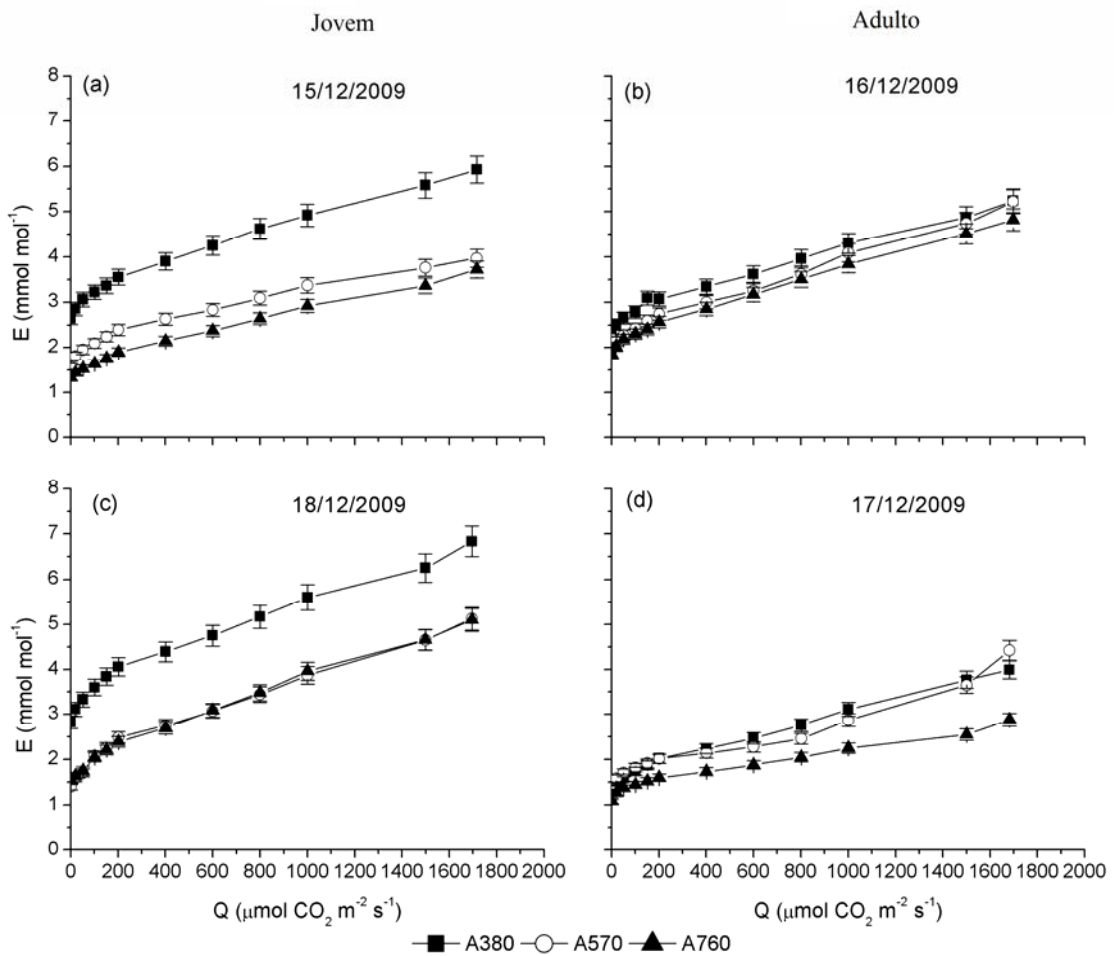


Figura 19 – Transpiração (E) em função da radiação (Q) medida no **verão** em clones de eucalipto sob tratamentos de 410, 592 e 760 $\mu\text{mol mol}^{-1}$: (a) plantio jovem; (b) plantio adulto; (c) plantio jovem; e (d) plantio adulto.

Por meio da Figura 20, é possível notar as diferenças no comportamento de E no inverno e no verão. Observam-se, nessa figura, acréscimos na transpiração do plantio adulto, a qual chega a se igualar à do plantio jovem quando submetido à concentração de CO_2 de 570 $\mu\text{mol mol}^{-1}$.

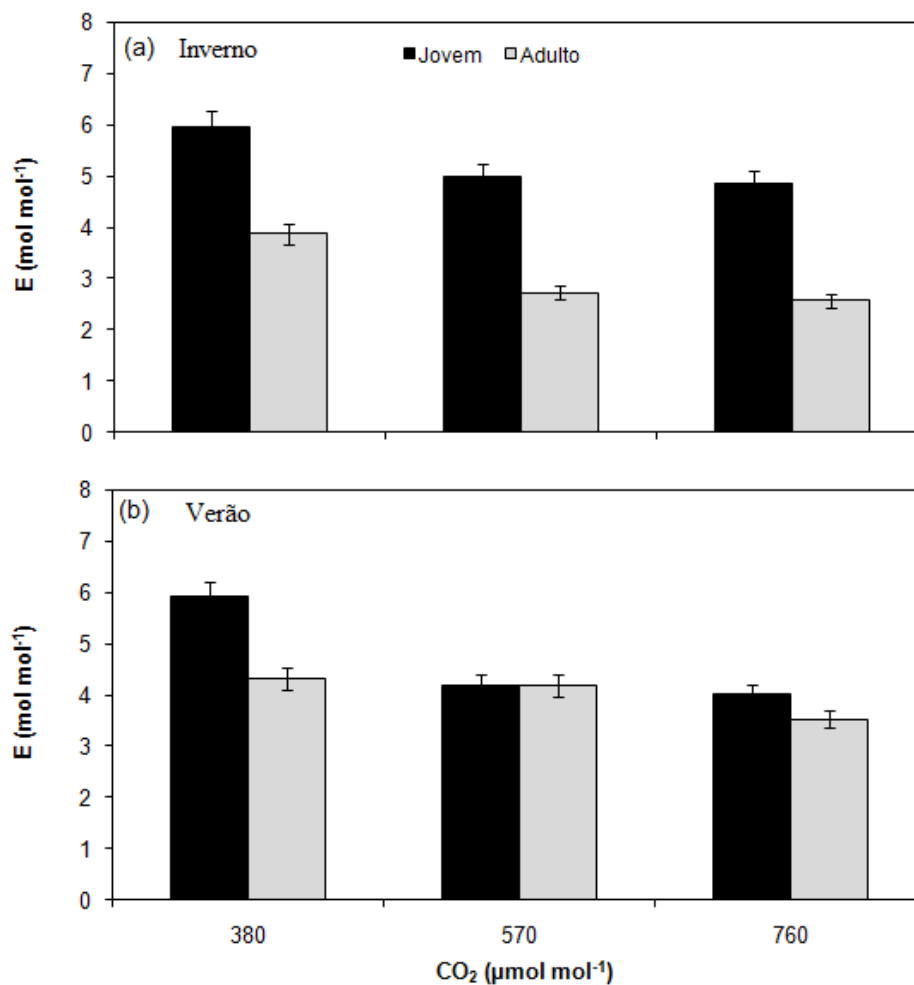


Figura 20 – Transpiração (E) medida em nível de radiação (Q) de $1.500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em clones de eucalipto sob tratamentos de 380, 570 e $760 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 : (a) inverno e (b) verão.

Da relação entre a fotossíntese (A) e a transpiração (E), obtém-se a eficiência instantânea da transpiração (EIT). Nas Figuras 21 e 22, observam-se os maiores valores de EIT quando as folhas das árvores foram submetidas às altas concentrações de CO_2 , em todas as faixas de radiação.

Ao analisar a Figura 23, vê-se que o plantio jovem apresentou menores valores de EIT que o plantio adulto, e esse mesmo comportamento ocorreu no verão quando comparado ao de inverno (Tabela 1). Em média, a redução na EIT no verão foi maior no plantio adulto, e na concentração de $380 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 a EIT reduziu-se 52% no plantio adulto e 23% no plantio jovem. Na concentração de $570 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 , encontraram-se decréscimos na EIT de 47% no plantio adulto e 10% no plantio jovem. Enfim, na concentração de $760 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 houve

diminuições de 45% e 6% nos plantios adulto e jovem, respectivamente. Comportamento esse explicado pela maior fotossíntese e menor transpiração encontrada no inverno em ambos os plantios.

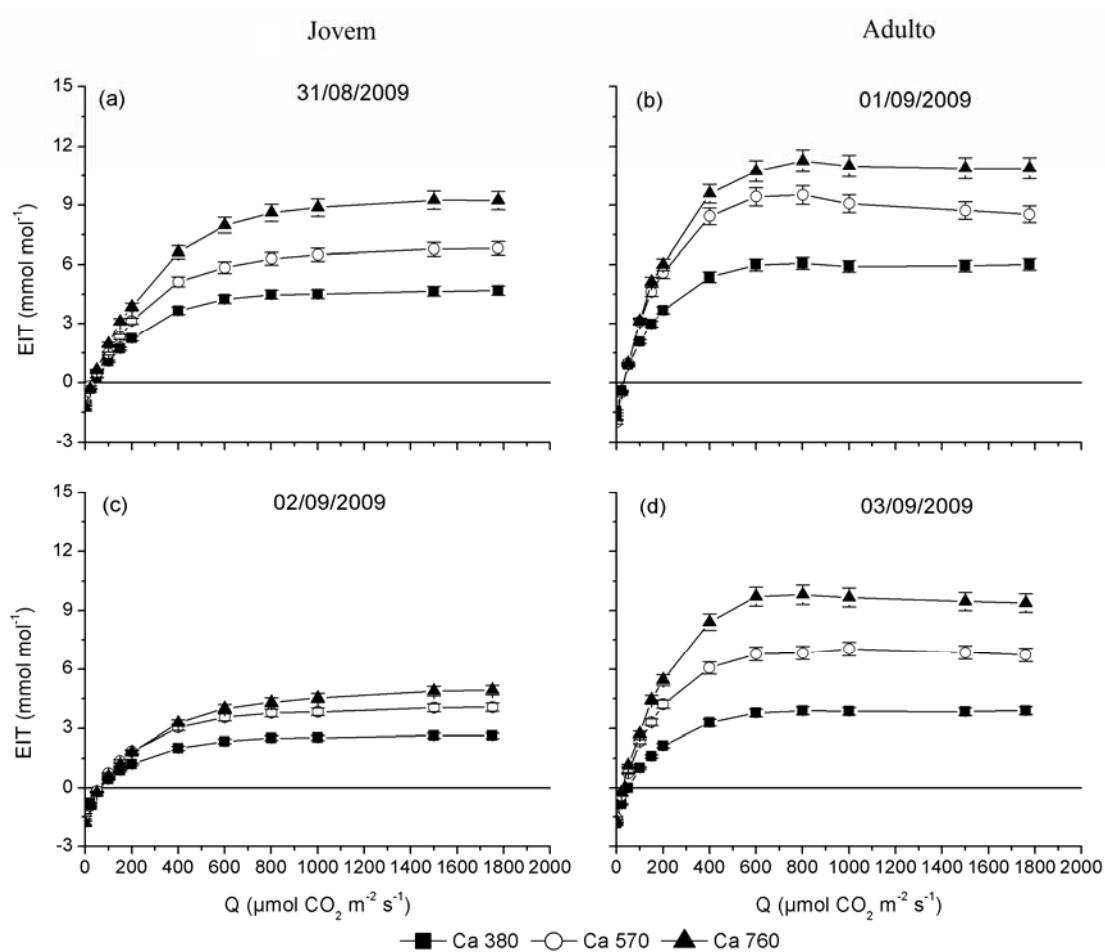


Figura 21 – Eficiência Instantânea da Transpiração (*EIT*) em função da radiação (*Q*) medida no **inverno** em clones de eucalipto sob tratamentos de 380, 570 e 760 μmol mol⁻¹: (a) plantio jovem; (b) plantio adulto; (c) plantio jovem; e (d) plantio adulto.

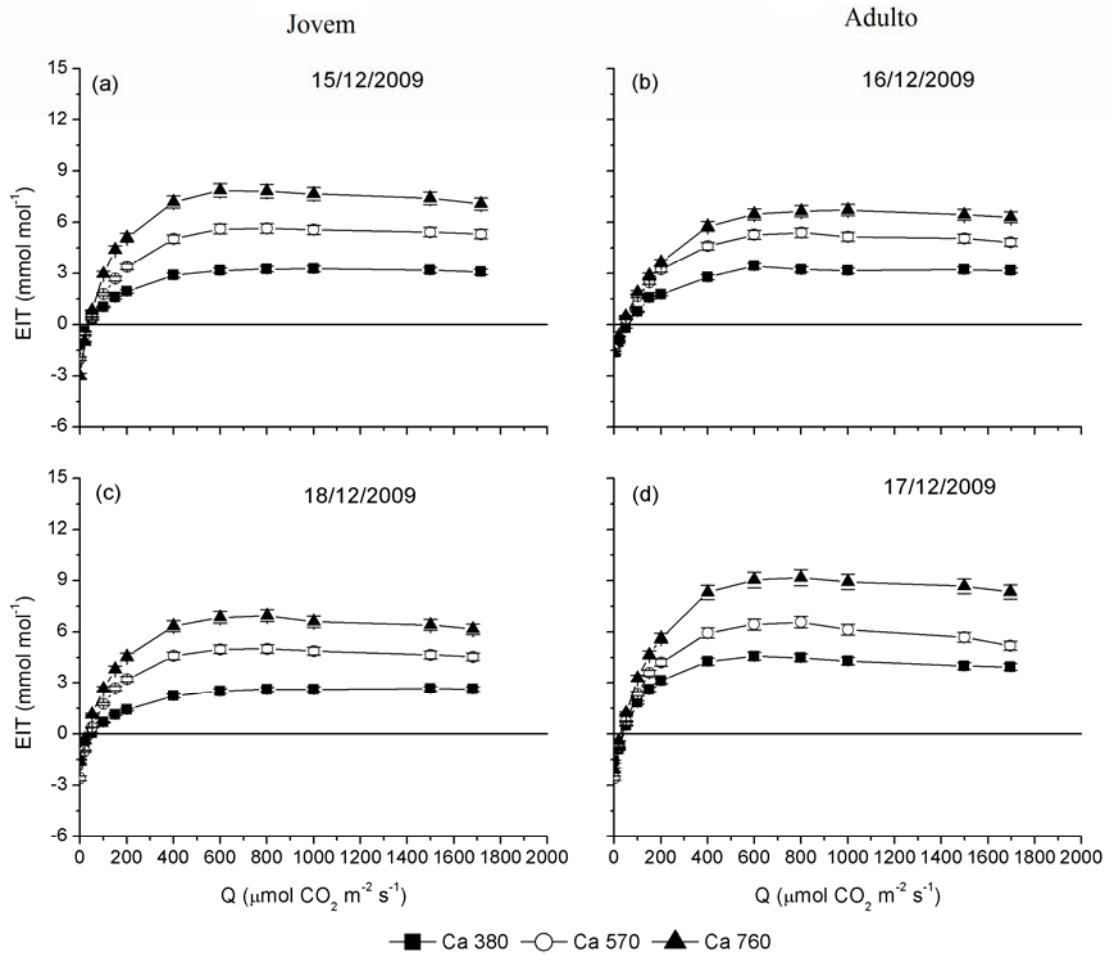


Figura 22 – Eficiência Instantânea da Transpiração (*EIT*) em função da radiação (*Q*) medida no **verão** em clones de eucalipto sob tratamentos de 380, 570 e 760 $\mu\text{mol mol}^{-1}$: (a) plantio jovem; (b) plantio adulto; (c) plantio jovem; e (d) plantio adulto.

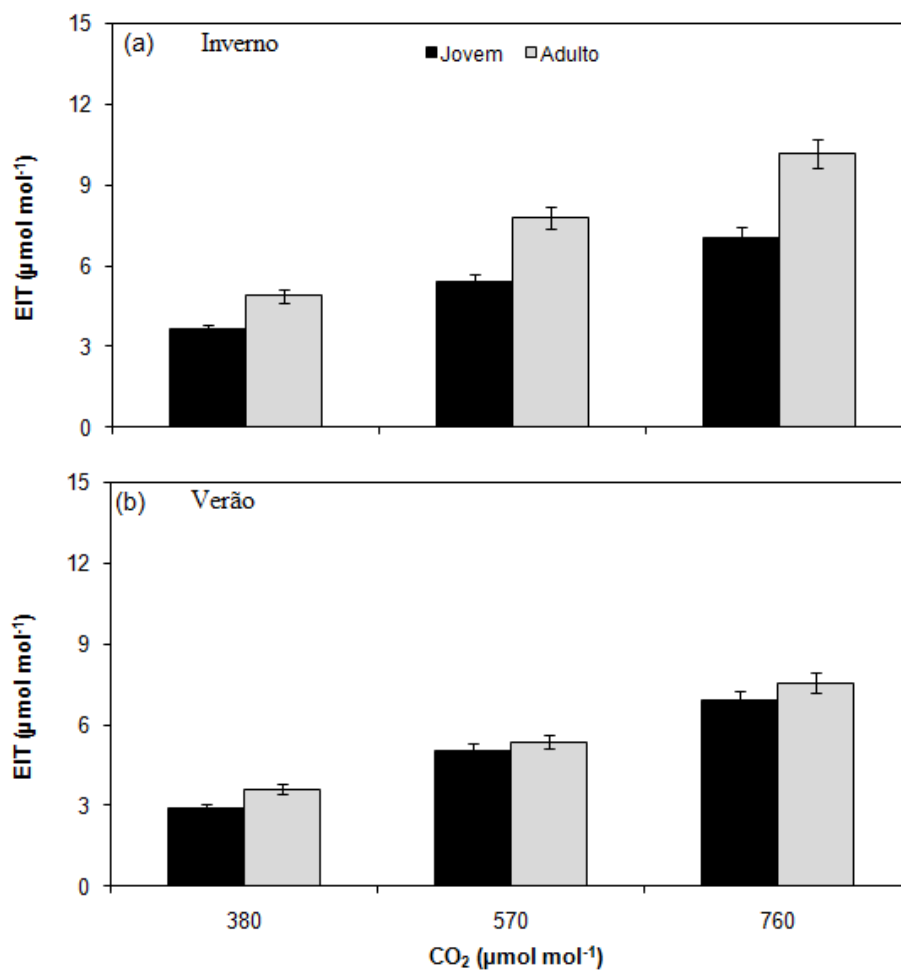


Figura 23 – Eficiência Instantânea da Transpiração (*EIT*) medida em nível de radiação (*Q*) de $1.500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em clones de eucalipto sob tratamentos de 380, 570 e $760 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂: (a) inverno e (b) verão.

Tabela 1 – Análise de variância do efeito de elevadas concentrações de CO₂ nas trocas gasosas de clones de eucalipto em idades jovem e adulta durante o inverno e verão

		Amax ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Amed ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Gsmad ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	EiUamed	Emed ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	EITmed
[CO ₂] ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	380	18,77	8,48	0,28	31,67	3,59	2,11
	570	23,69	10,67	0,18	62,17	2,80	3,47
	760	28,43	12,74	0,16	86,87	2,63	4,63
Idade	Jovem	24,94	10,88	0,24	54,77	3,57	2,87
	Adulto	22,31	10,39	0,17	65,70	2,46	3,95
Período	Inverno	24,96	11,18	0,25	49,29	3,09	3,65
	Verão	22,29	10,08	0,16	71,18	2,94	3,17
Análise de Variância		[CO ₂] =**	[CO ₂] =**	[CO ₂] =**	[CO ₂] =**	[CO ₂] = ^{ns}	[CO ₂] =**
		Idade =**	Idade = ^{ns}	Idade =**	Idade = ^{ns}	Idade =**	Idade =**
		Período =**	Período =**	Período =**	Período =**	Período = ^{ns}	Período = ^{ns}

^{ns} não significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 5% de probabilidade.

3.2. Fluorescência da Clorofila

Os pigmentos fotossintéticos, após serem excitados pelos fótons de luz, dissipam a energia absorvida por meio de três vias: dissipação fotoquímica, fluorescência e calor. Em condições ambientais normais, a dissipação da energia para eventos fotoquímicos da fotossíntese é maior que a dissipação da energia como fluorescência ou como calor. No entanto, sob situações de estresse a dissipação fotoquímica da energia diminui e a dissipação não fotoquímica e a fluorescência aumentam (MARTINEZ, 2008).

A máxima capacidade fotoquímica do fotossistema II é dada pela razão entre fluorescência variável e fluorescência máxima (F_v/F_m), que estão intimamente ligadas às condições microclimáticas ambientais representadas pela faixa de radiação luminosa fotossinteticamente ativa (Figura 24) pela temperatura (Figura 25) e pela umidade relativa do ar (Figura 26).

Os dados climáticos foram medidos continuamente durante todos os dias de coleta de dados. Nas três variáveis meteorológicas apresentadas, observou-se individualmente a semelhança no comportamento do curso diário entre os períodos analisados (inverno e verão). Porém, a magnitude dos valores muda de uma estação para outra, principalmente na radiação solar fotossinteticamente ativa (RFA) e temperatura média do ar. No inverno, encontraram-se como valor máximo de RFA $\sim 1448 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, enquanto no verão, $\sim 1.721 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Já a temperatura média variou de ~ 28 °C para ~ 31 °C, aumento de 3 °C. A umidade relativa não apresentou mudanças significativas nos dois períodos.

Os três processos de dissipação da energia luminosa pelas moléculas de clorofilas são competitivos, ou seja, alterações na taxa fotossintética e na dissipação de calor podem causar alterações complementares na emissão da fluorescência. Assim, alterações na fluorescência podem mostrar a ausência ou presença de comprometimentos no processo fotossintético. Nas Figuras 27 e 28 está apresentada a variação horária da razão entre fluorescência variável e fluorescência máxima (F_v/F_m) em clones de eucalipto com idades jovem e adulta no inverno e no verão.

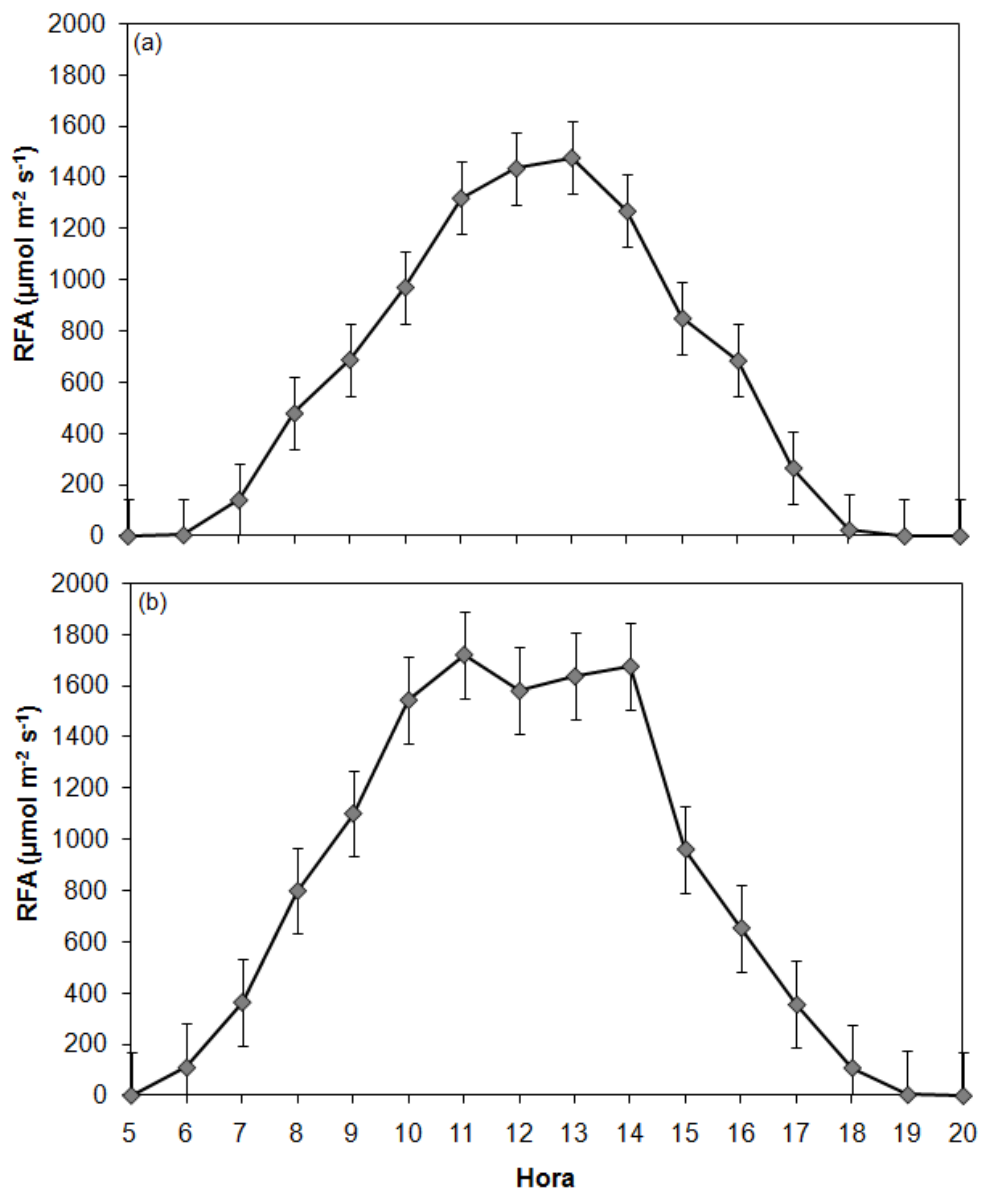


Figura 24 – Curso diurno da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) média dos três dias de medição da fluorescência: (a) inverno e (b) verão.

