

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA – INPA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS - UEA
Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente - CLIAMB

Impacto das mudanças climáticas na produtividade da cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merr) na Amazônia – Estudo de caso no Município de Santarém - PA

Poholl Adan Sagratzki Cavero

**Manaus-Amazonas
Abril 2016**

POHOLL ADAN SAGRATZKI CAVERO

Impacto das mudanças climáticas na produtividade da cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merr) na Amazônia – Estudo de caso no Município de Santarém - PA

Orientador: Dr. Luiz Antonio Candido

Co-Orientador: Dr. Antonio Ocimar Manzi

Tese de Doutorado apresentado junto ao Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/INPA e da Universidade do Estado do Amazonas/UEA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Clima e Ambiente.

**Manaus-Amazonas
Abril 2016**

C378i Cavero, Poholl Adan Sagratzki
Impacto das mudanças climáticas na produtividade da cultura da soja
(*Glycine max (L.) Merr*) na Amazônia – estudo de caso no município de
Santarém - PA / Poholl Adan Sagratzki Cavero. --- Manaus: [s.n.], 2016.
103 f. : il., color.

Tese (Doutorado) --- INPA, Manaus, 2016.
Orientador: Luiz Antonio Candido.
Coorientador : Antonio Ocimar Manzi.
Área de concentração: Clima e Ambiente.

1.Mudanças Climáticas – Cultura de soja. 2.Soja – cultura. 3. *Glycine
max (L.)*. I.Título

CDD 633

Sinopse:

Estudou-se o possível impacto das mudanças climáticas na produtividade da soja no município de Santarém – PA, utilizando o modelo agronômico Inland-Agro.

Palavras chave: Mudanças climáticas, Inland-Agro, Glycine max, modelagem.

AGRADECIMENTOS

- A Deus, pelo dom da vida e pelas bênçãos derramadas a todo instante.
- Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Universidade Estadual da Amazônia (UEA) e, ao curso de Clima e Ambiente (CLIAMB) pela oportunidade.
- A CAPES, pelo financiamento da bolsa de estudos no doutorado.
- Ao Dr. Luiz Candido, pela valiosa orientação e pelo exemplo de profissionalismo.
- Ao Dr. Antonio Ocimar Manzi, pela valiosa co-orientação e pelo exemplo de profissionalismo.
- Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente.
- A minha querida família pelo amor e carinho.
- A todos aqueles que, direta e indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Impacto das mudanças climáticas na produtividade da cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merr) na Amazônia – Estudo de caso no Município de Santarém - PA

As mudanças climáticas geradas pelos modelos de circulação geral em resposta ao incremento na concentração de CO₂ atmosférico e, seus possíveis impactos nos ecossistemas agrícolas são o foco de muitos estudos na comunidade científica. Este trabalho teve como o objetivo avaliar e quantificar os possíveis efeitos provocados pelas mudanças climáticas sobre a cultura da soja, considerando as projeções dos cenários climáticos do IPCC AR5 para a região leste da Amazônia, utilizando o modelo agrônomo Inland-Agro. O modelo foi ajustado e validado e, representou satisfatoriamente os fluxos de calor sensível, latente e conteúdo de água no solo. Projeções das médias mensais de temperatura e precipitação de oito modelos de circulação global foram analisadas para representar a área de estudo, sendo o modelo Hadgem2ES que melhor simulou os dados observados do Climatic Research Unit (CRU) para ambas as variáveis. Projeções, das medias mensais climatológicas da sequência dos anos 2031-2060 e 2071-2100 do Hadgem2ES, em concentrações de CO₂ atmosférico de 513 e 801 ppm respectivamente, foram utilizadas para forçar o modelo Inland-Agro . Com o objetivo de obter simulações, que representem aclimatação do ecossistema da soja na assimilação de CO₂ atmosférico elevado, a variável velocidade máxima da enzima rubisco (V_{max}) foi ajustada a valores de 20 e 13X10⁻⁶ mol(CO₂).m⁻².s⁻¹ em concentrações de CO₂ de 513 e 801 ppm respectivamente. Assim o modelo conseguiu representar satisfatoriamente as variáveis em estudo, tais como IAF, rendimento, fluxos de calor latente, sensível e evapotranspiração em elevadas concentrações de CO₂ atmosférico, quando comparadas aos resultados reportados por experimentos utilizando tecnologia FACE. Também foram realizadas simulações combinando CO₂ elevado (513 e 801 ppm) e as projeções geradas pelo modeloHadgem2ES (temperatura do ar, precipitação, onda curta, onda longa e umidade relativa do ar), individualmente com cada uma delas e com todas as variáveis em conjunto, utilizando os valores da V_{max} padrão (45X10⁻⁶ mol(CO₂).m⁻².s⁻¹) e das V_{max} ajustadas. Resultados encontrados nestas simulações indicam a necessidade de incluir uma função de aclimatação, para a cultura da soja, no código do modelo Inland-Agro.

Palavras chave: Mudanças climáticas, Inland-Agro, *Glycine max*, modelagem.

ABSTRACT

Impact of climate change in soybean productivity (*Glycine max* (L.) Merr) in the Amazon - Case study in the municipality of Santarém - PA

Climate change generated by general circulation models in response to the increase in atmospheric CO₂ concentration and its possible impacts on agricultural ecosystems are the focus of many studies in the scientific community. This study had as objective to evaluate and quantify the possible effects of climate change on soybeans, considering the projections of climate scenarios of the IPCC AR5 to the eastern Amazon region, using the agronomic model Inland-Agro. The model was fitted and validated, and satisfactorily represented the heat sensible and heat latent fluxes, and water content of the soil. Projections of monthly mean temperature and precipitation eight global circulation models were analyzed to represent the study area, and the Hadgem2ES model that best simulated the observed data from the Climatic Research Unit (CRU) for both variables. Projections, the climatological monthly averages of the sequence of the years 2031-2060 and 2071-2100 Hadgem2ES in atmospheric CO₂ concentrations of 513 and 801 ppm respectively were used to force the Inland Agro-model. In order to obtain simulations, representing soybean ecosystem acclimatization at high atmospheric CO₂ assimilation, the variable maximum speed of the rubisco enzyme (V_{max}) was adjusted to values of 20 and 13X10⁻⁶ mol (CO₂) .m⁻². s⁻¹ in CO₂ concentrations of 513 and 801 ppm respectively. Thus the model was able to satisfactorily represent the study variables such as LAI, yield, latent heat and heat sensible fluxes and evapotranspiration in high concentrations of atmospheric CO₂, when compared to the results reported by experiments using FACE technology. They were also carried out simulations combining high CO₂ (513 and 801 ppm) and the projections generated by model Hadgem2ES (air temperature, precipitation, short wave, long wave and relative humidity), individually with each of them and with all the variables together using standard V_{max} values (45X10⁻⁶ mol (CO₂) .m⁻².s⁻¹) and adjusted V_{max}. Results in these simulations indicate the need to include an acclimatization function for the soybean crop in the Inland-Agro model code

Keywords: Climate change, Inland-Agro, *Glycine max*, modeling.

Sumário

1. Introdução	16
2. Revisão Bibliográfica	19
2.1. Mudanças Climáticas e Aquecimento Global	19
2.2. Prováveis impactos das mudanças climáticas na agricultura global e no Brasil	20
2.3. Modelagem de culturas agrícolas	21
2.4. Interações entre elevadas concentrações de CO ₂ e fatores abióticos sobre o crescimento das plantas e produtividade	22
2.4.1. Efeitos de concentrações elevadas de CO ₂ nas culturas	22
2.4.2. Interações de elevadas concentrações de CO ₂ , com temperatura e precipitação	23
2.5. Exigências Edafoclimáticas da soja	25
3. Objetivos:	26
3.1. Objetivo geral:	26
3.2. Objetivos específicos:	26
4. MATERIAL E MÉTODOS	27
4.1. Área de estudo	27
4.2. Validação do modelo (Adaptação do modelo).....	28
4.3. Descrição do Modelo	32
4.4. Cenários de mudança climática	36
4.5. Avaliação de Modelos Circulação Global	37
4.6. Estimacão de mudançãs na produtividade, fluxos de energia e balanço hídrico no ecossistema de soja na localidade em estudo.	37
5. Resultados e Discussão	40
5.1 Condições Meteorológicas	40
5.2. Validação do Modelo Inland-Agro	42
5.2.1. Balanço de Energia.....	42
5.2.2. Umidade no solo	48
5.2.3. Evapotranspiracão	49
5.2.4. NEE (Troca Líquida de CO ₂ pelo ecossistema)	50
5.3. Avaliação de Modelos Circulação Global	51
5.4. Estimacão de mudançãs na produtividade, fluxos de água e energia no ecossistema da cultura da soja na localidade em estudo.	54
5.4.1. Simulacão com o CO ₂ aumentando	54

5.4.2. Simulação com CO2 e temperatura aumentando	67
5.4.3. Simulação com CO2 aumentando e precipitação diminuindo.....	73
5.4.4. Simulação com CO2 e onda curta aumentando	75
5.4.5. Simulação com CO2 aumentando e umidade relativa diminuindo...	79
5.4.7. Simulação com todas as variáveis em estudo	83
6. Conclusão	89
7. Referências Bibliográficas	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Parâmetros físicos do solo	28
Tabela 02: The four Representative Concentration Pathways (RCPs).....	36
Tabela 03: Valores de Vmax utilizados por outros autores.....	39
Tabela 04: Precipitação e Temperatura média mensal (2001-2005)	40
Tabela 05: Erro médio dos modelos avaliados.....	53
Tabela 06: Variação do balanço de energia simulado (apenas CO₂ aumentando)	102
Tabela 07: Variação umidade no solo simulado (apenas CO₂ aumentando).....	102
Tabela 08: Variação Balanço Hídrico simulado (apenas CO₂ aumentando).....	102
Tabela 09: Variação Rendimento simulado (CO₂ aumentando e todas as variáveis variando).....	102
Tabela 10: Variação IAF simulado (CO₂ aumentando e todas as variáveis variando).....	102
Tabela 11: Variação do balanço de energia simulado (CO₂ e Temperatura aumentando).....	103
Tabela 12: Variação Balanço Hídrico (CO₂ e Temperatura aumentando).....	103

Tabela 13: Variação umidade no solo (CO₂ e temperatura aumentando).....	103
Tabela 14: Variação do balanço de energia simulado (CO₂ aumentando e precipitação diminuindo).....	103
Tabela 15: Variação Balanço Hídrico (CO₂ aumentando e precipitação diminuindo).....	103
Tabela 16: Variação do balanço de energia simulado (CO₂ e onda curta aumentando).....	104
Tabela 17: Balanço Hídrico (CO₂ e onda curta aumentando).....	104
Tabela 18: Variação do balanço de energia simulado (CO₂ e onda longa aumentando).....	104
Tabela 19: Variação Balanço Hídrico (CO₂ e onda longa aumentando)...	104
Tabela 20: Variação do balanço de energia simulado (CO₂ aumentando e umidade relativa diminuindo).....	104
Tabela 21: Variação Balanço Hídrico (CO₂ aumentando e umidade relativa diminuindo).....	105
Tabela 22: Variação do balanço de energia simulado (CO₂ aumentando e todas as variáveis variando).....	105
Tabela 23: Balanço Hídrico (CO₂ aumentando e todas as variáveis variando).....	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Área de estudo.....	28
Figura 02: IAF sem ajuste e com ajuste da Vmax.....	30
Figura 03. Esquema Modelo Agro-IBIS.....	35
Figura 04: Precipitação e temperatura média diária durante o ciclo da cultura de soja entre abril e agosto de 2003.....	41
Figura 05: Fluxos de calor sensível para os dias de permanência da cultura no campo (media horaria).....	42
Figura 06: Fluxos de calor latente para os dias de permanência da cultura no campo (media horaria).....	43
Figura 07: Fluxo de calor no solo par os dias de permanência da cultura no campo (média horaria).....	43
Figura 08: Saldo de radiação para os dias de permanência da cultura no campo (média horaria).....	44
Figura 09: Fluxos de calor sensível para os dias de permanência da cultura no campo (média diária).....	45
Figura 10: Fluxos de calor latente para os dias de permanência da cultura no campo (média diária).....	46
Figura 11: Saldo de radiação para os dias de permanência da cultura no campo (média diária).....	47
Figura 12: Conteúdo de água no solo observado e calculado para os dias de permanência da cultura no campo (média diária).....	48

Figura 13: Evapotranspiração para os dias de permanência da cultura no campo (média diária).....	49
Figura 14: NEE para o ciclo da cultura da soja (média diária).....	51
Figura 15: Temperatura média anual projetada pelos modelos em estudo (1961-2005).....	51
Figura 16: Precipitação anual projetada pelos modelos em estudo (1961-2005).....	52
Figura 17: Índice de área foliar para os dias de permanência da cultura no campo (média diária).....	54
Figura 18: Rendimento e índice de área foliar para os dias de permanência da cultura no campo (média diária).....	56
Figura 19: Fluxo de calor sensível (H) em CO₂ elevado.....	60
Figura 20: Fluxo de calor latente (LE) em CO₂ elevado.....	61
Figura 21: Variação no balanço de energia em CO₂ elevado.....	62
Figura 22: Evapotranspiração simulada para os dias de permanência da cultura no campo (média diária).....	63
Figura 23: Transpiração simulada para os dias de permanência da cultura no campo (média diária).....	65
Figura 24: Evaporação simulada para os dias de permanência da cultura no campo (média diária).....	66

Figura 25: Variação na evapotranspiração para os dias de permanência da cultura no campo em CO₂ elevado.....	67
Figura 26: Variações percentuais no rendimento e IAF em CO₂ elevado e temperatura aumentando.....	68
Figura 27: Variações percentuais no balanço de energia em CO₂ elevado e temperatura aumentando.....	70
Figura 28: Variações percentuais no balanço hídrico em CO₂ elevado e temperatura aumentando.....	71
Figura 29: Temperatura média mensal projetada pelo Hadgem2ES para as médias climatológicas.....	73
Figura 30: Precipitação média mensal projetada pelo Hadgem2ES para as médias climatológicas.....	74
Figura 31: Variações percentuais no rendimento e IAF em CO₂ elevado e onda curta aumentando.....	76
Figura 32: Variações no balanço de energia em CO₂ elevado e onda curta aumentando.....	77
Figura 33: Variações no balanço hídrico em CO₂ elevado e onda curta aumentando.....	78
Figura 34: Projeções de onda curta em CO₂ elevado.....	79
Figura 35: Variações no balanço hídrico em CO₂ elevado e umidade relativa diminuindo.....	80
Figura 36: Variações no balanço de energia em CO₂ elevado e umidade relativa diminuindo.....	81

Figura 37: Variações no rendimento e IAF em CO₂ elevado e umidade relativa diminuindo.....	82
Figura 38: Umidade relativa projetada pelo modelo Hadge2ES para o cenário RCP 8.5.....	83
Figura 39: Variações no rendimento e IAF em CO₂ elevado e com todas as variáveis em estudo.....	84
Figura 40: Variação no balanço de energia em CO₂ elevado e com todas as variáveis em estudo.....	86
Figura 41: Variação na evapotranspiração CO₂ elevado e com todas as variáveis em estudo.....	87

1. Introdução

A soja (*Glycine max* (L.) Merr.) é uma das *commodities* que apresenta maior destaque no mercado nacional e internacional, sendo o quarto grão mais consumido e produzido no mundo, perdendo apenas para o milho, trigo e arroz. No Brasil tem uma expressiva importância socioeconômica, geradora de riquezas, empregos e divisas, tornando-se assim um dos principais veículos de desenvolvimento e o principal produto da agricultura do País (Embrapa, 2014).

Nesta última década, a área plantada da soja no Brasil aumentou em torno de 38,79%, a produtividade 24,47% e a produção cerca de 72,77%, sendo que no Estado do Pará a produção na safra de 2013/2014 e 2014/2015 teve um incremento de 45,30% aproximadamente, resultado de um aumento da área plantada de 45,21%. O Pará foi o estado que mostrou maior crescimento em porcentagem no País (Conab, 2015).

A agricultura é uma atividade fortemente influenciada pelas condições meteorológicas e climáticas, podendo se esperar então que alterações climáticas impactem na produtividade nas culturas agrícolas ameaçando-as ou proporcionando oportunidades para melhoras (Gornall *et al.*, 2010).

Segundo o IPCC (2013), a concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera aumentou em 40% desde a era pré-industrial, devido primeiramente às emissões derivadas dos combustíveis fósseis e, em segundo lugar às emissões derivadas de mudanças no uso do solo. Este aumento de CO₂ na atmosfera gerou um forçamento radioativo positivo, dando lugar à absorção de energia pelo sistema climático e por consequência o aquecimento da atmosfera e a superfície da terra. É muito provável que o aumento da temperatura média global da superfície do planeta para finais do século (2081-2100) seja em torno de 1,4 a 4,8 °C para os cenários 6,0 e 8,5 das projeções de concentrações representativas (RCP) do Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), quando comparadas com as médias do final do século passado (1986-2005), com maiores impactos nos trópicos e subtropicais que nas latitudes médias (IPCC, 2013). Em resposta ao aquecimento terrestre se prevê também mudanças não uniformes no ciclo global da água, acentuando o contraste nas precipitações entre as regiões úmidas e secas e entre as estações úmidas e secas. Estima-se que os impactos das mudanças climáticas perdurarão por

muitos séculos, mesmo diminuindo as emissões de CO₂, o que supõe uma notável inexorabilidade das mudanças climáticas durante vários séculos, devido às emissões de CO₂ passadas, presentes e futuras (IPCC, 2013).

Incrementos na concentração de CO₂ atmosférico podem ser benéficos para o desenvolvimento das culturas agrícolas, uma vez que o CO₂ é o substrato primário para o processo fotossintético (Taiz e Zeiger, 2004). A concentração atual do CO₂ atmosférico não é suficiente para saturar a capacidade potencial da Rubisco (ribulose 1,5-bifosfato carboxilase), enzima responsável pela carboxilação primária em plantas C₃. Mas se o incremento da concentração de CO₂ for acompanhado de aumento da temperatura do ar, poderá haver encurtamento do ciclo de desenvolvimento e aumento da respiração do tecido vegetal, reduzindo ou anulando os efeitos benéficos do CO₂ (Taiz e Zeiger, 2004). No entanto, a resposta aos aumentos na concentração de CO₂ e temperatura do ar varia de acordo com a cultura considerada (Walter *et al.*, 2010). Além disto, muitas das grandes quedas na produtividade das culturas estão atribuídas a eventos de baixa precipitação (Kumar *et al.*, 2004) que podem também reduzir os efeitos positivos do incremento do CO₂ atmosférico.

Estudos de impacto nos agro-ecossistemas devido às mudanças climáticas são muito importantes para a produtividade agrícola, porém são também difíceis de serem executados em campo, em razão de limitações de equipamentos, mão de obra e recursos financeiros (Andresen *et al.*, 2001).

Uma das ferramentas que auxilia na quantificação e prognóstico do rendimento das culturas agrícolas é a modelagem, através dos modelos agronômicos, que após serem calibrados e validados permitem descrever as interações dos mecanismos físicos e fisiológicos que existem nos ecossistemas agrícolas e o quanto podem se modificar com a variabilidade e mudança dos elementos climáticos (Costa, 2008). Estes modelos são utilizados com a finalidade de compreender como as culturas respondem as variações ambientais, permitindo o estudo e entendimento dessas interações, estimando o desempenho da cultura em diferentes áreas e situações (Tojo Soler, 2004).

A expansão das culturas *commodities* tanto no mercado nacional e global segue vários caminhos de mudança de terras, que implicam desmatamento direto e indireto, resultando em vários impactos sociais e ambientais.

Neste contexto é de extrema relevância analisar como as mudanças climáticas poderão afetar a produtividade agrícola, com a finalidade de criar estratégias dentro dos planejamentos para enfrentar os impactos prováveis das mudanças climáticas.

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar e quantificar os possíveis efeitos provocados pelas mudanças climáticas sobre a cultura da soja, considerando as projeções dos cenários climáticos do IPCC AR5 para a região leste da Amazônia, e a aplicação de um modelo agrônômico denominado Inland-Agro.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Mudanças Climáticas e Aquecimento Global

Os avanços da ciência e as mudanças climáticas observadas fornecem um melhor entendimento da variabilidade do sistema climático terrestre e sua provável resposta às influências naturais e antrópicas (Moss *et al.*, 2010).

As concentrações dos gases de efeito estufa como o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) aumentaram na atmosfera terrestre a níveis sem precedentes. O CO₂ atmosférico aumentou 40% desde a era pré-industrial devido, em primeiro lugar, as emissões derivadas dos combustíveis fósseis e, em segundo lugar, a emissões derivadas de mudanças no uso e cobertura dos solos. O aquecimento no sistema climático é inequívoco, a atmosfera e o oceano estão mais quentes, os volumes de neve e gelo diminuíram e o nível do mar aumentou. É provável que a influência humana tenha sido a causa dominante do aquecimento observado desde meados do século XX (IPCC, 2013).

Adaptação e mitigação são estratégias complementares para reduzir e gerir os riscos da mudança climática. Reduções substanciais das emissões durante as próximas décadas podem reduzir os riscos climáticos no século XXI e após. Se não se realizarem esforços adicionais para reduzir as emissões dos gases de efeito estufa além dos já realizados atualmente, se prevê que persistirá o aumento das emissões impulsionadas pelo crescimento da população mundial e das atividades económicas e, mesmo com a adaptação, o aquecimento até o final do século XXI vai levar ao aumento de riscos de impactos graves, generalizados e irreversíveis a nível mundial (IPCC, 2013). Nos cenários de referência em que não se realiza uma mitigação adicional se experimentam aumentos na temperatura média global a superfície em 2100 de 3,7°C a 4,8°C em comparação com os níveis pré-industriais. Muitos aspectos das alterações climáticas e impactos associados continuarão por séculos, mesmo se as emissões antrópicas de gases de efeito estufa parar. A mudança climática é uma ameaça ao desenvolvimento sustentável. No entanto, há muitas oportunidades de vincular mitigação, adaptação e à busca de outros objetivos sociais através de respostas integradas (IPCC, 2013).

Países em desenvolvimento tornam-se mais vulneráveis às mudanças climáticas devido a estes terem menor capacidade tecnológica e financeira para responder à variabilidade climática. A economia do Brasil pode ser fortemente afetada pelos efeitos das mudanças climáticas devido a sua forte dependência da exploração de recursos naturais (Comissão Mista Especial Sobre Mudanças Climáticas, 2008).

2.2. Prováveis impactos das mudanças climáticas na agricultura global e no Brasil

A agricultura é uma atividade altamente influenciada pelas condições do tempo e do clima. Mudanças climáticas ameaçam potencialmente os sistemas de cultivo tradicionais, mas também proporcionam oportunidades para melhoras (Gornall *et al.*, 2010).

Muitos estudos que abarcam uma vasta gama de regiões e culturas mostram, que os impactos negativos das mudanças climáticas no rendimento das culturas, vêm sendo mais comuns que os impactos positivos. O menor número de estudos mostram impactos positivos principalmente em regiões de altas latitudes. O trigo e o milho foram as culturas mais afetadas, já o arroz e a soja foram menos prejudicadas em comparação com as outras culturas (IPCC, 2013).