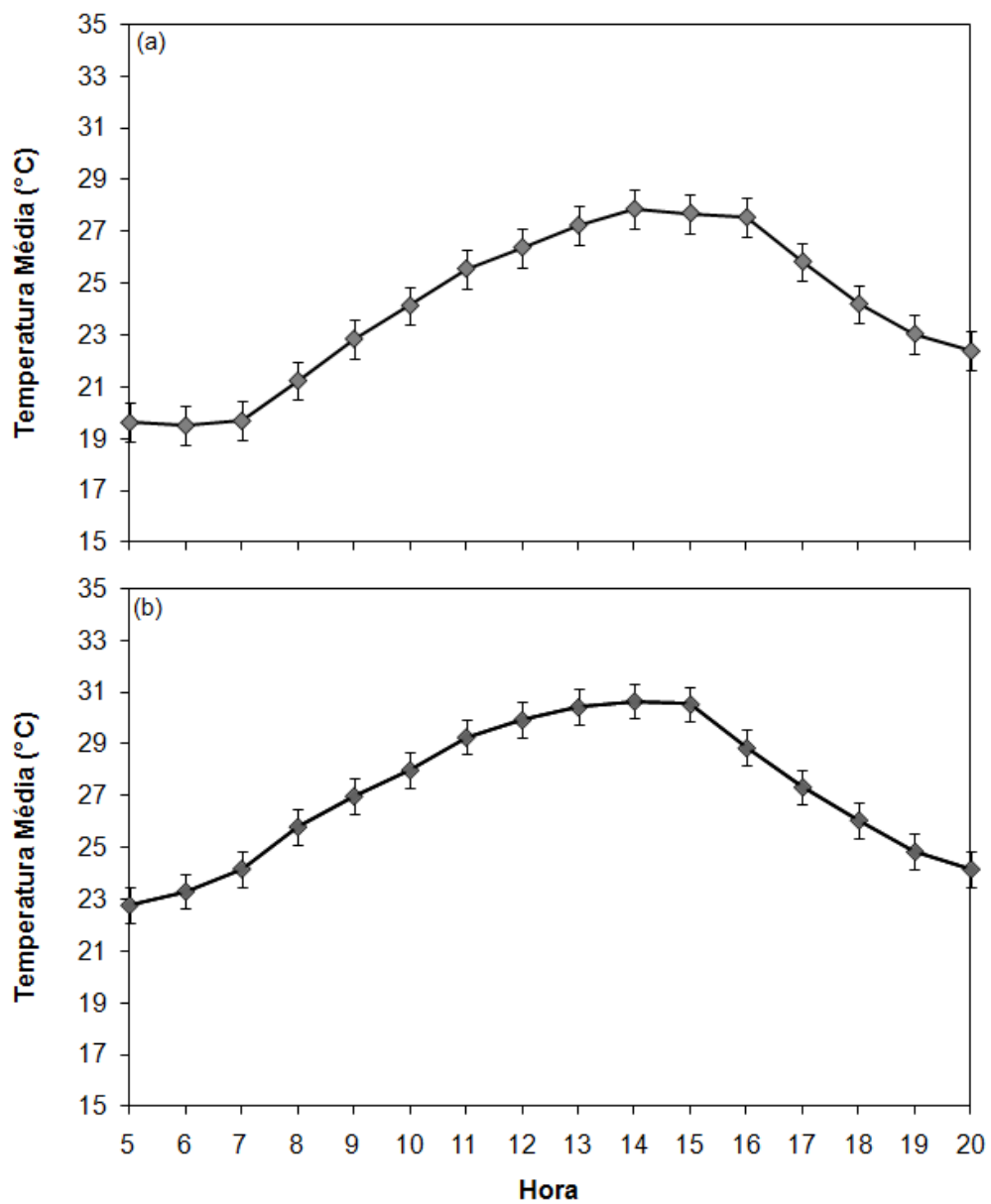


Figura 25 – Temperatura média (°C) dos três dias de medição da fluorescência: (a) inverno e (b) verão.

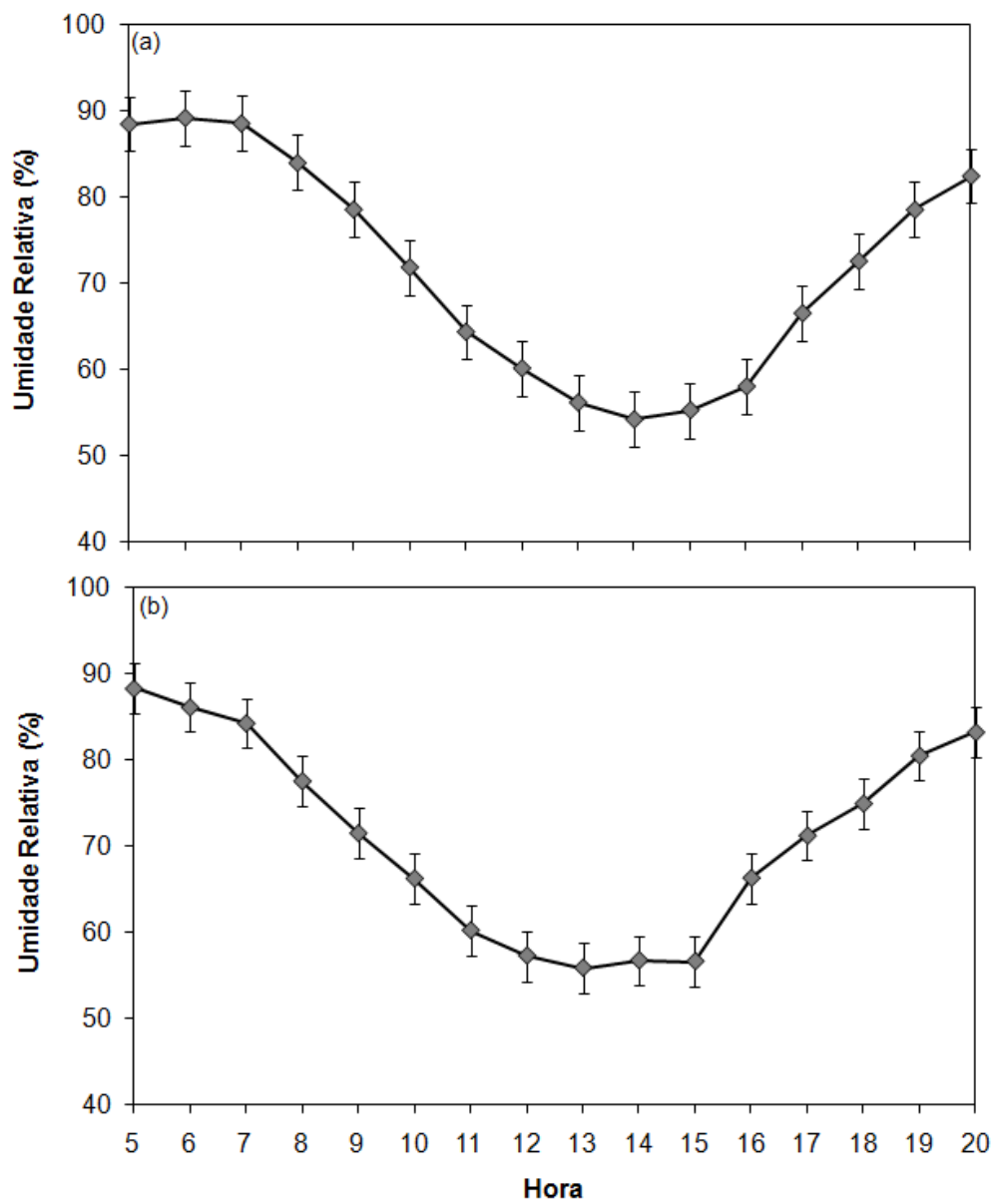


Figura 26 – Umidade relativa (%), média dos três dias de medição da fluorescência: (a) inverno e (b) verão.

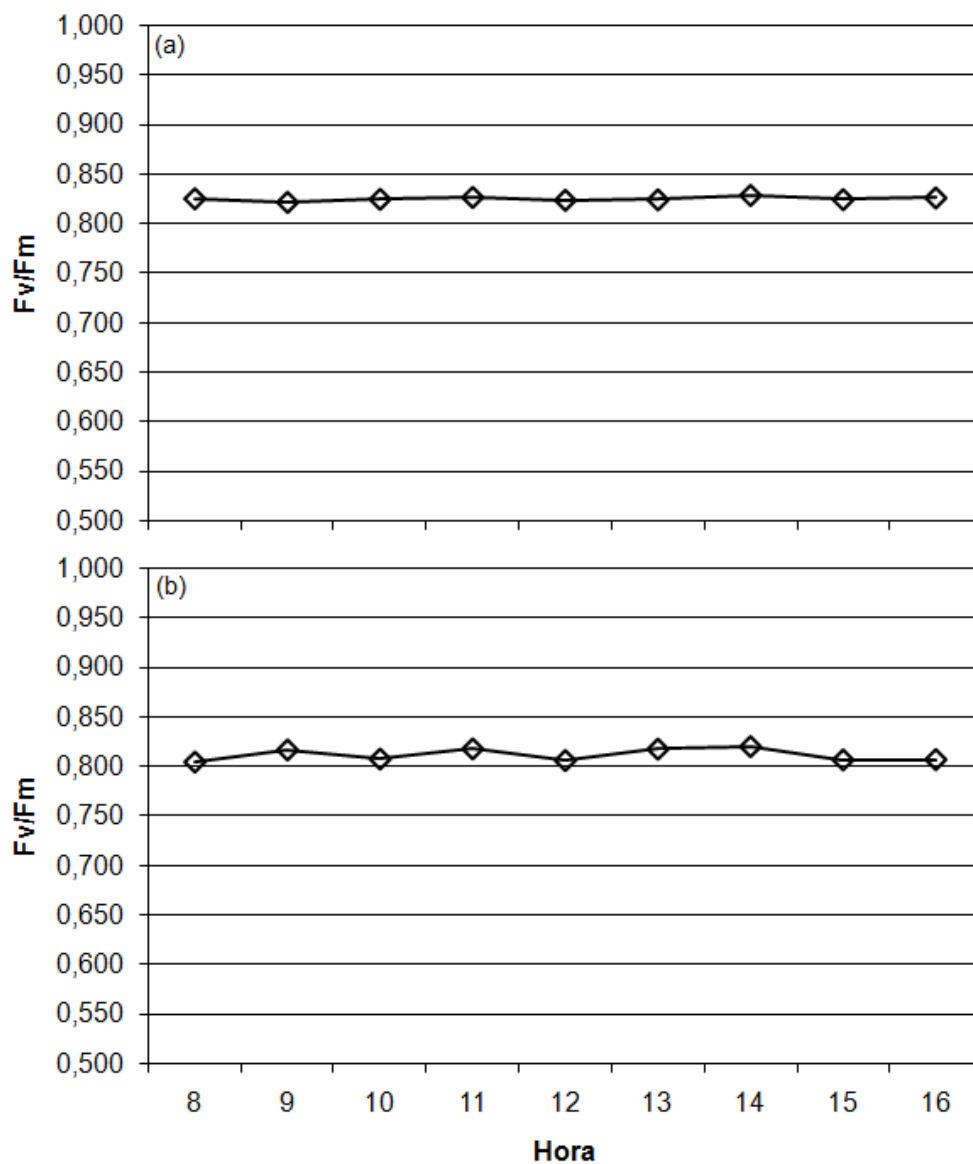


Figura 27 – Variação horária da razão entre fluorescência variável e fluorescência máxima (F_v/F_m) em clones de eucalipto durante o inverno: (a) plântio jovem e (b) plântio adulto.

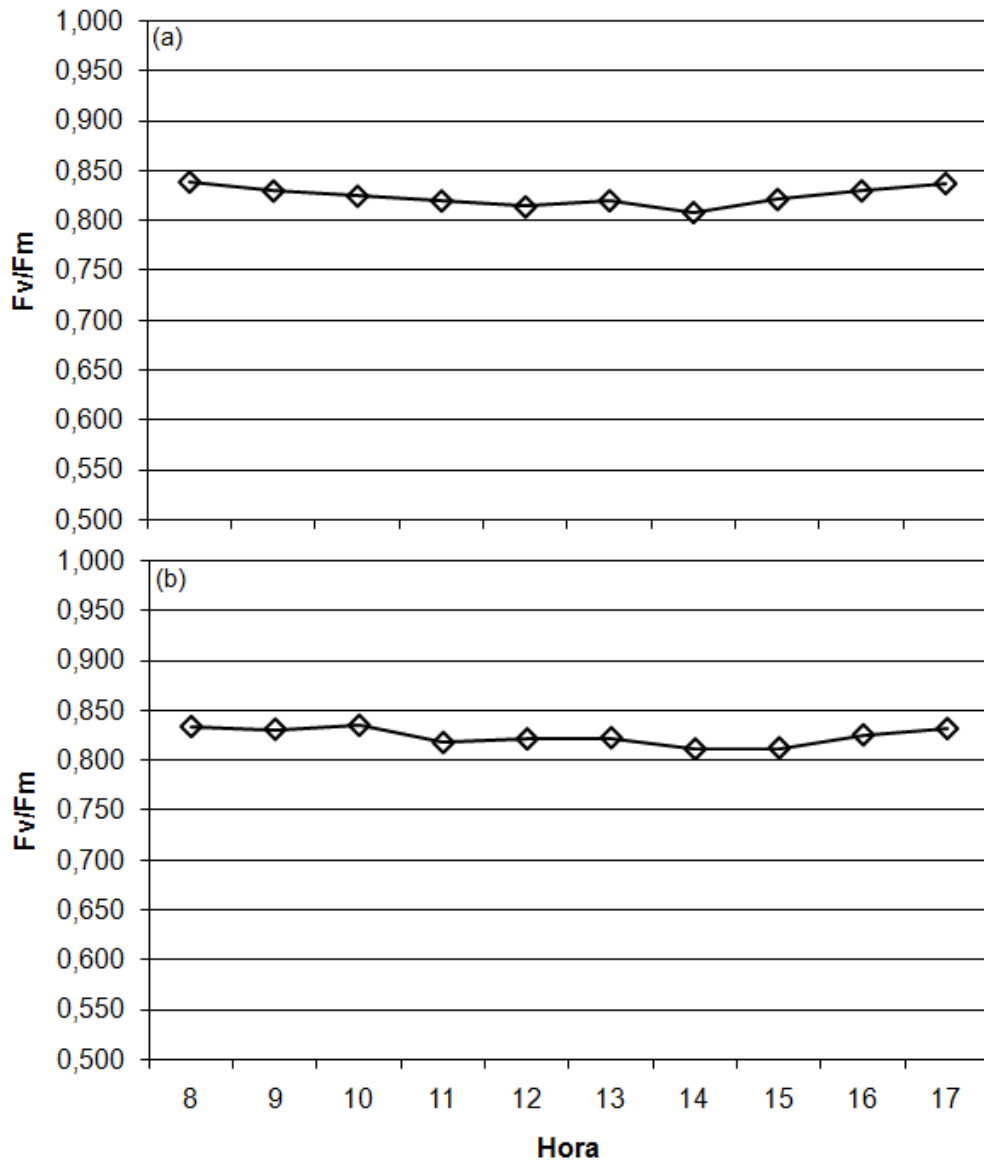


Figura 28 – Variação horária da razão entre fluorescência variável e fluorescência máxima (F_v/F_m) em clones de eucalipto durante o verão: (a) plântio jovem e (b) plântio adulto.

4. DISCUSSÃO

O incremento da taxa fotossintética verificada em clones de eucalipto submetidos a surtos instantâneos de aumento da concentração de CO₂ é uma resposta já observada em várias espécies arbóreas (BARTON *et al.*, 1993; KELLÖMAKI; WANG, 1997; ELLSWORTH, 1999; MIGLIETTA *et al.*, 2001; LIMA *et al.*, 2003). Neste estudo, as maiores taxas fotossintéticas no plantio jovem foram ainda mais evidentes quando ocorreram aumentos na concentração de CO₂ no inverno, com uma diferença de até 30% entre o plantio jovem e o adulto, o que pode ser explicado como a maior capacidade de as árvores jovens utilizarem o produto da fotossíntese (força de dreno). No plantio adulto, a menor força de dreno pode ser a maior restrição na aquisição de C.

A diferença entre as taxas fotossintéticas nas três concentrações de dióxido de carbono mostrou maiores valores da concentração de 760 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, seguidos por 570 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, em comparação com a taxa fotossintética alcançada pela concentração-controle. Em condições ideais do ambiente e em plantas C₃ submetidas ao dobro da concentração atual de CO₂, pode haver aumento de mais de 30% na taxa fotossintética, mas em condições de campo, em que fatores como a disponibilidade de H₂O e nutrientes influenciam no crescimento das plantas, foi mostrado que os aumentos nas taxas fotossintéticas tendem a ser menores que em condições ideais (HOUGHTON, 1990). No plantio jovem, durante o inverno o acréscimo na fotossíntese máxima foi, em média, 28% e 56% para 570 e 760 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂, respectivamente. Já no verão foram observados aumentos de 19% (570 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) e

50% ($760 \mu\text{mol mol}^{-1}$). No plantio adulto, durante o inverno o acréscimo na fotossíntese máxima foi em média 14% e 39% para 570 e $760 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 , respectivamente. Já no verão foram observados aumentos de 48% ($570 \mu\text{mol mol}^{-1}$) e 63% ($760 \mu\text{mol mol}^{-1}$). Nas Figuras 5 e 6, vê-se que os dois períodos de análise apresentaram déficit hídrico, sendo ligeiramente maior no inverno. Tal fato explica a pequena diferença entre os períodos nos resultados ecofisiológicos, já que se pode dizer que não houve grandes diferenças hídricas entre os períodos. A maior diferença entre os resultados ecofisiológicos deve-se principalmente à diferença entre as idades dos plantios e o aumento da temperatura média do ar no verão ~ 3 °C.

Em experimento FACE com *Pinus lobolly* adultos, em que a folhagem do dossel foi continuamente exposta ao aumento de CO_2 (concentração de CO_2 ambiente + $200 \mu\text{mol mol}^{-1}$) durante o crescimento e desenvolvimento das folhas por 400 dias, a fotossíntese no estrato superior do dossel foi estimulada em 50-60% pelo aumento de CO_2 , em comparação com a do ambiente-controle (ELLSWORTH, 1999). Mudanças de *Skita spruce* cresceram em câmaras de topo aberto, em ambiente enriquecido com CO_2 ($700 \mu\text{mol mol}^{-1}$) e concentração ambiente ($355 \mu\text{mol mol}^{-1}$). A fotossíntese líquida em resposta à saturação da luz nas mudas cultivadas em concentração de CO_2 elevada foi 26% maior que a das mudas cultivadas em concentração de CO_2 ambiente (MURRAY *et al.* 2000). Robertnz (1999) analisou galhos de árvores de Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) com 30 anos de idade, expostas ao aumento de CO_2 utilizando *branch bags*. Foram realizados dois tratamentos, um com concentração de CO_2 ambiente ($370 \mu\text{mol mol}^{-1}$) e outro com concentração ambiente mais $340 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 (ambiente elevado). A fotossíntese à luz saturada foi em média 56% maior no ambiente com concentração elevada, em comparação com a concentração ambiente. Os resultados deste estudo estão de acordo com os encontrados nos experimentos supracitados.

Neste experimento houve redução na condutância estomática das árvores submetidas a surtos instantâneos de CO_2 com C_a 570 e C_a 760. No plantio jovem durante o inverno, foram encontradas reduções de 26% (C_a 570) e 31% (C_a 760) e no verão, de 57% (C_a 570) e 61% (C_a 760). No plantio adulto durante o inverno foram encontradas reduções de 37% (C_a 570) e 40% (C_a 760) e no verão, redução de 6% (C_a 570) e 35% (C_a 760). A sensibilidade ao CO_2 é uma propriedade intrínseca das células-guarda que respondem à concentração de CO_2 intercelular (C_i) e não à concentração de CO_2 na superfície da folha (AINSWORTH; ROGERS, 2007). Em

outros experimentos, além do incremento da taxa fotossintética em árvores expostas à atmosfera enriquecida com CO₂, verificou-se redução concomitante da condutância estomática (LIMA *et al.*, 2003; KELLMÄKI; WANG, 1997; COSTA, 2004). Em plantas C₃, observou-se declínio de 30% a 40% na condutância estomática sob atmosfera enriquecida com CO₂ (EAMUS; JARVIS, 1989; DRAKE *et al.*, 1997).

Os estômatos não são somente a via de entrada para as trocas gasosas de CO₂, mas também a via de saída de água, na forma de vapor, do interior para o exterior da folha. Assim, a redução na condutância estomática favoreceu a diminuição na transpiração (*E*), como observado neste experimento. Quando os estômatos estão totalmente abertos, a absorção de CO₂ é mais limitada pela resistência de transferência do que a perda de água pela transpiração. Assim, a melhor relação entre absorção de CO₂ e perda de H₂O é alcançada quando os estômatos estão parcialmente fechados (LARCHER, 2000). O decréscimo na transpiração foi notado nas altas concentrações de CO₂, assim como na condutância estomática. No plantio jovem, a redução de *E* foi em média 17% em C_a 570 e C_a 760 no inverno; no verão foi de 35% e 40% em C_a 570 e C_a 760, respectivamente. No plantio adulto, durante o inverno a redução foi de 28% tanto para C_a 570 quanto para C_a 760. Já no verão *E* reduziu em 6% (C_a 570) e 18% (C_a 760).

A resposta dos estômatos (redução) ao aumento da concentração intercelular (C_i) de CO₂, seguido do incremento da fotossíntese e redução de *E*, favoreceu a eficiência instantânea da transpiração (*EIT*), que relaciona a taxa fotossintética com a condutância estomática (*A/E*). Experimentos com espécies arbóreas evidenciaram redução da condutância estomática em indivíduos jovens em resposta ao elevado CO₂, o que leva à previsão de que o uso da água seria reduzido nas florestas à medida que a concentração de CO₂ na atmosfera aumentasse (KEEL, 2007).

Observaram-se os maiores valores de *EIT* na concentração de CO₂ de 760 μmol mol⁻¹ no plantio adulto durante o inverno, indicando eficiente controle estomático dos clones de eucalipto em situação de menor disponibilidade hídrica (Figura 6). Roden e Ball (1996) verificaram, em duas espécies de eucalipto (*Eucalyptus macrorhyncha* e *Eucalyptus rossii*) crescidas em vasos dentro de câmaras com concentração de CO₂ ambiente (350 μL L⁻¹) e de CO₂ elevada (700 μL L⁻¹), em três tratamentos distintos: (1) irrigado, (2) não irrigado e (3) sujeito diariamente a 3 h de período de estresse com radiação de 1.250 μmol m⁻² s⁻¹ e temperatura de 45 °C, que o aumento da concentração de CO₂ permitiu melhor

desempenho das espécies de eucalipto durante as condições de baixa umidade de solo. A baixa regulação da capacidade fotossintética foi observada em mudas crescendo em elevada concentração de CO₂ quando irrigada, mas não quando sofreu estresse hídrico.

Pela relação A/g_s , que determina a eficiência intrínseca do uso da água ($EiUA$), é possível analisar melhor o efeito estomático sobre a fotossíntese. No plantio adulto foi expressivo o aumento da $EiUA$ no inverno, independentemente da concentração de CO₂ a que foi submetido. Apesar de esse plantio ter apresentado menores valores de fotossíntese quando comparado com o plantio jovem, a alta regulação estomática promoveu melhor desempenho nessa idade.

Como foi dito anteriormente, a razão F_v/F_m é importante indicador do estado funcional do aparato fotossintético, sendo uma estimativa da eficiência quântica do FSII. Na maioria das espécies, os valores ótimos da razão F_v/F_m encontram-se em torno de $0,832 \pm 0,004$ (BJÖRKMAN; DEMMIG, 1987).