Na Europa, durante o verão de 2003, as temperaturas foram até 6 °C acima da média de longo prazo e ocorreram déficits de precipitação de até 300mm. O rendimento das culturas e pastagens foram reduzidas em 20 - 36% nas regiões afetadas, levando a economia a perdas no setor da agricultura na União Europeia que foram estimadas em 36 bilhões de euros (IPCC, 2007).

Oliveira (2007), utilizando o cenário A2 do modelo HadCM3, sem avaliar o efeito do CO₂, projetou diminuição na produtividade potencial das culturas de milho e feijão em Minas Gerais para os anos de 2050 e 2080, quando comparada à produtividade potencial simulada para o ano base de 2000. Essa queda foi devida, principalmente, às temperaturas mais altas, que diminuem a assimilação de carbono pela cultura, decorrente do encurtamento das fases fenológicas e aumento da taxa de respiração de manutenção. Outro estudo, feito por Silva Júnior (2007), simulando a produtividade do milho para os anos de 2020, 2050

e 2080 e utilizando o modelo CERES-MAIZE para os cenários de mudanças climáticas A2 e B2, verificou uma queda na produtividade devido ao aumento de temperatura e uma redução no ciclo vegetativo, em ambos cenários, sendo mais significativo para o cenário A2.

O aumento das temperaturas em decorrência do aquecimento global pode provocar perdas nas safras de grãos de R\$ 7,4 bilhões já em 2020, número que pode subir para R\$ 14 bilhões em 2070 e alterar profundamente a geografia da produção agrícola no Brasil. Se nada for feito para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e adaptar as culturas para a nova situação, sendo que a soja deve ser a cultura mais afetada, com perdas que podem chegar a 40% em 2070, levando a um prejuízo de até R\$ 7,6 bilhões (Pinto e Assad, 2008).

2.3. Modelagem de culturas agrícolas

Modelos de culturas representam através de cálculos matemáticos os processos envolvidos na simulação da dinâmica do sistema solo-planta e sua interação com o clima e com as práticas culturais, podendo ser utilizados para prever o rendimento das culturas (Embrapa, 2009).

A prática da modelagem de crescimento de culturas já se encontra bastante desenvolvida para muitas culturas, porém é preciso que se realizem etapas de parametrização e validação dos modelos para diferentes regiões e cultivares antes de serem usados nas simulações (Pellegrino *et al.*, 2009).

Um modelo de crescimento da soja calibrado e validado é uma ferramenta essencial para avaliar o desenvolvimento desta cultura em resposta a possíveis mudanças climáticas futuras. O modelo Agro-IBIS é um desses modelos que tem sido utilizado para estudar os efeitos de cobertura do solo de mudança na hidrologia na superfície da terra (Twine *et al.*, 2004), exportação de nitrato (Donner e Kucharik, 2003), análises ambientais de uso da terra para os cenários de energia de biocombustíveis (Donner e Kucharik, 2008), entre outros. O Agro-IBIS tem sido avaliado na escala local (Kucharik e Brye, 2003) e na escala regional (Kucharik, 2003). Kucharik e Twine (2007) avaliaram o desempenho do modelo para a cultura da soja em condições norte-americanas. No Brasil foi avaliado para simular o balanço radiativo e fluxo de CO₂ na cultura da soja em Rio Grande do Sul (Webler *et al.*, 2010), balanço de energia em Cruz Alta – RS

e Santarém – PA (Webler *et al.*, 2010) e crescimento da cultura da cana-de-açúcar para estudos globais em São Paulo (Cuadra, 2010).

Experimentos com modelos de crescimento de culturas envolvendo processos fisiológicos são essenciais para compreender em parte a resposta dos ecossistemas às mudanças climáticas.

2.4. Interações entre elevadas concentrações de CO₂ e fatores abióticos sobre o crescimento das plantas e produtividade

O desenvolvimento das plantas, o crescimento, o rendimento e a produção de colheitas irão responder a aumentos na concentração de CO₂ atmosférico, temperatura elevada, alteração na precipitação e regimes de transpiração, aumento da frequência de temperaturas extremas e eventos de precipitação (IPCC, 2007).

2.4.1. Efeitos de concentrações elevadas de CO₂ nas culturas

Muitos estudos realizados ao longo das últimas décadas tais como os de Bernacchi *et al* (2005); Ainsworth e Long (2004) e Reddy *et al* (2010), confirmaram que a biomassa das plantas e o rendimento tendem a aumentar significativamente quando as concentrações de CO₂ aumentam acima dos níveis atuais. Métodos para avaliação desse efeito contam com o enriquecimento de CO₂ em câmaras de crescimento fechadas, em câmaras de topo aberto ou totalmente ao ar livre, como no sistema FACE (Free Air CO₂ Enrichment). Concentrações elevadas de CO₂ estimulam a fotossíntese, levando ao aumento da produtividade da planta, modificando por sua vez o ciclo da água e nutrientes (Kimball *et al.*, 2002; Nowak *et al.*, 2004). Experimentos em condições ideais mostraram que a duplicação da concentração atmosférica de CO₂ aumenta a fotossíntese da folha de 30% a 50% em espécies de plantas C3 e de 10% a 25% em espécies C4 (Ainsworth e Long, 2005).

Alguns trabalhos publicados mostram que o rendimento das culturas do tipo C3 e C4 aumentarão de 10 a 20% e de 0 a 10%, respectivamente, em concentrações de elevado CO₂ atmosférico de 550 ppm (Long *et al.*, 2004).

Simulações de crescimento e rendimento das plantas em resposta as elevadas concentrações de CO₂ utilizando modelos de simulação das principais culturas mostraram estar em conformidade com os dados experimentais, projetando aumento da produtividade de 5 a 20% em concentrações de 550 ppm de CO₂ (Tubiello *et al.*, 2006).

Fitofisiologistas e modeladores reconhecem que os efeitos das elevadas concentrações de CO₂, tal como medido em ambientes experimentais e, subsequentemente implementado em modelos, podem, não obstante superestimar as respostas no campo, por causa de muitos fatores limitantes, tais como pragas, ervas daninhas, nutrientes, competição por recursos hídricos, dos solos e da qualidade do ar etc (Tubiello *et al.*, 2006; Gifford, 2004; Tubiello e Ewert, 2002), que não são bem compreendidos em grande escala, nem bem implementados nos modelos.

2.4.2. Interações de elevadas concentrações de CO₂, com temperatura e precipitação.

A concentração do CO₂ atmosférico atual, se encontra abaixo do nível de saturação para a maioria das plantas. Níveis excessivos, próximos de 1.000 ppm, passam a causar fitotoxicidade (Pinto *et al.*, 2004). Incrementos na concentração do CO₂ atmosférico promovem maior produtividade biológica nas plantas, como demonstrado em vários trabalhos publicados. Entretanto, se o aumento da concentração de CO₂ for acompanhado de aumento da temperatura do ar, estes aumentos de produtividade poderão ser diminuídos ou anulados, principalmente em razão do encurtamento do ciclo de desenvolvimento da cultura e elevação da respiração (fotorrespiração e fase escura da respiração) do tecido vegetal (Taiz e Zeiger, 2004).

Alterações climáticas previstas para as próximas décadas irão modificar e, também poderão limitar os efeitos benéficos do aumento na concentração de CO₂ atmosférico nas culturas. Por exemplo, a temperatura elevada durante o período de floração de uma cultura pode diminuir os efeitos positivos do CO₂ sobre o rendimento, reduzindo o número de grãos, tamanho e qualidade (Baker, 2004).

A fotossíntese é muito sensível às variações de temperatura, afetando todas as reações bioquímicas, sendo mais acentuada em concentrações elevadas de CO₂ atmosférico, quando existe um amplo suprimento de CO₂ nos sítios de carboxilação e a taxa de fotossíntese é limitada pelas reações bioquímicas envolvidas com o transporte de elétrons e pelo decréscimo na afinidade da rubisco para CO₂, tendo grandes efeitos sobre as taxas de fixação de CO₂ nas plantas. Devido ao papel da fotorrespiração, o rendimento quântico é profundamente dependente da temperatura em plantas C3 (Taiz e Zeiger, 2004).

A disponibilidade de água é outro fator que desempenha um papel crucial no crescimento das plantas, que depende significativamente da precipitação na região. Modelos de circulação geral projetam mudanças na precipitação, muitas vezes, moldando a direção e a magnitude dos impactos globais (Reilly *et al.*, 2003). Em geral, as alterações nas taxas de precipitação e evapotranspiração, modificam a produtividade e as funções do ecossistema. Em áreas de baixa disponibilidade hídrica e concentrações de CO₂ atmosférico elevado, a eficiência no uso da água pelas plantas é maior, devido ao fechamento estomático e as maiores densidades radiculares, podendo, em alguns casos, aliviar ou mesmo contrabalançar as pressões de seca (Morgan *et al.*, 2004). Embora esta dinâmica seja razoavelmente bem compreendida no nível de uma única planta, implicações em nível de grande escala para ecossistemas inteiros não são bem compreendidos.

Estudos feitos por Benacchi *et al.* (2007) usando tecnologia FACE (Free Air Concentration Enrichment) em cultura de soja, com elevação de CO₂ do ambiente atual (~385 ppm) para 550 ppm, reportaram que o CO₂ elevado causou diminuição da evapotranspiração entre 9 e 16% dependendo do ano, resultando na diminuição do transporte do vapor de água para a atmosfera. Isto implica que o efeito na transpiração das plantas, ocasionado pelo aumento na concentração de CO₂ atmosférico, pode ter um grande impacto no clima regional a depender da extensão das áreas produtoras.

Gray *et al.* (2010) também utilizando tecnologia FACE em cultura de soja com tratamentos de CO₂ com concentrações ambientais atuais (~385 ppm), e CO₂ aumentado para 585 ppm e combinações com baixo e alto conteúdo de água no solo, acharam que o tratamento com baixa umidade diminuiu a fotossíntese (em cerca de 11%) tanto na condição de CO₂ atual como no

experimento com CO₂ elevado. O tratamento com baixo conteúdo de água no solo também causou grande diminuição de condutância estomática em plantas com elevado CO₂ (em cerca de 22%) comparado com as plantas sob tratamento de CO₂ atual (cerca de 9%). Conseqüentemente o baixo teor de umidade no solo causou uma diminuição significativa da relação da concentração interna/externa de CO₂ (C_i/C_a) em condição de elevado CO₂ (7%) e uma pequena (mas não significativa) diminuição em condição atual de CO₂ (cerca de 2%), sugerindo que o baixo conteúdo de água no solo ocasiona grande limitação estomática para a fotossíntese com CO₂ elevado. Plantas sob elevado nível de CO₂ também mostraram grande incremento no comprimento radicular em múltiplas profundidades em resposta ao menor conteúdo de água no solo.

2.5. Exigências Edafoclimáticas da soja

A soja é uma planta de dias curtos e sua resposta ao fotoperíodo depende do tipo de cultivar e da temperatura, adaptando-se melhor a temperaturas do ar entre 20°C e 30°C, com uma temperatura ideal para seu crescimento e desenvolvimento em torno de 30 °C (Embrapa, 2008). A temperatura do solo adequada para semeadura varia de 20°C a 30°C, sendo 25°C a temperatura ideal para uma emergência rápida e uniforme. Temperaturas abaixo de 10°C e acima de 40°C têm efeitos prejudiciais no desenvolvimento vegetativo e reprodutivo da planta (Embrapa, 2008).

A soja se adapta bem a uma ampla gama de solos, com exceção a solos arenosos de drenagem rápida, sendo os Latossolos e Podzólicos os mais utilizados para o cultivo desta espécie. A disponibilidade de água nos diferentes estádios de desenvolvimento da soja é muito importante, a qual constitui aproximadamente 90% do peso da planta, e atua praticamente em todos os processos fisiológicos e bioquímicos. Déficits hídricos expressivos provocam alterações fisiológicas na planta, como o fechamento estomático. A quantidade de água requerida para obtenção do máximo rendimento, varia entre 450 a 800mm/ciclo, dependendo das condições climáticas, do manejo da cultura e da duração do ciclo (Embrapa, 2008).

3. Objetivos:

3.1. Objetivo geral:

Avaliar e quantificar os possíveis efeitos provocados pelas mudanças climáticas globais sobre a cultura da soja no município de Santarém no estado de Pará, simulados pelo modelo Inland-Agro considerando as projeções de cenários do IPCC AR5.

3.2. Objetivos específicos:

Ajustar e validar um modelo matemático de crescimento e produtividade da soja nas condições ambientais locais, o qual incorpore o processo de assimilação de carbono em razão do uso eficiente de radiação solar e seja capaz de responder as mudanças climáticas futuras.

Avaliar e quantificar o impacto na produção agrícola na cultura da soja devido às mudanças climáticas futuras.

Estimar o balanço de água e energia atual e com os cenários a serem estudados no ecossistema da soja.

4. MATERIAL E MÉTODOS

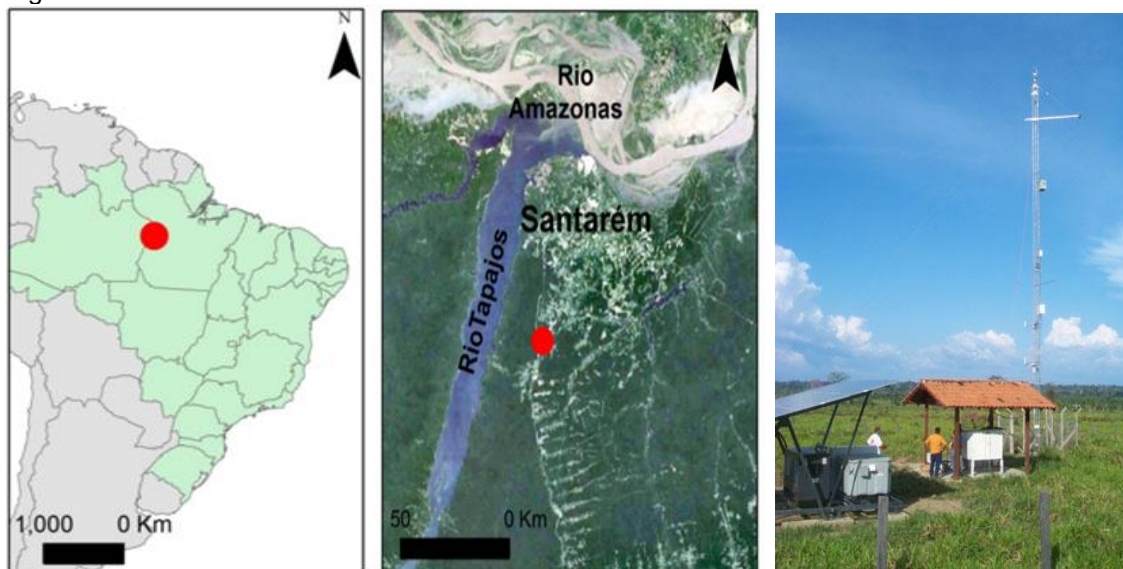
4.1. Área de estudo

O presente trabalho foi desenvolvido para as condições ambientais na região de Santarém no Estado do Pará, que apresenta clima tropical úmido, do tipo Am, segundo a classificação de Köppen, com temperatura média anual máxima de 31,2 °C, média de 26,0 °C e mínima de 22,6 °C, umidade relativa média do ar de 84%. A precipitação pluvial média anual é de 2.090 mm, com maior intensidade de dezembro a julho, sendo março o mês de maior precipitação (Bastos, 1972).

Dados de monitoramento de variáveis meteorológicas e concentração de dióxido de carbono do projeto LBA-ECO, que foram registrados desde o ano 2001 até o ano 2005, através de uma torre de 20 m instalada em um campo agrícola no sitio Km 77 (3°02'S, 54°42'O) na BR 163, foram utilizados neste trabalho. A torre foi implementada por um sistema Eddy covariance (EC) a 8,75 m, composto por um anemômetro sônico 3D (SATI/3K) e um analisador de gás infravermelho (IRGA, Licor 6262) para efetuar as medidas de CO₂, anemômetros sônicos 2D (CATI/2) a 3, 5,7 e 12,2 m, para medir componentes do vento, sensores de temperatura e umidade (CS500) a 2,2 4,1 e 6,1 m, um piranômetro (CM11/14) a 17,8 m, para medir radiação solar incidente e refletida, sensores quânticos (Licor LI-190) para medir radiação fotossinteticamente ativa, um radiômetro CNR1 para medir radiação de onda longa, a temperatura do solo (Campbell Inc 108) foi medido em 0,1, 0,244, 0,5 e 2,0 m de profundidade, o fluxo de calor no solo e umidade do solo foi medido a 0,3 m de profundidade (Campbell Inc HFT3 e CS615, respectivamente). Os dados coletados foram registrados em uma frequência de 30 minutos (Fitzjarrald e Sakai, 2010).

Na figura 01 observa-se área de estudo localizada no Km 77 da BR 163 – Santarém – PA.

Figura 01: Área de estudo



Fonte: Google Maps, 2015 e Fitzjarrald e Sakai, 2010

4.2. Ajuste do modelo

Ajustes foram realizados nos parâmetros físicos do solo, desde os valores padrões do modelo Inland-Agro tais como: textura (fração de areia, silte e argila), porosidade (poro), capacidade de campo (CC), ponto de murcha (PMP), condutividade hidráulica saturada (CHS) e expoente da curva de retenção (b), com a finalidade de representar melhor o conteúdo de água no solo. Os valores desses parâmetros são descritos na Tabela 01.

Parâmetros	Valores Padrão do modelo	Valores Utilizados pelo Inland-Agro
Areia (%)	30	30
Silte (%)	10	10
Argila (%)	60	60
Porosidade	0,34	0,40
Capacidade de campo	0,3	0,396
Ponto de Murcha Permanente	0,272	0,222
Expoente da curva de retenção	7,6	5,5
Condutividade Hidraulica Saturada (m/s)	1.6667×10^{-7}	$9,6667 \times 10^{-7}$

Tabela 01: Parâmetros físicos do solo

O índice de área foliar (IAF) variável biofísica que influencia diretamente nos fluxos de energia, água e carbono (Webler *et al.*, 2012), que é a razão entre a área foliar do dossel e a área do terreno ocupada pela cultura, expresso em m²/m² (Favarin *et al.*, 2002), também precisou ser ajustada para representar melhor a sua influência no desenvolvimento da cultura agrícola e sua resposta à demanda atmosférica. É calculada a partir de uma constante (*specla*), que determina a área foliar específica da cultura e se refere à área de folha por quilograma de carbono, multiplicada pela quantidade de carbono alocada por unidade de área da folha.

O Inland-Agro por ser um modelo adaptado do Agro-Ibis, mostra as mesmas dificuldades para representar eficientemente a fase de senescência da cultura da soja, a mesma já foi citada por alguns autores tais como Kucharik e Twine (2007), os quais também sugeriram melhorar a sua representação. O modelo apresenta valores elevados para o IAF na fase de senescência o que pode comprometer os resultados nas simulações, como pode ser observado na figura 01. O IAF na fase de senescência calculado pelo modelo é o resultado da razão entre a diferença diária dos graus dias crescentes na fase de senescência (*gddplant*) e o (*hui**grain*) pelo (*gddmaturity*), representado pela seguinte equação:

$$IAF_j = IAF_{j-1} \times \left(1 - \left(\frac{gdd_{plant} - hui_{grain}}{0.55 gdd_{plant}} \right)^{x_{laicons}} \right)$$

Com o objetivo de melhorar a representação do IAF incorporamos o ajuste da função de senescência recomendada por Moreira (2012), representada por um decréscimo exponencial dinâmico que depende da função senescente, conforme a seguinte equação:

$$IAF_j = IAF_{j-1} \times \left(\left(1 - \frac{gdd_{plant} - hui_{grain}}{0.55 gdd_{maturity}} \right)^{\alpha \left(\frac{gdd_{plant} hui_{grain}}{gdd_{maturity}} \right)} \right)$$

A figura 02 apresenta a comparação do IAF obtido pelo Inland-Agro na simulação com a expressão sem ajuste e com a expressão com ajuste na função de senescência foliar.

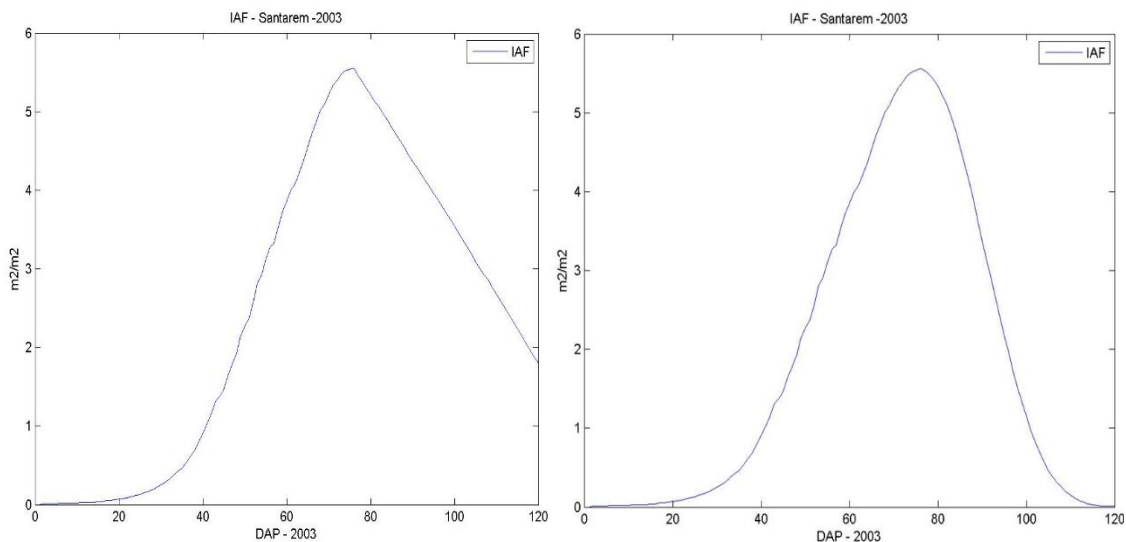


Figura 02: IAF sem ajuste e com ajuste na função de senescência

4.2. Validação do modelo

Para validar o modelo de crescimento e produtividade Inland-Agro na cultura de soja na região de Santarém, utilizamos os dados coletados da torre meteorológica, localizada no Km 77 da BR 163, do projeto LBA-ECO em uma área de cultivo com rotação de culturas (pastagem, arroz e soja) nos períodos de 2001 a 2005 e os ajustes descritos no item anterior.

Os dados utilizados para forçar o modelo foram: Radiação solar incidente (Sin), Radiação de onda longa incidente (Lin), Temperatura do ar (Ta), Umidade relativa do ar (Ur), Velocidade do vento (Ua) e Precipitação (P) para o ano 2003, medidos durante o desenvolvimento do cultivo de soja de abril a agosto.

A qualidade dos resultados das simulações após os ajustes terem sido implementados foram aferidos utilizando o parâmetro raiz quadrada do erro médio (RMSE) e, o coeficiente de correlação entre os dados simulados e observados, considerando os fluxos de calor latente e sensível, assim como o conteúdo de água no solo, representados pelas seguintes equações:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S - O)^2}$$

$$\alpha = \frac{N \sum O.S - (\sum O)(\sum S)}{N \sum O^2 - (\sum O)^2}$$

Onde N é o ponto de números de amostras, S é o valor simulado e O é o valor observado.

4.3. Descrição do Modelo

O modelo usado neste estudo foi o Inland-Agro, que é uma adaptação do modelo Agro-Ibis, desenvolvido a partir do modelo de superfície IBIS (*Integrated Biosphere Simulator*) (Foley *et al.*, 1996; Kucharik *et al.*, 2000), estruturado para simular o crescimento e produtividade de algumas culturas agrícolas tais como milho, trigo, soja e cana-de-açúcar (Donner e Kucharik, 2003; Cuadra, 2010).

Este modelo inclui em uma única estrutura integrada representações de processos de ecossistemas naturais, resolvendo um conjunto de equações para simular o balanço de energia, água e quantidade de movimento (momentum) entre o solo, a vegetação e a atmosfera, fisiologia do dossel (fotossíntese e condutância estomática), balanço do carbono terrestre (produtividade primária líquida, respiração do solo, decomposição de matéria orgânica), fenologia das culturas (emergência e crescimento foliar, preenchimento de grãos e senescência) (Foley *et al.*, 1996; Kucharik *et al.*, 2000). As equações físicas operam ao longo de um intervalo de tempo de uma hora. Outros processos, como alocação de carbono e fenologia operam em escala diária a anual.

O balanço de radiação solar a superfície é resolvido usando a aproximação “two-stream” para cada tipo de planta funcional (PFT), individualmente, considerando a radiação direta e difusa em duas bandas (visível e infravermelho próximo).

Os processos hidrológicos simulados dentro do modelo incluem interceptação e retenção da precipitação pelo dossel, escoamento superficial, infiltração do fluxo de água entre as camadas do solo, percolação profunda, evaporação à superfície do solo e da água interceptada pelo dossel e a transpiração do dossel.

A textura do solo e teor de matéria orgânica em cada camada, e as diferenças entre as camadas, influencia o fluxo de água unidimensional. A transpiração do dossel é acoplada à fotossíntese através da abertura estomática.

O ciclo do carbono depende das condições da atmosfera, do dossel e do solo, simulando os ecossistemas através da produção primária líquida (NPP), respiração heterotrófica, e decomposição da matéria orgânica. A fisiologia do dossel é caracterizada no modelo da seguinte forma: a fotossíntese e a

condutância estomática são calculadas usando as equações Farquhar-Ball-Collatz (Ball *et al*, 1987; Collatz *et al*, 1992; Farquhar *et al*, 1980).

A taxa de fotossíntese bruta (A_g) é uma função da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR), eficiência intrínseca quântica, concentração de CO_2 intercelular (que depende da concentração atmosférica de CO_2 , regulação estomática e condutância da camada limitrofe da folha), capacidade máxima da enzima Rubisco (V_{max}) e a temperatura da folha.

A respiração de manutenção da folha depende da V_{max} e da temperatura da folha, e a manutenção da respiração da raiz e do caule são funções do total de carbono nos órgãos e suas respectivas temperaturas.

As condições meteorológicas (climáticas) afetam a fotossíntese através da luz (radiação incidente de superfície), temperatura (por exemplo, carboxilação da Rubisco), pressão de vapor d'água (por exemplo, a condutância estomática), velocidade do vento (fluxos turbulentos de calor sensível, vapor d'água e CO_2) e precipitação (condições de umidade do solo) (Kucharik *et al.*, 2000).

A assimilação líquida de CO_2 (A_n) é representada por:

$$A_n = A_g - R_d \quad (1)$$

$$A_g = \min (J_e, J_c)$$

Onde A_g é a fotossíntese bruta, R_d é a respiração de manutenção, J_e é a taxa de assimilação de CO_2 limitada pela luz e J_c é a taxa de assimilação de CO_2 limitada pela Rubisco.

O fluxo líquido de CO_2 , ou troca líquida do ecossistema, é a diferença entre a captura de CO_2 durante a fotossíntese pela folha e a emissão de CO_2 pela respiração do ecossistema, portanto, a NEE é calculada pela seguinte fórmula:

$$NEE = Reco - A_g$$

Onde Reco é a respiração heterotrófica e autotrófica e A_g é a fotossíntese bruta.

A NPP representa o carbono novo armazenado como biomassa nos galhos, folhas e raízes das plantas. Ela é a diferença entre o carbono assimilado durante a fotossíntese e o consumo de carbono através da respiração das plantas. É uma medida quantitativa de crescimento da planta e de sequestro de carbono. A NPP é calculada pela fórmula:

$$NPP=(1-\eta)\int(Ag - R_{leaf} - R_{stem} - R_{root})dt$$

Onde Ag é a fotossíntese bruta do dossel, os Rs são as respirações de manutenção da folha, troncos e raízes, e η a fração de carbono perdido devido a respiração de crescimento.

Os estágios de desenvolvimento da planta são determinados pela variável graus-dia de desenvolvimento (GDD), de acordo com a equação:

$$GDD=\Sigma(T_{media} - T_{base})$$

Onde GDD são os graus-dia acumulados, T_{media} é a temperatura média diária e T_{base} é a temperatura de base, que é de 10 °C, temperatura mínima para o desenvolvimento da soja (Kucharik et al., 2000).

Os fluxos de calor sensível (H) e latente (LE) da superfície para a atmosfera são calculados pelas seguintes equações:

$$H = -\rho_{atm} C_p \frac{(\theta_{atm} - \theta_s)}{r_{ah}}$$

$$LE = -\rho_{atm} \frac{(q_{atm} - q_s)}{r_{aw}}$$

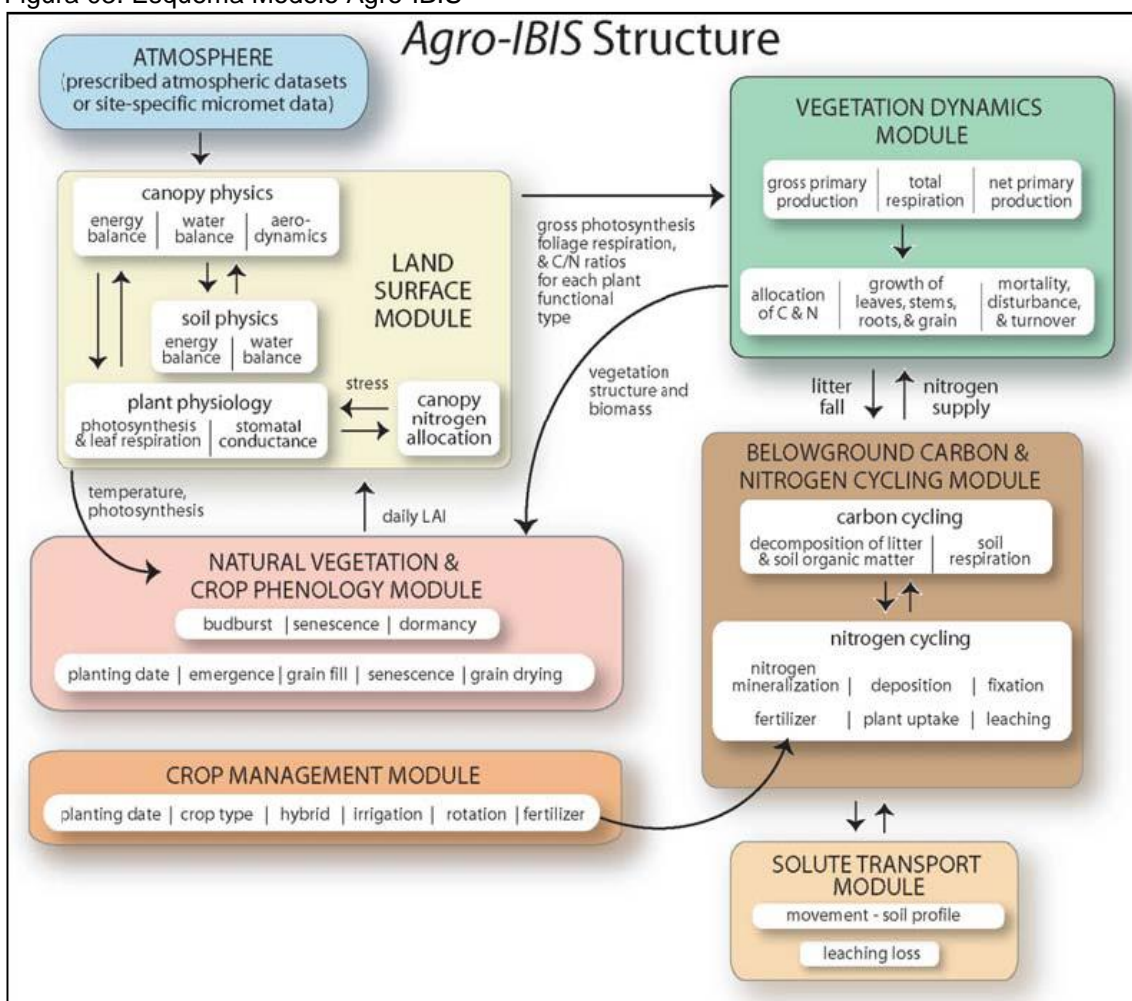
Onde ρ_{atm} é a densidade do ar úmido; C_p é a capacidade térmica do ar, θ_{atm} é a temperatura potencial da atmosfera, θ_s é a temperatura potencial da superfície, q_{atm} é a umidade específica da atmosfera, q_s é a umidade específica da superfície, r_{ah} é a resistência aerodinâmica para o calor e r_{aw} é a resistência aerodinâmica para o vapor d'água.

O índice de área foliar é a razão entre a soma das áreas da superfície de um lado de todas as folhas da vegetação e a área da superfície do solo na qual a vegetação cresce, representado pelo modelo com a seguinte fórmula:

$$IAF = \sum_{j=1}^n cbiol_j \cdot specal$$

Onde n é o número de tipos funcionais de plantas representadas no modelo, $specal$ é a área foliar específica e $cbiol$ é o carbono no reservatório de biomassa de folha.

Figura 03. Esquema Modelo Agro-IBIS



Fonte: Kucharik and Brye, 2003.

4.4. Cenários de mudança climática

Neste estudo utilizamos os cenários RCP 8.5 das projeções climáticas do quinto relatório do IPCC AR5, e cujas características são mostradas na Tabela 02.

Tabela 02: The four Representative Concentration Pathways (RCPs)

Cenário	Forçante Radiativa	Concentração	Caminho
RCP 8.5	> 8.5 W/m ² em 2100	> 1370 CO ₂ – eq. Em 2100	Aumentando
RCP 6.0	~ 6 W/m ² , estabilizando após 2100	~ 850 CO ₂ – eq. (estabilizando após 2100)	Estabilizando sem ultrapassar
RCP 4.5	~ 4.5 W/m ² , estabilizando após 2100gukl	~ 650 CO ₂ – eq. (estabilizando após 2100)	Estabilizando sem ultrapassar
RCP 2.6	Pico em ~ 3W/m ² antes de 2100 e declinando	Pico ~ 490 CO ₂ – eq. Antes de 2100 e declinando	Pico e declínio

Fonte: Moss *et al.*, 2010

As emissões antrópicas de gases de efeito estufa são afetadas principalmente pelo tamanho da população, atividade econômica, estilo de vida, utilização de energia, padrões de uso da terra, tecnologias e políticas climáticas. Os Caminhos de Concentração Representativos (RCPs), que são utilizados para fazer projeções com base nesses fatores, descrevem quatro diferentes vias de emissões de gases de efeito estufa e concentrações atmosféricas, emissões de poluentes atmosféricos e do uso do solo no século XXI (IPCC, 2013).

Os RCPs incluem um cenário de rigorosa mitigação (RCP 2.6), com pico na concentração de CO₂ equivalente de 490 ppm para antes de 2100 e declinando, dois cenários intermediários (RCP 4.5 e RCP 6.0), com picos de 650 e 850 ppm nas concentrações atmosféricas de CO₂ equivalente respectivamente e estabilizando e, um cenário com as emissões de gases de efeito estufa muito altas (RCP 8.5), com concentrações maiores a 1370 ppm e aumentando. Cenários sem esforços adicionais para limitar emissões conduzem a caminhos que variam entre RCP 6.0 e RCP 8.5. RCP 2.6 representa um

cenário que tem por objetivo manter o aquecimento global abaixo do provável 2°C acima das temperaturas pré-industriais (IPCC, 2013).

4.5. Avaliação de Modelos Circulação Global

Resultados das simulações do clima do século XX juntamente com as projeções climáticas futuras para a região de estudo foram analisadas em termos dos dados das medias mensais de precipitação e temperatura do ar obtidos a partir dos modelos GISS-E2-R, Hadgem2ES, MIROC5, MRI-CGCM3, NorESM1-M, CCSM4, GFDL-ESM2M e IPSL-CM5A-LR. Os resultados para o período de 1961 a 2005 foram comparadas como os dados observados de precipitação e temperatura do ar do Climatic Research Unit (CRU) com a finalidade de avaliar a habilidade desses modelos em representar as características climatológicas na área de estudo.

4.6. Estimação de mudanças na produtividade, fluxos de energia e balanço hídrico no ecossistema de soja na localidade em estudo.

Os prováveis impactos no desenvolvimento da cultura da soja foram estimados utilizando o modelo Inland-Agro descrito no item 4,3. Os dados observados que serviram para ajustar o modelo, foram modificados para representar as tendências mensais climatológicas (2031-2060 e 2071-2100) das projeções geradas pelo modelo Hadgem2ES do Hadley Centre com uma resolução horizontal de 1,25 graus de latitude por 1,875 graus de longitude, que simula um forte impacto na redução de chuvas e aumentos na temperatura da região leste da Amazônia, nas simulações do CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Phase 5), para o cenário RCP 8,5 de emissão de gases de efeito estufa durante o século XXI. As variáveis de entrada modificadas foram radiação solar incidente, radiação de onda longa incidente a superfície, precipitação, temperatura e umidade relativa do ar. Os dados das medias mensais do modelo Hadgem2ES para os anos de 2031 até 2060 e 2071 até 2100 foram obtidas do Real Instituto Meteorológico Holandês (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut - KNMI) no link http://climexp.knmi.nl/selectfield_cmip5.cgi?id=someone@somewhere.

O Inland-Agro inicialmente foi rodado com os dados observados de temperatura, precipitação, radiação solar incidente, onda longa incidente, umidade relativa e velocidade do vento do ano 2003, em concentrações atmosféricas de CO₂ atual, de 513ppm e 801ppm respectivamente, com a finalidade de avaliar as respostas do ecossistema da soja em concentrações atmosféricas de CO₂ elevado. Posteriormente o modelo foi rodado utilizando os mesmos parâmetros descritos acima, substituindo para cada rodada as variáveis modificadas descritas no parágrafo anterior, de forma independente para cada variável, com a finalidade de determinar o grau de influência de cada variável em resposta aos aumentos na concentração de CO₂ atmosférico. Também o modelo foi rodado incluindo todas as variáveis modificadas, com o intuito de avaliar a influência em conjunto das mesmas, em resposta ao aumento na concentração de CO₂ atmosférico.

A projeção da concentração de CO₂ atmosférico para a média climatológica 2031-2060 e 2071-2100 foi de 513ppm e 801ppm respectivamente, projeção do ano central das respectivas médias climatológicas.

Com o objetivo de realizar simulações mais realistas, dos prováveis impactos às mudanças climáticas, ajustamos a variável V_{max} (velocidade máxima da enzima rubisco), baseando-nos em resultados obtidos em alguns experimentos com a metodologia FACE (enriquecimento de CO₂ ao ar livre). Para rodar o modelo com o CO₂ elevado de 513ppm e 801ppm utilizamos os valores de V_{max} de 20 e 13X10⁻⁶ mol(CO₂).m⁻².s⁻¹ respectivamente, desde um valor padrão de 45x10⁻⁶ mol(CO₂).m⁻².s⁻¹ em concentrações de CO₂ atmosférico atual. Desta forma tentamos realizar um ajuste que represente um grau de aclimação da rubisco aos efeitos do CO₂ elevado. Também foram realizadas simulações utilizando o valor padrão da V_{max} para analisar as comparações entre as rodadas.

Na tabela 03 mostram-se valores de V_{max} utilizados por outros autores nas simulações de validação dos modelos utilizados e respectivos ecossistemas.

Autores	Valor Vmax (mol(CO ₂).m ⁻² .s ⁻¹)	Modelo	Ecossistema	CO ₂ Atmosf.
Kucharik e Brye (2003)	65x10 ⁻⁶	Agro-Ibis	Soja	375ppm
Bernacchi <i>et al</i> (2005)	40,53x10 ⁻⁶	Agro-Ibis	Soja	375ppm
Bernacchi <i>et al</i> (2005)	37,4x10 ⁻⁶	Agro-Ibis	Soja	550ppm
Kucharik e Brye (2003)	70x10 ⁻⁶	Agro-Ibis	Milho	375ppm
Markelz <i>et al</i> (2011)	34,14x10 ⁻⁶	Agro-Ibis	Milho	375ppm
Markelz <i>et al</i> (2011)	34,14x10 ⁻⁶	Agro-Ibis	Milho	550ppm
Santos e Costa (2003)	75x10 ⁻⁶	Site	Floresta	-
Imbuzeiro (2005)	70x10 ⁻⁶	Ibis	Floresta	-

Tabela 03: Valores de Vmax utilizados por outros autores

5. Resultados e Discussão

5.1 Condições Meteorológicas

A tabela 04 apresenta os dados de precipitação média climática mensal dos anos 2001-2005 e da precipitação média mensal no período do ciclo da soja 2003 em Santarém-PA. A precipitação média acumulada para os meses de abril a agosto foi de 657,54mm, sendo que para o ciclo da cultura da soja em 2003 o acumulado foi de 785,62mm, 128,08mm acima da média climática (2001-2005). Os três primeiros meses do plantio foram os que apresentaram maior precipitação. A temperatura média mensal não apresentou variações significativas durante o ciclo da cultura.

Tabela 04: Precipitação e Temperatura média mensal (2001-2005)

Mês	Média climatológica 2001-2005 (mm/mês)	Precipitação no ciclo 2003 (mm/mês)	Temperatura (°C)
Abril	292,65	296,98	25,65
Maio	152,44	160,50	25,91
Junio	136,50	162,74	25,56
Julio	47,32	72,60	25,85
Agosto	28,63	92,80	26,66
Total	657,54	785,62	

Na figura 04 mostra a variação da precipitação e temperatura em valores médios diários.

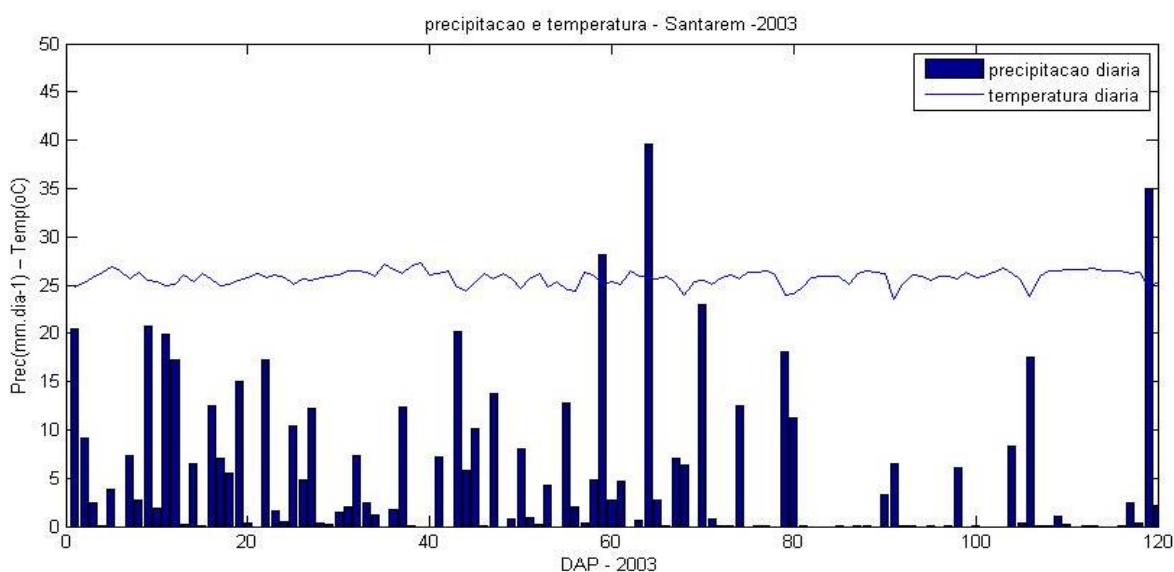


Figura 04: Precipitação e temperatura média diária durante o ciclo da cultura de soja entre abril e agosto de 2003.

Observa-se que durante os primeiros 80 dias houve maior concentração da precipitação durante o ciclo da cultura, após este período a precipitação teve uma forte redução tanto na frequência como na quantidade.

Os dados de temperatura mostram menor variação com valor médio em torno de 25 °C, mas com pequenas variações acompanhando os eventos de precipitação. No período final de cultivo (após os 80 DAP) houve uma menor ocorrência de eventos de chuva que favoreceu condições menos úmidas na fase de senescência da cultura de soja.

5.2. Validação do Modelo Inland-Agro

5.2.1. Balanço de Energia

Na figura 05 apresenta-se o ciclo diário médio do fluxo de calor sensível observado e calculado durante o ciclo da soja no ano 2003.

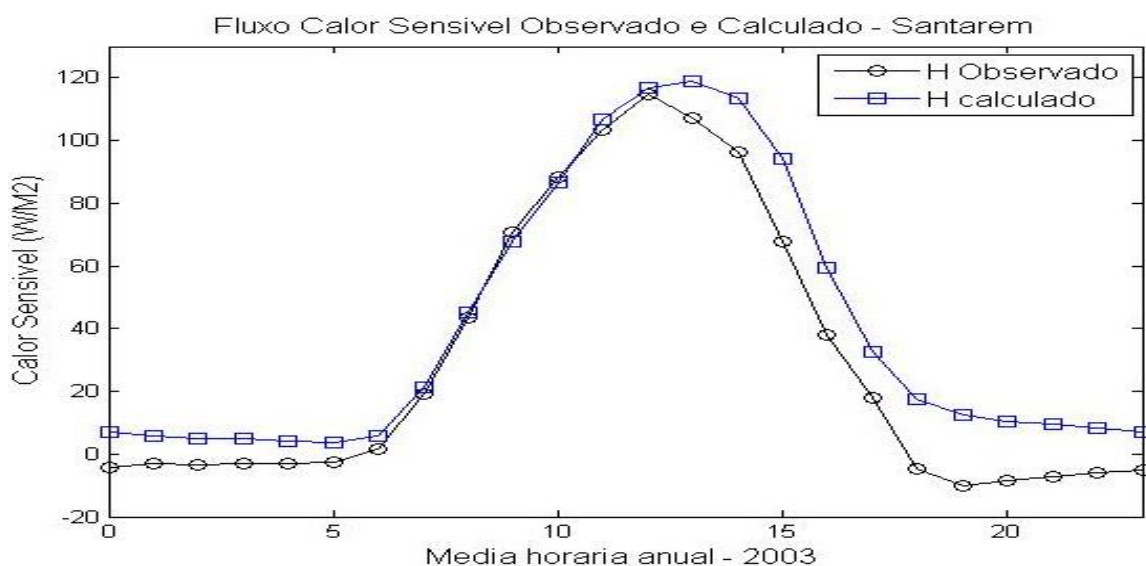


Figura 05: Fluxos de calor sensível para os dias de permanência da cultura no campo (média horaria).