Alterações na fluorescência podem mostrar a ausência ou presença de comprometimentos no processo fotossintético. Quando os valores de F_v/F_m ficam abaixo de 0,7, entende-se que está ocorrendo fotoinibição, o que mostra que grande parte da energia luminosa absorvida pela planta foi utilizada para realizar fotossíntese. Assim, notou-se que não houve fotoinibição no clone de eucalipto em nenhum período e idade analisados (Figuras 27 e 28).

5. CONCLUSÕES

- Em ambas as idades, a taxa fotossintética foi incrementada com o aumento da concentração de CO₂.
- A taxa fotossintética foi, em média, maior no plantio jovem, independentemente da concentração de CO₂ aplicada nas folhas.
- A condutância estomática (*g_s*) e a transpiração (*E*) foram reduzidas com o aumento da concentração de CO₂ nos plantios jovem e adulto.
- A *g_s* e *E* em geral foram menores no plantio adulto no inverno, mostrando maior controle na perda de água na idade adulta.
- A eficiência instantânea do uso da água (*EIT*) e a eficiência intrínseca do uso da água (*EiUA*) foram maiores nas altas concentrações de CO₂, sendo os maiores valores encontrados no plantio adulto.
- Em geral, não ocorreram grandes diferenças entre as respostas ecofisiológicas dos plantios nos diferentes períodos, principalmente devido à semelhança das condições hídricas durante a coleta de dados.
- A razão *F_v/F_m* não apresentou valores denotando fotoinibição em nenhuma idade e período estudado.

6. REFERÊNCIAS

AINSWORTH, E.A.; ROGERS, A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. **Plant, Cell and Environment**, v. 30, p. 258-270, 2007.

BOJÖRKMAN, O.; DEMMIG, B. Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. **Planta**, v. 170, n. 1, p. 61-66, 1987.

BOWES, G. Facing the inevitable. **Plants and Increased Atmospheric Co₂**, v. 44, p. 309-332, 1993.

CAMPOSTRINI, E. **Fluorescência da clorofila a**: considerações teóricas e aplicações práticas. Disponível em: <<http://www.uenf.br/downloads/ApostiladeFluorescencia.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2010.

COSTA, P.M.F. **Efeitos da alta concentração de CO₂ sobre o crescimento e o estabelecimento de plântulas do jatobá de mata *Hymenaea courbaril* L. VAR. *stilbocarpa* (HEYNE) Lee & Langenheim (LEGUMINOSAE, CAESALPINIOIDEAE, DETARIEAE)**. 2004. 88 f. Tese (Mestrado em Biologia Celular e Estrutural) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2004.

DRAKE, B.G.; GONZÁLEZ-MELER, M.A.; LONG, S.P. More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO₂? **Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 48, p. 607-37, 1997.

EAMUS, D.; JARVIS, P.G. The direct effects of increase in the global atmospheric CO₂ concentration on natural and commercial temperate trees and forest. **Advances in Ecological Research**, v. 19, p. 1-55, 1989.

ELLSWORTH, D.S. CO₂ enrichment in a maturing pine forest: are CO₂ exchange and water status in the canopy affected? **Plant, Cell and Environment**, v. 22, p. 461-472, 1999.

FREER-SMITH, P. Environmental stresses to forests. In: EVANS, J. (Ed.). **The forests handbook**. Oxford: Blackwell Science, 2001. v. 1, p. 282-300.

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

HOUGHTON, J.T.; JENKINS, G.J.; EPHRAUMS, J.J. **Climate change: the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) scientific assessment**. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1990. 364 p.

KEEL, S.G.; PEPIN, S.; LEUZINGER, S.; KÖRNER, C. Stomatal conductance in mature deciduous forest trees exposed to elevated CO₂. **Trees**, v. 21, p. 151-159, 2007.

KELLOMÄKI, S.; WANG, K.Y. Photosynthetic responses of Scots pine to elevated CO₂ and nitrogen supply: results of a branch-in-bag experiment. **Tree Physiology**, v. 17, p. 231-240, 1997.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos, SP: RiMa, 2000. 531 p.

LEWIS, J.D.; OLSZYK, D.; TINGEY, D.T. Seasonal patterns of photosynthetic light response in douglas-fir seedlings subjected to elevated atmospheric CO₂ and temperature. **Tree Physiology**, v. 19, p. 243-252, 1999.

LIMA, W.P.de; JARVIS, P.; RHIZOPOULOU, S. Stomatal responses of *Eucalyptos* species to elevated CO₂ concentration and drought stress. **Scientia Agrícola**, v. 2, p. 231-238, 2003.

LONG, S.P.; DRAKE, B. Effect of the long term elevation of CO₂ concentration in the field on the quantum yield of photosynthesis of the C₃ sedge, *Scirpus olneyi*. **Plant Physiology**, v. 96, p. 221-226, 1992.

MARTINEZ, C.A. **Fotossíntese – Parte 1**. [S.l. : s.n.], 2008. (Notas de aula).

MEDHURST, J.; PARSEBY, J.; LINDER, S.; WALLIN, G.; CESCHIA, E.; SLANEY, M. A whole-tree chamber system for examining tree-level physiological responses of field-grown trees to environmental variation and climate change. **Plant, Cell and Environment**, v. 29, p. 1853-1869, 2006.

MIGLIETTA, F.; PERESSOTTI, A.; VACCARI, F.P.; ZALDEI, A.; ANGELIS, P. de; SCARASCIA-MUGNOZZA, G. Free-air CO₂ enrichment (FACE) of a poplar plantation: the POPFACE fumigation system. **New Phytologist**, v. 150, p. 465-476, 2001.

MURRAY, M.B.; SMITH, R.I.; FRIEND, A.; JARVIS, P.G. Effect of elevated [CO₂] and varying nutrient application rates on physiology and biomass accumulation of Sitka spruce (*Picea sitchensis*). **Tree Physiology**, v. 20, p. 421-434, 2000.

PRADO, C.H.B.A.; MORAES, J.A.P.V. Photosynthetic capacity and specific leaf mass in twenty woody species of Cerrado vegetation under field conditions. **Photosynthetica**, v. 33, p. 103-112, 1997.

ROBERTNZ, P. Effects of long-term CO₂ enrichment and nutrient availability in Norway spruce. I. Phenology and morphology of branches. **Trees**, v. 13, p. 188-198, 1999.

RODEN, J.S.; BALL, M.C. The effect of elevated [CO₂] on growth and photosynthesis of two *Eucalyptus* species exposed to high temperatures and water deficits. **Plant Physiology**, v. 111, p. 909-919, 1996.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3th ed. Massachusetts: Publishers Sunderland, Sinauer Associates, Inc., 2003. 690 p.

CAPÍTULO II

ESTIMATIVA DA EFICIÊNCIA QUÂNTICA DO DOSSEL EM PLANTIO DE CLONES DE EUCALIPTO SOB DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE CO₂

RESUMO

O processo fotossintético pode ser bem interpretado a partir da curva de resposta fotossintética à luz. A declividade da região linear dessa curva representa o rendimento quântico máximo da fotossíntese ou a eficiência quântica (α), ou seja, a relação entre moles de carbono (C) assimilados e moles de fótons absorvidos. Dependendo das condições e técnicas de medição, α reflete aspectos diferentes do aparato fotossintético. Existe uma base teórica consistente afirmando que o valor de α sob condições normais de CO₂ não pode exceder o valor de 0,05. Apesar disso, trabalhos que incluem a produção de raízes e queda de *litter* no cômputo da produção primária bruta (PPB) têm encontrado valores acima de 0,07 mol C mol⁻¹ RFA⁻¹. O objetivo deste estudo foi estimar a eficiência quântica em plantio clonal de eucalipto submetido a surtos instantâneos de CO₂, observando-se o efeito da sazonalidade climática. Para a determinação de α , é necessário o conhecimento da fotossíntese, ou seja, das trocas de CO₂ ou de O₂, em nível de ecossistema, de dossel ou de folha, os quais serão relacionados com os valores de radiação fotossinteticamente ativa (RFA).

Determinaram-se as curvas de fotossíntese *versus* radiação em plantios de eucalipto clonal em Aracruz, ES, em três níveis de concentração de CO₂ (380, 570 e 760 μmol mol⁻¹) e duas épocas do ano (inverno e verão). Em seguida, estimou-se a eficiência quântica por meio da equação $\alpha = k \cdot A_{\max} (e^{k \cdot PCR})$, em que A_{\max} é a fotossíntese líquida máxima, e a base do logaritmo natural, k a constante de proporcionalidade que está associada à concavidade da curva e PCR o ponto de compensação à radiação. Neste estudo, α variou de 0,0521 a 0,0532 mol C mol⁻¹ RFA⁻¹ sob concentração de CO₂ ambiente e de 0,0572 a 0,0661 mol C mol⁻¹ RFA⁻¹ sob elevada concentração de CO₂. Os valores de α apresentaram aumento de 17% no plantio jovem e de 27% no plantio adulto sob elevada concentração de CO₂, em comparação com a concentração-controle. A eficiência quântica teve variação relativamente pequena entre o inverno e o verão. O período de inverno apresentou valores ligeiramente maiores que o de verão em razão, principalmente, das menores temperaturas encontradas nesse período que, provavelmente, reduziram a fotorrespiração. O plantio adulto apresentou maior eficiência quântica em comparação com o plantio jovem sob concentração de 760 μmol mol⁻¹ de CO₂, enquanto nas outras concentrações de CO₂ não se verificou diferença expressiva nos valores de α entre as diferentes idades.

CHAPTER II

ESTIMATE OF QUANTUM EFFICIENCY IN THE CANOPY IN PLANTATION OF CLONES OF EUCALYPTUS UNDER DIFFERENT CONCENTRATIONS OF CO₂

ABSTRACT

The photosynthetic process can be well interpreted from the photosynthetic curve of response to light. The slope of the linear region of the curve represents the maximum quantum yield of photosynthesis or the quantum efficiency (α), i.e., the ratio of moles of assimilated carbon (C) and moles of absorbed photons. Depending on the conditions and measurement techniques, α reflects different aspects of the photosynthetic apparatus. There is a consistent theoretical basis stating that the value of α under normal CO₂ conditions cannot exceed the value of 0.05. Nevertheless, studies that include the production of roots and litter fall in the computation of gross primary production (GPP) have found values above 0.07 mol C mol⁻¹ RFA⁻¹. The objective of this study was to estimate the quantum efficiency in clonal eucalyptus plantations submitted to instant surges of CO₂, by observing the effect of climate seasonality. For the determination of α , knowledge of photosynthesis is required, i.e., CO₂ or O₂ exchanges, at the level of ecosystem, or leaf or canopy, which will be related to the values of photo synthetically active radiation (*PAR*). Curves of photosynthesis *versus* radiation on clonal eucalyptus plantations were evaluated in

Aracruz, ES, at three levels of CO₂ concentration (380, 570 and 760 μmol mol⁻¹) and two seasons (winter and summer). Then, quantum efficiency was estimated from the equation $\alpha = k \cdot A_{\max} (e^{k \cdot PCR})$, in which A_{\max} is the maximum net photosynthesis, e is the base of natural logarithm, k is the proportionality constant which is associated with concavity of the curve and PCR is the compensation point to radiation. In this study, α ranged from 0.0521 to 0.0532 mol C mol⁻¹ RFA⁻¹ under concentration of environment CO₂, and from 0.0572 to 0.0661 mol C mol⁻¹ RFA⁻¹ under high CO₂ concentration. The values of α showed a 17% increase in the young plantation and of 27% in the adult plantation under high CO₂ concentration, compared with the concentration-control. The quantum efficiency had a relatively small variation between winter and summer. The winter period showed slightly higher values than in the summer, mainly due to the lower temperatures found in this period which probably reduced photorespiration. Adult plantation showed greater quantum efficiency compared with the young plantation at concentration of 760 μmol mol⁻¹ of CO₂ whereas at the other CO₂ concentrations, there was no significant difference in α values among the different ages.

1. INTRODUÇÃO

O rendimento quântico tem sido amplamente estudado em nível de folha (EHLERINGER; BJÖRKMAN, 1977; EHLERINGER; PEARCY, 1983; LONG; DRAKE, 1991). O rendimento quântico máximo da fotossíntese é mais importante do que o ponto de saturação, que é atingido quando não há aumento significativo da taxa fotossintética (de PURY; FARQUHAR, 1997).

A literatura que trata a respeito da eficiência energética de conversão da luz em energia química atribui termos diferentes que na verdade tem o mesmo significado, por exemplo: eficiência quântica (α), rendimento quântico (Φ), eficiência energética (α ou Φ) e eficiência quântica máxima (α_{CX}). Dependendo do órgão da planta utilizado para caracterizar a referida eficiência, acrescenta-se o nome dele, da folha ou do dossel. Em alguns casos, acrescenta-se também a palavra “aparente”.

Para determinar a fotossíntese em campo, é necessário que o povoamento esteja em pleno desenvolvimento foliar e que as condições limitantes ao crescimento sejam mínimas. Essa determinação pode ser realizada por diversos métodos: fotoacústico, luminescência e fluorescência da clorofila e trocas de CO_2 e O_2 . Os métodos baseados nas trocas de CO_2 e O_2 podem ser divididos em: técnicas micrometeorológicas, fracionamento isotópico dos átomos de carbono e oxigênio e análise de gases por infravermelho (LEVERENZ; HÄLLGREN, 1991).

Ögren e Evans (1993) examinaram as curvas de fotossíntese em resposta à luz de folhas de *Eucalyptus maculata* e *E. pauciflora*, por meio de três métodos distintos, para medir a fotossíntese: trocas de CO_2 e vapor d'água, evolução de O_2 e

fluorescência da clorofila. Os dados de fotossíntese *versus* irradiância foram ajustados a partir da equação quadrática a seguir:

$$\Theta P^2 - (\alpha_{CX} \cdot RFA + P_m)P - \alpha_{CX} \cdot RFA + P_m = 0 \quad (1)$$

em que P é a taxa fotossintética com unidade de μmol (CO_2 , O_2 ou elétrons) $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, dependendo do método de medida; P_m é a taxa fotossintética máxima para saturação de luz; α_{CX} é a eficiência quântica máxima do dossel; RFA é a radiação fotossinteticamente ativa; e Θ é a convexidade da curva.

Dependendo das condições e técnicas de medição, a eficiência quântica (α) reflete aspectos diferentes do aparato fotossintético. Estudos comparativos mostram que a eficiência fotossintética varia pouco entre as espécies de diversas origens quando as plantas crescem sob condições não limitantes e que a eficiência quântica ficava próxima ao valor teórico atingível (SINGSAAS et al., 2001; LONG et al., 1993). Entretanto, alguns trabalhos contradizem essa conclusão, dizendo que a eficiência quântica fica 30% abaixo dos valores encontrados em estudos comparativos, criando a impressão de que certas plantas, principalmente as que crescem em campo, podem ter baixa eficiência quântica. Assim, variáveis como: déficit de pressão de vapor, temperatura, disponibilidade de água no solo e nutrientes, quando em condições limitantes no ambiente, contribuem para reduzir o α .

Singsaas et al. (2001) investigaram a variação nos valores medidos da eficiência quântica, utilizando um banco de dados com 29 estudos de fotossíntese publicados, com observações de campo de 48 espécies, medidos pela evolução de O_2 (Tabela 1) e pela assimilação de CO_2 (Tabela 2). Também calcularam a eficiência quântica limitada pela luz de medidas da assimilação de CO_2 em oito espécies nativas crescendo em campo e duas espécies crescendo em condições artificiais (Tabela 3). A eficiência quântica (α) foi calculada a partir dos dados de fotossíntese em resposta à luz usando regressão linear por meio de três ou mais pontos, onde a assimilação líquida de CO_2 foi linearmente relacionada à radiação fotossinteticamente ativa (RFA). Os dados deste trabalho confirmaram que a eficiência quântica é próxima ao valor teórico atingível e pouco variável entre as espécies. Portanto, a subestimativa de α em alguns estudos pode ser devida à inclusão de dados que extrapolam a parte linear da curva de fotossíntese em resposta

à luz e, ainda, à influência da variação da concentração de CO₂ intercelular durante as medições.

Tabela 1 – Eficiência quântica (α) obtida a partir da medição da evolução de O₂, em diferentes trabalhos

Espécie	$\alpha - O_2$	Condições de crescimento ^d	Referência
<i>Acer saccharum</i> Marshall ^a	0,0630	C	Naidu and deLucia, 1997
<i>A. saccharum</i> Marshall ^{a,b}	0,0120	C	Naidu and deLucia, 1998
<i>A. saccharum</i> Marshall ^{a,c}	0,0230	C	Naidu and deLucia, 1998
<i>Chenopodium abum</i> L.	0,1053	C	Lal and Edwards, 1995
<i>Eucalyptus maculata</i> Hook.	0,0543	C	Ögren and Evans, 1993
<i>Flaveria cronquistii</i>	0,1080	E	Lal and Edwards, 1995
<i>F. robusta</i>	0,1069	E	Lal and Edwards, 1995
<i>F. pringlei</i>	0,1083	E	Lal and Edwards, 1995
<i>Opuntia basilaris</i> Engel & Bigelow	0,0750	E	Adams et al., 1987
<i>O. basilaris</i> Engel & Bigelow	0,0300	C	Adams et al., 1987
<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	0,1025	CC	Castonguay and Markhart, 1991
<i>P. acutifolius</i>	0,1050	CC	Castonguay and Markhart, 1991
<i>Pisum sativum</i> L.	0,0970	CC	Chow et al., 1990
<i>P. sativum</i> L.	0,0800	E	Chow et al., 1990
<i>P. sativum</i> L.	0,0923	CC	Oquist et al., 1992
<i>P. sativum</i> L.	0,1080	E	Chow et al., 1990
<i>Quercus suber</i> L. ^b	0,1100	C	Faria et al., 1996
<i>Q. suber</i> L. ^c	0,0875	C	Faria et al., 1996
<i>Q. rubra</i> L. ^a	0,0550	C	Naidu and deLucia, 1997
<i>Q. rubra</i> L. ^{a,b}	0,0320	C	Naidu and deLucia, 1998
<i>Q. rubra</i> L. ^{a,c}	0,0430	C	Naidu and deLucia, 1998
<i>Ricinus communis</i> L.	0,0998	C	Lal and Edwards, 1995
<i>Tradescantia albiflora</i> Kunth.	0,0966	CC	Oquist et al., 1992

^a Árvores plantadas sobre a serapilheira de florestas; ^b folhas adaptadas à sombra; ^c folhas adaptadas ao sol; ^d condições de crescimento: câmara de crescimento (CC); estufa (E); e campo (C).
Fonte: SINGSAAS et al., 2001.

Tabela 2 – Eficiência quântica (α) obtida a partir da medição do CO₂ fixado, em diferentes trabalhos

Espécie	$\alpha - \text{CO}_2$	Condições de crescimento ^c	Referência
<i>Brassica napus</i> L.	0,0550	E	Farage and Long, 1991
<i>B. napus</i> L.	0,0400	C	Farage and Long, 1991
<i>Carica papaya</i> L.	0,0488	E	Marler et al., 1993
<i>Duchesnea indica</i> (Andrzejowski) Focke. ^a	0,0600	C	Ösbome et al., 1997
<i>Erythrina poeppigiana</i> (Walp.) O.F.	0,0663	C	Nygreen, 1995
<i>Fagus grandifolia</i> Ehrth.	0,0426	C	Teskey and Shrestha, 1985
<i>Helianthus annuus</i> L.	0,0650		Jacob and Lawlor, 1991
<i>Lepechinia calycinia</i>	0,0550	C	Field and Mooney, 1983
<i>Liquidambar styraciflua</i> L.	0,0466	C	Teskey and Shrestha, 1985
<i>Lirtodendron tulipifera</i> L.	0,0550	C	Teskey and Shrestha, 1985
<i>Manikara zapota</i> (L.) Von Roney	0,0300	E	Mickelbart and Marler, 1996
<i>Mucuna pruriens</i> L. var. utilis ^b	0,0480	CC	Monson et al., 1992
<i>Olea europaea</i> L. var. <i>europaea</i> cv. Rajo	0,0270	E	Bongi and Long, 1987
<i>Oryza australiensis</i>	0,0649	E	Yeo et al., 1994
<i>O. glaberrima</i> Stendel	0,0505	E	Yeo et al., 1994
<i>O. latifolia</i> Derv.	0,0590	E	Yeo et al., 1994
<i>O. longiglumis</i>	0,0553	E	Yeo et al., 1994
<i>O. longistaminata</i> A. Chev. & Roehr.	0,0610	E	Yeo et al., 1994
<i>O. meridionalis</i>	0,0634	E	Yeo et al., 1994
<i>O. nivara</i>	0,0769	E	Yeo et al., 1994
<i>O. officinalis</i>	0,0684	E	Yeo et al., 1994
<i>O. rhizomatis</i>	0,0586	E	Yeo et al., 1994
<i>O. rufipogon</i> Griffiths	0,0457	E	Yeo et al., 1994
<i>O. sativa</i> L.	0,0800	E	Ágarie et al., 1994
<i>O. sativa</i> L.	0,0522	E	Yeo et al., 1994
<i>Pinus sylvestris</i>	0,0570	C	Leverenz, 1987
<i>P. taeda</i> L.	0,0269	C	Teskey and Shrestha, 1985
<i>Prunus cerasus</i> L. cv. Montmorency	0,0266	E	Beckman et al., 1992
<i>Quercus alba</i> L.	0,0324	C	Teskey and Shrestha, 1985
<i>Q. rubra</i> L.	0,0355	C	Teskey and Shrestha, 1985
<i>Q. cerris</i> L.	0,0700		Valentini et al., 1995
<i>Salix</i> sp.	0,0500	C	Ögren and Sjostrom, 1990
<i>Scirpus olneyi</i> Gray.	0,0650	C	Long and Drake, 1991
<i>Simmondsta chinensis</i> (Link.) Schneider	0,0590	E	Loreto and Bongi, 1989
<i>Triticum aestivum</i> L.	0,0820	CC	Dai et al., 1993
<i>T. aestivum</i> L. cv. Avalon	0,0520	CC	Farage et al., 1991
<i>T. aestivum</i> L.	0,0650		Jacob and Lawlor, 1991
<i>T. aestivum</i> L. cv. Alexandria	0,0650	CC	Habash et al., 1995
<i>Vaccinium ashei</i> Reade	0,0350	E	Davies and Flore, 1986
<i>Vitis vinifera</i> L.	0,0413	E	Correia et al., 1990

^a Câmaras abertas localizadas sobre a serapilheira da floresta; ^b crescimento e medições a 26 °C; ^c condições de crescimento: câmara de crescimento (CC), estufa (E); e campo (C).

Fonte: SINGSAAS et al., 2001.

Tabela 3 – Eficiência quântica (α) obtida a partir da medição do CO₂ fixado em 10 espécies em Illinois central, USA

Espécie	$\alpha - \text{CO}_2$
<i>Acer saccharum</i> Marshall.	0,066±0,002
<i>Aesculus glabra</i> Willd.	0,083±0,009
<i>Apocynum androsaemifolium</i> L.	0,076±0,003
<i>Asarum canadense</i> L.	0,080±0,000
<i>Glycine max</i> (L.) Merr	0,086±0,001
<i>Helianthus tuberosus</i> L.	0,077±0,002
<i>Parthenocissus quinquefolia</i> (L.) Planchon	0,079±0,003
<i>Phaseolus vulgaris</i> L. var. Linden	0,084±0,001
<i>Rhamnus cathartica</i> L.	0,084±0,008
<i>Solidago canadensis</i> L.	0,090±0,006

Fonte: SINGSAAS et al., 2001.

Estudos como de Stape (2008) estimaram a eficiência quântica de plantios de eucalipto por meio de modelo como o 3-PG (Physiological Principles in Predicting Growth), desenvolvido por Landsberg e Waring (1997). Esse modelo estima a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel (*RFAA*) por meio da Lei de Beer. Quantificada a *RFAA* pelo dossel, o 3-PG estima a quantidade de CO₂ fixado por unidade de energia radiante absorvida (fótons), que representa a eficiência quântica do dossel (α_c). O valor dessa eficiência de conversão é calculado a partir de um valor de eficiência quântica máxima do dossel (α) que considera as limitações ambientais impostas pelo déficit de pressão de vapor (f_{VPD}), pela temperatura (f_T), pelas geadas (f_F), pela disponibilidade hídrica (f_A) e nutricional (f_N) e pela idade da população (f_I). Após a consideração de todas essas limitações impostas pelo ambiente por meio dos moduladores, o 3-PG estima o relacionamento entre a produção primária bruta (PPB) e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel (*RFAA*):

$$PPB = \alpha_c RFAA \quad (2)$$

Segundo Gholz e Lima (1997), existe uma base teórica consistente afirmando que o valor de α sob condições normais de CO₂ não pode exceder o valor de 0,05. Apesar disso, trabalhos que incluem a produção de raízes e queda de litter no cômputo da PPB têm encontrado valores acima de 0,07 mol C mol⁻¹ *RFAA*⁻¹ que poderiam ser mais realísticos (LANDSBERG et al., 2003).

Estudos de modelagem da fotossíntese em dossel, baseado na resposta fotossintética de folhas individuais à luz, mostram que a eficiência quântica (α) tem maior importância para a produtividade que a taxa de fotossíntese máxima (de PURY; FARQUHAR, 1997).

Este estudo teve como objetivo estimar a eficiência quântica em plantio clonal de eucalipto submetido a surtos instantâneos do aumento da concentração de CO₂, com idades distintas e observando o efeito da sazonalidade climática.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A caracterização da área de estudo, condições experimentais, medições das trocas gasosas e a curva fotossintética de resposta à luz deste capítulo são as mesmas que foram descritas no capítulo I.

Aqui é tratada a metodologia para estimar a eficiência quântica em povoamento clonal de eucalipto (híbrido *E. grandis* x *E. urophylla*), sendo um plantio jovem e outro adulto, em dois períodos do ano (inverno e verão), submetidos a aumentos instantâneos da concentração de CO₂.

2.1. Estimativa da eficiência quântica do dossel

Para a determinação da eficiência quântica (α) é necessário o conhecimento da fotossíntese, ou seja, das trocas de CO₂ ou de O₂, em níveis de ecossistema, de dossel ou de folha, os quais serão relacionados com os valores de radiação fotossinteticamente ativa (*RFA*). Como o processo fotossintético pode ser bem interpretado a partir da curva de resposta à luz (Figura 1), o ajuste dos valores das curvas de *A versus RFA* pode ser realizado pela equação a seguir (PRADO; MORAES, 1997).

$$A = A_{\max} \left[1 - e^{-k(RFA-PCR)} \right] \quad (3)$$

em que:

$$A = \text{fotossíntese líquida momentânea, } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1};$$

A_{max} = fotossíntese líquida máxima, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$;

E = base do logaritmo natural ($e = 2,718$);

K = constante de proporcionalidade está associado à concavidade da curva ($0,001 - 0,009$);

PCR = ponto de compensação à radiação, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; e

RFA = radiação fotossinteticamente ativa, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

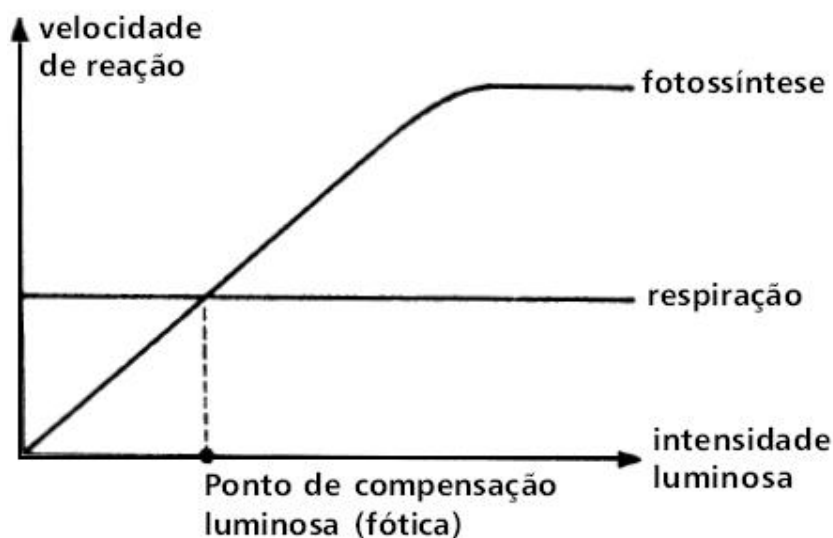


Figura 1 – Resposta fotossintética à luz.

A declividade da região linear da curva de resposta fotossintética à luz representa o rendimento quântico máximo da fotossíntese, ou seja, expressa a relação entre moles de carbono assimilados e moles de fótons absorvidos. Por meio da equação 4, é possível encontrar a inclinação da curva na fase linear conhecida como eficiência quântica (α).

$$\alpha = k \cdot A_{\max} \left(e^{k \cdot PCR} \right) \quad (4)$$

em que α é a eficiência quântica, $\text{mol C mol}^{-1} RFA^{-1}$.

3. RESULTADOS

Nas Figuras 2 e 3, observam-se as curvas de fotossíntese (A) *versus* radiação fotossinteticamente ativa (RFA) durante o inverno e o verão, respectivamente, em plantios jovem e adulto submetidos à concentração de CO_2 controle ($380 \mu\text{mol mol}^{-1}$) e elevadas concentrações: 570 e $760 \mu\text{mol mol}^{-1}$. Verificam-se as maiores taxas fotossintéticas em elevadas concentrações de CO_2 , independentemente da idade do plantio e do período analisado.

A eficiência quântica (α) é a inclinação inicial da curva de fotossíntese em resposta à radiação e representa a máxima eficiência de utilização da luz na fotossíntese. Nas Tabelas 4 e 5 estão apresentados os valores da eficiência quântica (α) no clone de eucalipto estudado durante o inverno e o verão, respectivamente. Logo, observa-se que os valores de α são maiores nas folhas sob altas concentrações de CO_2 quando comparados ao α sob a concentração de CO_2 controle (Tabela 7). Também é possível observar que a eficiência quântica apresenta ligeiro decréscimo do inverno para o verão. Devido à pequena diferença encontrada nos valores de α entre as duas épocas do ano, realizou-se a média dos períodos (Tabela 6). As médias da eficiência quântica indicaram que não ocorreram grandes diferenças entre as idades (jovem e adulta). Logo, observa-se que os valores de α não foram significativamente diferentes entre as idades na probabilidade de 5% (Tabela 7).

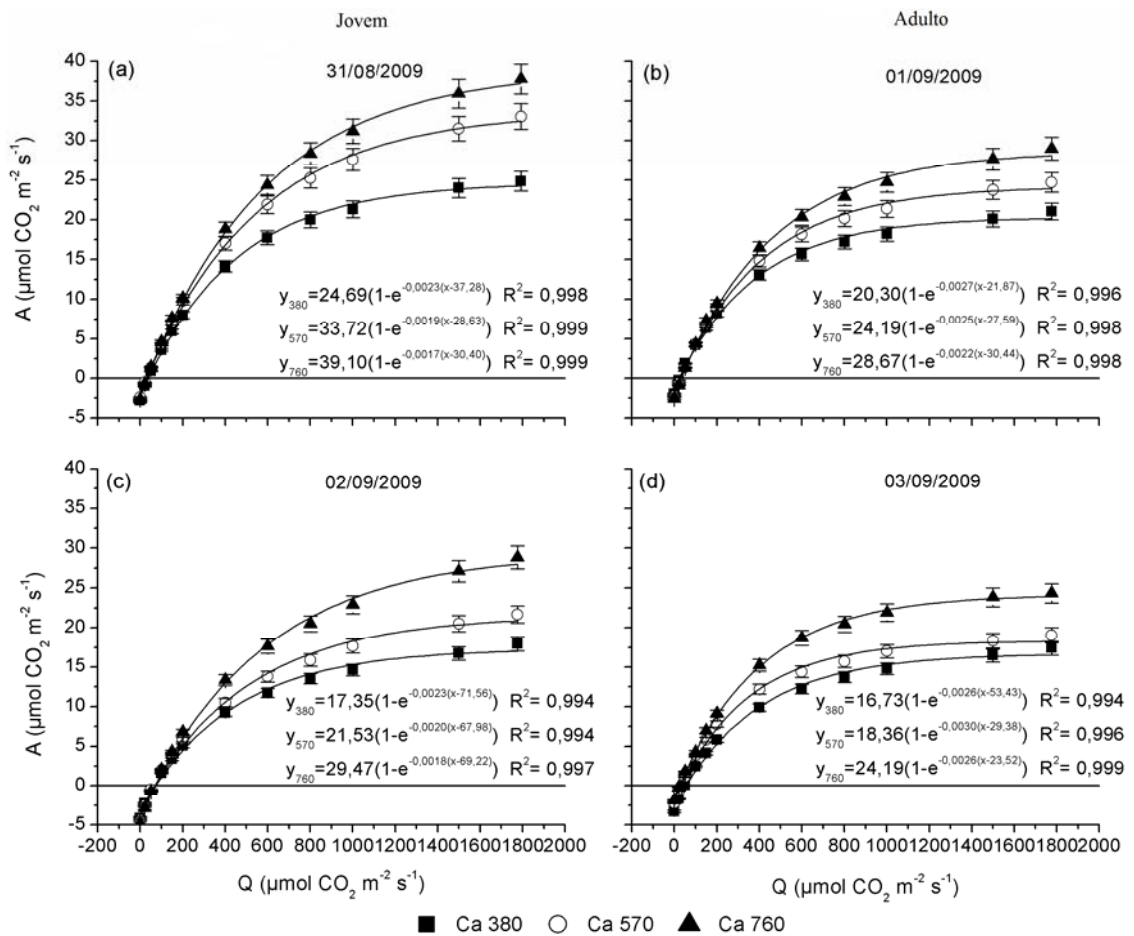


Figura 2 – Curvas de resposta da fotossíntese (A) em função da radiação (Q) em clones de eucalipto, sob três concentrações de CO_2 , no **inverno**: (a) plantio jovem; (b) plantio adulto; (c) plantio jovem; e (d) plantio adulto.

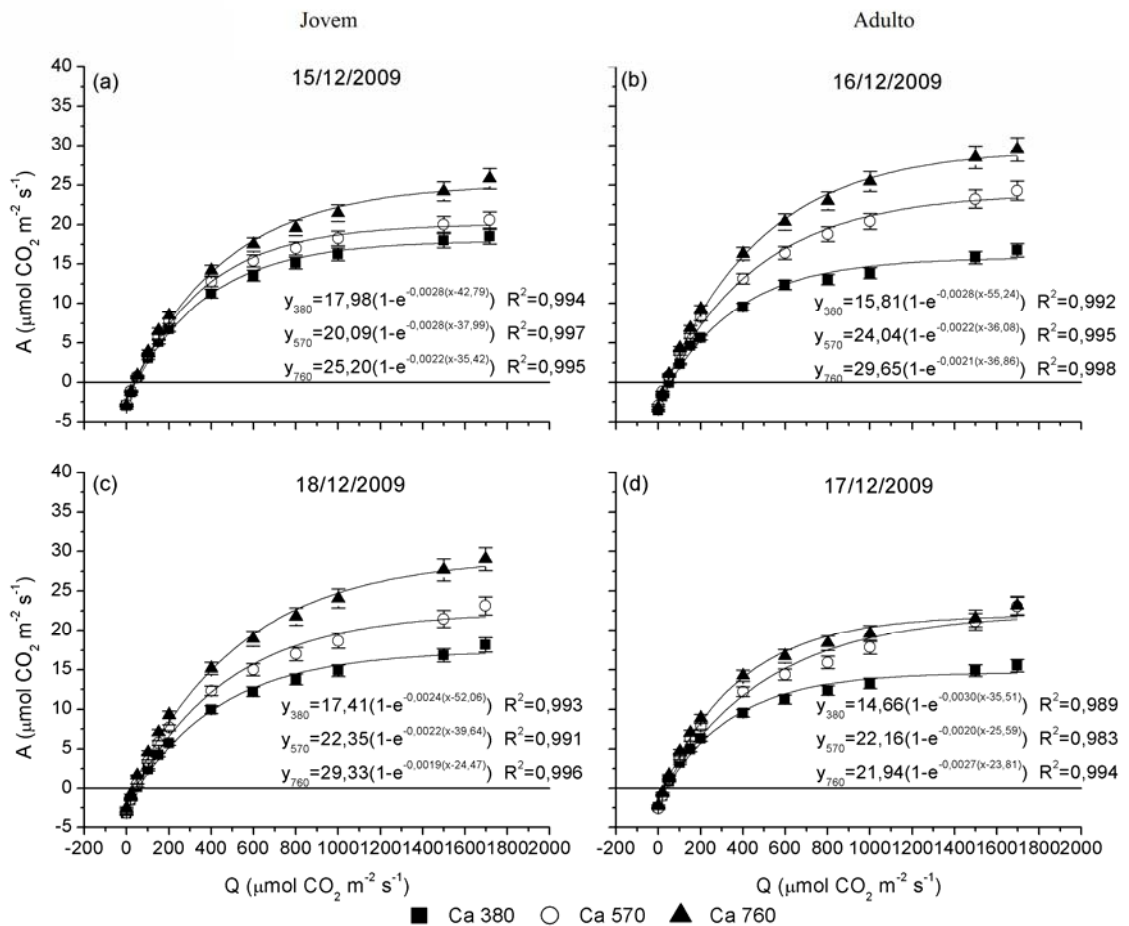


Figura 3 – Curvas de resposta da fotossíntese (A) em função da radiação (Q) em clones de eucalipto, sob três concentrações de CO_2 , no **verão**: (a) plantio jovem; (b) plantio adulto; (c) plantio jovem; e (d) plantio adulto.

Tabela 4 – Eficiência quântica (α) obtida a partir da medição do CO₂ fixado, no inverno, em povoamentos de eucalipto clonal (híbrido *E. grandis* x *E. urophylla*) em Aracruz, ES

Data	Idade do plantio (ano)	[CO ₂] ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	α ($\text{mol C mol}^{-1} \text{RFA}^{-1}$)
31/08/2009	0,92	380	0,0619
		570	0,0676
		760	0,0700
01/09/2009	4,75	380	0,0581
		570	0,0648
		760	0,0674
02/09/2009	0,92	380	0,0470
		570	0,0493
		760	0,0601
02/09/2009	4,75	380	0,0500
		570	0,0602
		760	0,0669

Tabela 5 – Eficiência quântica (α) obtida a partir da medição do CO₂ fixado, no verão, em povoamentos de eucalipto clonal (híbrido *E. grandis* x *E. urophylla*) em Aracruz, ES

Data	Idade do plantio (ano)	[CO ₂] ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	α ($\text{mol C mol}^{-1} \text{RFA}^{-1}$)
15/12/2009	1,17	380	0,0568
		570	0,0626
		760	0,0600
16/12/2009	5,00	380	0,0517
		570	0,0572
		760	0,0673
17/12/2009	5,00	380	0,0489
		570	0,0466
		760	0,0632
18/12/2009	1,17	380	0,0473
		570	0,0537
		760	0,0584

Tabela 6 – Eficiência quântica (α) obtida a partir da medição do CO₂ fixado em povoamentos de eucalipto clonal (híbrido *E. grandis* x *E. urophylla*) em Aracruz, ES

Idade do plantio	[CO ₂] ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	α ($\text{mol C mol}^{-1} \text{RFA}^{-1}$)
Jovem	380	0,0532
	570	0,0582
	760	0,0621
Adulto	380	0,0521
	570	0,0572
	760	0,0661

Quando se relacionam a concentração de CO₂ e a eficiência quântica (α), nota-se o efeito crescente em α à medida que a concentração de CO₂ é elevada. Pela Figura 4, nota-se uma tendência de maiores valores de eficiência quântica no inverno, apesar de os períodos inverno e verão não terem sido significativamente diferentes a 5% de probabilidade (Tabela 7). Se for feita uma análise de α na concentração de CO₂ de 760 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, observa-se que, além do aumento, os valores da eficiência quântica se aproximam independentemente do período do ano, fato bem notado no plantio adulto. Nas concentrações de 380 e 570 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, verificou-se distância entre os valores de eficiência quântica, principalmente no plantio jovem. Na Figura 5 está apresentada a correlação entre a concentração de CO₂ e a eficiência quântica de acordo com a idade, em que se visualiza que no plantio adulto a inclinação da reta, coeficiente angular, foi mais acentuada que no plantio jovem. Isso mostra que a eficiência quântica nas árvores adultas foi mais estimulada que no plantio jovem, apesar de este ter apresentado maiores valores de fotossíntese máxima.

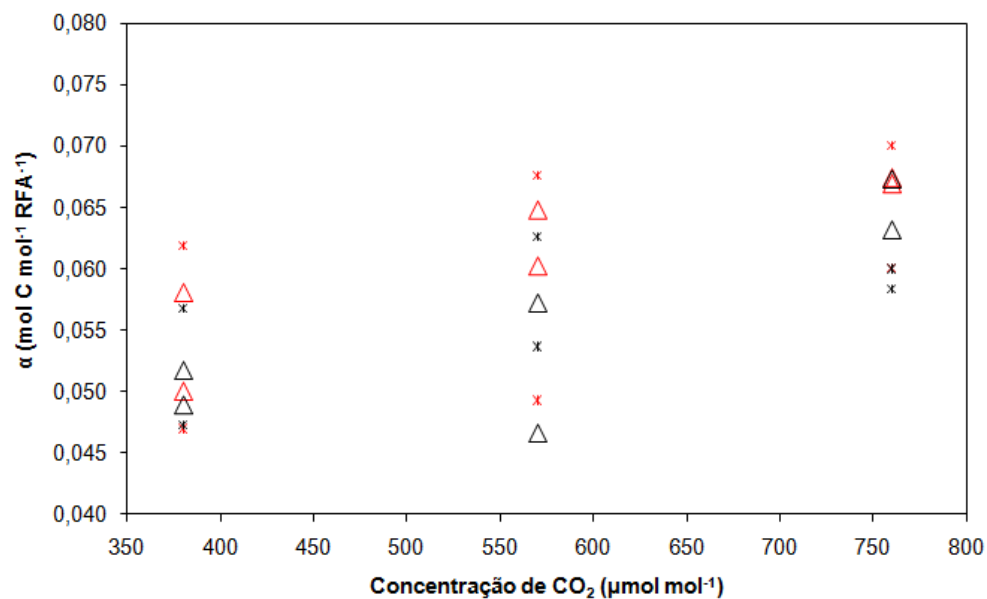


Figura 4 – Concentração de CO₂ (μmol mol⁻¹) versus a eficiência quântica (α, mol C mol⁻¹ RFA⁻¹) do dossel de povoamentos de eucalipto clonal, medições no inverno (símbolo vermelho) e no verão (símbolo preto). Plantio com idade jovem (*) e idade adulta (Δ).

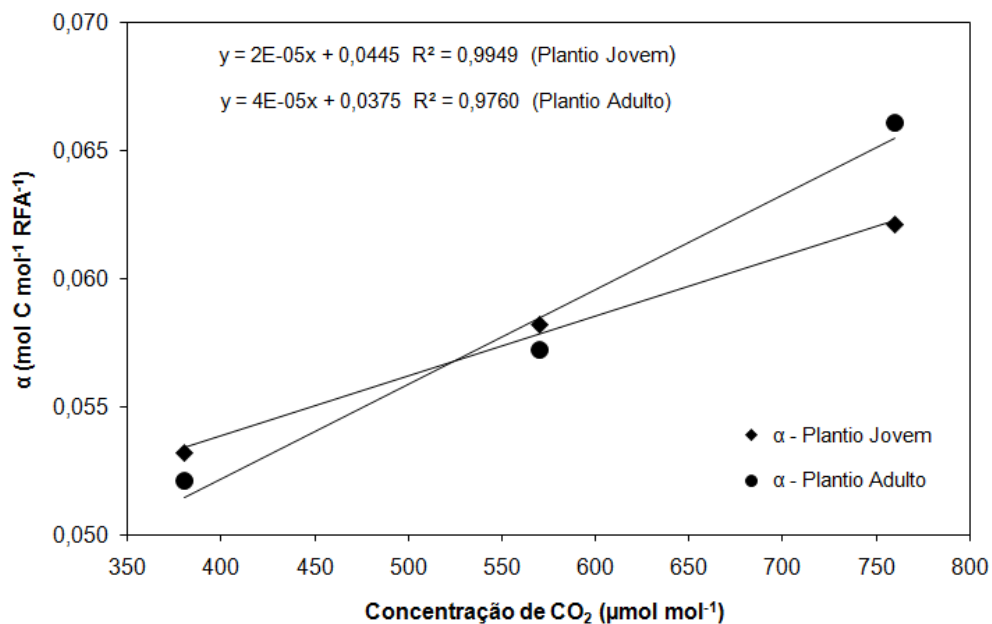


Figura 5 – Correlação entre a concentração de CO₂ (μmol mol⁻¹) e a eficiência quântica (α, mol C mol⁻¹ RFA⁻¹) do dossel de povoamentos de eucalipto clonal jovem e adulto.

Tabela 7 – Análise de variância do efeito de elevadas concentrações de CO₂ na eficiência quântica (α) de clones de eucalipto em idades jovem e adulta durante o inverno e o verão

		α (mol C mol ⁻¹ RFA ⁻¹)
[CO ₂] ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	380	0,0527
	570	0,0578
	760	0,0642
Idade	Jovem	0,0579
	Adulto	0,0585
Período	Inverno	0,0603
	Verão	0,0561
Análise de variância		[CO ₂] = ** Idade = ^{ns} Período = ^{ns}

^{ns} Não significativo a 5% e ** significativo a 5%.

4. DISCUSSÃO

Este estudo indicou que a eficiência quântica (α) variou de 0,0521 a 0,0532 mol C mol⁻¹ RFA sob concentração-controle e de 0,0572 a 0,0661 mol C mol⁻¹ RFA sob elevada concentração de CO₂. Os resultados de α apresentaram aumento de 17% no plantio jovem e 27% no plantio adulto, sob elevada concentração de CO₂, em comparação com a concentração-controle. Vários estudos têm demonstrado que a eficiência quântica (α) aumentou em elevada concentração de CO₂ (ZISKA *et al.*, 1991; EAMUS *et al.*, 1993; WANG *et al.*, 1995).

O aumento da eficiência quântica (α) induzido pelo CO₂ neste estudo foi similar ao estímulo descrito por Luo *et al.* (2000), em que girassóis cresceram sob concentrações de CO₂ ambiente (399 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) e elevada (746 $\mu\text{mol mol}^{-1}$). O fluxo de carbono foi medido continuamente durante o desenvolvimento do dossel, do qual foi estimada a eficiência quântica (α). Os resultados indicaram que o fluxo de carbono diário total foi similar entre os tratamentos com CO₂ ambiente e elevado na fase de desenvolvimento inicial do dossel. Depois do fechamento do dossel, o fluxo de carbono em ambiente com CO₂ elevado foi, em média, 53% maior que em CO₂ ambiente. A curva de assimilação *versus* irradiação incidente (A/I) de folhas em diferentes posições do dossel foi usada para estimar a eficiência quântica foliar (α_L), e as curvas A/I dos dosséis em estágios de desenvolvimento final foi usado para estimar α_C . Em ambiente com elevado CO₂, o α_L aumentou 24%. Houve pouca diferença no α_L nas diferentes posições do dossel, sendo, em média, 0,0542 em CO₂ ambiente e 0,0671 em CO₂ elevado. A eficiência quântica (α) foi 32% maior em

concentração de CO₂ elevada do que em concentração ambiente. O α aumentou com o desenvolvimento do dossel e foi fortemente correlacionado com o índice de área foliar (*IAF*) por $\alpha = 0,0094 \text{ IAF}/(0,0829+0,1137 \text{ IAF})$ na concentração de CO₂ ambiente e $\alpha = 0,01382 \text{ IAF}/(0,1129+0,1224 \text{ IAF})$ em elevada concentração de CO₂.

Como se observou neste estudo, a eficiência quântica teve variação relativamente pequena entre o inverno e o verão. O período de inverno apresentou valores ligeiramente maiores que o período de verão, bem explicados pelos menores valores de temperatura (-3 °C), já que acréscimos na temperatura ótima (observados no verão) reduzem a fotossíntese porque causam acréscimos na relação O₂/CO₂, favorecendo a fotorrespiração e diminuindo a especificidade da Rubisco para fixar CO₂ e a inibição da Rubisco (MARENCO; LOPES, 2007).

Estudos têm mostrado que α geralmente não varia com mudanças sazonais e posições do dossel. Nilsen e Sharufi (1994) relataram que não houve maiores diferenças entre a eficiência quântica na primavera e no verão em duas espécies de leguminosas de deserto (*Caes alponia virgata* e *Senna armata*). De acordo com Luo *et al.* (2000), não houve diferenças significativas na eficiência quântica em diferentes posições do dossel.

5. CONCLUSÕES

De acordo com as estimativas da eficiência quântica (α), pode-se concluir que:

- Houve aumento da eficiência quântica (α) sob elevada concentração de CO₂, como testado neste estudo.
- A eficiência quântica (α) não variou abruptamente com as mudanças sazonais climáticas.
- Os efeitos da idade não foram significativos, a não ser sob elevada concentração de CO₂ (760 $\mu\text{mol mol}^{-1}$), em que o plantio adulto apresentou maiores valores de α .

6. REFERÊNCIAS

de PURY, D.G.G.; FARQUHAR, G.D. Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models. **Plant, Cell and Environment**, v. 20, p. 537-557, 1997.