O modelo projeta um ciclo diário do fluxo de calor sensível mais prolongado após as 12 horas, permanecendo até o final do dia, com relação ao fluxo de calor sensível observado (Fig. 05) Isto provavelmente é reflexo da dificuldade que o modelo apresentou em estimar o fluxo de calor no solo.

O fluxo de calor sensível apresentou forte grau de associação entre os dados observados e calculados com valores de 0,98 e 0,97 para os coeficientes de correlação (r) e determinação (r^2) respectivamente, ao longo do período de cultivo. A raiz do erro médio quadrático (RMSE) foi de 13,32 W.m².

Na figura 06 apresenta-se o ciclo diário médio do fluxo de calor latente observado e calculado durante o período de cultivo da soja no ano 2003.

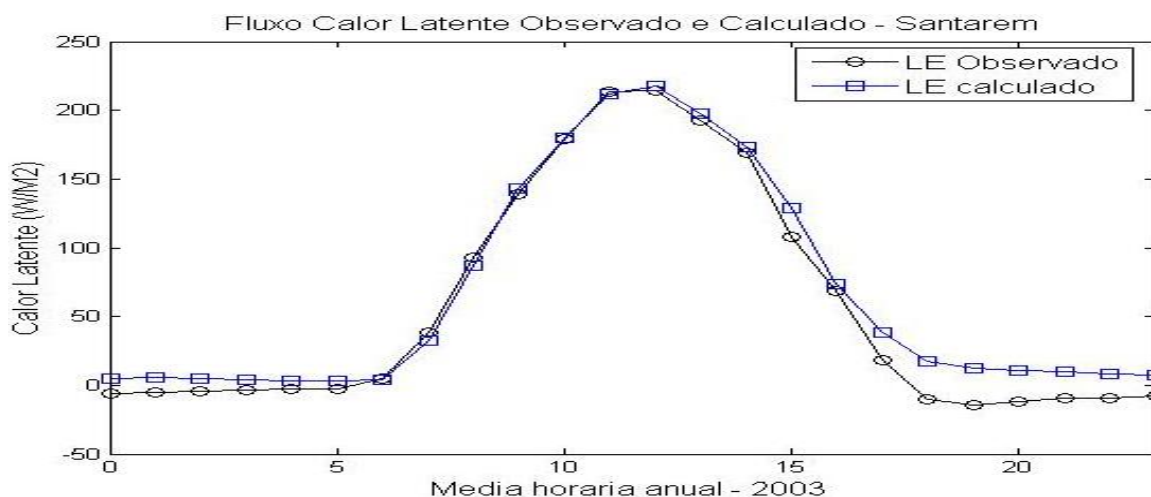


Figura 06: Fluxos de calor latente para os dias de permanência da cultura no campo (média horária).

O modelo superestima o fluxo de calor latente apenas para os horários durante a noite, provavelmente devido à dificuldade que o modelo apresenta para estimar o fluxo de calor no solo.

O LE apresentou coeficiente de correlação de 0,99 e coeficiente de determinação de 0,98, mostrando assim forte associação entre os dados calculados e observados para esta variável. A raiz do erro médio quadrático (RMSE) foi de 13,52 W.m².

Na figura 07 apresenta-se o ciclo diário médio do fluxo de calor no solo observado e calculado durante o período de cultivo da soja no ano 2003.

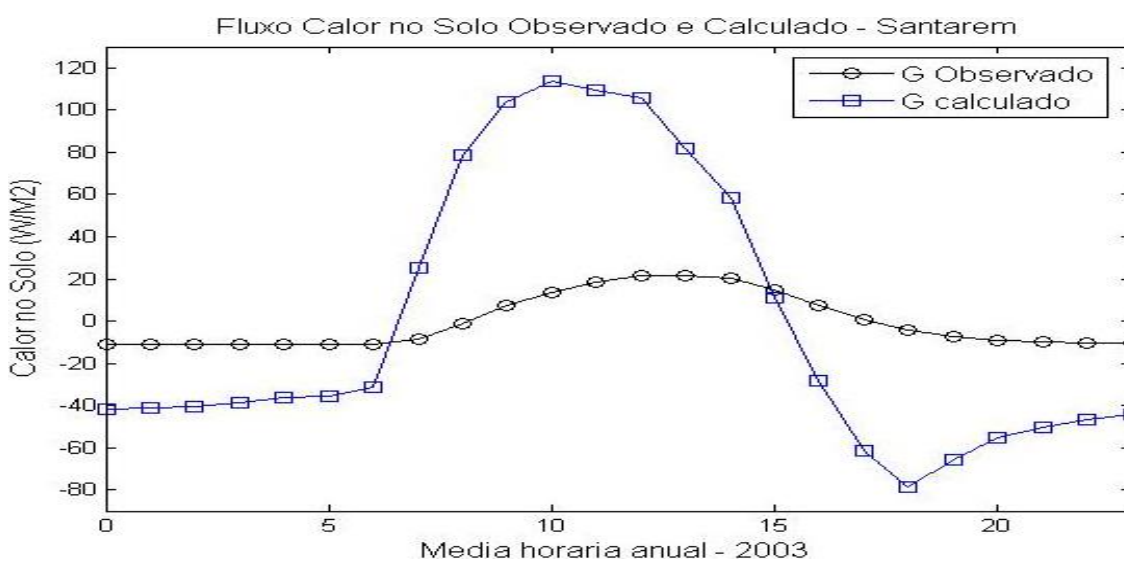


Figura 07: Fluxos de calor no solo para os dias de permanência da cultura no campo (média horária).

O modelo tem dificuldades para representar o fluxo de calor no solo, como podemos observar na figura acima.

Na figura 08 apresenta-se o ciclo diário médio do fluxo do saldo de radiação observado e calculado durante o período de cultivo da soja no ano 2003.

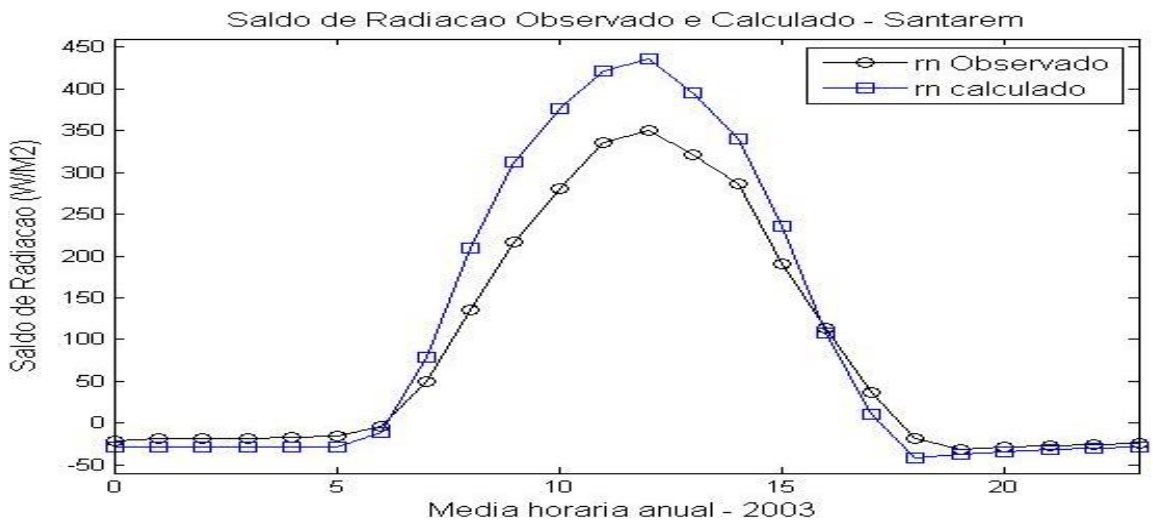


Figura 08: Saldo de radiação para os dias de permanência da cultura no campo (media horaria).

O saldo de radiação observado foi calculado somando os valores medidos dos fluxos de calor sensível, latente e do solo, para efetuar as comparações com o saldo de radiação calculado pelo modelo.

O Inland-Agro superestima o saldo de radiação devido às dificuldades que apresenta para estimar o fluxo de calor no solo, isto pode ser verificado na figura 07.

A figura 09 mostra as médias diárias do fluxo de calor sensível observado e simulado para todo o ciclo da cultura.

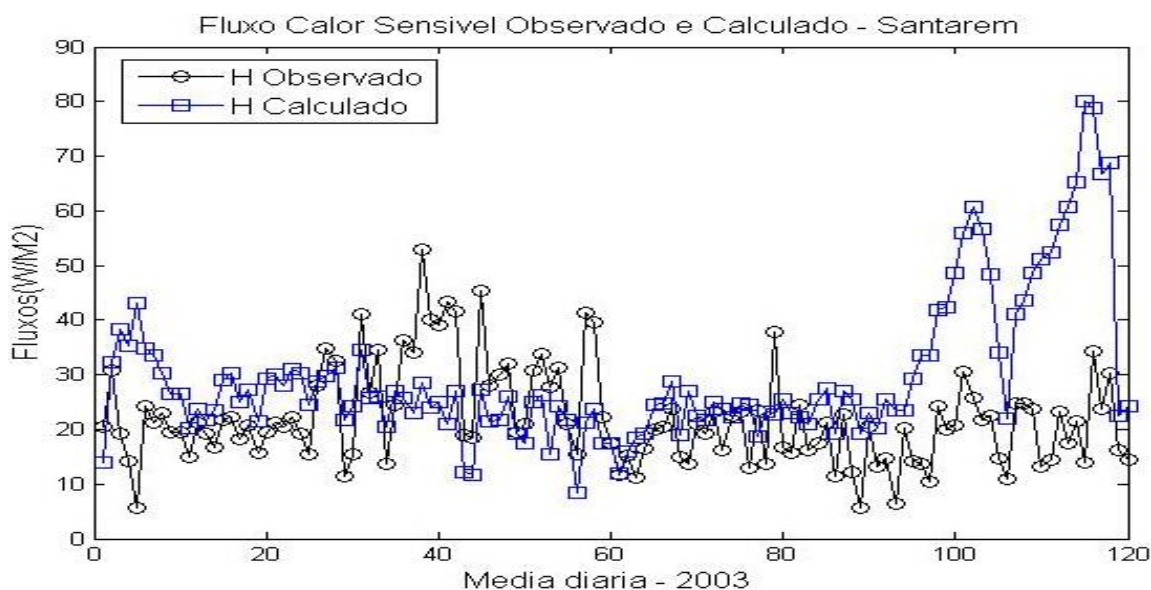


Figura 09 Fluxos de calor sensível para os dias de permanência da cultura no campo (média diária).

O modelo nos primeiros 25 dias superestima o fluxo de calor sensível, em consequência da falta de cobertura vegetal do solo, devido a cultura da soja se encontrar em seus primeiros estádios de crescimento e apresenta IAF baixo. Após os 95 dias de plantio o modelo superestima o fluxo de calor sensível com maior intensidade, devido à cultura da soja se encontrar na fase de senescência, apresentando IAF reduzido e, também a forte redução na precipitação neste período do plantio que reduz a umidade do solo e portando no particionamento da energia disponível, o fluxo de calor sensível é mais favorecido. Na fase em que a cultura se apresenta mais desenvolvida com os maiores índices de área foliar (dos 25 aos 95 DAP), o modelo apresenta pouca variação no fluxo de calor sensível, em função da condição praticamente estável da umidade do solo em virtude dos altos índices de precipitação.

A figura 10 mostra as médias diárias do fluxo de calor latente observado e simulado para todo o período de cultivo da soja.

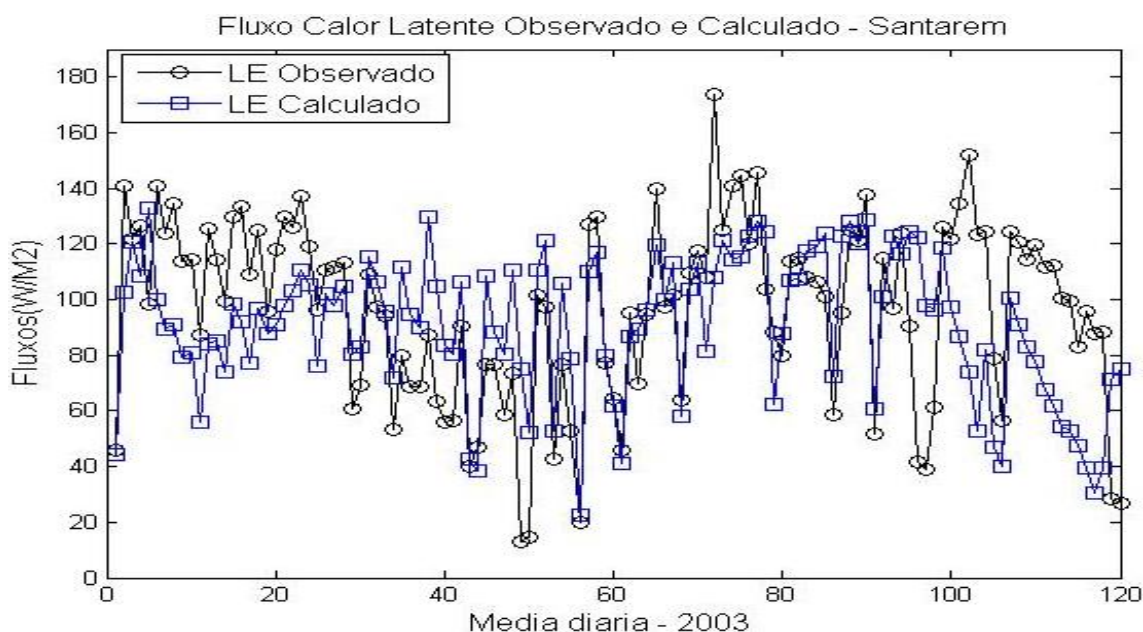


Figura 10 Fluxos de calor latente para os dias de permanência da cultura no campo (média diária).

O modelo Inland-Agro captura a variabilidade do fluxo de calor latente em relação ao observado, com valores menores nos primeiros 40 DAP e se elevando no estágio de desenvolvimento da soja entre 40 e 90 DAP, para após estes períodos sofrer forte redução em função da senescência foliar da soja que ocorre após os 100 DAP (Fig. 08).

O modelo subestima o fluxo de calor latente nos primeiros 25 dias após o plantio da cultura, isto também pode ser observado na redução da evapotranspiração mostrado na figura 10. Após 95 dias de plantio o modelo continua subestimando o fluxo de calor latente com maior intensidade, devido à planta da soja se encontrar na fase de senescência, apresentando IAF reduzido e, também a forte redução na precipitação e como consequência redução na umidade do solo neste período do plantio. Estes resultados corroboram o relatado por Singer *et al* (2010), que a evapotranspiração é influenciada fortemente pelo IAF, ocorrendo assim menor transporte de água para a atmosfera. O modelo também mostra um pequeno aumento no fluxo de calor latente, quando a cultura apresenta maiores índices de área foliar.

A figura 11 mostra as médias diárias do saldo de radiação observado e simulado para todo o ciclo da cultura.

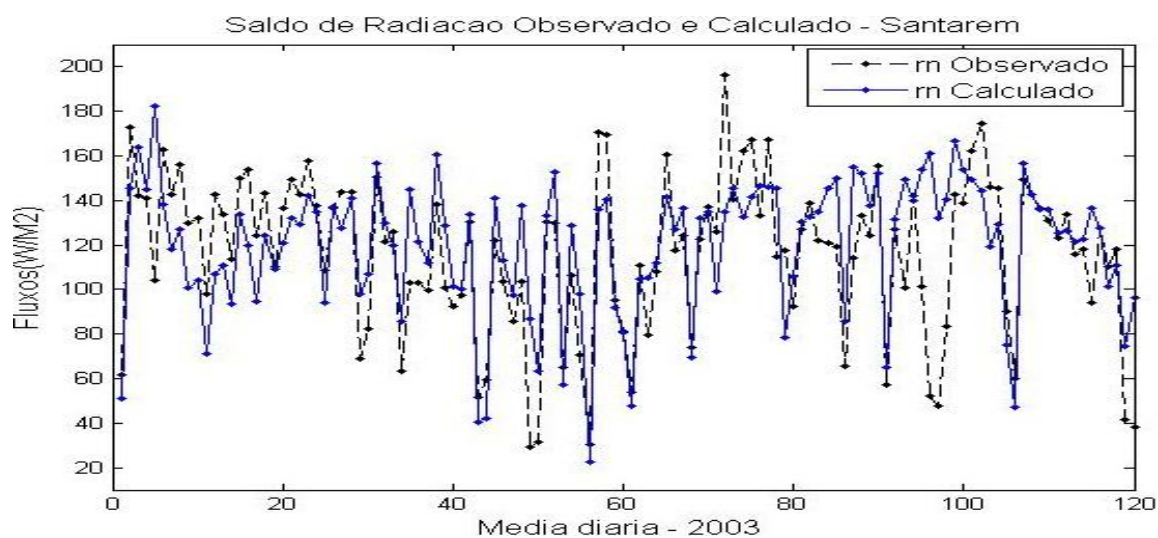


Figura 11: Saldo de radiação para os dias de permanência da cultura no campo (média diária).

As médias diárias do saldo de radiação, projetadas pelo modelo, apresentam menores desvios que os outros componentes do balanço de energia, com variabilidade diária associada aos eventos de precipitação, enquanto na escala intrasazonal sofre influência das diferentes fases de desenvolvimento da soja que afeta todos os componentes do balanço de energia a superfície.

5.2.2. Umidade no solo

A figura 12 apresenta as médias diárias observadas e simuladas do conteúdo de água no solo ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura de soja.

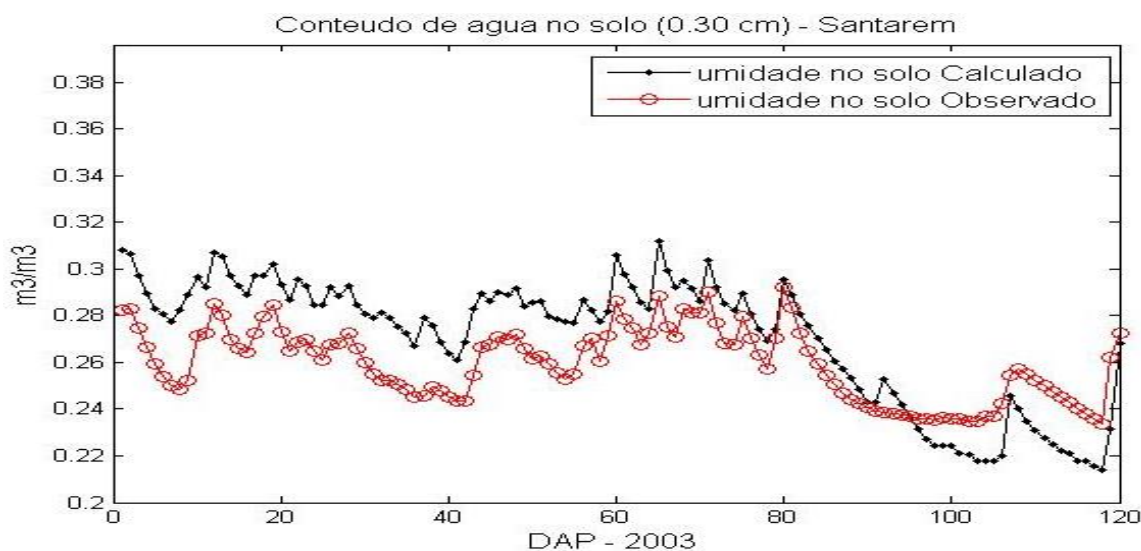


Figura 12: Conteúdo de água no solo observado e calculado para os dias de permanência da cultura no campo (média diária).

As medidas da umidade em campo foram realizadas a 29 cm de profundidade e, foram comparadas com os resultados calculados pelo modelo para a camada a 30 cm de profundidade. Nos primeiros 80 dias após o plantio o modelo superestima levemente a umidade no solo, devido a que neste período existe maior concentração das chuvas. Após os 80 dias de plantio o conteúdo de água no solo apresentou uma pequena redução gradual que acompanha as variações na taxa de precipitação, mostradas na figura 02. O Inland-Agro simulando o conteúdo de água no solo apresenta um coeficiente de correlação (r) de 0,85 e um coeficiente de determinação (r^2) de 0,72, mostrando um forte grau de associação entre os valores observados e calculados pelo modelo. Também foi calculada a raiz do erro médio quadrático (RMSE), apresentando o valor de $0,04 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

É muito importante mencionar que o modelo representa satisfatoriamente o conteúdo de água no solo, já que esta variável é uma estimativa da disponibilidade de água para as plantas e também é útil na adoção de técnicas

de manejo da cultura e sistemas de irrigação (Bernardo *et al.*; 2006). A pequena variabilidade da umidade do solo reafirma que a variabilidade da precipitação foi o elemento climático mais determinante das variações dos fluxos de energia a superfície durante o desenvolvimento da cultura de soja.

5.2.3. Evapotranspiração

A figura 13 mostra as médias diárias da evapotranspiração e dos componentes, evaporação do solo e transpiração do dossel vegetal da cultura de soja.

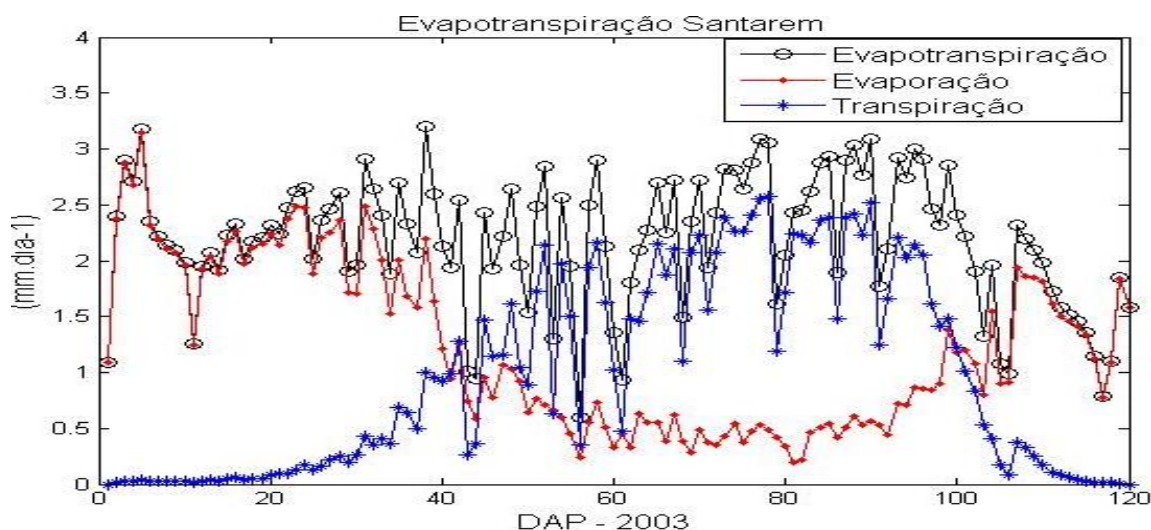


Figura 13: Evapotranspiração para os dias de permanência da cultura no campo (média diária).