EAMUS, D.; BERRYMAN, C.A.; DUFF, G.A. Assimilation, stomatal conductance, specific leaf area and chlorophyll responses to elevated CO₂ of *Maranthes corymbosa*, a tropical monsoon rain forest species. **Australian Journal Plant Physiol.**, v. 20, p. 741-755, 1993.

EHLERINGER, J.R.; BJÖRKMAN, O. Quantum yield for CO₂ uptake in C₃ and C₄ plants. **Plant Physiology**, v. 59, p. 86-90, 1977.

EHLERINGER, J.; PEARCY, R.W. Variation in quantum yield for CO₂ uptake among C₃ and C₄ plants. **Plant Physiology**, v. 73, p. 555-559, 1983.

GHOLZ, H.; LIMA, W.P. The ecophysiological basis for productivity in the tropics. In: NAMBIAR, E.K.S.; BROWN, A.G. (Eds.). **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests**. Canberra: ACIAR, 1997. p. 213-246.

LANDSBERG, J.J.; WARING, R.H.; COOPS, N.C. Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types. **Forest Ecology and Management**, v. 172, p. 199-214, 2003.

LANDSBERG, J.J.; WARING, R.H. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, v. 95, p. 209-228, 1997.

LEVERENZ, J.W.; HÄLLGREN, J. Measuring photosynthesis and respiration of foliage. In: LASSOIE, J.P.; HINCKLEY, T.M. **Techniques and approaches in forest tree ecophysiology**. Boston: Boca Raton, 1991. p. 303-328.

LONG, S.P.; DRAKE, B.G. Effect of the long-term elevation of CO₂ concentration in the field on the quantum yield of photosynthesis of the C₃ sedge, *Scirpus olneyi*. **Plant Physiology**, v. 96, p. 221-226, 1991.

LONG, S.P.; POSTL, W.F.; BOLHÁR, N.H.R. Quantum yield for uptake of carbon dioxide in C₃ vascular plants of contrasting habitats and taxonomic groupings. **Planta**, v. 189, p. 226-234, 1993.

LUO, Y.; HUI, D.; CHENG, W.; COLEMAN, J.S.; JOHNSON, D.W.; SIMS, D.A. Canopy quantum yield in a mesocosm study. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 100, p. 35-48, 2000.

MARENCO, R.A.; LOPES, N.F. **Fisiologia vegetal**. 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2007. 469 p.

MARTINEZ, C.A. **Fotossíntese**. Parte 3. 2008. (Notas de aula).

NILSEN, E.; SHARIFI, M.R. Seasonal acclimation of stem photosynthesis in woody legume species from the Mojave and Sonoran Deserts of California. **Plant Physiology**, v. 105, p. 1385-1391, 1994.

ÖGREN, E.; EVANS, J.R. Photosynthetic light-response curves. I. The influence of CO₂ partial pressure and leaf inversion. **Planta**, v. 189, p. 182-190, 1993.

PRADO, C.H.B.A.; MORAES, J.A.P.V. **Photosynthetic capacity and specific leaf mass in twenty woody species of Cerrado vegetation**. [S.l. : s.n.t.], 1997.

SINGSAAS, E.L.; ORT, D.R.; DELUCIA, E.H. Variation in measured values of photosynthetic quantum yield in ecophysiological studies. **Oecologia**, v. 128, p.15-23, 2001.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology and Management**, v. 225, p. 920-930, 2008.

WANG, K.; KELLOMAKI, S.; LAITINEN, K. Effects of needle age long-term temperature and CO₂ treatments on the photosynthesis of Scots pine. **Tree Physiology**, v. 15, p. 211-218, 1995.

ZISKA, L.H.; HONGAN, K.P.; SMITH, A.P.; DRAKE, B.G. Growth and photosynthetic responses of nine tropical species with long term exposure to elevated carbon dioxide. **Oecologia**, v. 86, p. 383-389, 1991.

CAPÍTULO III

SIMULAÇÃO DO EFEITO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO

RESUMO

Nas últimas décadas tem sido crescente a preocupação mundial quanto às mudanças no clima devido ao aumento da emissão global de gases de efeito-estufa. Modelos com bases ecológica e fisiológica são utilizados para prever o crescimento potencial de florestas em condições climáticas atuais e históricas, e essas previsões têm sido incorporadas a cenários climáticos futuros. O objetivo principal deste trabalho consistiu em simular a produtividade do eucalipto, por meio do modelo de crescimento 3-PG, em diferentes cenários de mudanças climáticas. A simulação da produtividade futura do eucalipto utilizando o modelo de crescimento 3-PG foi realizada em um sítio situado na latitude 19°43'32"S e longitude 40°06'39"W. As projeções de clima utilizadas consistiram do cenário de clima futuro denominado A2 (alta emissão) e B1 (baixa emissão), que foram idealizados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – IPCC. As variáveis climáticas empregadas como dados de entrada no modelo de crescimento 3-PG foram derivadas das saídas do modelo climático global CSIRO Mk3. Para o efeito radiativo e fertilizante do aumento de CO₂ na atmosfera, além do uso dos cenários de mudanças climáticas, simulou-se o efeito fertilizante por meio de aumentos na eficiência

quântica máxima do dossel (α_{CX}), estimada por meio de dados experimentais, dentro do modelo de crescimento 3-PG. Variou-se o valor de eficiência do uso do carbono (EUC) no modelo 3-PG em 0,45; 0,47; e 0,50, para se ter ideia do efeito da redução ou aumento da respiração na produção florestal. As projeções climáticas do modelo CSIRO Mk3 mostraram tendência de aquecimento mais acentuada nos últimos 30 anos do século, e principalmente no cenário A2 também foram simulados acréscimos na precipitação nos meses mais quentes e decréscimos nos meses mais frios, principalmente nos períodos de 2041-2070 e 2071-2100. O acréscimo na eficiência quântica do dossel devido ao aumento da concentração de CO₂ atmosférico algumas vezes superou as adversidades do clima na simulação da produtividade futura do eucalipto, sobretudo no cenário A2 no fim do século, quando a eficiência quântica aumentou em 22%. Na simulação da queda da respiração no plantio florestal, o incremento médio anual apresentou tendência de aumento, e, no aumento da respiração no plantio florestal, o incremento médio anual mostrou tendência de redução. Na transpiração, a variação no uso eficiente do carbono não promoveu grandes diferenças nas taxas transpiratórias futuras. Na maioria das vezes, a transpiração futura se manteve abaixo da transpiração-controle, comportamento esperado nos cenários de mudanças climáticas, quando o aumento da concentração intercelular de CO₂ provocaria redução na transpiração.

CHAPTER III

SIMULATION OF THE EFFECT OF CLIMATE CHANGE IN PRODUCTIVITY OF EUCALYPTUS

ABSTRACT

In recent decades there has been a growing global concern regarding climate change due to increased global emissions of greenhouse gases. Models with ecological and physiological bases are used to predict the potential growth of forests in current and historical weather conditions, and these predictions have been incorporated into future climate scenarios. The primary objective of this study was to simulate the productivity of eucalyptus, through the 3-PG growth model in different climate change scenarios. The simulation of future productivity of eucalyptus using 3-PG growth model was performed at a farm located at latitude 19°43'32 "S and longitude 40°06'39" W. The climate projections used consisted of the future climate scenario called A2 (high emissions) and B1 (low emissions), which were devised by the Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC). The climatic variables used as input data in the 3-PG growth model were derived from CSIRO Mk3global climate outputs model. For the radioactive and fertilizing effect of the increased CO₂ in the atmosphere, and the use of climate change scenarios, the fertilizing effect was simulated through increases in the maximum quantum efficiency of the canopy (α_{CX}), estimated by the experimental

data within the 3-PG growth model. The value of efficiency of carbon use (EUC) was varied in the 3-PG model at 0.45, 0.47, and 0.50 to get an idea of the effect of reduction or increase of respiration in forest production. The climate projections from the CSIRO Mk3 showed a sharper heating trend over the past 30 years in the century, and especially in the A2 scenario, increases in precipitation were simulated in the warmer months and decreases in the colder months, especially during the 2041-2070 and 2071-2100. The increase in canopy quantum efficiency due to increased atmospheric CO₂ concentration sometimes exceeded the adversities of weather in the simulation of future productivity of eucalyptus, particularly in the A2 scenario by the end of the century, when the quantum efficiency increased by 22%. In the simulation of the fall of respiration in forest plantation, the average annual increment tended to increase, and the increased respiration in forest plantation, the average annual increment showed a decreasing trend. In the transpiration, the variation in the efficient use of carbon did not promote large differences in future transpiratory rates. In most cases, future transpiration remained below control transpiration, an expected behavior in climate change scenarios, when the increase in intercellular CO₂ concentration would lead to reduction in the transpiration.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas tem sido crescente a preocupação mundial quanto às mudanças no clima devido ao aumento da emissão global de gases de efeito-estufa. Mudanças climáticas no Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) referem-se a uma alteração no estado do clima que possa ser identificada (por exemplo, utilizando testes estatísticos) por mudanças na média e, ou, na variabilidade das suas propriedades e persista por um período prolongado de décadas ou mais anos, devido à variabilidade natural do tempo ou como resultado da atividade humana (IPCC, 2007).

O dióxido de carbono (CO₂) é o mais importante gás de efeito-estufa emitido pelas atividades humanas. O CO₂ tem propriedade de absorver radiação infravermelha e, juntamente com o vapor d'água e outros gases do efeito-estufa, retardar o resfriamento da superfície terrestre, contribuindo para o aumento da temperatura do globo terrestre (SCHNEIDER, 1989).

Os cenários de emissões *Special Report on Emissions Scenarios – SRES* (NAKIĆENOVIC; SWART, 2000), adotados pelo IPCC, revelam grandes diferenças nas mudanças de temperatura e de precipitação entre os modelos e entre os cenários de emissões do mesmo modelo. Como era esperado, as principais fontes de incertezas regionais das alterações climáticas e dos impactos na produtividade estão associadas a projeções de diferentes cenários, de diferentes modelos climáticos globais (MCG), de imprecisões no modelo e de processos não modelados. A análise é muito mais complexa para mudanças na precipitação, pois os vários modelos

climáticos mostram padrões bastante distintos, com projeções quase que opostas. Porém, mesmo com as incertezas nas projeções dos modelos é importante a utilização prática das tendências dessas projeções para orientar políticas ativas de adaptação ou mitigação dos efeitos das mudanças climáticas.

A fotossíntese é a principal via de entrada de carbono e energia na biosfera e, ao lado da transpiração, representa um dos principais processos fisiológicos por meio dos quais as plantas percebem as alterações atmosféricas (LACHER, 2000). Assim, todo processo que possa afetá-la deve ser cuidadosamente estudado e, na medida do possível, utilizado para deduzir eventos ocorridos no passado e fazer previsões. Os efeitos benéficos de elevadas concentrações de CO₂ no crescimento das plantas dependem do seu estado hídrico. Assim, é importante considerar tanto o incremento atmosférico de CO₂ quanto a disponibilidade de água no solo para avaliar os possíveis efeitos das mudanças climáticas nas produções agrícola e florestal. Determinado aumento na concentração atmosférica de CO₂ pode incrementar a produtividade, dependendo da disponibilidade de água no solo (ROGERS *et al.*, 1986; KIMBALL *et al.*, 1995).

A importância econômica do eucalipto é muito grande para o Brasil, pois seu plantio e beneficiamento geram empregos e divisas comerciais, tendo participação importante no desenvolvimento de grande parte dos setores da economia nas regiões onde é plantado. Estudos têm demonstrado que mudanças na concentração de dióxido de carbono atmosférico e, em consequência, no clima influenciarão a produção, consumo e comércio internacional de produtos de madeira, por meio de efeitos no crescimento das árvores (PEREZ-GARCIA *et al.*, 2002). As florestas são sistemas biológicos que estão sempre em mudança, portanto necessitam da projeção dessas mudanças para que se possam tomar as decisões necessárias, a fim de ser executado um manejo adequado nesse ecossistema.

As decisões de manejo são baseadas em informações sobre a situação atual e futura dos povoamentos. A modelagem florestal está intimamente ligada ao manejo das florestas, pois com a condição de se predizer o futuro de um povoamento é mais fácil manejá-lo e explorá-lo racionalmente, sem que haja agressões ao meio ambiente.

O modelo 3-PG (*Physiological Principles in Predicting Growth*), baseado em processos ecofisiológicos, utiliza princípios fisiológicos para estimar a produtividade florestal. Necessita de poucos ajustes para se obter estimativa realista do crescimento

florestal e também pode ser facilmente parametrizado para um tipo definido de floresta plantada (LANDSBERG; WARING, 1997), sendo, portanto, modelo bastante adequado para determinação do desenvolvimento florestal. O 3-PG consiste basicamente em cinco submodelos: produção de biomassa; balanço de água no solo; alocação de biomassa entre folhas, raízes e lenho (incluindo galhos e cascas); mortalidade de árvores; e módulo para converter biomassa de tronco em variáveis de interesse para o manejo florestal.

Modelos com bases ecológica e fisiológica são utilizados para prever o crescimento potencial de florestas sobre condições climáticas atuais e históricas, e essas previsões têm sido incorporadas a cenários climáticos futuros (BACHELET *et al.*, 2001; COOPS; WARING, 2001). Recentemente, modelos processuais têm sido empregados para estimar a variação anual no crescimento ao longo de décadas, para o passado e o futuro.

Coops *et al.* (2005), utilizando o modelo de crescimento baseado em processos 3-PG, verificaram aumento de 5 a 10% na dominância do pinheiro (*P. ponderosa*) no próximo século no interior de Oregon, Idaho e Washington, nos Estados Unidos. Baesso *et al.* (2010) encontraram reduções na produtividade de plantações de eucalipto no Sudeste do Brasil, utilizando o modelo 3-PG acoplado a cenários de mudanças climáticas, sem considerar o efeito fertilizante do aumento da concentração de CO₂ sobre as plantas. Para a região montanhosa do Sudoeste do Estado de Oregon, nos Estados Unidos, Coops e Waring (2001), simulando o modelo 3-PG para cenário de mudanças climáticas com o dobro de CO₂ atmosférico atual, observaram crescimento de 50%, em média, em todos os tipos de florestas, como resultado de um acréscimo de 33% na capacidade fotossintética das plantas devido ao aumento na concentração de CO₂ atmosférico.

O uso de modelos de crescimento como 3-PG permite a avaliação dos riscos da variação climática na produtividade de plantios florestais. Partindo do princípio de que mudanças no clima são inevitáveis, faz-se necessário conhecer os fatos, monitorar localmente as mudanças e traçar estratégias que garantam a sustentabilidade do negócio florestal. O objetivo principal deste trabalho consistiu em simular a produtividade futura do eucalipto, por meio do modelo de crescimento 3-PG, em diferentes cenários de mudanças climáticas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A simulação da produtividade futura do eucalipto utilizando o modelo de crescimento 3-PG foi realizada para um ponto situado na latitude 19°43'32"S e longitude 40°06'39"W, uma média dos dois plantios do experimento descrito no Capítulo I. Utilizou-se como parametrização do modelo aquela realizada por Almeida *et al.* (2004), baseada nos dados coletados em bacia experimental plantada com híbrido de *Eucalyptus grandis* no Norte do Estado do Espírito Santo.

2.2. O modelo 3-PG

O 3-PG (*Physiological Principles in Predicting Growth*) é baseado em relações biofísicas estabelecidas e constantes, incorporando uma série de simplificações derivadas de estudos realizados em várias florestas (LANDSBERG *et al.*, 2001). O modelo calcula a fotossíntese, transpiração, produção de serrapilheira e crescimento em espaço de tempo mensal. Uma de suas vantagens é a capacidade de prever um conjunto de variáveis de interesse para o planejamento e o manejo florestal, como a densidade das árvores, área basal, diâmetro médio, volume e incremento médio anual e atual, assim como variáveis baseadas em processos como índice de área foliar e balanço de água no solo. O 3-PG consiste basicamente de cinco submodelos: produção de biomassa; balanço de água no solo; alocação de

biomassa entre folhas, raízes e lenho (incluindo galhos e cascas); mortalidade de árvores e módulo para converter biomassa de tronco em variáveis de interesse para o manejo florestal. As variáveis de estado são as folhas, biomassa de tronco e raízes, número de troncos e água disponível no solo. A Figura 1 ilustra a estrutura do modelo 3-PG.

Algumas das mais importantes simplificações do modelo incluem: a) dados climáticos mensais; b) a necessidade de apenas o conhecimento da variável mais limitante para restringir a fotossíntese a cada mês; c) a respiração autotrófica e a produção primária líquida são uma fração fixa (~50%) da produção primária bruta (PPB); d) a condutância máxima do dossel se aproxima de um valor constante como o índice de área foliar ($IAF > 3,0$); e) a proporção de fotoassimilados alocados abaixo do solo aumenta com a seca e a deficiência nutricional; e f) as relações alométricas específicas da espécie definem a partição do crescimento entre a parte aérea das folhas, galhos e tronco como o crescimento em diâmetro das árvores (LANDSBERG; WARING, 1997).

Essencialmente, o modelo 3-PG estima a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel (RFAA), por meio da Lei de Beer, considerando-se que a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) constitui 50% da radiação global (RG). A Lei de Beer descreve o decréscimo exponencial da radiação, ao penetrar verticalmente toda a extensão da cobertura vegetal, por meio da equação 1.

$$I_z = I_o \cdot e^{-k \cdot IAF} \quad (1)$$

em que:

I_z = intensidade da radiação a determinada altura dentro da cobertura vegetal, $W m^{-2}$;

I_o = intensidade de radiação no topo da cobertura vegetal, representando a RFA, $W m^{-2}$;

E = base do logaritmo natural ($e = 2,718$);

K = coeficiente de extinção ou atenuação, representando o grau de diminuição da radiação no interior da cobertura vegetal, seja por absorção, seja por espalhamento; e

IAF = soma total da superfície foliar, de cima para baixo, até a altura Z , por unidade de área de solo (IAF acumulado), em $m^2 m^{-2}$ (LARCHER, 2000).

Quantificada a RFAA pelo dossel, o 3-PG estima a quantidade de CO_2 fixado por unidade de energia radiante absorvida (fótons), que representa a eficiência quântica do dossel (α_c). O valor dessa eficiência de conversão é calculado a partir de um valor de eficiência quântica máxima do dossel (α_{cx}) e considera as limitações ambientais impostas pelo déficit de pressão de vapor (f_{DPV}), pela temperatura (f_T), pelas geadas (f_F), pelas disponibilidades hídrica (f_{SW}) e nutricional (f_N) e pela idade da população (f_I).

Essas limitações ambientais são incorporadas ao 3-PG pela multiplicação de moduladores adimensionais, apropriadamente calculados, cujos valores variam de 0 (condições de alta limitação) a 1 (condições sem limitação). Os moduladores que tratam sobre balanço de água no solo (f_{SW}), déficit de pressão de vapor (f_{DPV}) e idade da população (f_I) compõem o chamado modulador fisiológico (φ), definido como:

$$\varphi = f_I \min\{f_{DPV}, f_{SW}\} \quad (2)$$

O modulador φ atua diretamente no processo fotossintético. Os moduladores f_{DPV} e f_{SW} não atuam de forma aditiva ou multiplicativa, e sim considerando a limitação mais restritiva (modulador de menor valor), ou seja, se a água no solo é mais limitante ao crescimento do que o déficit de pressão de vapor (DPV), então o modulador f_{SW} atuará limitando o crescimento no período de estimativa considerado (LANDSBERG *et al.*, 2001). Os outros moduladores f_T , f_F e f_N que atuam de forma independente no processo fotossintético são aplicados multiplicativamente (SANDS; LANDSBERG, 2002). Portanto, a eficiência quântica do dossel é calculada da seguinte forma:

$$\alpha_c = \alpha_{cx} f_T f_F f_N \varphi \quad (3)$$

O efeito da fertilidade do solo influencia, indiretamente, a eficiência quântica do dossel, por meio do f_N , o qual é dependente do nível de fertilidade do solo (FR), que pode variar de 0 (baixa fertilidade) a 1 (sem limitação nutricional). O relacionamento entre o valor de FR e o modulador de fertilidade (f_N) é dado por:

$$f_N(FR) = 1 - (1 - f_{N0})(1 - FR)^{n_{FN}} \quad (4)$$

em que f_{N0} é o valor de f_N quando $FR = 0$. O valor de FR é obtido empiricamente, baseando-se em características físicas e químicas do solo e dados sobre crescimento florestal, além da própria experiência do manejador florestal.

Para contornar a dificuldade na determinação de FR , que é utilizado como variável de entrada no modelo 3-PG, vários trabalhos têm considerado essa dificuldade como variável ajustável (LANDSBERG *et al.*, 2001; LANDSBERG *et al.*, 2003), ou seja, dependendo das condições locais, ela pode ser ajustada para possibilitar melhor relacionamento entre os valores observados e aqueles estimados pelo modelo, mantendo-se as outras variáveis de entrada constantes. Landsberg *et al.* (2003) propuseram os valores de 0,6 e 1 para f_{N0} e n_N , respectivamente. Após a consideração de todas essas limitações impostas pelo ambiente, por meio dos moduladores, o 3-PG estima o relacionamento entre a produção primária bruta (PPB) e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel (RFAA):

$$PPB = \alpha_c RFAA \quad \therefore \quad \alpha_{cx} f_T f_F f_N \phi RFAA \quad (5)$$

em que:

PPB = produção primária bruta, mol C; e

$RFAA$ = radiação fotossinteticamente ativa absorvida, $W m^{-2}$.

A relação entre produção primária líquida (PPL) e PPB equivale a um coeficiente de uso de carbono. O 3-PG considera um valor fixo em torno de 0,47 para a referida relação, o que elimina a necessidade de cálculos referentes às perdas de carbono por meio da respiração.

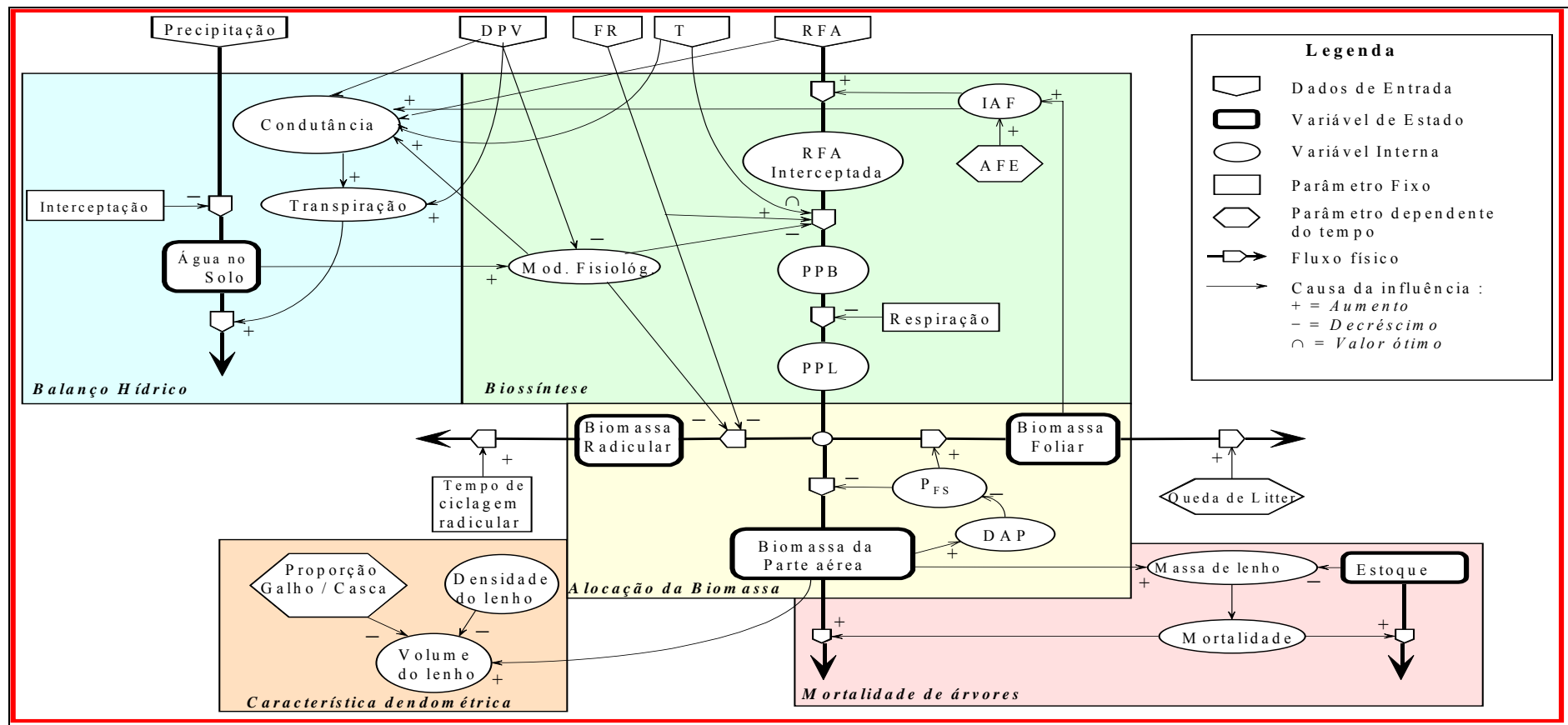


Figura 1 – Descrição dos cinco submodelos do 3-PG.