O modelo representa consistentemente os componentes do balanço hídrico, de acordo com o desenvolvimento da cultura no campo. Nos primeiros 40 dias a evapotranspiração (EVT) é dominada pela evaporação do solo (EV), quando a soja se encontra nos primeiros estádios de crescimento, após este período e até os 95 dias aproximadamente a transpiração começa a ter maior representatividade, devido ao crescimento das plantas, especialmente com o incremento do índice de área foliar (IAF), ocorrendo maior cobertura do solo pela cultura no campo. Na fase de senescência, aproximadamente 95 dias após o plantio (DAP) também se pode observar que a EVT é novamente dominada pela EV, quando a cultura apresenta IAF reduzido. Observa-se também forte redução na EVT após os 100 dias de plantio, efeito da diminuição na precipitação.

5.2.4. NEE (Troca Líquida de CO₂ pelo ecossistema)

A figura 14 apresenta o comportamento da troca líquida de CO₂ pelo ecossistema (NEE) durante o ciclo da cultura no campo.

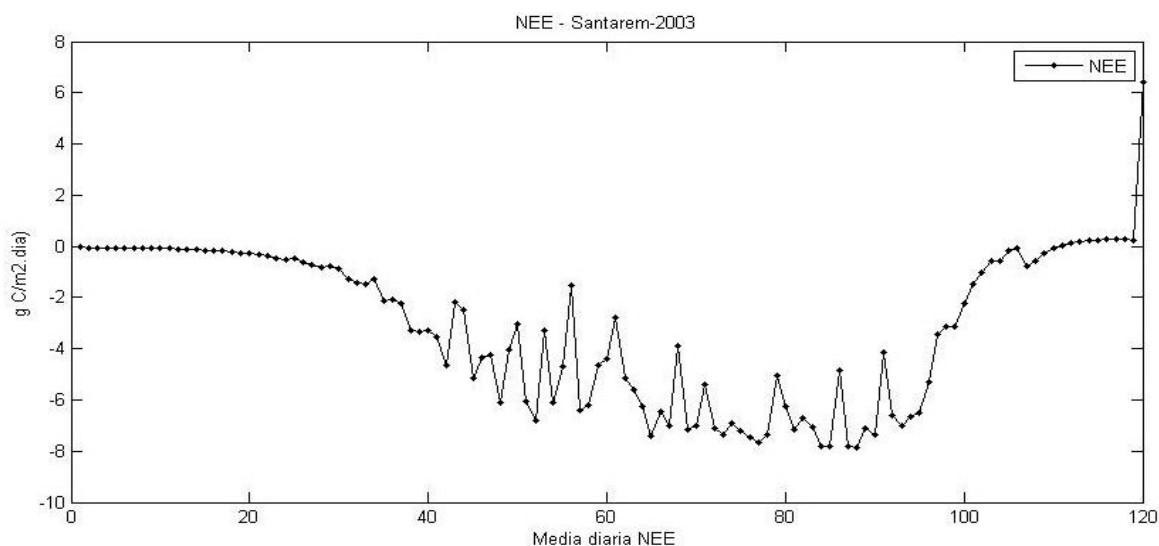


Figura 14: NEE para o ciclo da cultura da soja

A compreensão da dinâmica das trocas de carbono entre os ecossistemas e a atmosfera é de extrema importância para a tomada de decisões de mitigação, a fim de reduzir as emissões de carbono, principalmente às provenientes de atividades antrópicas ou potencializar as absorções de carbono pelos ecossistemas. As funções ecológicas dos ecossistemas e seus ciclos biogeoquímicos podem ser fortemente afetados pelo manejo inadequado dos mesmos (Khader *et al*, 2010). As variações do ciclo de carbono nos ecossistemas terrestres influenciam significativamente os níveis de CO₂ atmosférico (Suyter e Verma, 2010). Os ecossistemas agrícolas representam uma das mais importantes fontes de carbono da biosfera, produto dos processos de assimilação e respiração das plantas e decomposição da matéria orgânica do solo (Smith *et al*, 2010).

O ecossistema da soja nas simulações feitas com o modelo Inland-Agro, apresentou ser sumidouro de CO₂ desde o início até os 110 dias após o plantio e, fonte de CO₂ apenas nos últimos 10 dias ao final do ciclo da cultura. Observa-se na figura 14, que com o desenvolvimento da cultura no campo, especialmente

com o incremento no IAF a intensidade para sequestrar CO₂ também aumenta. Os maiores níveis de assimilação de CO₂, chegando a cerca de 7,5 gC/m²/dia, coincidem com os picos no IAF desde os 65 até os 90 dias após o plantio. Nos primeiros dias após o plantio o ecossistema da soja simulado pelo modelo Inland-Agro representou ser sumidouro de CO₂, resultado diferente ao encontrado por Webler (2011) em que o ecossistema da soja apresentou ser fonte, tanto nos dados observados em campo, como nos simulados pelo modelo Agro-Ibis. Trocas de CO₂ entre a superfície e a atmosfera influenciam no equilíbrio de vários processos abióticos e bióticos e se tornam muito importantes nas variações do clima (Khader *et al*, 2010).

5.3. Avaliação de Modelos de Circulação Global

A figura 15 mostra as variações da temperatura média anual dos modelos GISS-E2-R, Hadgem2ES, MIROC5, MRI-CGCM3, NorESM1-M, CCSM4, GFDL-ESM2M e IPSL-CM5A-LR e os dados observados do Climatic Research Unit (CRU) para a região de Santarém, considerando as análises comparativas para o período de 1961 a 2005 e os modelos selecionados em função da disponibilidade de dados e participação nos cenários RCP's.

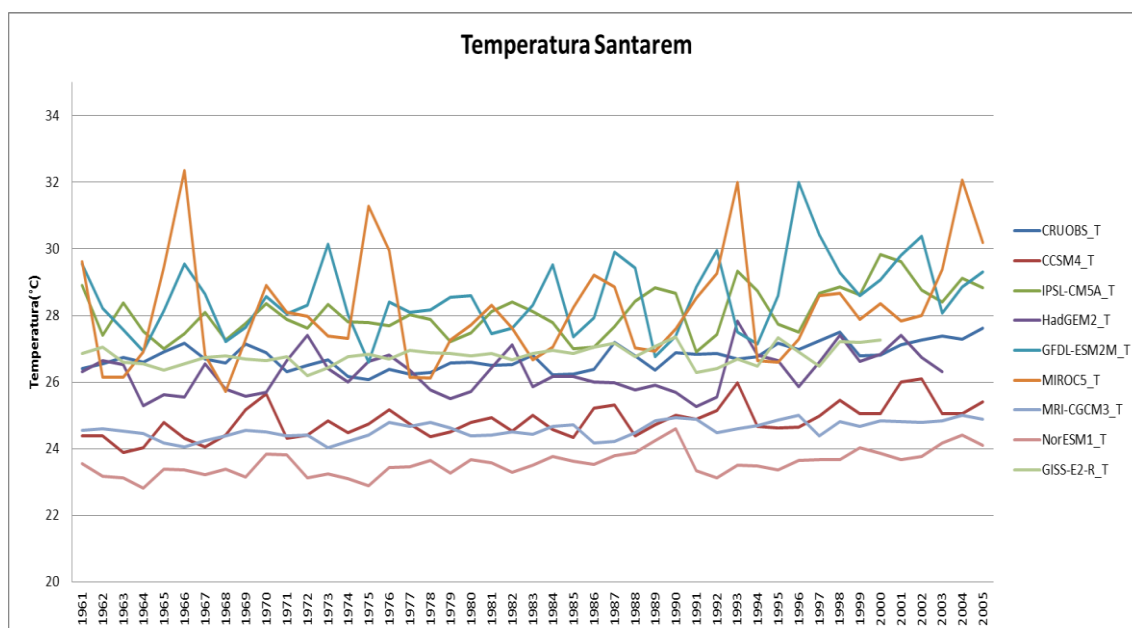


Figura 15: Temperatura média anual projetada pelos modelos em estudo (1961-2005)

Observa-se que os modelos Hadgem2ES e o GISS-E2-R representam consistentemente os dados de temperatura média anual em comparação aos registrados pelo CRU para a sequência dos anos 1961-2005.

Já os modelos IPSL-CM5A-LR, MIROC5 e GFDL-ESM2M, superestimam os dados de temperatura média anual em comparação aos registrados pelo CRU para a sequência dos anos 1961-2005.

Enquanto os modelos CCSM4, MRI-CGCM3 e NorESM1-M subestimam os dados de temperatura média anual em comparação aos registrados pelo CRU para a sequência dos anos 1961-2005.

A figura 16 apresenta as variações na precipitação anual dos modelos avaliados mencionados acima e os dados de precipitação fornecidos pelo CRU.

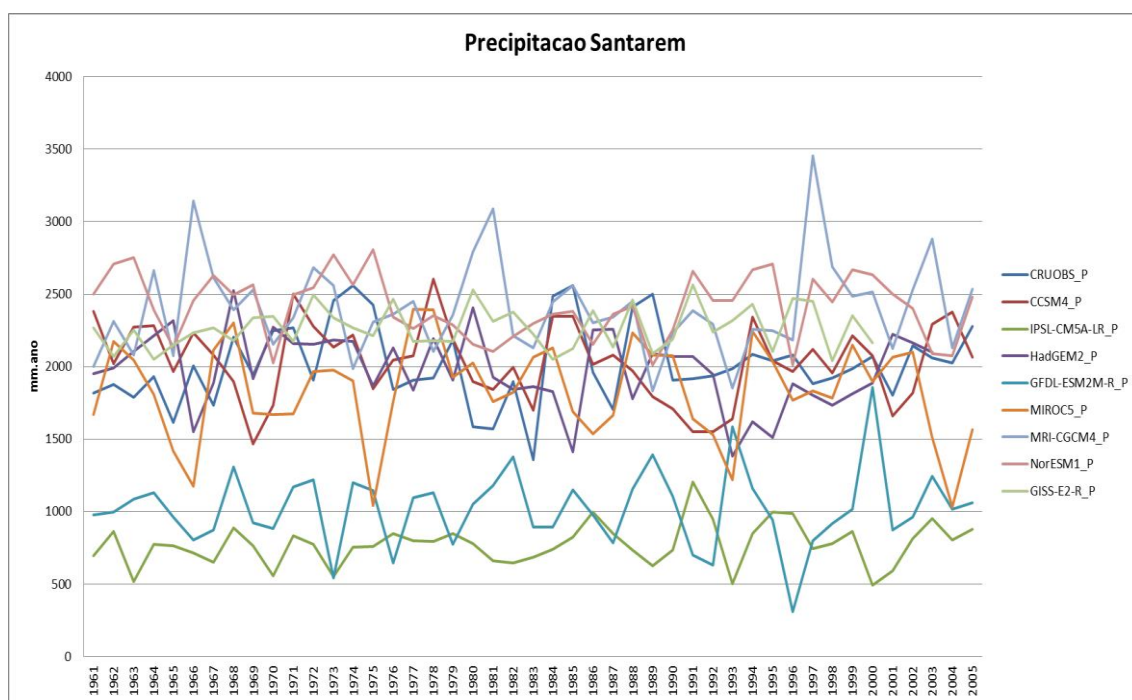


Figura 16: Precipitação anual projetada pelos modelos em estudo (1961-2005)

Observa-se que dentre os modelos analisados apenas o Hadgem2ES e o CCSM4 representam consistentemente os dados de precipitação anual em comparação aos registrados pelo CRU para a sequência dos anos 1961-2005. Resultados similares encontrados por Barreto *et al* (2013), que avaliando oito modelos de simulação climática globais (incluindo o modelo Hadgem2ES) pertencentes ao conjunto de experimentos “phase five of the Coupled Model Intercomparison Project” (CMIP5), durante o período de 1979 a 2005,

encontraram que os modelos em estudo representaram adequadamente o ciclo anual de precipitação sobre o Brasil Tropical, em especial o centro leste da Amazônia, quando comparados aos dados obtidos da base de dados do "Climate Prediction Center unified gauge" (CPC-uni).

Os modelos MRI-CGCM3, NorESM1-M e GISS-E2-R, superestimam os dados de precipitação anual em comparação aos registrados pelo CRU para a sequência dos anos 1961-2005.

Os modelos IPSL-CM5A-LR, GFDL-ESM2M e MIROC5, subestimam os dados de precipitação anual em comparação aos registrados pelo CRU para a sequência dos anos 1961-2005.

Analisando os resultados apresentados nas figuras 12 e 13 verifica-se que apenas o modelo Hadgem2ES simula de uma forma mais consistente as duas variáveis (temperatura e precipitação), considerando as condições do clima atual (definido aqui como o período de 1961 a 2005) para a região de Santarém. O modelo GISS-E2-R embora simule satisfatoriamente as variações de temperatura média anual, superestima as variações anuais de precipitação e por isso foi descartado na definição dos cenários climáticos a serem utilizados. O modelo CCSM4 simula as variações anuais de precipitação satisfatoriamente, mas subestima as variações de temperatura média anual e da mesma maneira foi descartado.

Na tabela 05 observam-se os erros médios das simulações das variáveis de temperatura e precipitação dos modelos analisados acima sobre a área de estudo, comparados com os dados observados do CRU, para a sequência dos anos 1961-2005.

Tabela 05: Erro médio dos modelos avaliados

Erro Médio (1961-2005)								
Model	CCSM4	IPSL	HadGem	GFDL	MIROC	MRI	NorEs	GISS
Temp. (°C)	-1,91	1,34	-0,44	1,79	1,41	-2,17	-3,18	0,12
Prec. (mm)	17,88	-1242,64	-29,89	-997,31	-182,62	384	397,2	254,5

Observa-se que os modelos GISS-E2-R e o Hadgem2ES apresentam menor erro simples na simulação da temperatura do ar. O modelo Hadgem2ES

também apresenta menor erro simples na simulação da precipitação juntamente com o modelo CCSM4.

Após as análises dos modelos citados acima, as projeções climáticas geradas pelo modelo de circulação global Hadgem2ES foram utilizadas para forçar o modelo Inland-Agro nas estimativas da produtividade, fluxos de água e energia na cultura da soja na região de Santarém, para os períodos 2031-2060 e 2071-2100.

5.4. Efeitos das mudanças futuras nos elementos climáticos na produtividade, fluxos de água e energia da cultura da soja .

5.4.1. Simulação com o CO₂ aumentando

5.4.1.1 Rendimento e Índice de Área Foliar (IAF).

A figura 17 mostra as curvas de IAF geradas pelo modelo nas simulações realizadas para o ano 2003 com a concentração de CO₂ atual, CO₂ elevado a 513ppm com o valor da Vmax padrão, CO₂ elevado a 513ppm com o valor da Vmax ajustada, CO₂ elevado a 801ppm com o valor da Vmax padrão e CO₂ elevado a 801ppm com o valor da Vmax ajustada. As letras **C** e **S** na figura representam as simulações com Vmax ajustada e Vmax padrão, respectivamente.

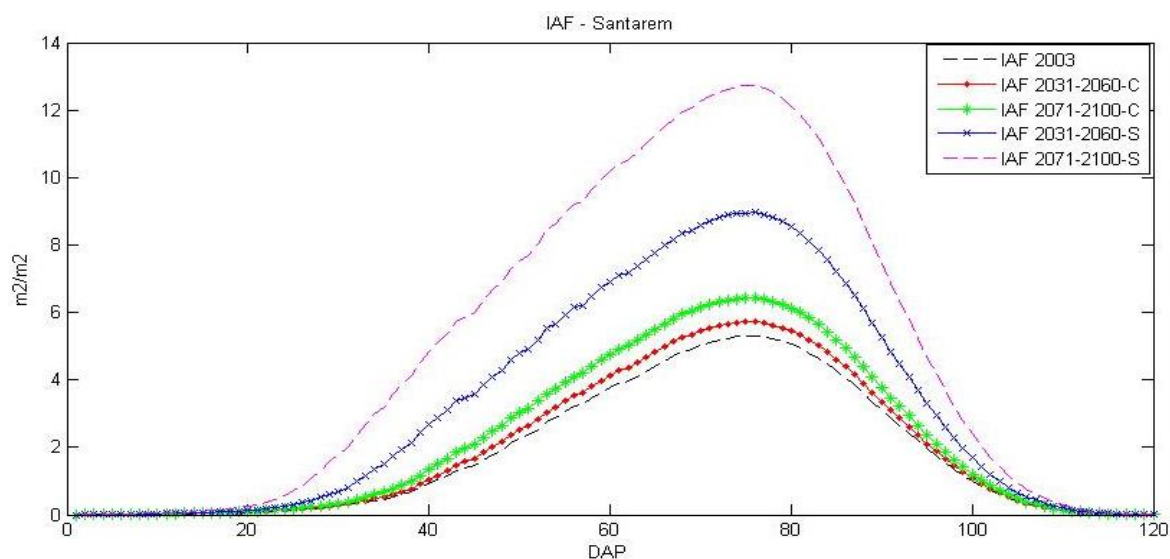


Figura 17 Índice de Área Foliar para os dias de permanência da cultura no campo (média diária).

O modelo Inland-Agro indica que haverá incrementos no IAF da cultura de soja, na região de Santarém, se as concentrações de CO₂ na atmosfera aumentarem. Simulações utilizando concentrações de CO₂ atmosférico de 513ppm e 801ppm considerando o valor da Vmax padrão mostraram que o IAF aumentou em 69% e 140% respectivamente. Observa-se nestas simulações que o modelo superestima os valores de IAF em CO₂ elevado, quando se analisa os resultados obtidos em experimentos de campo utilizando tecnologia FACE, em que o IAF aumenta em 9% e 21% nas concentrações de CO₂ atmosférico de 550ppm e 720ppm, respectivamente (Bernacchi *et al*, 2005; Ainsworth e Long, 2004).

Nas simulações quando o valor da Vmax foi ajustada de $45 \times 10^{-6} \text{ mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (valor padrão) para o valor de $20 \times 10^{-6} \text{ mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ considerando a concentração de CO₂ atmosférico de 513ppm, o IAF aumentou 7,9%, resultado próximo aos encontrados nos trabalhos de Bernacchi *et al* (2005) utilizando tecnologia FACE e ao modelado por Twine *et al* (2013) utilizando o Agro-Ibis. Ambos mostrando aumento no IAF de 9% na cultura da soja com incremento na concentração de CO₂ atmosférico de 550ppm. O impacto no IAF aumenta à medida que o CO₂ atmosférico cresce do período atual, passando por meados, até o final do século XXI. Contudo, o efeito de aclimatação sugerido pelos experimentos do tipo FACE, introduzidos na modelagem do Inland-Agro através da velocidade máxima da enzima Rubisco, limitou sobre maneira os impactos, indicando aumentos menores no IAF da cultura de soja em resposta ao aumento do CO₂ atmosférico.

A figura 18 mostra as variações percentuais no rendimento e IAF da cultura da soja, nas simulações considerando as concentrações de CO₂ elevado em 513ppm e com o valor da Vmax padrão (C1S), CO₂ elevado em 513ppm e com valor da Vmax ajustada (C1C), CO₂ elevado em 801ppm e com o valor da Vmax padrão (C2S) e CO₂ elevado em 801ppm e com o valor da Vmax ajustada (C2C), quando comparadas a simulação considerando a concentração de CO₂ atmosférica atual.

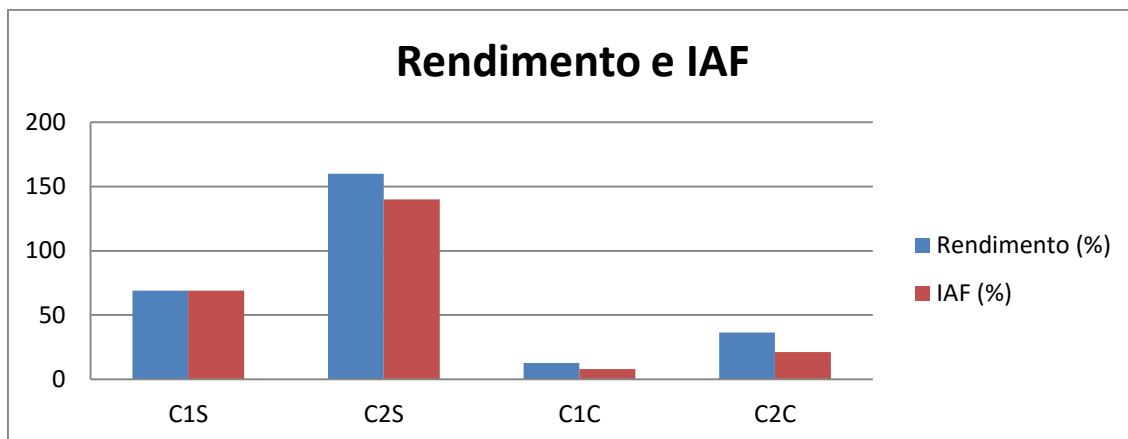


Figura 18: Índice de Área Foliar para os dias de permanência da cultura no campo (média diária).

O modelo Inland-Agro projeta aumentos no rendimento da cultura da soja em concentrações de CO₂ elevado (513 e 801 ppm), utilizando o valor padrão na V_{max}, simulando aumentos de 69% e 160% respectivamente. Nas simulações em que a V_{max} foi reduzida para 20x10⁻⁶ mol(CO₂).m⁻².s⁻¹ e na concentração de 513ppm de CO₂ atmosférico, o modelo estimou aumento no rendimento de apenas 12,7%, isto pode ser verificado na tabela 09 no anexo A. Resultados similares foram encontrados utilizando tecnologia FACE (Bernachi *et al*, 2005) e simulações com o modelo Agro-Ibis (Twine *et al*, 2013) em concentrações de elevado CO₂ (550ppm), que reportaram aumento no rendimento de 11% e 13%, respectivamente, para a região central dos Estados Unidos.

Outros experimentos utilizando a mesma metodologia FACE, em concentração de CO₂ atmosférico de 720ppm, reportaram aumentos de 30% no rendimento e 21% no IAF em espécies C₃, comparado aos resultados em concentração de CO₂ atmosférico de 360ppm (Ainsworth e Long, 2004). O modelo Inland-Agro apresentou aumentos de 36,4% no rendimento e 21,1% no IAF, utilizando o valor da V_{max} de 13x10⁻⁶ mol(CO₂).m⁻².s⁻¹, na concentração de CO₂ atmosférico de 801ppm.

Nas simulações com o modelo Inland-Agro, utilizando o valor padrão na V_{max}, observa-se que o modelo respondeu linearmente aos incrementos do CO₂ atmosférico, superestimando a produção de biomassa, rendimento e IAF da cultura que derivam da assimilação de carbono pelo processo fotossintético.

A superestimativa/subestimativa das respostas dos modelos de vegetação e agrônômicos associados aos processos de fotossíntese e ciclo do

carbono, podem nos levar a uma incorreta representação no particionamento de energia, água e nutrientes e alguns erros em outras variáveis que dependem do dossel (Twine *et al.*, 2013).

Com os resultados nas simulações, observamos que é preciso que no modelo Inland-Agro seja incorporada uma função de aclimatação, com o objetivo de realizar simulações mais realistas em ambientes com variações em CO₂ elevado.