2.3. Dados climáticos

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – IPCC publicou um conjunto de cenários *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES) para explorar o desenvolvimento futuro no ambiente global, especialmente no que diz respeito à produção de gases de efeito-estufa e aerossóis. Os cenários são utilizados como forçantes de modelos climáticos globais (MCGs), com a finalidade de obter projeções futuras do clima global. As projeções de clima utilizadas neste estudo consistiram do cenário de clima futuro denominado A2 (alta emissão) e B1 (baixa emissão), que foram idealizados pelo IPCC (Figura 2). O cenário A2 descreve um mundo futuro muito heterogêneo, em que a regionalização é dominante, com fortalecimento de identidades culturais regionais e ênfase em valores da família e tradições locais. Outras características são o crescimento populacional alto e menos preocupação em relação ao desenvolvimento econômico rápido. O cenário B1 descreve uma rápida mudança na estrutura econômica mundial, em que ocorre a introdução de tecnologias limpas; a ênfase está em soluções globais para a sustentabilidade ambiental e social e inclui esforços combinados para o desenvolvimento de tecnologia rápida (MAGRIN *et al.*, 2007).

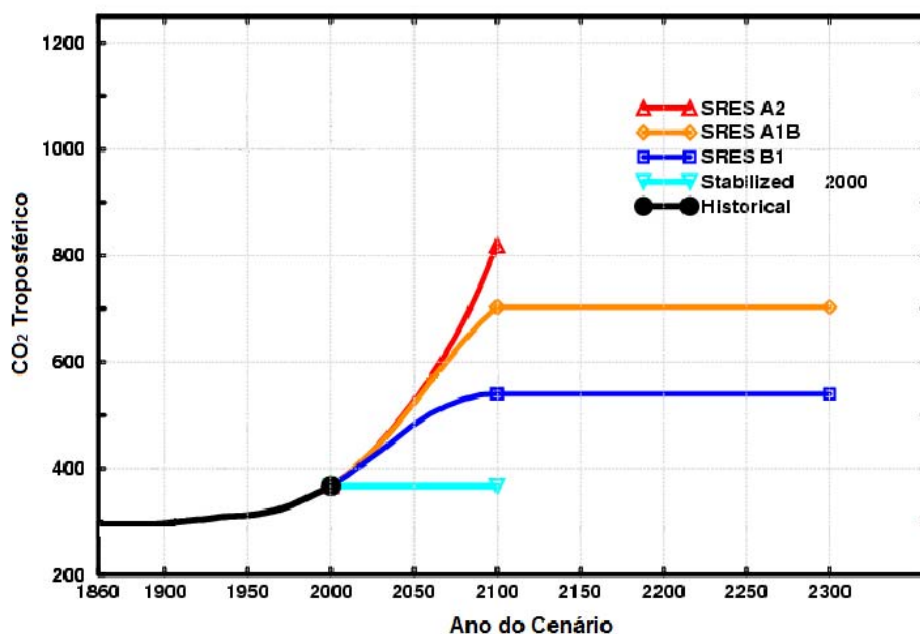


Figura 2 – Evolução da concentração de CO₂ nos diferentes cenários considerados no IPCC/AR4.

Fonte: <<http://nomads.gfdl.noaa.gov>>.

As variáveis climáticas temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação e radiação utilizadas como dados de entrada no modelo de crescimento 3-PG foram derivadas das saídas do modelo climático global CSIRO Mk3. Esse modelo contém a representação dos quatro maiores componentes do sistema climático (atmosfera, superfície terrestre, oceano e geleiras). O componente atmosférico possui resolução horizontal espectral T63 ($\sim 1,9^\circ \times 1,9^\circ$ latitude/longitude) com 18 níveis verticais na atmosfera, e o componente oceânico tem resolução de T63 com 31 níveis verticais (GORDON *et al.*, 2002).

Os modelos de projeção de clima apresentam limitações, e uma delas é a capacidade de resolução dos modelos climáticos globais, que são ferramentas de modelagem tradicionalmente utilizadas para a produção de cenários e projeções de mudanças climáticas. Os modelos globais têm capacidade de resolução bastante baixa, podendo-se perder informações importantes. Conseqüentemente, esses modelos não são bons para caracterizar variáveis climáticas em muitas regiões do mundo. Uma forma de utilizar dados gerados por modelos climáticos globais é fazer uso da técnica de *downscaling*, com o intuito de reproduzir melhor os detalhes climáticos regionais.

O uso das saídas de resolução grosseira dos MCGs para estudos de impactos regionais e locais requer dois passos: *downscaling* e retirada do viés, ou erros sistemáticos dos modelos (CCSP, 2008). O método de *downscaling* utilizado é o estatístico, e a correção dos erros sistemáticos do modelo é realizada obtendo-se as anomalias das variáveis climáticas pela diferença entre o cenário climático futuro e o cenário de referência, definido para o período de 1961-1990. Neste estudo foi realizado *downscaling* do modelo global CSIRO Mk3 na escala de $0,5^\circ$ latitude/longitude. Primeiramente, reduziu-se a temperatura ao nível do mar para obtenção da temperatura em uma altitude diferente da estação (BRUTSAERT, 1982). Esse método, apesar de simplificado, apresenta bons resultados, considerando que a temperatura do ar decresce um grau a cada 100 m a mais de altitude. Uma vez reduzidas ao nível do mar, as temperaturas foram interpoladas para 30' por um processo de interpolação bi-linear; em seguida, os valores de temperatura foram convertidos para a latitude dada pela orografia de 30', obtida por meio do modelo digital de elevação gerado pela *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM (GEOWORLD, 2000). Para a precipitação e a radiação solar foi feita a interpolação bi-linear.

Para avaliar as projeções dos cenários A2 e B1 dado pelo modelo climático CSIRO Mk3, foram utilizados como período-base (atual) os dados de temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação médios de 1961-1990 do *Climatic Research Unit* (CRU), climatologia, com resolução de 0,5° de latitude/longitude. A climatologia foi construída a partir da interpolação, em função da latitude, longitude e altitude, de dados observados de estações climatológicas (NEW *et al.*, 1999). Os dados de radiação solar foram derivados das reanálises do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP). A simulação do crescimento do eucalipto foi rodada para três períodos futuros de 30 anos (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) e para o período atual. No entanto, antes de implementar os cenários climáticos no modelo de crescimento 3-PG, procedeu-se da seguinte forma:

$$\text{Cenário Climático} = \text{Clima Atual} + \text{Cenário de Mudanças Climáticas}$$

2.4. Simulações

Para o efeito radiativo (aquecimento) e fertilizante do aumento de CO₂ na atmosfera, nesta simulação, além do uso dos cenários de mudanças climáticas, simulou-se o efeito fertilizante por meio de aumentos na eficiência quântica máxima do dossel (α_{CX}) no modelo de crescimento 3-PG. Para isso, o estudo foi baseado nos dados experimentais descritos no Capítulo II, onde se determinou a eficiência quântica média entre plantios com idades distintas e no inverno e verão (Figura 3).

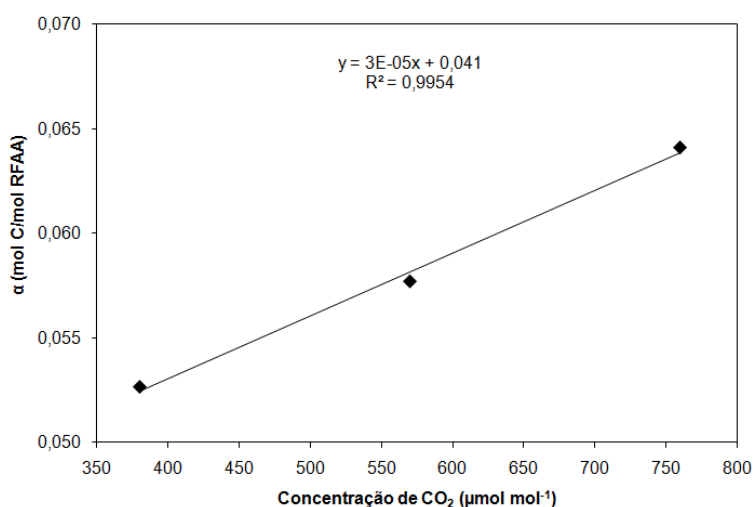


Figura 3 – Correlação entre a concentração de CO₂ (µmol mol⁻¹) e a eficiência quântica (α , mol C mol⁻¹ RFAA) do dossel de povoamentos de eucalipto clonal.

A partir dos valores de concentração de CO₂ atingidos em cada período futuro de acordo com o cenário (Tabela 1), foi possível estimar a eficiência quântica máxima do dossel por meio da regressão linear observada na Figura 3. O modelo 3-PG foi parametrizado de acordo com Almeida *et al.* (2004) para plantações de *Eucalyptus grandis* híbrido no Norte do Estado do Espírito Santo, em que α_{CX} foi igual a 0,068 mol C mol⁻¹ RFAA na concentração atual de CO₂ (Tabela 2). Assim, calculou-se quanto a eficiência quântica futura aumentou em relação ao valor de 0,068 mol C mol⁻¹ RFAA (Tabela 3).

Com as mudanças climáticas poderão ocorrer mudanças na taxa respiratória das plantas em razão, principalmente, das alterações nos fatores ambientais como temperatura e concentração de CO₂. Landsberg e Waring (1997) contornaram as dificuldades do cálculo da respiração no modelo 3-PG, assumindo que a PPL/PPB é uma proporção aproximadamente constante, com um valor médio de 0,45 para florestas temperadas. Esse valor foi baseado em vários estudos publicados e não publicados (GIFFORD, 1994, 1995, 2003; DEWAR *et al.*, 1998). A relação entre PPL e PPB é conhecida como a eficiência do uso do carbono (EUC). Waring *et al.* (1998) sugerem que 0,47 é um valor universal apropriado para a maioria das florestas. Várias revisões de literatura têm concluído que elevadas concentrações de CO₂ geralmente reduzem a taxa respiratória, porém alguns estudos recentes têm encontrado pouca ou nenhuma resposta direta da respiração à concentração de CO₂ e sugerem que os efeitos diretos do CO₂ na respiração são principalmente devidos a vazamentos durante a medição (DRAKE *et al.*, 1999; AMTHOR, 2000; BRUHN *et al.*, 2002). Como neste estudo não foi medida a respiração, variou-se o valor de EUC no modelo 3-PG em 0,45; 0,47; e 0,50 para que se possa ter uma ideia do efeito da redução ou aumento da respiração na produção florestal.

Tabela 1 – Concentração de CO₂ (ppm) em cada período, de acordo com cenários SRES idealizados pelo IPCC

Cenário	2011-040	2041-070	2071-100
A2	453	582	775
B1	437	507	544

Fonte: <http://www.ipcc-data.org/ddc_co2.html>.

Tabela 2 – Principais parâmetros do modelo 3-PG depois do processo de calibração realizado por Almeida *et al.* (2004) na região Norte do Espírito Santo

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Partição folha/lenho para D = 2 cm	pFS2	-	0,7
Partição folha/lenho para D = 20 cm	pFS20	-	0,1
Constante do relacionamento entre massa do stem vs D	stemConst	-	0,045
Potência do relacionamento entre massa do stem vs D	stemPower	-	2,812
Fração máxima da PPL para raízes	pRx	-	0,6
Fração mínima da PPL para raízes	pRn	-	0,1
Taxa de queda de “litter” para t = 0	gammaF0	1/mês	0,0017
Taxa de queda de “litter” para plantios em idade adulta	gammaF1	1/mês	0,13
Idade em que a taxa de queda de “litter” é $\frac{1}{2}(\sigma_0 + \sigma_1)$	tgammaF	mês	13
Taxa média de ciclagem radicular	Rttover	1/mês	0,025
Temperatura mínima para o crescimento	Tmin	°C	8
Temperatura ótima para o crescimento	Topt	°C	25
Temperatura máxima para o crescimento	Tmax	°C	36
Valor de f_N quando FR = 0	fN0	-	0,5
Potência de (1 – FR), na expressão do f_N	fNn	-	1
Nível de fertilidade (FR)	FR	-	1
Define a resposta estomática ao déficit de pressão de vapor	CoeffCond	mbar ⁻¹	0,047
Parâmetro relacionado com a disponibilidade de água no solo	Soil Class	-	cl
Idade máxima do “stand” para computar a idade relativa	MaxAge	Ano	9
Potência para idade relativa (f_{age})	nAge	-	4
Idade relativa igual a 0,5	rAge	-	0,95
Condutância máxima do dossel	MaxCond	m/s	0,021
IAF em que a condutância do dossel é máxima	LAIgcx	m ² /m ²	3
Condutância da camada-limite do dossel	BLcond	m/s	0,2
Massa de lenho máxima para cada 1.000 árvores/ha	wSx1000	kg/arv.	180
Área foliar específica para plantios em idade zero	SLA0	m ² /kg	10,5
Área foliar específica para plantios em idade adulta	SLA1	m ² /kg	8
Idade na qual a área foliar específica = $\frac{1}{2}(\sigma_0 + \sigma_1)$	tSLA	Ano	2,5
Interceptação máxima de água pelo dossel	MaxIntcptn	-	0,15
IAF em que a interceptação de água pelo dossel é máxima	LAImax-Intcptn	m ² /m ²	3
Coefficiente de extinção da RFAA pelo dossel	k	-	0,5
Idade de fechamento do dossel	fullCanAge	Ano	0
Eficiência quântica máxima do dossel	Alpha	-	0,068
Relação PPL/PPB	Y	-	0,47
Fração de galho e casca para plantios em idade inicial (zero)	fracBB0	-	0,3
Fração de galho e casca para plantios em idade adulta	fracBB1	-	0,12
Idade na qual a fração de galhos e casca = $\frac{1}{2}(p_{BB0} + p_{BB1})$	tBB	Ano	5
Densidade básica mínima – plantios em idade inicial (zero)		t/m ³	0,480
Densidade básica máxima – plantios em idade adulta	rhoMax	t/m ³	0,520
Idade na qual a densidade básica = $\frac{1}{2}(\sigma_0 + \sigma_1)$	tRho	Ano	4

Tabela 3 – Acréscimo no valor futuro da eficiência quântica máxima do dossel (α_{CX} , mol C mol⁻¹ RFA⁻¹) baseado na α_{CX} parametrizada por Almeida *et al.* (2004)

Cenário	2011-040	2041-070	2071-100
A2	4%	11%	22%
B1	3%	7%	9%

3. RESULTADOS

Nas Figuras 4 e 5, observa-se que os cenários de mudanças climáticas A2 e B1 dados pelo modelo climático CSIRO Mk3 apresentaram valores tanto de temperatura máxima quanto de mínima, na maioria das vezes maiores que os valores observados no clima atual (controle). Foi possível notar que a temperatura prevista pelo modelo seguiu a mesma tendência observada do clima atual nos três períodos analisados. Como era esperado, o aquecimento teve comportamento crescente com o passar dos anos, porém o cenário A2 apresentou os maiores valores, sendo um cenário mais pessimista em relação ao cenário B1. A temperatura máxima no cenário A2 apresentou, em média, valor superior ao da climatologia de até 0,3 °C no período 2011-2040, 0,9 °C no período 2041-2070 e 1,9 °C no período 2071-2100 (Figura 4a). No cenário B1, a temperatura máxima apresentou, em média, valor superior ao da climatologia de 0,1 °C no período 2011-2040, 0,6 °C no período 2041-2070 e 0,7 °C no período 2071-2100 (Figura 4b). Os valores de temperatura mínima foram superiores aos do clima atual, exceto no período de 2011-2040 no cenário A2, quando a temperatura mínima foi, em média, 0,2 °C menor que no clima atual. No cenário A2, encontraram-se valores de temperatura mínima em média 0,4 °C e 1,3 °C superior no período de 2041-2070 e 2071-2100, respectivamente (Figura 5a). Já no cenário B1 os valores de temperatura mínima foram, em média, 0,2 °C (2011-2040), 0,5 °C (2041-2070) e 0,7 °C (2071-2100) maior que a temperatura mínima no clima atual (Figura 5b).

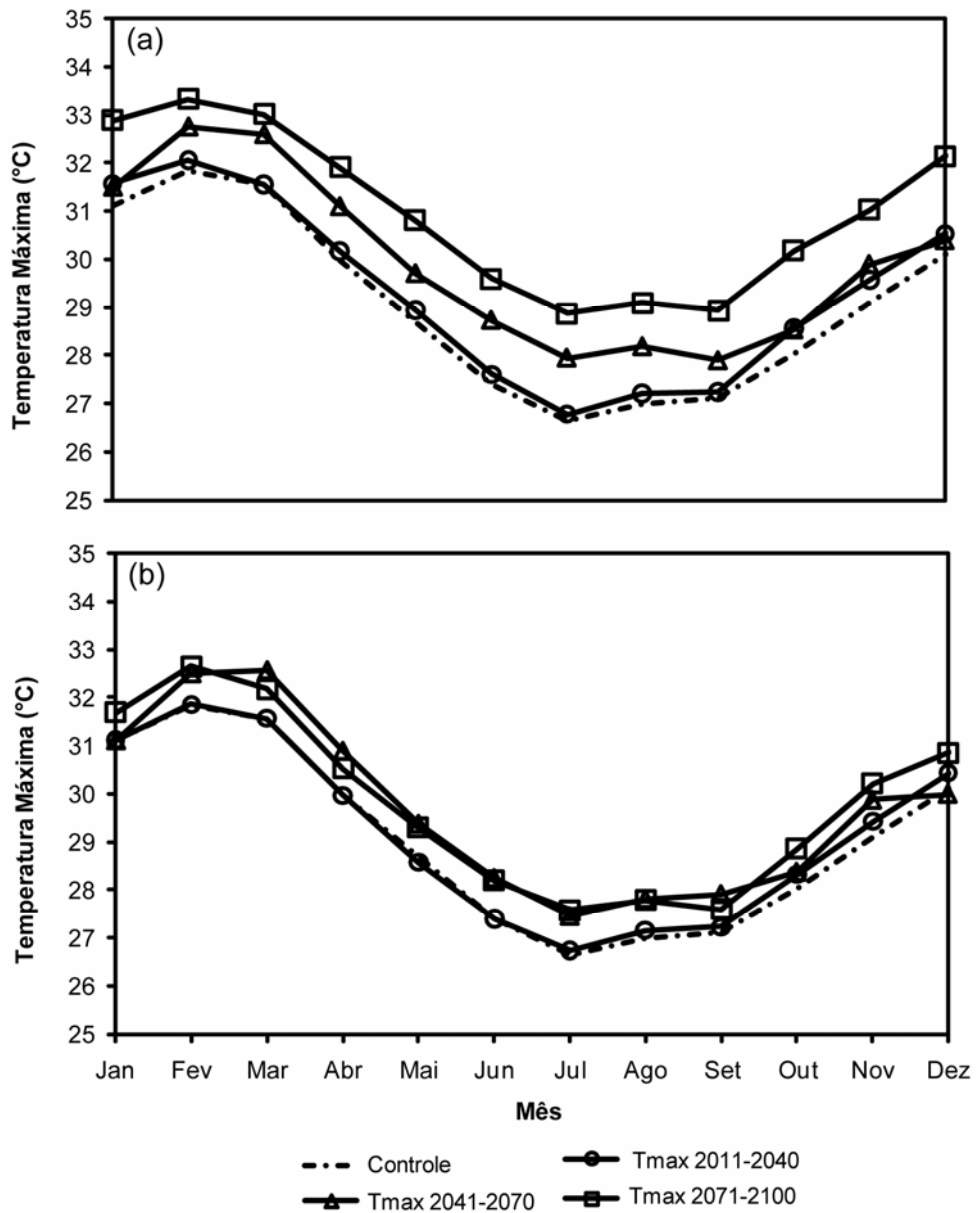


Figura 4 – Temperatura máxima dada pelo CSIRO Mk3 nos cenários de mudanças climáticas: (a) cenário A2; e (b) cenário B1, em Aracruz, ES.

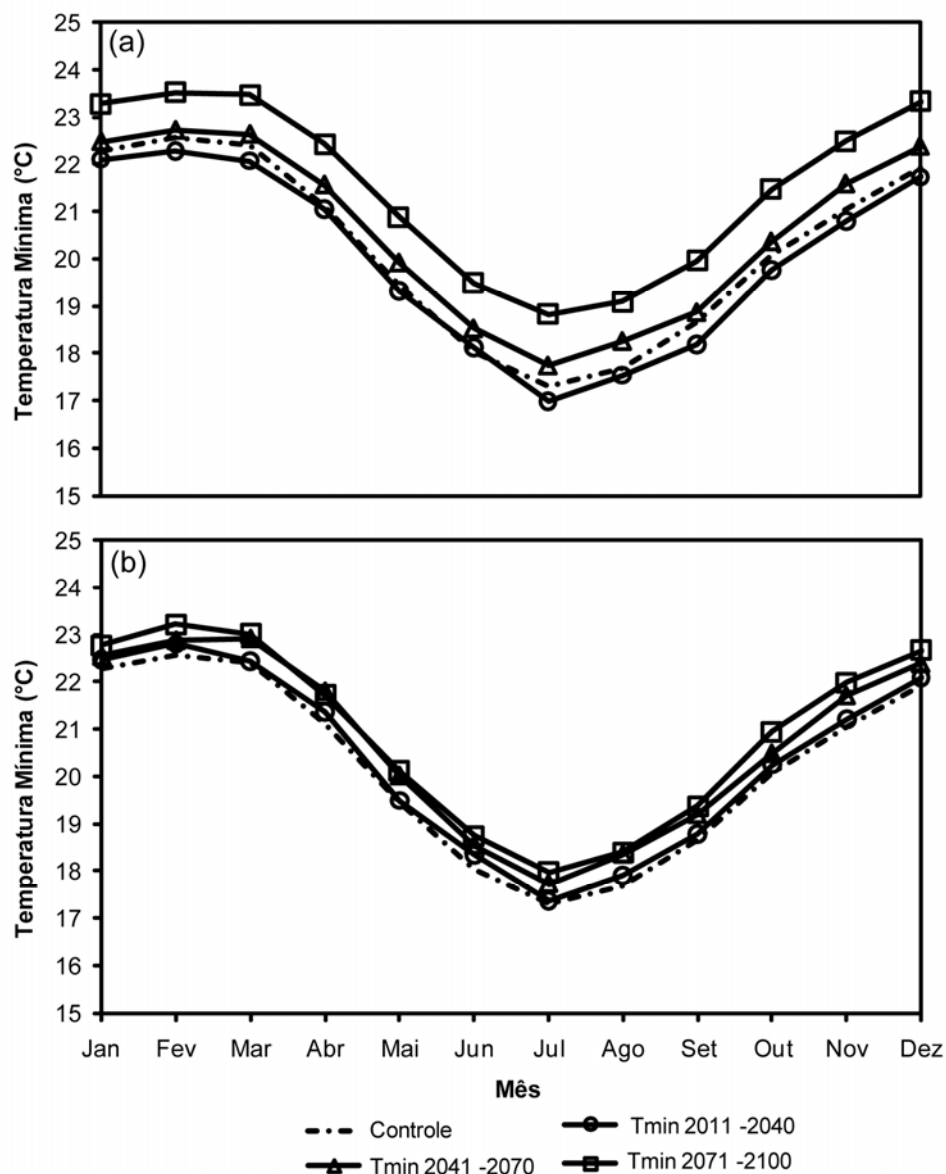


Figura 5 – Temperatura mínima dada pelo CSIRO Mk3 nos cenários de mudanças climáticas: (a) cenário A2; e (b) cenário B1, em Aracruz, ES.

Na Figura 6 estão apresentadas os cenários de mudanças climáticas A2 e B1 para precipitação, no cenário A2 observou-se que, em média, a precipitação reduziu 0,7 mm (2011-2040) e apresentou aumentos de 4,6 mm (2041-2070) e 1,9 mm (2071-2100), comparados aos do clima atual (Figura 6a). Já no cenário B1 observou-se aumento de 8,2 mm no período 2011-2040 e redução de 3,8 mm e 7,1 mm nos períodos 2041-2070 e 2071-2100, respectivamente (Figura 6b). Por meio da Tabela 4, é possível visualizar as diferenças entre a precipitação no clima atual e a

precipitação futura, notando-se tendência nos dois cenários de menos chuva no futuro na época dos meses mais secos e mais precipitação nos meses mais chuvosos.

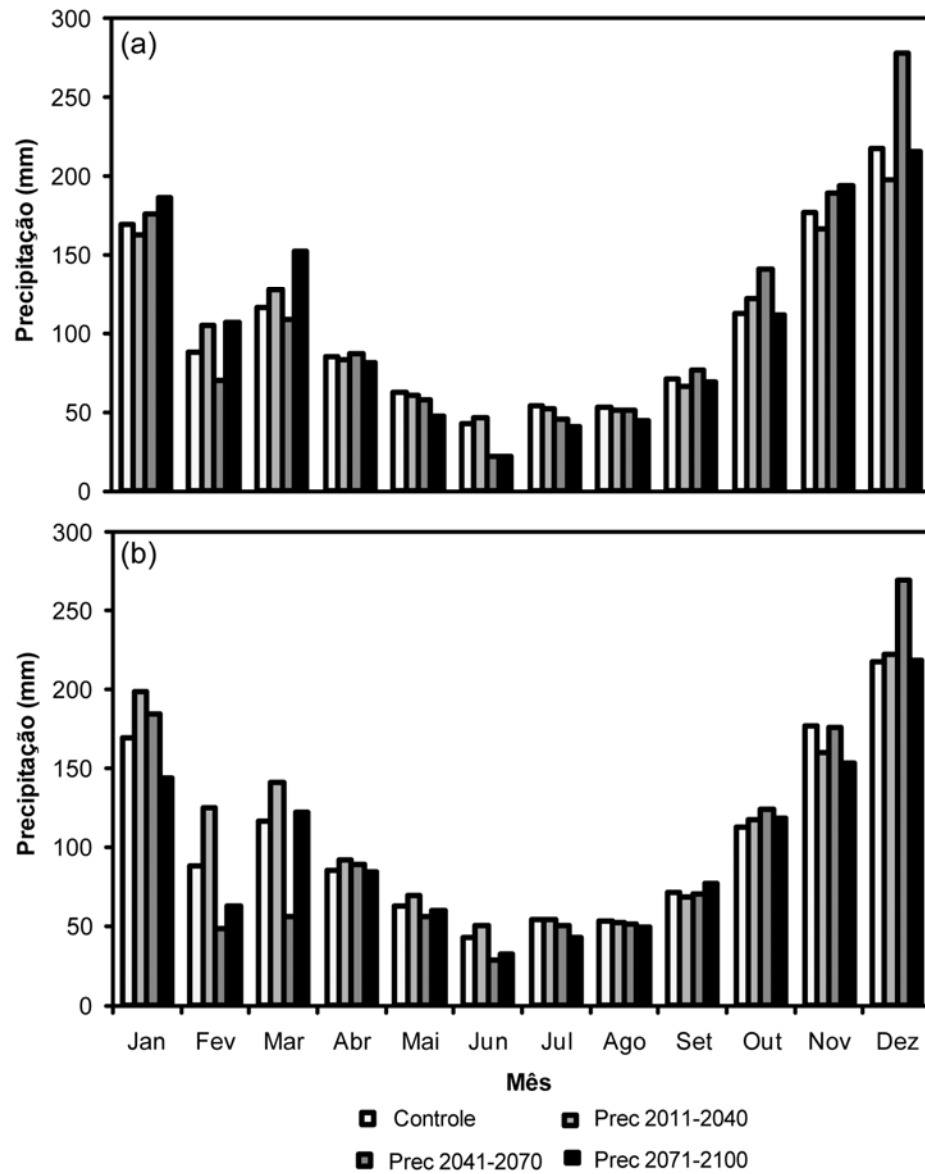


Figura 6 – Precipitação dada pelo CSIRO Mk3 nos cenários de mudanças climáticas: (a) cenário A2; e (b) cenário B1.

Tabela 4 – Diferença entre a precipitação (mm) do clima-controle e a prevista pelo modelo CSIRO Mk3

Mês	Cenário A2			Cenário B1		
	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Jan.	-7,2	+6,7	+16,7	+29,2	+15,3	-26,1
Fev.	+17,3	-17,4	+19,4	+36,7	-39,7	-25,0
Mar.	+11,4	-6,9	+36,2	+24,3	-60,5	+5,9
Abr.	-2,2	+1,9	-4,4	+6,6	+3,9	-1,2
Mai	-2,1	-4,7	-15,4	+6,5	-6,8	-2,6
Jun.	+4,0	-20,9	-21,0	+7,9	-14,2	-10,1
Jul.	-2,2	-8,8	-12,9	+0,4	-3,9	-11,7
Ago.	-1,8	-2,5	-8,2	-1,1	-2,1	-3,9
Set.	-4,9	+5,8	-2,2	-3,5	-0,9	+5,2
Out.	+9,6	+28,2	-1,3	+4,2	+10,7	+5,5
Nov.	-10,0	+12,9	+17,6	-16,9	-0,2	-22,9
Dez.	-19,9	+60,6	-1,2	+4,6	+52,1	+1,3

A quantidade de radiação utilizada na biossíntese, no modelo 3-PG, é controlada pelas condições ambientais, definidas pelos modificadores que variam entre 0 e 1. Na Figura 7 está apresentada a média dos modificadores ambientais no clima atual e nos cenários de mudanças climáticas. O modificador de água no solo (f_{SW}) teve seus valores nos cenários futuros, em geral, superiores ou iguais ao f_{SW} no clima atual, concordando com a precipitação prevista pelo modelo CSIRO Mk3. Nos três últimos anos, a produção primária bruta (PPB) não foi penalizada por esse modificador no clima atual nem nos cenários futuros (Figura 7a). O modificador de temperatura (f_T) atua de forma multiplicativa para penalizar a PPB (equação 5), de acordo com as flutuações da temperatura em torno do valor ótimo (25 °C). Na Figura 7b, observa-se que f_T foi limitante para a produção apenas no cenário A2 no final do século (2071-2100). O modificador de déficit de pressão de vapor (f_{DPV}) apresentou ligeira variação nos cenários futuros em comparação ao f_{DPV} controle, e assim como no f_T ocorreu limitação no cenário A2 no fim do século (Figura 7c). O modificador fisiológico ($PhysMod$) penaliza o crescimento das plantas com base na variação do armazenamento de água no solo e do valor do déficit de pressão de vapor de acordo com a lei dos mínimos entre f_{SW} e f_{DPV} (equação 2), e o f_{SW} manteve-se sempre superior ao f_{DPV} , indicando que a influência da elevação da temperatura do ar no cenário futuro promoveu aumento no DPV, devido ao incremento exponencial da pressão de saturação (e_s) promovido pelo aumento da temperatura ($DPV = e_s - e$), induzindo o fechamento estomático.

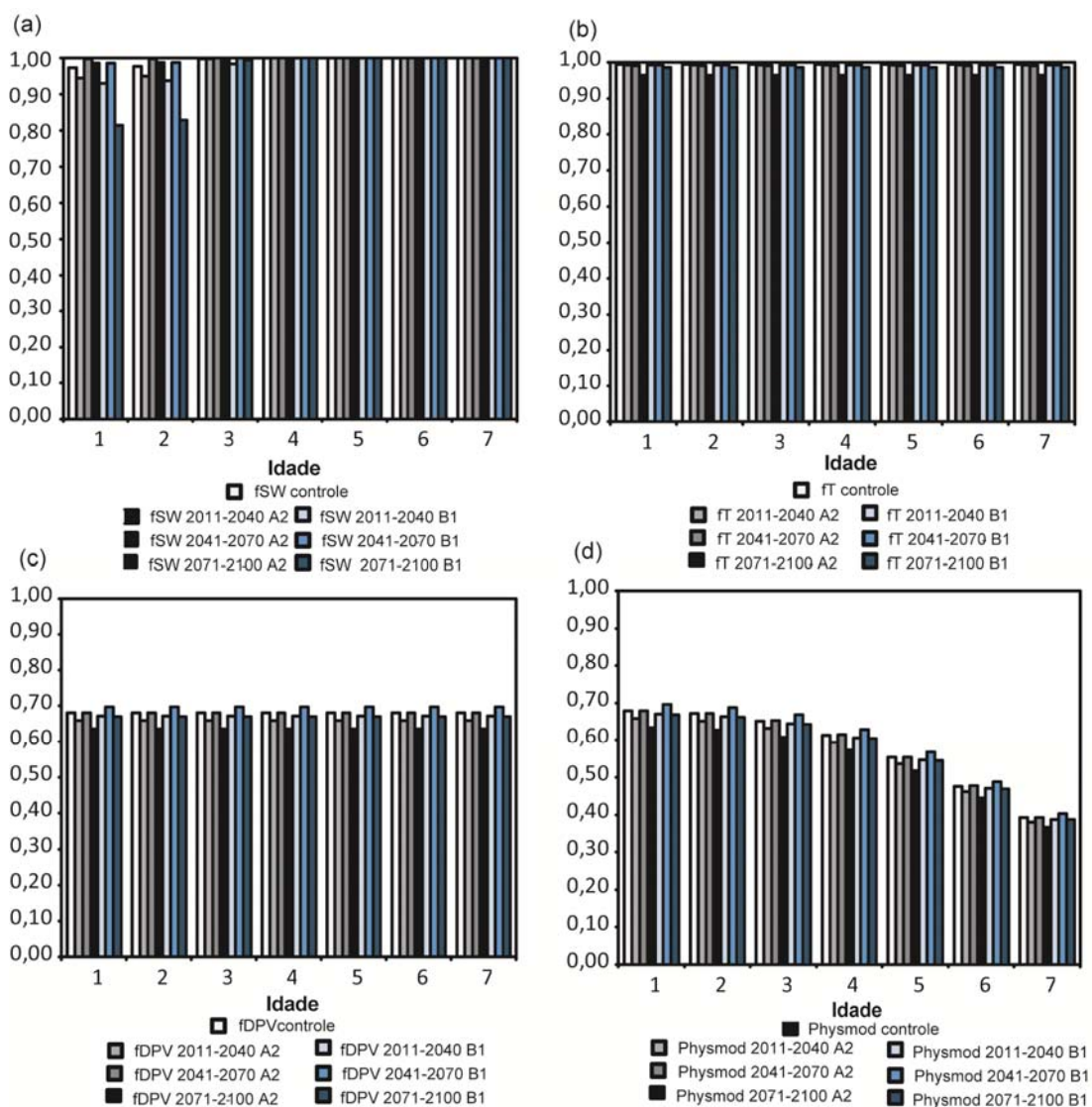


Figura 7 – Comportamento dos modificadores ambientais e fisiológicos do modelo 3-PG nos cenários de mudanças climáticas: (a) modificador de disponibilidade hídrica (f_{SW}); (b) modificador de temperatura (f_T); (c) modificador do déficit de pressão de vapor (f_{VPD}); e (d) modificador fisiológico ($PhysMod$).

Na Figura 8 está apresentado o incremento médio anual (IMA) em eucaliptos clones simulado pelo modelo 3-PG para o ciclo de sete anos, com os dados dos cenários de mudanças climáticas previstos pelo modelo CSIRO Mk3. A fim de comparar o cenário futuro com o presente, sempre foi plotado o comportamento do IMA simulado com os dados do clima atual (controle). Foram realizadas simulações do IMA para os cenários climáticos atual e futuro, variando a eficiência quântica máxima do dossel para analisar o efeito do aumento da concentração de CO_2

atmosférico de acordo com o cenário e o período (Tabela 3). Além disso, o IMA foi simulado para três valores de uso eficiente do carbono (UEC): 0,45; 0,47; e 0,50. Observa-se no cenário B1 que o IMA foi menor nas condições do clima atual comparado com o clima futuro, mesmo quando simulado para o futuro com menor UEC, ou seja, quando as plantas apresentaram maiores taxas respiratórias (Figura 8a). No cenário A2 no período de 2011-2040, o incremento médio anual controle apresentou, em geral, valores iguais ao do IMA simulado com UEC igual a 0,47, sendo o IMA simulado com UEC = 0,45 inferior e o simulado com UEC = 0,50, superior (Figura 8b). Durante o segundo período (2041-2070), no cenário B1 os valores do IMA controle superaram os valores de todas as outras simulações do IMA, mostrando, nesse caso, que as variações climáticas futuras superaram o efeito fertilizante do CO₂ e contribuíram para a redução do IMA futuro (Figura 8c). No cenário A2, o IMA controle só não foi superior ao IMA simulado com UEC = 0,50, no caso em que as árvores apresentaram menores taxas respiratórias (Figura 8d). No final do século (2071-2100), as árvores estariam sob maiores concentrações de CO₂ atmosférico, principalmente no cenário A2. Na Figura 8e, no cenário B1 percebe-se que apenas o IMA simulado com UEC = 0,50 superou o IMA controle, mostrando o forte controle climático, que mais uma vez anulou o efeito fertilizante do CO₂ sobre o crescimento das árvores. No cenário A2, todas as outras simulações do IMA superaram o IMA controle, mostrando que a alta concentração de CO₂ prevista por esse cenário anulou o efeito do clima futuro, aumentando a produção das árvores mesmo quando as taxas respiratórias foram altas UEC = 0,45 (Figura 8f).

Na Figura 9, observa-se o comportamento da transpiração (*E*) simulada no modelo 3-PG utilizando os cenários de mudanças climáticas. Como foi discutido no Capítulo I, elevadas concentrações de CO₂ favoreceram a redução da transpiração, comportamento bem representado no cenário B1 nos períodos 2041-2070 e 2071-2100 (Figura 9ce). Também foi possível visualizar esse comportamento no cenário A2 no período 2041-2070 (Figura 9d). No período mais recente (2011-2040), a concentração de CO₂ em ambos os cenários não diferiu muito da concentração no clima atual, talvez por isso não afetasse a transpiração a ponto de reduzi-la. Porém, analisando tal fato a partir da precipitação, no cenário B1 observou-se acréscimo de precipitação no período em questão, o que pode ter favorecido as maiores taxas transpiratórias (Figura 9a), enquanto no cenário A2 se notou decréscimo na precipitação, favorecendo a redução das taxas transpiratórias (Figura 9b). No período

de 2071-2100, no cenário A2 as maiores taxas transpiratórias podem ter ocorrido principalmente pelo acréscimo na precipitação, favorecendo a transpiração (Figura 9f).

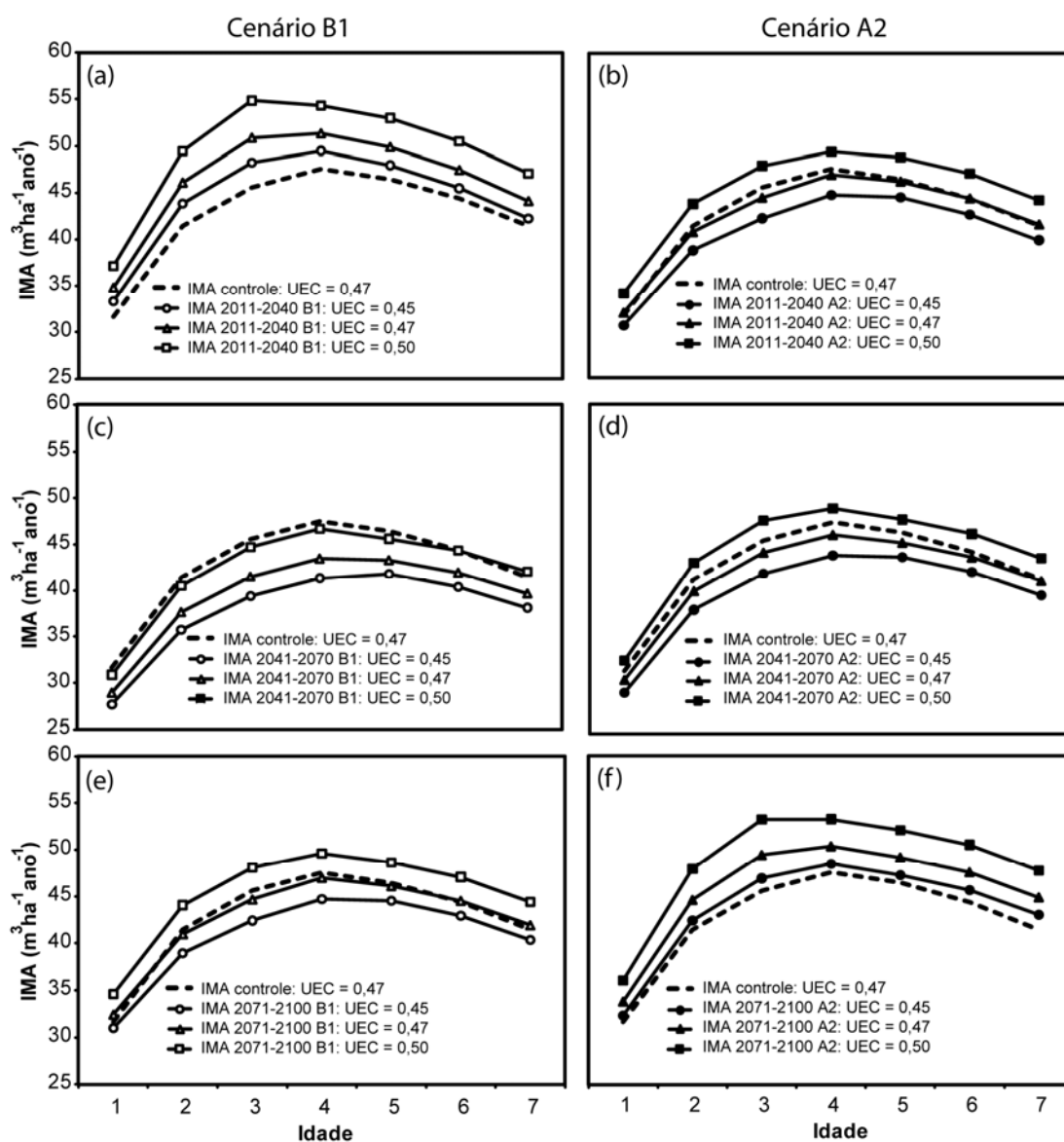


Figura 8 – Simulação do incremento médio anual (IMA, $\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$) em clone de eucalipto em cenários de mudanças climáticas para um ciclo de sete anos, variando a eficiência do uso do carbono (UEC): (a) 2011-2040 cenário B1; (b) 2011-2040 cenário A2; (c) 2041-2070 cenário B1; (d) 2041-2070 cenário A2; (e) 2071-2100 cenário B1; e (f) 2071-2100 cenário A2.

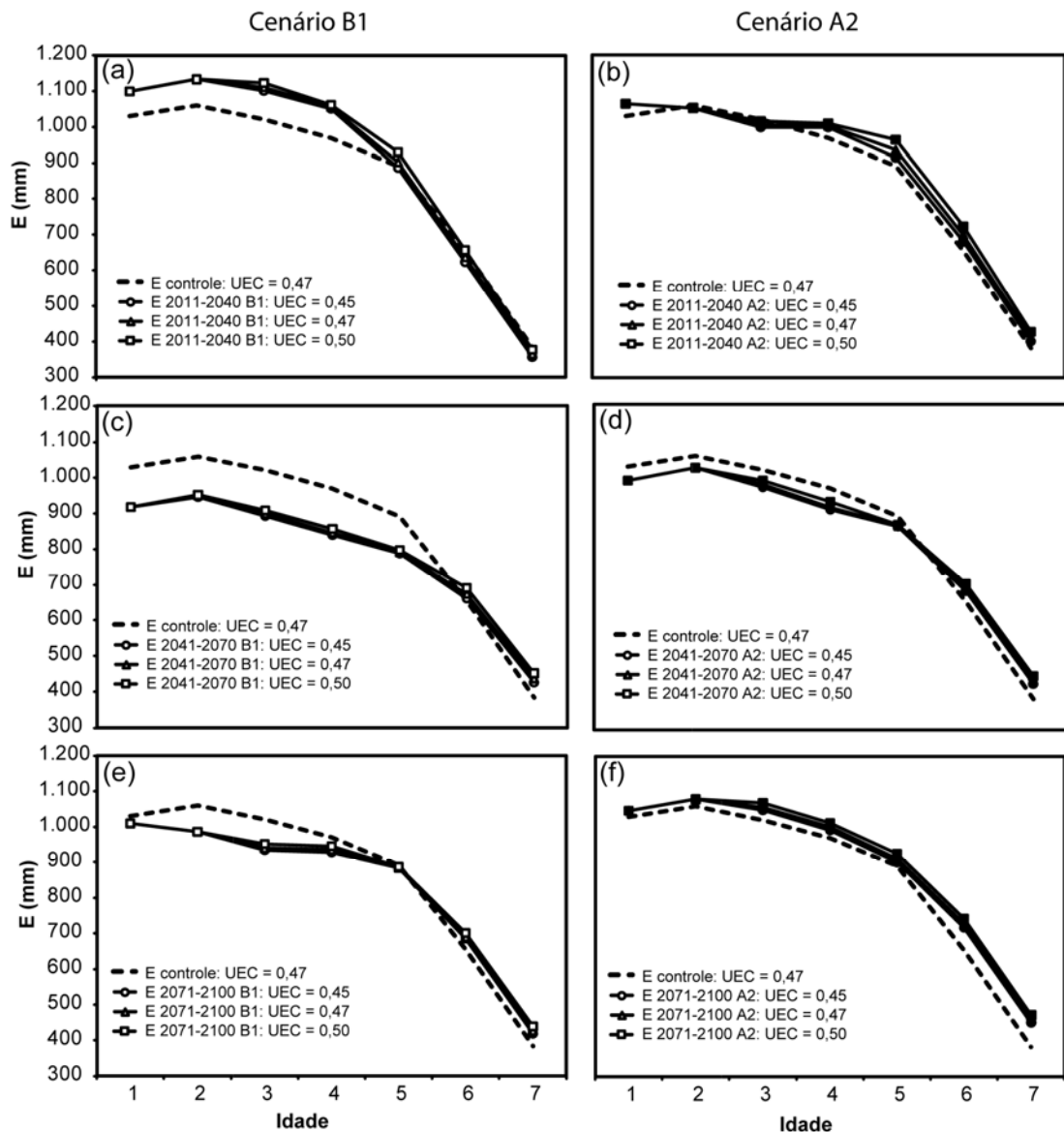


Figura 9 – Simulação da transpiração (E, mm) em clone de eucalipto em cenários de mudanças climáticas para um ciclo de sete anos, variando a eficiência do uso do carbono (UEC): (a) 2011-2040 cenário B1; (b) 2011-2040 cenário A2; (c) 2041-2070 cenário B1; (d) 2041-2070 cenário A2; (e) 2071-2100 cenário B1; e (f) 2071-2100 cenário A2.

O incremento corrente anual (ICA) é o incremento no volume em determinada idade e é determinado por medida anual no volume das árvores. Como exemplo: $ICA_{2 \text{ anos}} = \text{volume}_{3 \text{ anos}} - \text{volume}_{2 \text{ anos}}$. Na Figura 10 está apresentado o ICA simulado com os cenários de mudanças climáticas, notando-se que o comportamento geral do ICA apresentou maiores incrementos nos três primeiros anos e redução acentuada no último ano. Na Figura 10a, verifica-se que o ICA

simulado no cenário B1 em 2011-2040 foi diretamente afetado pelo acréscimo na precipitação durante os dois primeiros anos, tendo valores superiores ao ICA simulado no clima atual. O mesmo ocorreu no período 2071-2100 no cenário A2 (Figura 10f). Em 2011-2040, no cenário A2, onde houve redução na precipitação, o ICA controle só foi superior ao ICA simulado com $UEC = 0,50$ durante os três primeiros anos (Figura 10b). Comportamento esse também observado em 2041-2070 no cenário A2 (Figura 10d). O período de 2041-2070, cenário B1, apresentou acréscimos nos valores de temperatura e redução na precipitação (Figura 10c), como ocorreu no período 2071-2100 (Figura 10e), sendo o ICA controle maior que o ICA futuro em todos os anos. Enquanto no período de 2071-2100 o ICA simulado com UEC igual a 0,50 foi superior ao ICA controle em todos os anos.

Como constatado, os efeitos benéficos do aumento de CO_2 (efeito fertilizante) no crescimento das plantas são limitados pelas condições ambientais, mostrando que principalmente altos valores de temperatura e de DPV e, ainda, redução na precipitação afetam diretamente a produtividade das plantas, sobretudo, em longo prazo.