Aclimatação, no contexto fisiológico, é um termo usado para descrever um conjunto de respostas bioquímicas e fisiológicas de uma planta a mudanças ambientais, em que a resposta da planta a uma sustentável mudança é manifestada como alterações nas funções de processos fisiológicos de resposta de curto prazo. A extensão em que a aclimatação ocorre depende do estímulo e do tempo à exposição, uma vez que estes fatores influenciam tanto o substrato disponível e a capacidade da planta para fazer adaptações fisiológicas, estruturais e bioquímicas (Smith e Dukes, 2012). Incrementos na concentração de CO₂ atmosférico podem ser benéficos para o desenvolvimento das culturas agrícolas, uma vez que o CO₂ é o substrato primário para o processo fotossintético (Taiz e Zeiger, 2004). Muitas vezes, em curto prazo o incremento na concentração de CO₂ atmosférico pode acelerar os processos fotossintéticos (Norby *et al.*, 2005), mas em longo prazo as plantas podem regular ou estabilizar seu aparelho fotossintético em resposta a níveis elevados de CO₂ atmosférico (Smith e Dukes, 2012) através de ajustes fisiológicos e bioquímicos, ou pela limitação de recursos disponíveis, como podem ser observados em resultados encontrados em experimentos utilizando tecnologia FACE (Bernacchi *et al.* (2005); Ainsworth e Long (2004; Reddy *et al.*, 2010).

Com os incrementos na concentração atmosférica de CO₂, os níveis de CO₂ intercelulares aumentam, diminuindo a sua difusão, levando a aumentos da fotossíntese em curto tempo. Eventualmente, embora, alguns dos outros processos que regulam o crescimento da planta (captação de luz, exportação de carboidratos, absorção de nitrogênio) desequilibram, existe alguma evidência de que as plantas realocam recursos fora da fixação de CO₂ em favor destes processos recentemente limitados (Smith e Dukes, 2012).

Plantas cultivadas em sistemas com baixos níveis de nutrientes apresentam diminuição na produtividade mais forte em resposta a CO₂ elevado,

em comparação com aqueles em sistemas de níveis altos de nutrientes (Ainsworth e Long, 2005). Da mesma forma, as respostas positivas de fotossíntese para CO₂ pode diminuir ao longo do tempo em estudos de longo prazo devido à limitação por nutrientes (Luo *et al.*, 2004; Lukac *et al.*, 2010). Plantas em alguns sistemas, no entanto, podem ser capazes de superar a limitação por nutrientes através do maior desenvolvimento da raiz, decomposição liteira e liberação de nitrogênio microbiano (Zak *et al.*, 2011).

Modelos baseados em processos usam algoritmos interativos para descrever respostas da planta às condições ambientais, muitas vezes estes algoritmos incorporam valores prescritos que são fixos, eles não mudam. Portanto, assumem que as plantas não possam aclimatar-se a alterações das condições ambientais. Em algum nível, todos os algoritmos usam parâmetros fixos. No entanto, para incorporar respostas de aclimatação a estímulos ambientais, como as variações de temperatura ou concentrações de CO₂ atmosférico, esses parâmetros fixos devem se ajustar ao longo da duração da exposição a estes estímulos, representando uma variável de resposta dinâmica (Smith e Dukes, 2012).

Smith e Dukes (2012) avaliando a estrutura de 17 modelos de vegetação (componentes primários de modelos de superfície terrestre), no que diz respeito à troca de carbono terrestre com as plantas, observando processos de longo prazo tais como aclimatação fotossintética a temperatura, aclimatação da respiração autotrófica a temperatura e, aclimatação fotossintética ao CO₂ através da limitação fotossintética por outros processos biogeoquímicos sob CO₂ elevado, encontraram que, nenhum dos modelos analisados incorporou variáveis de resposta dinâmica para respostas fotossintéticas e respiratórias as variações de temperatura e concentração de CO₂ atmosférico, o que significa que nenhum dos modelos pode simular aclimatação fotossintética e respiratória da planta à temperatura e concentração de CO₂.

Alguns modelos permitem respostas dinâmicas do processo fotossintético às variações de CO₂ atmosférico, permitindo que a resposta à fertilização de CO₂ seja limitada pela disponibilidade de nitrogênio ambiental (Thornton *et al.*, 2009; Sokolov *et al.*, 2008).

Outra abordagem de modelagem com o intuito de representar respostas mais próximas a um provável futuro de mudança na concentração de CO₂

atmosférico é realizar ajustes em parâmetros chaves tais como velocidade da enzima rubisco (V_{max}) e área foliar específica (SLA), como foi feito nas simulações de Twine *et al.* (2013), utilizando o modelo Agro-Ibis em concentração de CO_2 atmosférico de 550 ppm, baseando-se em resultados de experimentos utilizando tecnologia FACE em cultura de soja, na mesma concentração atmosférica de CO_2 .

Para tornar mais realistas as simulações foi considerada a possibilidade de reduzir a V_{max} (simulando um efeito de aclimatação) para os valores mencionados no item 4.6. A ideia foi buscar respostas fisiológicas mais coerentes, em concentrações de CO_2 elevado, quando comparados aos experimentos FACE. Vale ressaltar que Ainsworth e Long (2004) reportaram um significativo processo de aclimatação afetando o processo de fotossíntese em espécies C3, tendo como mecanismo desencadeador uma redução na V_{max} de aproximadamente 13% em CO_2 elevado.

Quantificar as variações fisiológicas dos ecossistemas através de modelos dinâmicos de vegetação, em resposta a prováveis aumentos na concentração atmosférica de CO_2 são necessárias para avaliar as alterações futuras do clima. No entanto uma incerteza significativa permanece nas simulações de modelos a estas respostas da vegetação e seus impactos (Twine *et al.*, 2013). Com a finalidade de diminuir o grau de incerteza e realizar simulações mais realistas, dos prováveis impactos às mudanças climáticas, ajustamos um dos principais parâmetros sensível às variações na concentração de CO_2 atmosférico a taxa máxima de carboxilação (V_{max}). Com os ajustes realizados na V_{max} o Inland-Agro representou satisfatoriamente as variações nos fluxos de energia, evapotranspiração, rendimento e IAF em concentrações de CO_2 elevado (513 e 801ppm), quando comparado a resultados encontrados em experimentos utilizando tecnologia FACE. Resultados encontrados neste trabalho e alguns outros, tais como o de Twine *et al.* (2013), mostram a necessidade de parametrizar apropriadamente, os modelos de simulação de ecossistemas agrícolas e naturais, com o objetivo de representar melhor os processos influenciados pelos cenários climáticos em condições de elevadas concentrações de CO_2 , especialmente as potencialidades da aclimatação.

5.4.1.2 Balanço de energia

Na figura 19 observam-se as variações no fluxo diário de calor sensível no cenário RCP 8.5 entre as concentrações de CO₂ atmosférico elevado (513ppm e 801ppm) e o CO₂ atual. As descrições acompanhadas com a letra C significam com ajuste na Vmax e com a letra S, com o valor padrão na Vmax.

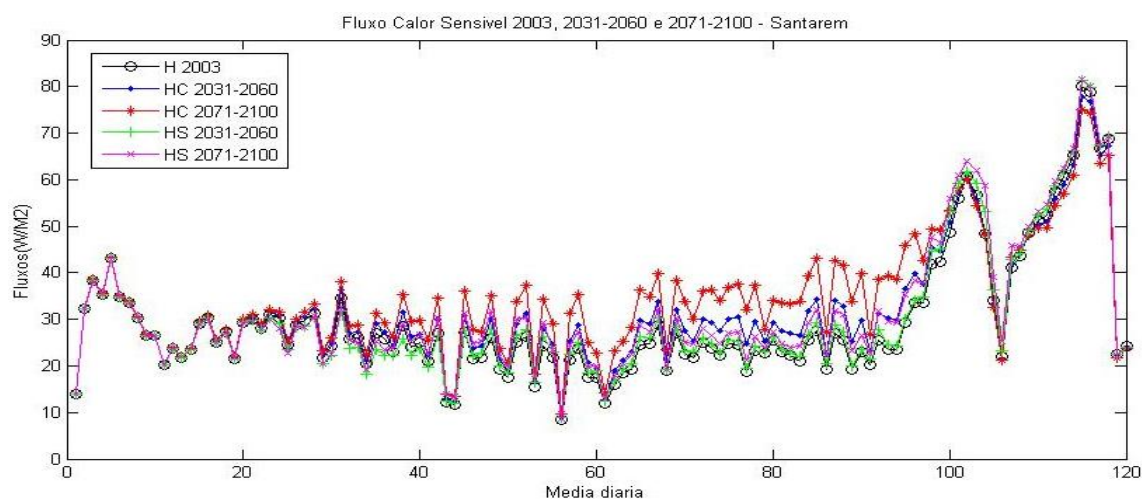


Figura 19: Fluxo de calor sensível (H) em CO₂ elevado

O modelo estimou aumento no fluxo de calor sensível em todas as simulações realizadas, com maior intensidade nas simulações em que o ajuste na Vmax foi considerado, apresentando incrementos de 7,2 e 16,7% para as condições em que o CO₂ atmosférico foi de 513ppm e 801ppm respectivamente. Nas simulações utilizando a Vmax padrão, se observou aumentos de 1,6 e 6,6% em CO₂ elevado (513ppm e 801ppm respectivamente).

As variações no fluxo de calor sensível começaram a serem observadas com o desenvolvimento da cultura no campo, a partir dos 20 dias (com aumentos no IAF) até os 110 dias (finalização da fase de senescência) após o plantio e, conseqüentemente mudanças na cobertura do solo. As simulações utilizando ajuste na Vmax, projetaram forte redução no fluxo de transpiração (-12,5 e -26,6%) e aumentos na evaporação (4,12 e 8,1%), refletindo na diminuição da evapotranspiração (-3,2 e -7,2%), para as concentrações de CO₂ atmosférico de 513ppm e 801ppm respectivamente. Com a redução da evapotranspiração e, conseqüentemente menor quantidade de água transportada para a atmosfera, o

particionamento de energia foi afetado, assim parte da energia utilizada na liberação de calor latente foi utilizada aumentando o fluxo de calor sensível.

Nas simulações com a Vmax padrão o modelo projetou pequena redução na evapotranspiração (-0,4 e -2,6%), aumento na transpiração (15,4 e 16,9%) e forte redução na evaporação (-12,9 e -18%), para as concentrações de CO₂ atmosférico de 513ppm e 801ppm respectivamente. Observa-se que mesmo com o aumento na transpiração, a evapotranspiração diminuiu compensada pela redução da evaporação, decorrente do efeito da maior cobertura da superfície pela vegetação (portanto, menor solo exposto) em resposta ao aumento na concentração de CO₂.

Após os 95 dias do plantio o fluxo de calor sensível aumento consideravelmente devido à diminuição na precipitação nesse período e, ao baixo IAF da cultura.

A figura 20 mostra as variações no fluxo de calor latente para todas as simulações em condições de CO₂ elevado.

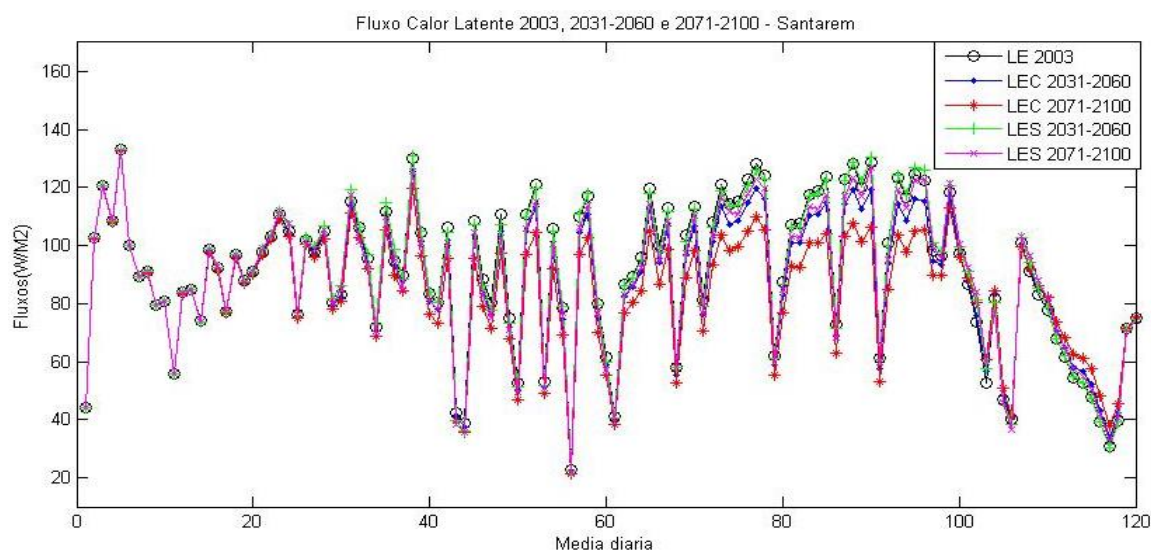


Figura 20: Fluxo de calor latente (LE) em CO₂ elevado

O modelo apresentou diminuição no fluxo de calor latente para todas as simulações, com exceção na simulação em que a concentração de CO₂ atmosférico foi de 513ppm e sem ajuste na Vmax, que mostrou um pequeno aumento de 0,1%, como pode ser observado na tabela 06 do anexo A.

O Inland-Agro simulou redução de 6,7% no fluxo de calor latente em CO₂ atmosférico elevado de 801ppm e ajuste na V_{max}, com maior intensidade a partir do dia 70 até o dia 100 após o plantio, devido que a planta neste período utiliza maior quantidade de água no desenvolvimento de raízes e enchimento de grãos. No último mês da cultura observa-se forte diminuição no LE, devido ao baixo IAF.

Na figura 21 são mostradas as variações dos fluxos de calor latente, calor sensível e saldo de radiação em percentual, comparados com os respectivos fluxos calculados para o ano 2003.

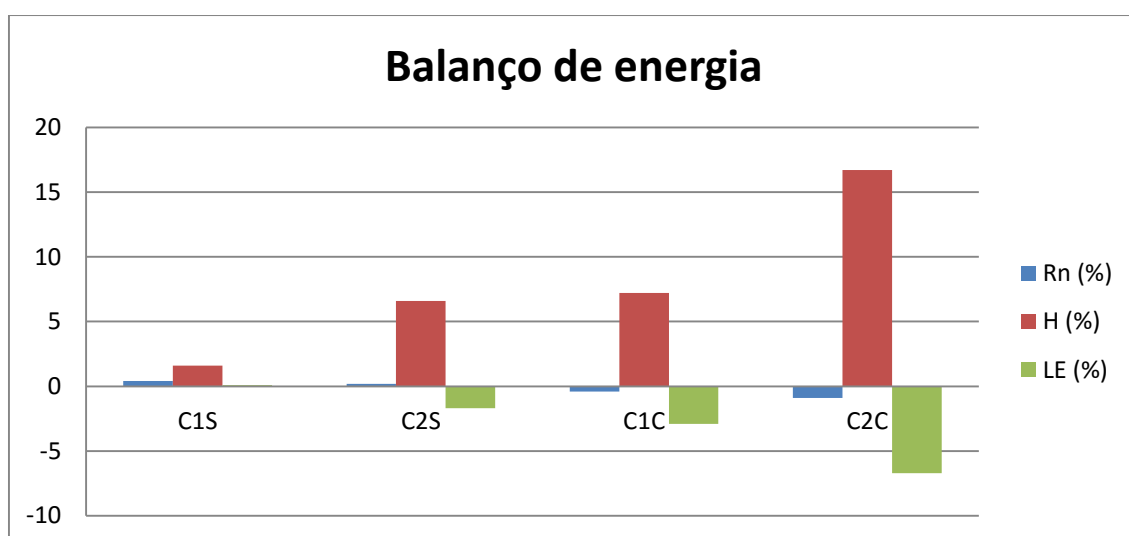


Figura 21: Variação no balanço de energia em CO₂ elevado.

Verificam-se aumento no fluxo de calor sensível, redução no fluxo de calor latente e variação mínima no saldo de radiação.

O modelo simulou redução no fluxo de calor latente de 2,3% e o aumento de 7,2% no fluxo de calor sensível em CO₂ atmosférico elevado de 513ppm e com a V_{max} ajustada, resultados relativamente próximos aos simulados por Twine *et al* (2013), utilizando o modelo Agro-Ibis, que calcularam redução de 3,5%, no fluxo de calor latente, e 12,5% de aumento no fluxo de calor sensível em concentrações de CO₂ de 550 ppm. Estas simulações concordam com os resultados de Bernacchi *et al* (2007) que reportaram aumento no fluxo de calor sensível e diminuição no fluxo de calor latente acima do dossel em um experimento com soja com concentrações de CO₂ de 550 ppm. Alguns estudos tem sugerido aclimatação da função estomática em elevado CO₂ (Bunce, 2004).

5.4.1.3 Evapotranspiração (EVT)

A figura 22 apresenta a evapotranspiração para todas as simulações em condição de CO₂ elevado

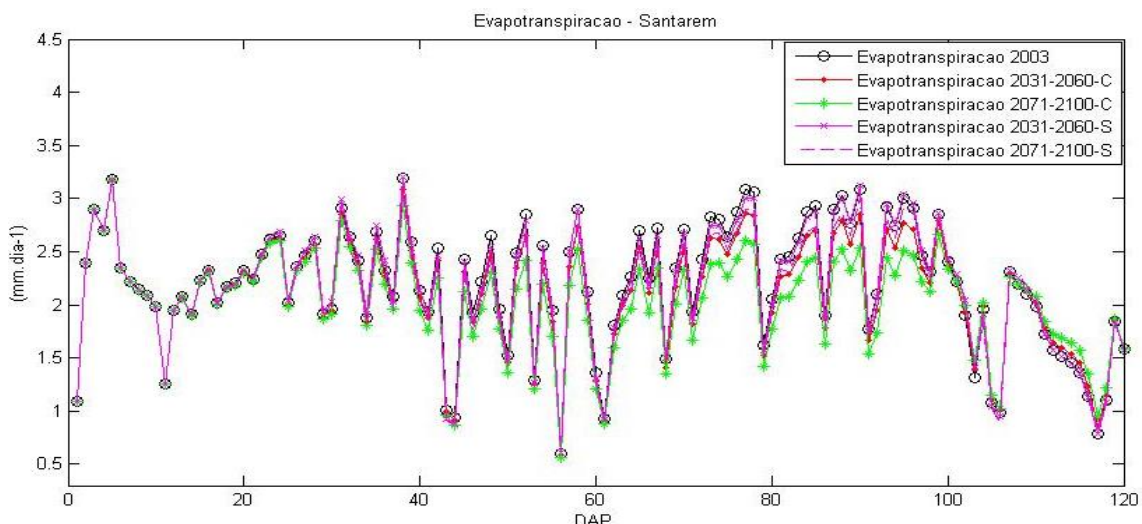


Figura 22: Evapotranspiração simulada para os dias de permanência da cultura no campo (média diária).

O modelo Inland-Agro apresentou diminuição na evapotranspiração em todas as simulações no cenário RCP 8.5. A simulação em CO₂ elevado em 801ppm (Vmax ajustada) reportou maior impacto, reduzindo a evapotranspiração em 7,2%. Estudos feitos por Benacchi *et al.* (2007) usando tecnologia FACE (Free Air Concentration Enrichment) em cultura de soja, com elevação de CO₂ do ambiente atual (~385 ppm) para 550 ppm, reportaram que o CO₂ elevado causou diminuição da evapotranspiração entre 9 e 16% dependendo do ano, resultando na diminuição do transporte do vapor de água para a atmosfera. Estes resultados implicam que o efeito na evapotranspiração no ecossistema da soja, devido ao aumento na concentração de CO₂ atmosférico, pode ter um grande impacto no clima regional, que será influenciado pela extensão das áreas produtoras.

Gray *et al.* (2010) também utilizando tecnologia FACE em cultura de soja com tratamentos de CO₂ em concentrações ambientais atuais (~385 ppm), e CO₂ aumentado para 585 ppm e combinações com baixo e alto conteúdo de água no solo, reportaram que o tratamento com baixo conteúdo de água no solo causou

grande diminuição de condutância estomática em plantas em atmosfera com elevado CO₂ (em cerca de 22%) comparado com as plantas sob tratamento de CO₂ atual (cerca de 9%), afetando assim a transpiração das plantas e por sua vez a evapotranspiração.

É muito importante que a sensibilidade do modelo às variações do CO₂ atmosférico seja ajustada através de uma função de aclimatação para cada tipo funcional de planta e, assim poder ter uma visão mais apurada dos possíveis impactos nos ecossistemas as potenciais variações na concentração de CO₂ atmosférico.

A figura 23 apresenta a transpiração (TR) para todas as simulações em condições de CO₂ elevado, variando o valor da V_{max}.

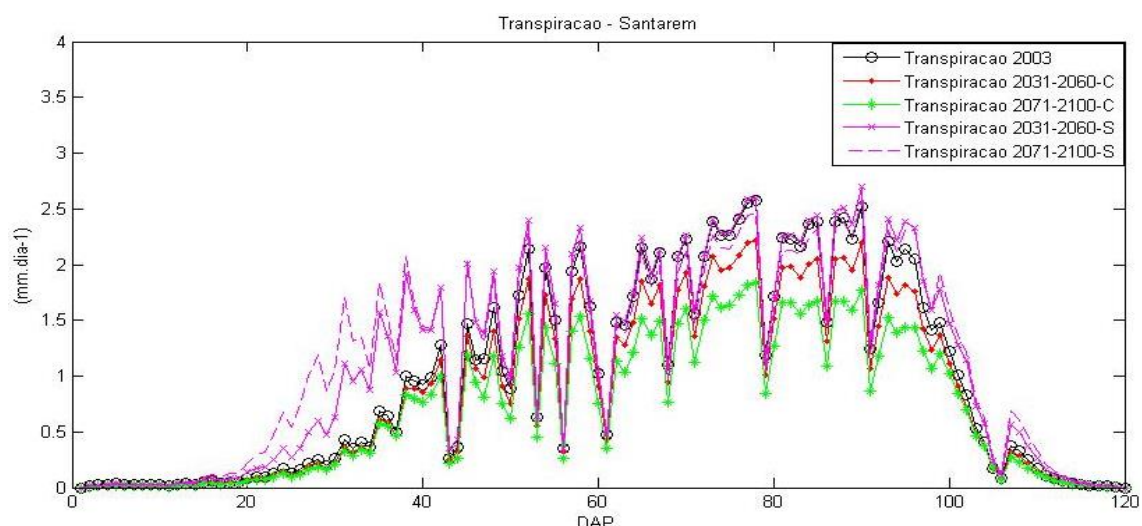


Figura 23: Transpiração simulada para os dias de permanência da cultura no campo (média diária).