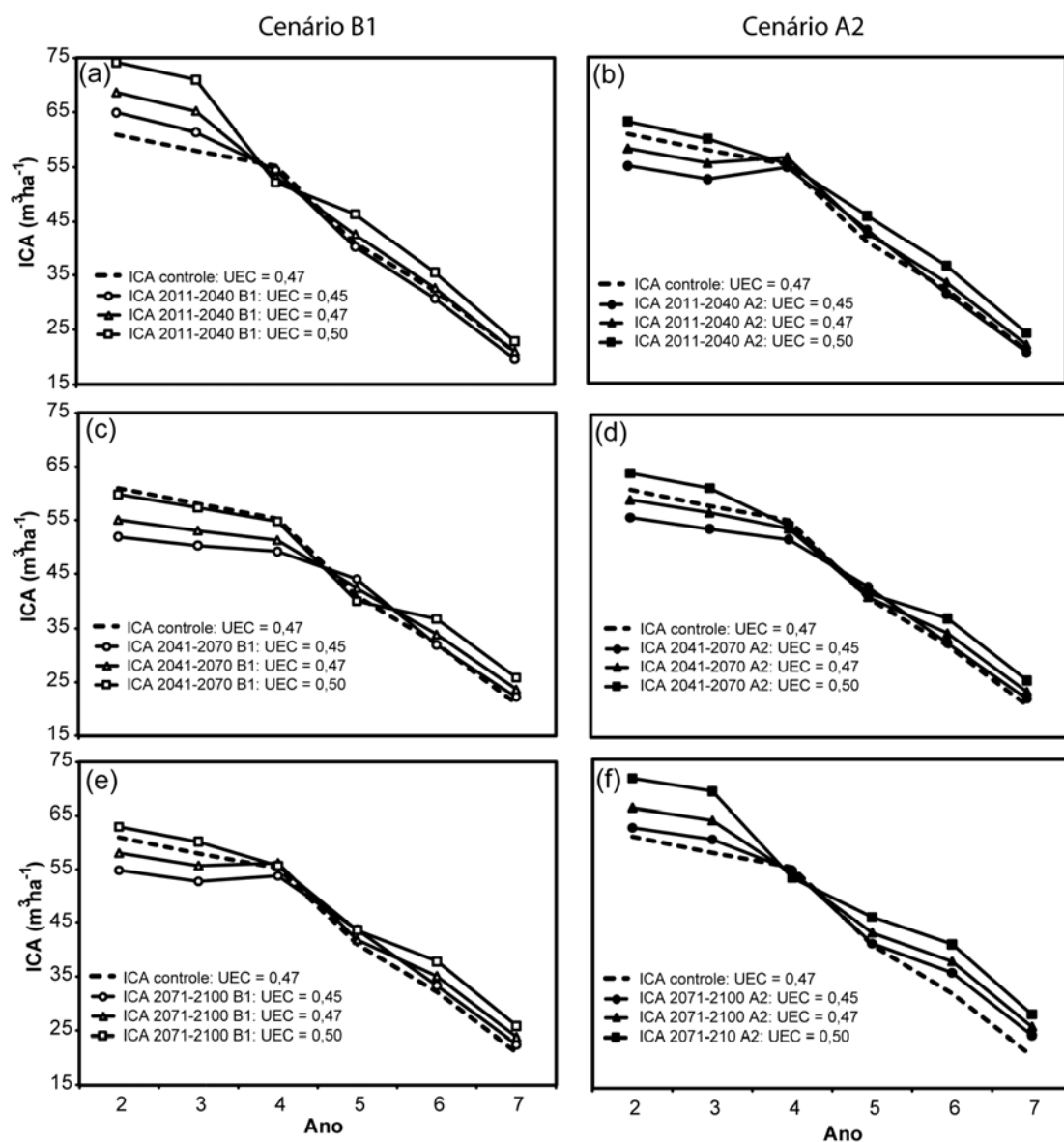


Figura 10 – Simulação do incremento corrente anual (ICA, $\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$) em clone de eucalipto em cenários de mudanças climáticas para um ciclo de sete anos, variando a eficiência do uso de carbono (UEC): (a) 2011-2040 cenário B1; (b) 2011-2040 cenário A2; (c) 2041-2070 cenário B1; (d) 2041-2070 cenário A2; (e) 2071-2100 cenário B1; e (f) 2071-2100 cenário A2.

4. DISCUSSÃO

O modelo de crescimento 3-PG tem sido amplamente utilizado para simular o crescimento florestal (BAESSO *et al.*, 2010; ALMEIDA *et al.*, 2004; STAPE *et al.*, 2004; SANDS; LANDSBERG, 2002; COOPS; WARING, 2001). Apesar de suas limitações, o modelo mostra-se muito eficiente na estimativa da produtividade florestal. Para estimativas da produtividade futura de plantios florestais, é necessária a utilização de diferentes cenários de mudanças climáticas. Neste estudo, observou-se que a tentativa de representar um clima futuro e os seus efeitos fisiológicos nas árvores (aumento da capacidade fotossintética e mudanças nas taxas respiratórias) mostrou que algumas vezes as adversidades do clima futuro foram superadas pelo efeito fertilizante do CO₂ na produção florestal.

Apesar das incertezas nas projeções climáticas dos modelos globais, o CSIRO Mk3 representou bem o comportamento das variáveis climáticas ao longo do ano no local de estudo. Verificou-se tendência de aquecimento mais acentuado nos últimos 30 anos do século e, principalmente, no cenário A2, o que era esperado, já que é o cenário mais pessimista. O modelo CSIRO Mk3 em geral simula acréscimos na precipitação nos meses mais quentes e decréscimos nos meses mais frios, sobretudo nos períodos 2041-2070 e 2071-2100 (Tabela 4). De acordo com o Quarto Relatório de Avaliação do IPCC (AR4), há padrões de mudanças no clima, como aquecimento geral da América Latina, especialmente com tendências positivas de aquecimento noturno e tendências negativas de ocorrência de noites frias; também há tendências positivas para eventos intensos de precipitação e consecutivos dias secos. Em 2020,

mudanças na temperatura poderão causar aquecimento de 0,4 °C até 1,8 °C e para 2080, de 1,0 °C até 7,5 °C, sendo os maiores valores de aquecimento projetados para ocorrer sobre a América do Sul tropical. A projeção das mudanças na precipitação é mais complexa. Projeções climáticas regionais apresentam alto grau de incerteza, modelos climáticos mostram tanto redução na precipitação de 20% a 40% quanto aumento de 5% a 10% em 2080 nas Américas do Sul tropical e central. A incerteza é ainda maior no Sul da América do Sul, tanto no inverno quanto no verão, embora a porcentagem de variação da precipitação seja um pouco menor em relação à América Latina tropical (MAGRIN *et al.*, 2007).

O incremento médio anual (IMA) simulado pelo modelo 3-PG com o mesmo uso eficiente do carbono do clima atual, ou seja, supondo que não ocorram mudanças na respiração das árvores sob elevada concentração de CO₂ e, conseqüentemente, de um novo clima, mostrou diferente comportamento nos diferentes períodos e cenários. No cenário B1, no primeiro período notou-se que o IMA futuro foi maior que o controle, apesar de a precipitação ter sido maior nesse período e na maioria dos meses do ano, com aumento médio de 8,2 mm, e a temperatura ter permanecido praticamente a mesma do clima atual; os penalizadores da produção primária bruta não sofreram alterações expressivas. Assim, pode-se dizer que o aumento no IMA foi devido ao incremento da concentração de CO₂ atmosférico refletido na eficiência quântica do dossel, que aumentou 3% em relação ao clima atual. No mesmo cenário, no período de 2041-2070 o IMA controle superou o IMA futuro, provavelmente devido à redução na precipitação durante a maioria dos meses (Figura 6b). No último período, o IMA simulado com UEC igual a 0,47 foi praticamente igual ao IMA controle, mesmo com as adversidades climáticas como a redução da precipitação, fato explicado pelo aumento de 9% na eficiência quântica.

No cenário A2, nos dois primeiros períodos o IMA simulado com UEC = 0,47 mostrou valores bem próximos do IMA controle. Em 2041-2070, quando o IMA futuro foi ligeiramente menor que o IMA controle, mesmo com aumento de 11% na eficiência quântica, além do pequeno incremento nos valores da temperatura, observa-se na Figura 6a que a precipitação promoveu aumento médio de 4,6 mm, sendo seu comportamento de redução na maioria dos meses, e o aumento observado foi principalmente devido ao excesso de chuva precipitada em dois meses. Quando essa chuva ultrapassa a capacidade de armazenamento de água do solo, ela não pode ser utilizada em sua totalidade pelo plantio florestal. O acréscimo de precipitação,

algumas vezes previstas nos cenários de mudanças climáticas, muitas vezes resulta em chuvas mal distribuídas ao longo do tempo, e grande parte não é infiltrada no solo por causa de sua alta intensidade, gerando escoamento superficial. Ainda no cenário A2, em 2071-2100 o aumento de 22% na eficiência quântica favoreceu o aumento do IMA futuro mesmo diante das mudanças no clima.

É sabido que os fatores ambientais podem alterar a operação de rotas metabólicas e de taxas metabólicas. Assim, uma nova condição climática, devida em grande parte ao aumento da concentração de CO₂ atmosférico e ao consequente aumento da temperatura, deve ser levada em consideração quando se utilizam modelos para simular a produção vegetal no futuro.

O dióxido de carbono tem efeito inibitório direto muito limitado sobre a taxa respiratória em concentrações entre 3 e 5%, que estão bem além da concentração de 0,036% normalmente encontrada na atmosfera. Plantas cultivadas a 350 ppm de CO₂ comparadas às plantas cultivadas a 700 ppm de CO₂, apresentaram taxa respiratória mitocondrial 20% mais lenta. O número de mitocôndrias por unidade de área celular na verdade dobra no ambiente rico em CO₂. Tais dados implicam atividade respiratória na luz, pois é nela que podem aumentar em concentrações de CO₂ mais elevadas (TAIZ; ZEIGER, 2003). Considerações teóricas levam a definições contrastantes de como o aumento da concentração de dióxido de carbono atmosférico pode afetar a respiração. Amthor (2000) levantou a possibilidade de que, ao estimular a translocação, o crescimento e o acúmulo de carboidratos não estruturais, a elevada concentração de CO₂ pode aumentar a respiração em toda a planta, reduzindo o UEC. Entretanto, a diminuição de nitrogênio e de proteínas nas plantas expostas à elevada concentração de CO₂ pode contribuir para a baixa respiração de manutenção, aumentando a UEC (DEWAR *et al.*, 1998). Em um experimento de enriquecimento de CO₂ em ar livre (FACE), mudas de *Pinus loboly* foram expostas a mais 200 µLL⁻¹ de CO₂, e a elevada concentração de CO₂ estimulou a PPB e a PPL (De LUCIA *et al.*, 2005), mas não pareceu alterar a alocação de carbono (C), e seu efeito sobre a respiração foi baixo (SCHÄFER *et al.*, 2003). Em experimento semelhante, a exposição de árvores *sweetgum* à elevada concentração de CO₂ causou redirecionamento do C para a produção de raízes finas (NORBY *et al.*, 2002) e estimulou em 28% a respiração (De LUCIA *et al.*, 2005). No entanto, esse aumento na respiração contribuiu apenas para uma pequena redução no UEC de 0,52 na

floresta exposta à concentração de CO₂ ambiente para 0,49 nas árvores com elevada concentração de CO₂.

O potencial de alta concentração de CO₂ afetar o uso eficiente do carbono (UEC) dependerá da idade das árvores ou do genótipo. Contrariando os estudos discutidos anteriormente, a exposição à elevada concentração de CO₂ de plantios jovens de *Populus* de alta densidade em solos férteis aumentou consistentemente o UEC. Depois de três anos, a elevada concentração de CO₂ causou maiores aumentos na PPL (21-36%) que na PPB (5-19%), entre três diferentes genótipos de *Populus*. Embora não tenha sido medido, esse estímulo na PPL sugere que a respiração se tornou um menor percentual da PPB sob elevado CO₂ (GIELEN *et al.*, 2005). Ao contrário das mudas de *pinus* e *sweetgum*, a exposição à elevada concentração de CO₂ causou redução significativa de nitrogênio na folha em *Populus* (GIELEN *et al.*, 2003), e baixos níveis de nitrogênio na folha podem ter diminuído a respiração e aumentado a EUC, como sugerido por Dewar *et al.* (1998).

Devido à incerteza do comportamento futuro da respiração em florestas, simularam-se tanto o aumento quanto a redução da respiração nos plantios de eucalipto. O IMA simulado nos cenários de mudanças climáticas, supondo que as taxas respiratórias aumentariam no futuro (UEC = 0,45), só foi superior ao IMA controle no período 2011-2040 (cenário B1) e 2071-2100 (cenário A2), o que se deve à sobreposição do efeito fertilizante do CO₂ ao clima futuro. Nos outros períodos, a maior respiração levou o IMA futuro a ser menor que o IMA controle. Quando simulada a redução da respiração nos cenários futuros (UEC = 0,50), o IMA futuro na maioria das vezes foi superior ou, pelo menos, bem próximo ao IMA controle nos dois cenários. Fato esse esperado, já que com a menor taxa respiratória a produção primária líquida foi maior.

Na transpiração (E), a variação no uso eficiente do carbono não promoveu grandes diferenças nas taxas transpiratórias futuras. Na maioria das vezes, a transpiração futura se manteve abaixo da transpiração-controle, comportamento esperado nos cenários de mudanças climáticas, em que foi simulado o aumento da concentração de CO₂. Como discutida no Capítulo I, a redução da condutância estomática, devido ao aumento da concentração intercelular (C_i) de CO₂, reduziu a transpiração.

O incremento corrente anual (ICA) simulado para o futuro seguiu a mesma tendência do ICA controle, como os maiores valores nos três primeiros anos e decréscimos no último ano, a variação anual do ICA é de acordo com a sazonalidade e o tratamento do povoamento. Em relação à variação da eficiência do uso do carbono, o ICA seguiu o mesmo comportamento do IMA.

5. CONCLUSÕES

De acordo com as simulações no modelo de crescimento 3-PG, associado aos cenários de mudanças climáticas, conclui-se que:

- O modelo de crescimento 3-PG, associado aos cenários de mudanças climáticas, mostrou-se útil na projeção da produtividade futura do eucalipto.
- O acréscimo na eficiência quântica do dossel devido ao aumento da concentração de CO₂ atmosférico algumas vezes superou as adversidades do clima na simulação da produtividade futura do eucalipto, principalmente no cenário A2 no fim do século, quando a eficiência quântica aumentou 22%.
- Na simulação da redução da respiração no plantio florestal, o incremento médio anual apresentou tendência de aumento.
- A transpiração nos cenários futuros foi reduzida como consequência do aumento da concentração de CO₂, que reduziu a condutância estomática.
- Tais projeções são importantes para estimar os impactos no setor florestal causados pelas mudanças no clima.

6. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A.C.; LANDSBERG, J.J.; SANDS, P.J. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 179-195, 2004.

AMTHOR, J.S. Direct effect of elevated CO₂ on nocturnal in situ leaf respiration in nine temperate deciduous tree species is small. **Tree Physiology**, v. 20, p. 139-144, 2000.

BACHELET, D.; NEILSON, R. P.; LENTHAN, J.M.; DRAPEK, R.J. Equilibrium and dynamic models agree about impacts of globalwarming on US ecosystems. **Ecosystems**, v. 4, n. 1, p. 64-185, 2001.

BAESSO, R.C.E.; RIBEIRO, A.; SILVA, M.P. Impacto das mudanças climáticas na produtividade do eucalipto na região norte do Espírito Santo e sul da Bahia. **Ciência Florestal**, v. 20, p. 335-344, 2010.

BRUHN, D.; MIKKELSEN, T.N.; ATKIN, O.K. Does the direct effect of CO₂ concentration on leaf respiration vary with temperature? Responses in two species of *Plantago* that differ in relative growth rate. **Physiologia Plantarum**, v. 114, p. 57-64, 2002.

BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere, theory, history, and application**. Dordrecht: D. Reidel, 1982. 299 p.

BADER D.C.; COVEY, C.; GUTOWSKI JR., W.J.; HELD, I.M.; KUNKEL, K.E.; MILLER, R.L.; TOKMAKIAN, R.T.; ZHANG, M.H. **CCSP. Climate models: an assessment of strengths and limitations**. A report by the U.S. Climate change science program and the subcommittee on global change research. Washington, D.C., USA: Department of Energy, Office of Biological and Environmental Research, 2008. 124 p.

COOPS, N.C.; WARING, R.H.; LAW, B.E. Assessing the past and future distribution and productivity of ponderosa pine in the Pacific Northwest using a process model, 3-PG. **Ecological Modelling**, v. 183, p. 107-124, 2005.

COOPS, N.C.; WARING, R.H. Assessing forest growth across southwestern Oregon under a range of current and future global change scenarios using a process model, 3-PG. **Global Change Biology**, v. 7, p. 15-29, 2001.

DELUCIA, E.H.; MOORE, D.J.; NORBY, R.J. Contrasting responses of forest ecosystems to rising atmospheric CO₂: implications for the global C cycle. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 19, 2005. GB3006, doi: 10.1029/2004GB002346.

DEWAR, R.C.; MEDLYN, B.E.; MCMURTRIE, R.E. A mechanistic analysis of light and carbon use efficiencies. **Plant, Cell and Environment**, v. 21, p. 573-588, 1998.

DRAKE, B.G. *et al.* Does elevated atmospheric CO₂ concentration inhibit mitochondrial respiration in green plants? **Plant, Cell and Environment**, v. 22, p. 649-658, 1999.

ELLSWORTH, D.S. CO₂ enrichment in a maturing pine forest: are CO₂ exchange and water status in the canopy affected? **Plant, Cell and Environment**, v. 22, p. 461-472, 1999.

GGEOWORLD. **Endeavour maps the world in three dimensions**. Disponível em: <<http://www.geoplance.com/gw/2000/0400/0400tec.asp>>. Acesso em: 20 mar. 2003.

GIELEN, B.C.; CALFAPIETRA, C.; LUKAC, M.; WITTIG, V.E.; ANGELIS, P. DE; JANSSENS, I.A.; MOSCATELLI, M.C.; GRECO, S.; COTRUFO, M.F.; GODBOLD, D.L.; HOOSBEEK, M.R.; LONG, S.P.; MIGLIETTA, F.; POLLE, A.; BERNACCHI, C.J.; DAVEY, P.A.; CEULEMANS, R.; SCARASCIA-MUGNOZZA, G.E. Net carbon storage in a poplar plantation (POPFACE) after three years of free-air CO₂ enrichment. **Tree Physiology**, v. 25, p. 1399-1408, 2005.

GIELEN, B.; LIBERLOO, M.; BOGAERT, J.; CALFAPIETRA, C.; DE ANGELIS, P.; MIGLIETTA, F.; SCARASCIA-MUGNOZZA, G.; CEULEMANS, R. Three years of free-air CO₂ enrichment (POPFACE) only slightly affect profiles of light and leaf characteristics in closed canopies of Populus. **Global Change Biology**, v. 9, p. 1022-1037, 2003.

GIFFORD, R.M. Plant respiration in productivity models: conceptualisation, representation and issues for global terrestrial carbon-cycle research. **Functional Plant Biology**, v. 30, p. 171-186, 2003.

GIFFORD, R.M. The global carbon cycle: a viewpoint on the missing sink. **Australian Journal Plant Physiology**, v. 21, p. 1-15, 1994.

GIFFORD, R.M. Implications of CO₂ effects on vegetation for the global carbon budget. In: **The global carbon cycle**. Berlin: Ed. M. Heinmann. Springer-Verlag, 1993. p. 165-205.

GORDON, H.B.; ROTSTAYN, L.D.; MCGREGOR, J.L.; DIX, M.R.; KOWALCZYK, E.A.; O'FARRELL, S.P.; WATERMAN, L.J.; HIRST, A.C.; WILSON, S.G.; COLLIER, M.A.; WATTERSON, I.G.; ELLIOTT, T.I. The CSIRO Mk3 climate system model. In: COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANISATION ATMOSPHERIC RESEARCH, ASPENDALE, VICTORIA, 2002, Australia. **Proceedings...** Australia, 2002. 130 p. (CSIRO atmospheric research technical paper, 60). Disponível em: <http://www.cmar.csiro.au/e-print/open/gordon_2002a.pdf>.

IPCC. Climate change: synthesis report. In: CORE WRITING, Team; PACHAURI, R.K.; REISINGER, A. (Eds.). **Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.** IPCC, Geneva, Switzerland, 2007. 104 p.

KIMBALL, B.A.; PINTER, JR.; GARCIA, R.L.; LA MORTE, R.L.; WALL, G.W.; HUNSAKER, D. J.; WECHSUNG, G.; WECHSUNG, F.; KARTSCHALL, T. Productivity and water use of wheat under free-air CO₂ enrichment. **Global Change Biology**, v. 1, p. 429-442, 1995.

LANDSBERG, J.J.; WARING, R.H.; COOPS, N.C. Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types. **Forest Ecology and Management**, v. 172, p. 199-214, 2003.

LANDSBERG, J.J.; JOHNSEN, K.H.; ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H.L.; MCKEAN, S.E. Applying 3-PG, a simple process-based model designed to produce practical results, to data from loblolly pine experiments. **Forest Science**, v. 47, p. 43-51, 2001.

LANDSBERG, J.J.; WARING, R.H. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, v. 95, p. 209-228, 1997.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal.** São Carlos, SP: RiMa.2000. 531 p.

MAGRIN, G.; GARCÍA, C.G.; CHOQUE, D.C.; GIMÉNEZ, J.C.; MORENO, A.R.; NAGY, G.J.; NOBRE, C.; VILLAMIZAR, A. Latin America. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. In: PARRY, O.F.; CANZIANI, J.P.; PALUTIKOF, P.J.; VAN DER LINDEN; C.E.; HANSON (Eds.). **Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L.** Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. p. 581-615.

NAKIĆENOVIĆ, N.; SWART, R. **Special report on emissions scenarios: a special report of working group III of the Intergovernmental panel on climate change.** Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 599 p.

NEW, M.; HULME, M.; JONES, P.D. Representing twentieth century space-time climate variability. Part 1: development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. **Journal of Climate**, v. 12, p. 829-856, 1999.

NORBY, R.J.; HANSON, P.J.; O'NEILL, E.G.; TSCHAPLINSKI, T.J.; WELTZEN, J.F.; HANSEN, R.A.; CHENG, W.; WULLSCHEIGER, S.D.; GUNDERSON, C.A.; EDWARDS, N.T.; JOHNSON, D.W. Net primary productivity of a CO₂-enriched deciduous forest and the implications for carbon storage. **Ecological Applications**, v. 12, p. 1261-1266, 2002.

PEREZ-GARCIA, J.; JOYCE, L.A.; MCGUIRE, A.D.; XIAO, X. Impacts of climate change on the global forest sector. **Climatic Change**, v. 54, p. 439-461, 2002.

ROGERS, H.H.; CURE, J.D.; SMITH, J.M. Soybean growth and yield response to elevated carbon dioxide. **Agriculture Ecosystem Environment**, v. 16, p. 113-128, 1986.

SANDS, P.J.; LANDSBERG, J.J. Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. **Forest Ecology and Management**, v.163, p. 273-292, 2002.

SCHNEIDER, S.H. The changing climate. **Scientific American**, p. 38-47, 1989.

SCHÄEFER, K.V.R.; OREN, R.; ELLSWORTH, D.S.; LAI, C.; HERRICKS, J.D.; FINZI, A.C.; RICHTER, D.D.; KATUL, G.G. Exposure to an enriched CO₂ atmosphere alters carbon assimilation and allocation in a pine forest ecosystem. **Global Change Biology**, v. 9, p. 1378-1400, 2003.

STAPE, J.L.; RYAN, M.G.; BINKLEY, D. Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis* x *urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 219-234, 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3th ed. Massachusetts: Publishers Sunderland, Sinauer Associates, Inc., 2003. 690 p.

WARING, R.H.; LANDSBERG, J.J.; WILLIAMS, M. Net primary production of forest: a constant fraction of gross primary production? **Tree Physiology**, v. 18, p. 129-134, 1998.

CONCLUSÃO GERAL

Conclui-se que a exposição de árvores de eucalipto a alta concentração de CO₂ aumenta a sua capacidade fotossintética. Porém, são necessários mais experimentos em longo prazo, sob condições naturais, principalmente em países tropicais, para melhor observação do comportamento vegetal à elevada concentração de CO₂ em todo o seu ciclo de vida. A eficiência quântica do dossel mostrou-se parâmetro adequado para a observação do efeito do aumento da concentração de CO₂ nas árvores de eucalipto.

O modelo de crescimento florestal foi útil na estimativa da produtividade de plantios de eucalipto, pois, ao implementar cenários de mudanças climáticas, foi possível ter ideia do comportamento florestal no futuro diante das variações climáticas. Isso permite que sejam tomadas decisões adequadas sobre o manejo das florestas, além de identificar novas áreas aptas ao plantio.

Assim, partindo do princípio de que as mudanças no clima são inevitáveis, é necessário conhecer os fatos, monitorar localmente as mudanças e traçar estratégias que garantam a sustentabilidade do negócio florestal.