O modelo representou diminuição na transpiração da cultura em 12,5% e 26,6% nas simulações com a V_{max} ajustada em CO₂ elevado de 513ppm e 801ppm, respectivamente. Estudos de observações, revisões e simulações tais como os do Bernacchi *et al* (2007); Ainsworth e Long (2004) e Twine *et al* (2007) mencionam a diminuição na transpiração como consequência da diminuição da condutância estomática ao nível de folhas, com o fechamento parcial dos estômatos, o que diminui o transporte de água para a atmosfera através das plantas.. O mesmo não acontece quando o modelo utiliza o valor padrão da V_{max} que resultou em aumento da transpiração em CO₂ elevado, não

concordando assim como os resultados dos estudos mencionados anteriormente. Mesmo com a transpiração aumentando o modelo simulou diminuição na evapotranspiração devido a compensação pela redução na evaporação.

Nos dias 20 até o 40 após o plantio a transpiração aumentou consideravelmente nas simulações sem o ajuste na V_{max} , devido a maior necessidade hídrica da cultura nesta fase de crescimento e a resposta fotossintética a maior concentração de CO_2 .

Desta maneira, com os ajustes na V_{max} o modelo representou bem as variações nos fluxos de energia, evapotranspiração, rendimento e IAF em elevado CO_2 , quando comparado aos resultados encontrados utilizando tecnologia FACE.

Embora a transpiração seja considerada proporcional à condutância estomática sobre condições ambientais constantes, onde as folhas estão fortemente acopladas com a atmosfera, no ar livre esta relação pode ser mais complexa (Bernacchi *et al*, 2007). As resistências no caminho entre a absorção de água pelas raízes e a transpiração através dos estômatos influenciam a transpiração das folhas, ao passo que resistências adicionais existentes no caminho entre o estômato e a atmosfera podem retroalimentar a evapotranspiração do ecossistema (Bazzaz e Sombroek, 1996). Resistências ocorrem na camada limite da folha, na transferência dentro do dossel, transferência para a camada limite do dossel, e transferência para a camada de mistura entre o dossel e o ar sobrejacente. Por exemplo, no curto prazo a baixa condutância estomática em CO_2 elevado pode aumentar a temperatura da folha e, por sua vez o déficit de pressão de vapor, que tendera a incrementar a transpiração, compensando parcialmente a resposta da condutância estomática às concentrações de CO_2 elevado. Em mais longo prazo, a conservação da umidade do solo, devido à diminuição da condutância estomática pode resultar em aumento do crescimento da folha e, por sua vez, maior transpiração. Assim pode-se diminuir ou eliminar um efeito de longo prazo da diminuição da condutância estomática na evapotranspiração no ecossistema (Bernacchi *et al*, 2007).

A figura 24 apresenta a evaporação (EV) do solo para todas as simulações durante o ciclo da soja em concentrações de elevado CO₂.

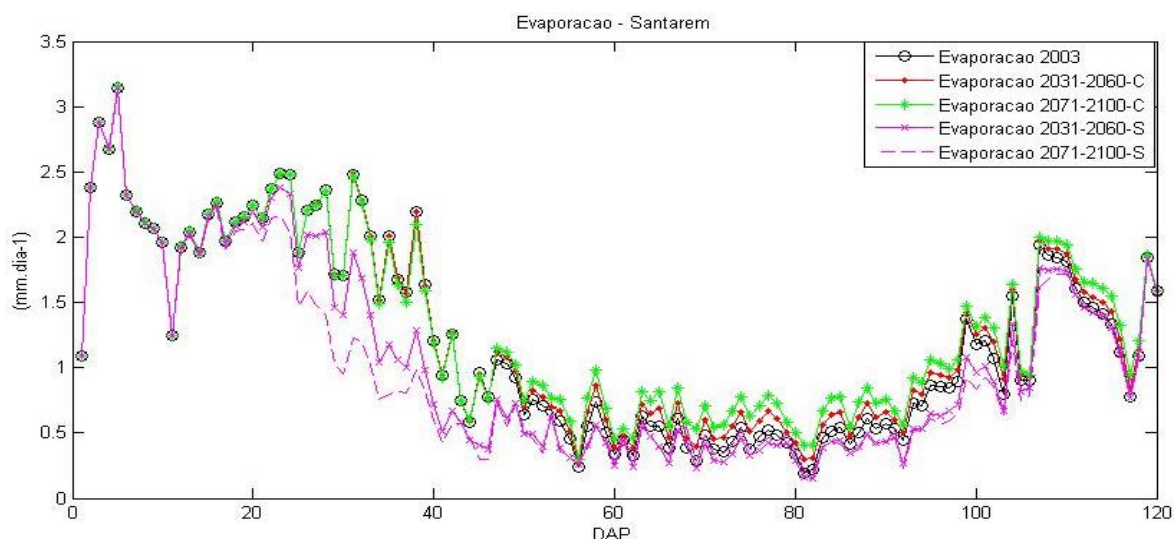


Figura 24: Evaporação simulada para os dias de permanência da cultura no campo (média diária).

Nas simulações com a Vmax padrão o Inland-Agro apresentou redução na evaporação, com valores de -12,9% e -18,0% em CO₂ elevado de 513ppm e 801pp, respectivamente. Mas quando a Vmax foi ajustada para os valores de $20 \times 10^{-6} \text{ mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ e $13 \times 10^{-6} \text{ mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ o modelo representou aumentos na evaporação, com valores de 4,12% e 8,1%, respectivamente. Também se observou redução mais acentuada dos 20 até os 45 dias após o plantio, nas simulações sem ajuste na Vmax, devido ao aumento no IAF da cultura e conseqüentemente maior cobertura do solo pelas plantas e aumento na transpiração.

A figura 25 mostra as variações percentuais nos fluxos de evapotranspiração, transpiração e evaporação das simulações em concentrações de CO₂ elevado. As descrições C1S, C2S, C1C e C2C significam concentração de CO₂ atmosférica de 513ppm com Vmax padrão, concentração de CO₂ atmosférica de 801ppm com Vmax padrão, concentração de CO₂ atmosférica de 513ppm com Vmax ajustado e, concentração de CO₂ atmosférica de 801ppm com Vmax ajustado, respectivamente.

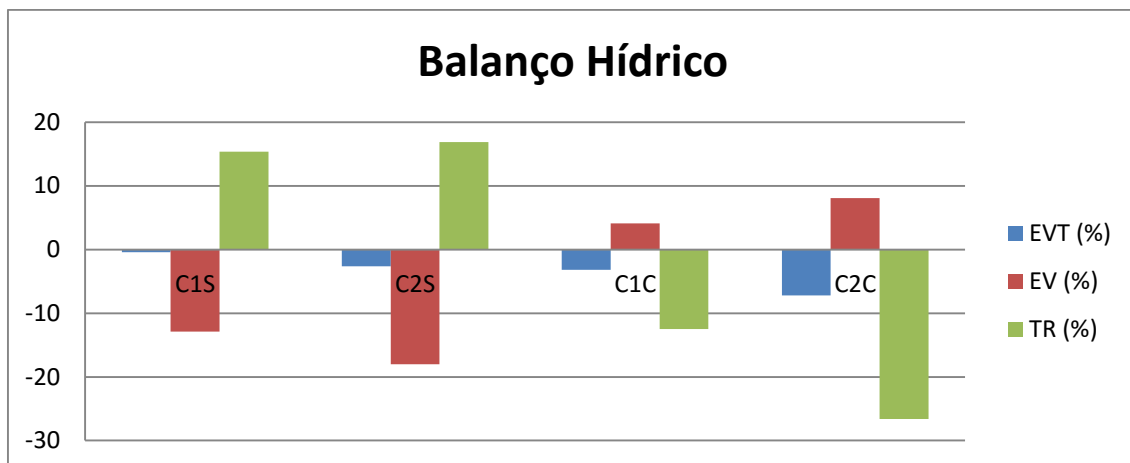


Figura 25: Variação na evapotranspiração para os dias de permanência da cultura no campo em CO₂ elevado.

O modelo simulou aumento na transpiração e redução na evaporação com a V_{max} padrão, já quando a V_{max} é ajustada aos valores descritos no item 4.6 o efeito é contrário, diminuindo a transpiração e aumentando a evaporação, mesmo com estas variações o Inland-Agro calcula redução na evapotranspiração em todas as simulações.

Embora os modelos de vegetação dinâmica sejam ferramentas apropriadas para representar as potenciais respostas dos ecossistemas às mudanças ambientais (Sitch *et al.*, 2003; Krinner *et al.*, 2005), os resultados deste trabalho e alguns outros, tais como o de Twine *et al.* (2007), mostram a necessidade de parametrizar apropriadamente, os modelos de simulação de ecossistemas agrícolas e naturais, com o objetivo de representar melhor os processos influenciados pelos cenários climáticos em condições de elevadas concentrações de CO₂, em especial as potencialidades da aclimação.

5.4.2. Simulação com CO₂ e temperatura aumentando

Na figura 26 são apresentados as variações no rendimento e IAF dos resultados do modelo Inland-Agro considerando os efeitos combinados de CO₂ elevado e o aumento da temperatura, projetada pelo modelo climático Hadgem2ES, segundo os resultados do cenário RCP8.5. Na figura a ausência de barras significa perda total da cultura da soja.

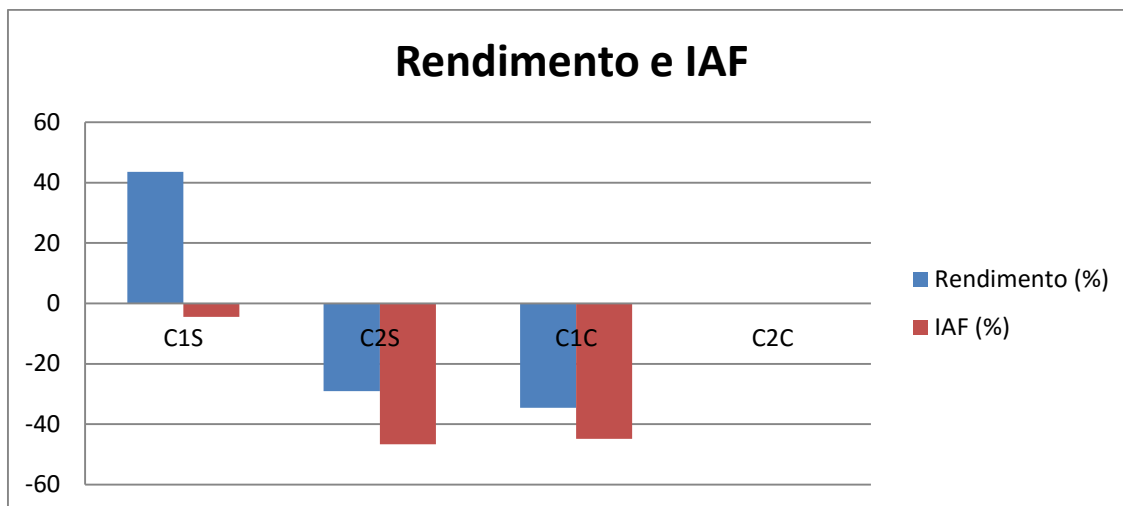


Figura 26: Variações percentuais no balanço de energia em CO₂ elevado e temperatura aumentando.

Com o aumento na concentração de CO₂ atmosférico, espera-se aumento no rendimento das culturas agrícolas, especialmente nas espécies C₃. Este aumento de CO₂ também poderá intensificar o efeito estufa da atmosfera e, conseqüentemente a temperatura do ar tenderá a aumentar, podendo diminuir e até mesmo anular os efeitos benéficos atribuídos ao aumento na concentração de CO₂ atmosférico (Streck, 2005). Nas simulações desenvolvidas com o modelo Inland-Agro foi possível verificar que o aumento na temperatura afetou negativamente o rendimento e o IAF, tanto para as simulações com a V_{max} ajustada como nas simulações onde a V_{max} foi mantida no valor padrão. A simulação com CO₂ elevado em 513ppm e sem ajuste na V_{max}, apresentou aumento no rendimento de 43,6%, observando-se apenas redução dos efeitos benéficos devido ao aumento na concentração de CO₂ atmosférico. Isto aconteceu porque o modelo superestimou o rendimento da cultura em CO₂ elevado. Na simulação com CO₂ elevado em 801ppm e a V_{max} ajustada, que apresenta aumento na temperatura média de 6,7 °C, o modelo simulou perda total no ecossistema da soja. Nas outras simulações os efeitos benéficos do CO₂ elevado, foram anulados com os aumentos de temperatura projetados pelo modelo Hadgem2ES. Essa queda na produtividade foi devido aos efeitos das temperaturas altas na fotossíntese, que diminuíram a assimilação de carbono pela cultura de soja, decorrente do encurtamento das fases fenológicas e aumento da taxa de respiração de manutenção (Oliveira., 2007; Silva Júnior.,2007) e, ao ajuste na V_{max}, que limitou a assimilação de CO₂ nestas

condições. Com o aumento da temperatura o modelo simulou o encurtamento do ciclo vegetativo em 15 dias devido às mudanças nos graus dias de crescimento.

Existe uma temperatura ótima para o pleno desenvolvimento de cada espécie de planta, onde é o ponto em que as capacidades das etapas da fotossíntese estão equilibradas. É neste ponto que as mais altas taxas fotossintéticas se manifestam. Incrementos da temperatura acima do valor ótimo para a cultura, diminui o estado de ativação da rubisco e a sua especificidade de CO₂ com relação ao O₂, resultando em grandes perdas de CO₂ pela fotorrespiração, diminuindo a assimilação líquida do CO₂. O rendimento quântico também é afetado com o aumento da temperatura, estimulando a fotorrespiração, exigindo maior demanda de energia para fixar CO₂ pela planta (Taiz e Zeiger, 2004).

Reações bioquímicas fotossintéticas são sensíveis as variações na temperatura e, são mais pronunciadas em concentrações de elevado CO₂, quando existe um amplo suprimento de CO₂ nos sítios de carboxilação, limitando a taxa fotossintética devido as reações bioquímicas conectadas com o transporte de elétrons. Nestas condições, as alterações de temperatura tem efeitos grandes sobre as taxas de fixação de CO₂ nas plantas (Taiz e Zeiger, 2004).

Temperaturas acima de 36 °C e abaixo de 18 °C são conhecidas por reduzir a exportação de hidratos de carbono através do floema, resultando em queda na aclimatação em atmosfera enriquecida com CO₂. No entanto, as consequências reais de aumento da temperatura (acima de 35 °C), associada com o aumento da concentração de CO₂ atmosférico, são difíceis de prever apenas com essa interação, uma vez que ela também é influenciada por outras variáveis ambientais (Reddy *et al.*; 2010).

Morison e Lawlor (1999) também mencionam que a especificidade da rubisco em CO₂ com relação a O₂ diminui com o aumento da temperatura.

VU *et al.* (1997) reportaram que a taxa fotossintética em arroz e soja crescendo em uma concentração de CO₂ de 660ppm foi máxima em 35 °C e 32 °C, respectivamente, diminuindo quando estas temperaturas foram ultrapassadas.

Segundo Oliveira *et al* (2013) reduções no rendimento da soja projetadas para o período de 2041-2060 esta associado com o encurtamento da fase

fenológica da cultura, devido às mudanças nos graus dias de crescimento pelo aquecimento climático. Além disso, se as temperaturas estão acima do faixa ideal da cultura, a função de temperatura do modelo penaliza a assimilação de carbono.

Em temperaturas elevadas a soja floresce antes do tempo e diminui o tamanho da planta, e a maturação também pode ser acelerada. Temperaturas elevadas associadas com alta umidade podem diminuir a qualidade das sementes e quando associadas com umidade baixa as sementes ficam predispostas a danos mecânicos durante a colheita (Embrapa, 2007). Estes efeitos que afetam o rendimento da cultura não são contemplados pelo modelo Inland-Agro.

Aumentos na temperatura do ar previstos pelo modelo de circulação global Hadgem2ES, se acontecerem, afetara negativamente o rendimento da cultura da soja na localidade em estudo, segundo as projeções geradas pelo modelo Inland-Agro, desconsiderando qualquer evolução tecnológica, tanto no manejo da cultura quanto no seu melhoramento genético, mesmo em condições de CO₂ elevado.

Na figura 27 são apresentados as variações percentuais no balanço de energia dos resultados do modelo Inland-Agro considerando os efeitos combinados do CO₂ elevado e o aumento da temperatura projetada pelo modelo climático Hadgem2ES segundo o cenário RCP8.5.

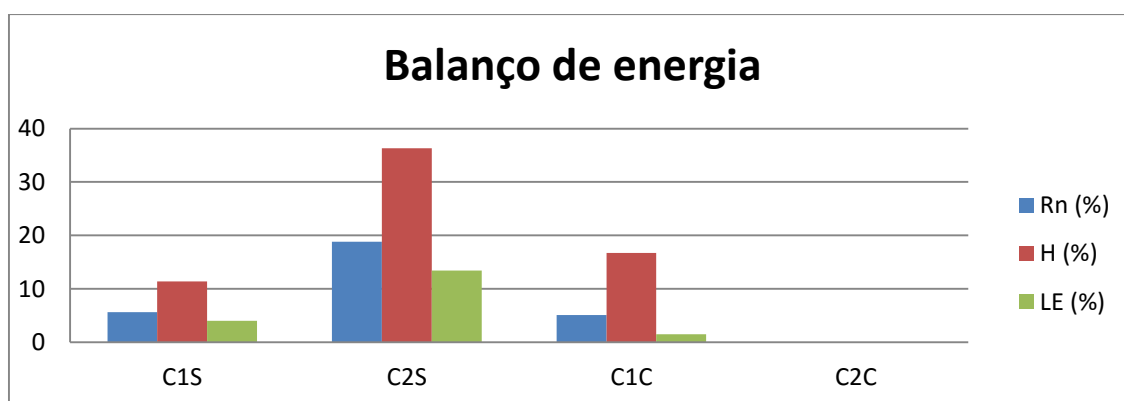


Figura 27: Variações percentuais no balanço de energia em CO₂ elevado e temperatura aumentando.

Os fluxos de calor latente e sensível aumentaram em todas as simulações. Nas simulações com CO₂ elevado em 513ppm e a V_{max} ajustada apresentaram valores de 16,7% e 1,5%, respectivamente. Os maiores aumentos foram encontrados nas simulações com CO₂ elevado em 801ppm e V_{max} padrão, com 36,3% e 13,4% para os fluxos de calor latente e sensível, respectivamente. O fluxo de calor latente aumentou em resposta ao aumento da evapotranspiração, dominada pela evaporação do solo, isto aconteceu devido ao incremento na temperatura e conseqüentemente aumento na demanda evaporativa. O fluxo de calor sensível aumentou em decorrência do incremento na temperatura do ar. O saldo de radiação aumentou em resposta aos aumentos nos fluxos de calor latente e sensível.

Na figura 28 são apresentados as variações percentuais no balanço hídrico dos resultados do modelo Inland-Agro, considerando os efeitos combinados de CO₂ elevado e o aumento da temperatura projetada pelo modelo climático Hadgem2ES segundo o cenário RCP8.5.

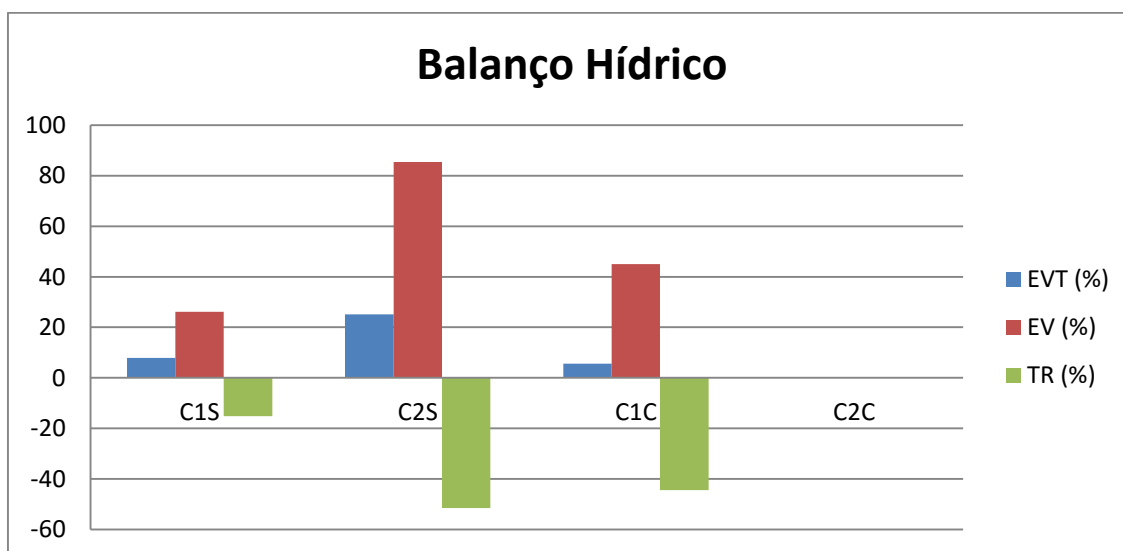


Figura 28: Variações percentuais no balanço hídrico em CO₂ elevado e temperatura aumentando.

O Inland-Agro simulou aumentos nos fluxos de evapotranspiração e evaporação em todas as simulações e redução nas taxas de transpiração, sendo mais acentuadas nas simulações com CO₂ elevado em 801ppm e sem ajuste na V_{max}, com valores de 25,1% e 85,4% na evapotranspiração e evaporação, respectivamente, e variação de -51,5% na transpiração.

A evapotranspiração é uma das principais componentes do ciclo hidrológico, responsável pelo maior volume de água transportado para a atmosfera e, de muita importância na regulação do fluxo de calor latente (Santos, 2009). Embora a demanda evaporativa da atmosfera possa ter aumentado com os incrementos da temperatura do ar, o modelo simulou redução na transpiração em todos os cenários, devido a diminuição do IAF e pelo efeito de fechamento parcial e provavelmente uma melhor eficiência no uso da água ter acontecido, em resposta aos aumentos na concentração de CO₂ atmosférico e temperatura do ar.

O conhecimento da evapotranspiração máxima das culturas agrícolas nas diferentes fases de desenvolvimento e em todo o seu ciclo é de extrema importância no manejo da água na atividade agrícola. Em cultivos não irrigados, como na maioria das áreas plantadas com soja, esta informação é de muita utilidade na hora de tomada de decisões na adoção de práticas culturais que permitam o melhor uso da água disponível em cada localidade, tais como: melhor época de semeadura, evitar que os períodos críticos de exigência hídrica coincidam com períodos de menor disponibilidade de água para cultura (Embrapa, 2007).

A figura 29 mostra as projeções da temperatura pelo modelo climático Hadgem2ES para as médias climatológicas de 1971-2000, 2031-2060, 2071-2100 no cenário RCP 8.5, juntamente com a média mensal para os dados observados para o ano 2003.

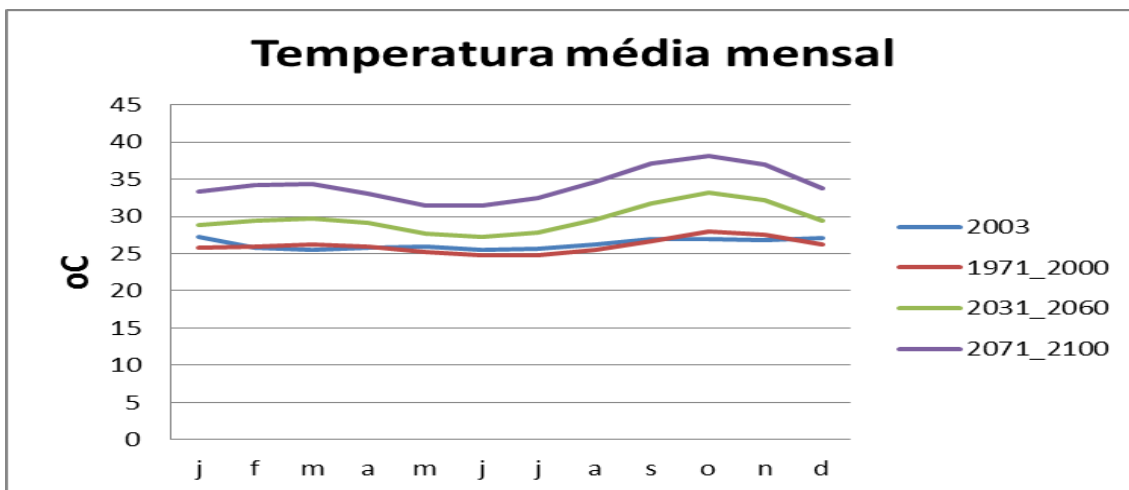


Figura 29: Temperatura média mensal projetada pelo Hadgem2ES para as médias climatológicas.

O Hadgem2ES projeta uma leve variação da temperatura na média climatológica 1971-2000 em comparação aos dados observados para o ano 2003. Para as medias climatológicas 2031-2060 e 2071-2100 nos meses de abril até agosto, período de cultivo da soja, os dados projetam aumento da temperatura em 2,1 °C e 6,7 °C, respectivamente.

Respostas do desenvolvimento da planta e crescimento da biomassa pelo aumento na concentração de CO₂ atmosférico a diferentes temperaturas não são esperadas apenas de uma análise de processos fotossintéticos. Avaliações da resposta ao aumento da concentração de CO₂ em diferentes regimes de temperatura são muito importantes, no entanto, outros aspectos do ambiente como luz, água e fornecimento de nutrientes, são obviamente críticos na avaliação e interpretação dos efeitos do aumento de CO₂, de modo que os impactos das interações CO₂ e temperatura não devem ser consideradas isoladamente (Morison e Lawlor, 1999). Em função disso, aprofundamos as análises com o modelo Inland-Agro considerando as variações de outros elementos climáticos além da temperatura e que são mostrados nas próximas seções.

5.4.3. Simulação com CO₂ aumentando e precipitação diminuindo

A figura 30 mostra as projeções da precipitação media mensal do modelo Hadgem2ES para as médias climatológicas 1971-2000, 2031-2060 e 2071-2100

no cenário RCP 8.5, juntamente com a média mensal para os dados observados para o ano 2003.

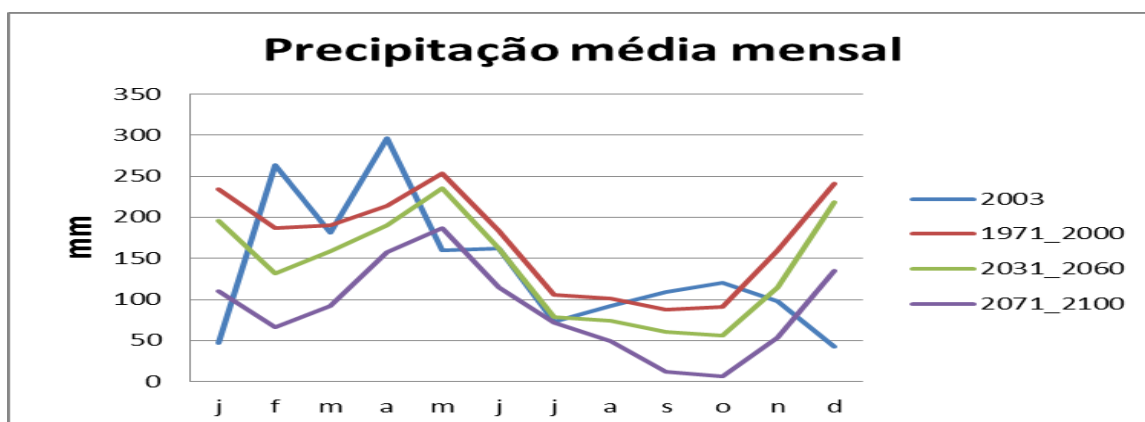


Figura 30: Precipitação média mensal projetada pelo Hadgem2ES para as médias climatológicas.

A água constitui aproximadamente 90% do peso da planta e, o seu consumo pela cultura da soja depende, além da fase fenológica, da demanda evaporativa da atmosfera. A necessidade de água aumenta com o desenvolvimento da cultura e, a sua disponibilidade hídrica é importante, principalmente em dois períodos de desenvolvimento: germinação-emergência e floração-enchimento de grãos. A água além de estar presente em todos os processos fisiológicos e bioquímicos, cumpre uma função importante na regulação térmica, agindo tanto no resfriamento como na manutenção e distribuição de calor (Embrapa, 2007).

Alguns estudos avaliando as interações na disponibilidade de água com concentrações elevadas de CO₂ atmosférico mostram que haverá um fechamento parcial dos estômatos devido ao incremento na concentração de CO₂ na cavidade subestomática, diminuindo a pressão parcial de CO₂ na folha e, esta resposta estomática, poderá melhorar a eficiência do uso da água na folha e na planta. No entanto o CO₂ elevado pode induzir à redução na condutância estomática e incrementar a condutância hidráulica em toda a planta. Assim a diminuição na condutância estomática pode ser compensada pelo aumento da área foliar, raízes e biomassa nas plantas cultivadas e, portanto, o uso da água pela planta pode não ser proporcional à condutância estomática (Wullschlegler *et al.*; 2002).

O cenário mais afetado pela redução na precipitação (década climatológica 2071-2100) projetou uma queda de 25,9% na chuva em comparação aos dados observados, apresentando 582,1 mm de chuva no período de cultivo (abril-agosto). Incrementos na eficiência no uso da água e reduções no seu uso podem contribuir para melhorar o conteúdo de água no solo em condições de CO₂ elevado (Wullschleger *et al.*; 2002).

Nas simulações considerando a diminuição da precipitação anual conforme projetada pelo Hadgem2ES, no cenário RCP8.5, não houve efeito significativo no desenvolvimento da cultura. Isso se deve ao fato que a redução da precipitação não foi suficiente para promover um déficit de hídrico do solo que ficasse abaixo das recomendações de água requerida para obtenção do máximo rendimento da cultura de soja, que varia entre 450 a 800mm/ciclo. Nestas simulações nenhuma variável em estudo foi afetada significativamente. Resultados similares foram encontrados por Oliveira *et al* (2013) no rendimento da soja em resposta a mudanças climáticas modeladas para o período 2041-2060 na Amazônia, para o cenário A2, onde relatam que a diminuição na produtividade da soja não está associada com mudanças na precipitação, e que o efeito fisiológico do CO₂ é suficiente para mitigar os efeitos das condições climáticas futuras sobre a produtividade.

A distribuição uniforme da precipitação é um fator muito importante na obtenção de altos rendimentos na cultura da soja, principalmente nos estádios de maior demanda hídrica como a floração e enchimento de grãos. (Embrapa, 2007). Após 80 dias de plantio a redução da precipitação tanto na quantidade quanto na distribuição, e que se intensificou no cenário RCP 8.5, não foi suficiente para limitar o rendimento da soja, mas a manutenção do conteúdo de água no solo foi fundamental para garantir o rendimento da cultura em níveis satisfatórios.

5.4.4. Simulação com CO₂ e radiação solar aumentando

Na figura 31 mostra as variações percentuais dos resultados das simulações utilizando o modelo Inland-Agro, considerando a concentração elevada de CO₂ e aumento na radiação solar incidente projetada pelo modelo Hadgem2ES.

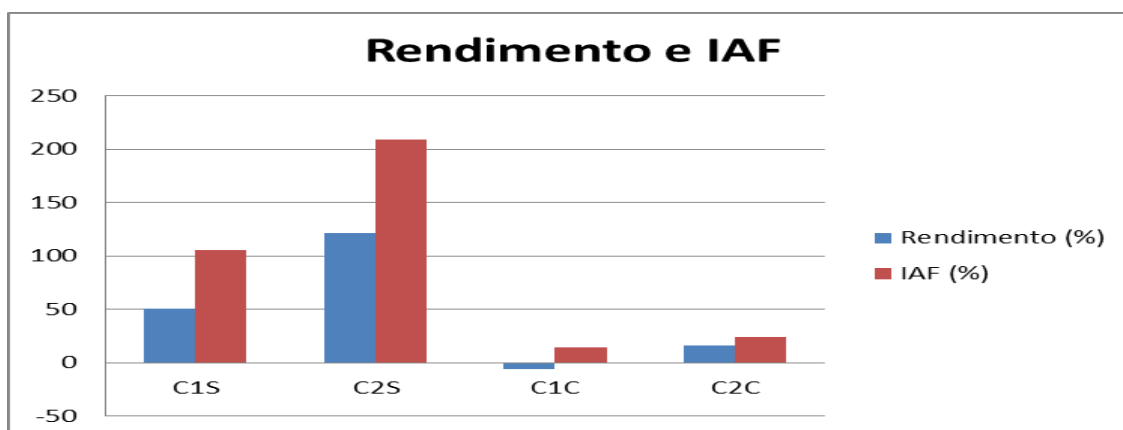


Figura 31: Variações percentuais no rendimento e IAF em CO₂ elevado e onda curta aumentando.

As plantas estão sujeitas a mudanças constantes de intensidade de luz no ambiente. A fim de manter o máximo de fotossíntese em todos os níveis de luz e para evitar danos por uma maior excitação por luz, a planta deve ser capaz de regular a distribuição da entrada de energia. Fisiologicamente esta regulação é conseguida muitas vezes pelo movimento da folha e cloroplastos e, em escala molecular pode ser observado como alterações estequiométricas nos fotossistemas, concentração dos componentes de transporte de elétrons e o tamanho da antena (Demming *et al.*; 1987).

A resposta fotossintética a fluxos fotônicos mais altos é a saturação por luz. Aumentos no fluxo fotônico após a saturação não afetam mais as taxas fotossintéticas, indicando que outros fatores, tais como a taxa de transporte de elétrons, atividade da rubisco ou o metabolismo de trioses fosfato tornam-se limitantes a fotossíntese. Quando as folhas são expostas a uma quantidade de luz maior do que podem regular, o centro de reação do fotossistema II é inativado e danificado, constituindo um fenómeno denominado fotoinibição. Esta fotoinibição pode ser ocasionada pelo desvio da energia luminosa absorvida em direção a dissipação de calor, resultando em diminuição da eficiência quântica (Taiz e Zeiger, 2004).

Com base nos resultados pode-se verificar que o aumento na radiação solar incidente (onda curta) afeta o rendimento da cultura em todas as simulações, diminuindo os efeitos benéficos do aumento na concentração de CO₂ atmosférico, isto pode ser verificado comparando com as simulações em

que apenas o aumento do CO₂ atmosférico foi considerado (Ver tabela 09 no anexo A).

Nas simulações com o cenário futuro (RCP 8.5) e com ajuste na V_{max}, verifica-se que o aumento na radiação solar incidente afetou o rendimento da cultura com maior intensidade. Na simulação com CO₂ elevado em 513ppm observa-se que o aumento da radiação solar incidente, afetou o rendimento da cultura em -5,5%, quando comparado a simulação para o ano 2003, reduzindo o efeito benéfico do CO₂ elevado de 12,7% mostrado na simulação com apenas o CO₂ aumentando (discutido no item 5.4.1.1). Já na simulação com CO₂ elevado em 801ppm, verificou-se diminuição dos efeitos benéficos do CO₂ elevado, apresentando apenas 16,4% de aumento no rendimento em comparação aos 36,4% de aumento no rendimento da cultura, nas simulações em que apenas aumentos na concentração de CO₂ atmosférico foram considerados. Estes resultados provavelmente mostram o efeito da fotoinibição devido ao excesso de luz absorvida, afetando a eficiência quântica.

Na figura 32 mostra as variações percentuais dos resultados utilizando o modelo Inland-Agro, dos fluxos de calor latente, sensível e saldo de radiação considerando a concentração elevada de CO₂ e aumento na radiação solar incidente projetada pelo modelo climático Hadgem2ES.

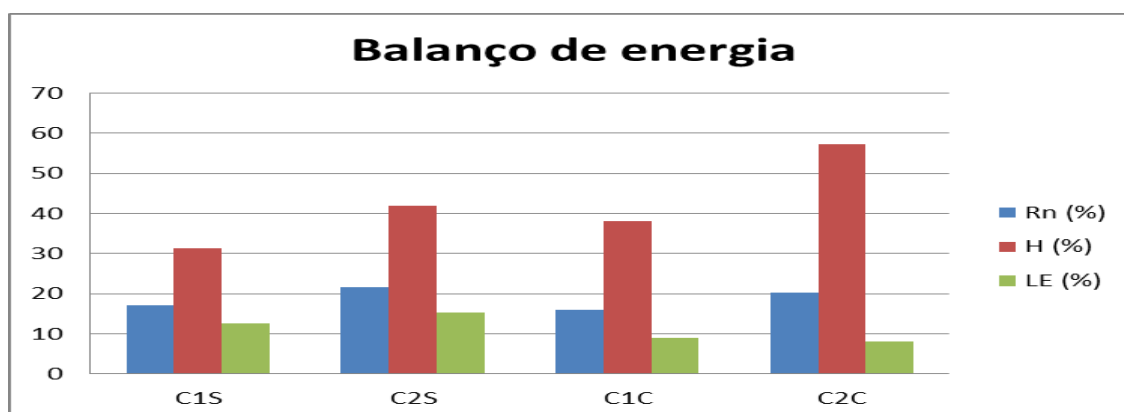


Figura 32: Variações no balanço de energia em CO₂ elevado e onda curta aumentando.

Os fluxos de calor latente, sensível e saldo de radiação aumentam em todas as simulações, devido a maior disponibilidade de energia no ambiente. Maior destaque é observado no fluxo de calor sensível na simulação com CO₂

elevado em 801ppm e ajuste na Vmax, devido ao fluxo de calor no solo ter diminuído, como pode ser verificado na tabela 06 do anexo A.

Na figura 33 mostra as variações percentuais dos resultados utilizando o modelo Inland-Agro, do balanço hídrico considerando a concentração elevada de CO₂ e aumento na radiação solar incidente projetada pelo modelo climático Hadgem2ES.

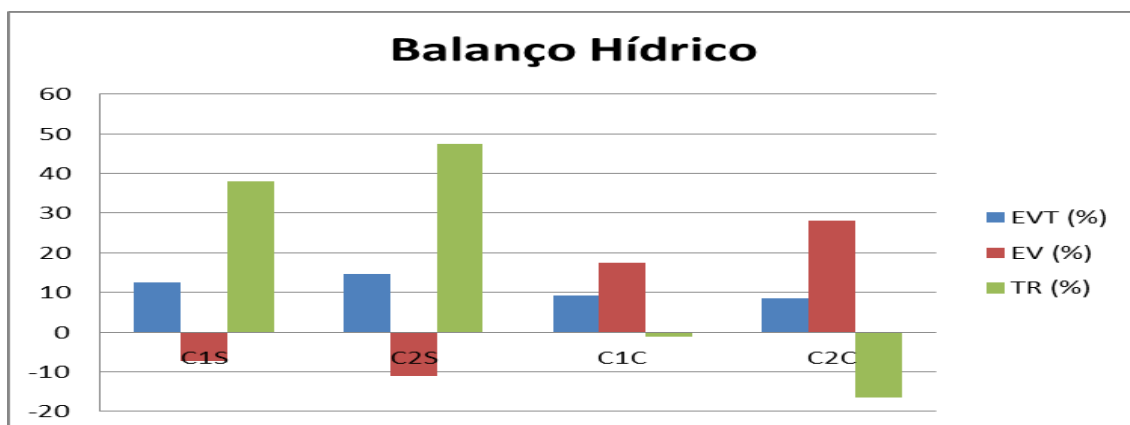


Figura 33: Variações no balanço hídrico em CO₂ elevado e onda curta aumentando.

O modelo Inland-Agro projeta aumento da evapotranspiração em todas as simulações, com pequenas variações entre elas. Redução na evaporação nas simulações sem ajuste na Vmax, diferentemente das simulações com ajuste na Vmax que apresentam aumento na evaporação. A transpiração aumenta nas simulações sem ajuste na Vmax e diminui nas simulações com ajuste na Vmax. Nestes resultados observamos o mesmo padrão de comportamento que nas simulações em que apenas o aumento na concentração de CO₂ atmosférico foi considerado, com a diferença que a evapotranspiração aumenta em todas as simulações.

As simulações com CO₂ elevado e Vmax padrão, apresentaram aumentos na transpiração em 37,9 e 47,4%, respectivamente, incrementos maiores que nas simulações em que apenas o aumento na concentração de CO₂ atmosférico foi considerado (15,4 e 16,9%). Já nas simulações com ajuste na Vmax em CO₂ elevado em 513ppm e 801ppm, a transpiração diminuiu em -1,2 e -16,4, respectivamente, com menores impactos que nas simulações em que apenas os incrementos de CO₂ foram considerados (-12,5 e -26,6%). Isto

acontece porque o modelo superestima a alocação de biomassa na cultura em CO₂ elevado utilizando a Vmax padrão.

Nestas simulações também observa-se a necessidade de que no modelo Inland-Agro, seja incorporada uma função que permita representar respostas de adaptação da cultura da soja às mudanças climáticas.

A figura 34 mostra as projeções da radiação solar incidente (onda curta) do modelo climático Hadgem2ES para as médias climatológicas 1971-2000, 2031-2060 e 2071-2100 no cenário RCP 8.5, juntamente com a media mensal para os dados observados para o ano 2003.

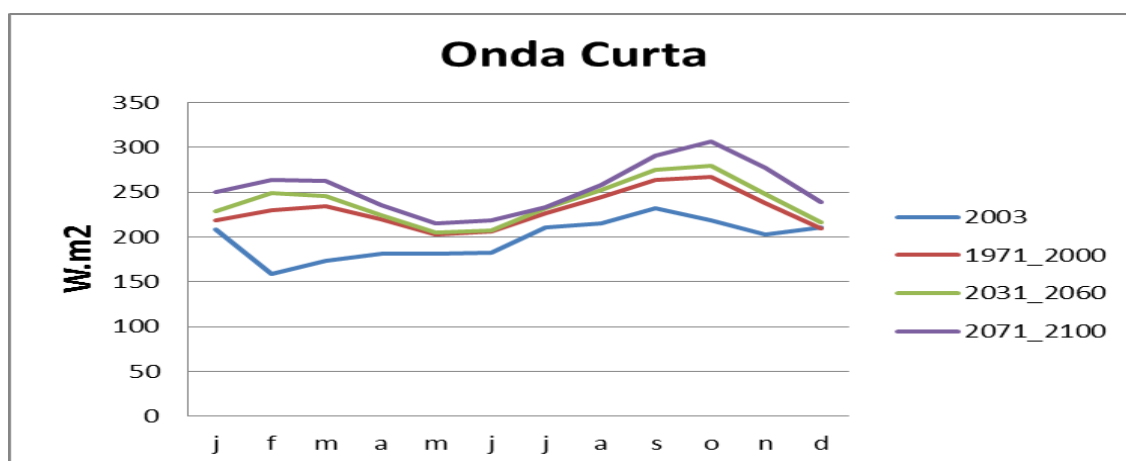


Figura 34: Projeções de onda curta em CO₂ elevado.

O Hadgem2ES projeta aumentos no fluxo de onda curta nas medias climatológicas 1971-2000, 2031-2060 e 2071-2100 em comparação aos dados observados para o ano 2003, de 36,9, 42,1 e 50,7 W/m² respectivamente, durante todo o ciclo da cultura.

5.4.5. Simulação com CO₂ aumentando e umidade relativa diminuindo

Na figura 35 são apresentados as variações dos resultados considerando a concentração elevada de CO₂ e a diminuição da umidade relativa atmosférica conforme projetado pelo modelo climático Hadgem2ES para o cenário RCP8.5.

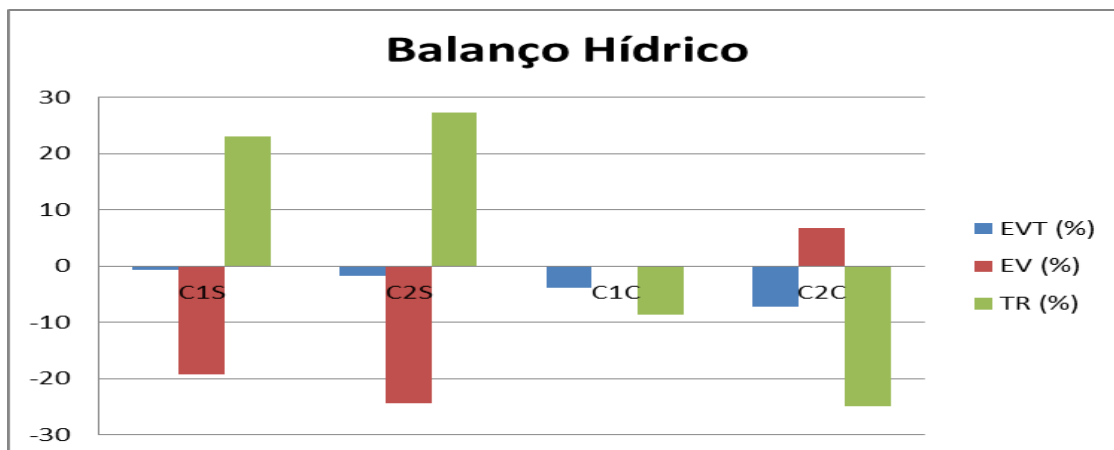


Figura 35: Variações no balanço hídrico em CO₂ elevado e umidade relativa diminuindo.

A umidade do ar influencia o déficit de pressão de vapor, aos quais os estômatos das folhas são sensíveis (Barnard e Ryan, 2003). Quando a umidade do ar diminui a demanda evaporativa da atmosfera aumenta e consequentemente favorece o déficit de pressão de vapor, aumentando a transpiração das plantas. Nas simulações sem ajuste na V_{max} observa-se aumento na transpiração, devido à diminuição na umidade relativa na atmosfera. Quando a V_{max} foi ajustada simulando aclimação pela cultura, o modelo Inland-Agro projeta redução na transpiração, isto ocorre como consequência da diminuição da condutância estomática das folhas e fechamento parcial dos estômatos, diminuindo o transporte de água pelas plantas para a atmosfera em elevadas concentrações de CO₂ atmosférico (Bernacchi *et al*, 2007; Ainsworth e Long, 2004 e Twine *et al*, 2007). Também o modelo representou reduções nos fluxos de evaporação e evapotranspiração em todas as simulações, com exceção da simulação com CO₂ elevado em 801ppm e ajuste na V_{max}, que calcula aumento na evaporação do solo de 6,7%, devido à redução da umidade relativa do ar em 31,9%.

Na figura 36 são apresentados as variações dos resultados do modelo Inland-Agro para o balanço de energia, considerando a concentração elevada de CO₂ e a diminuição da umidade relativa atmosférica conforme projetado pelo modelo climático Hadgem2ES para o cenário RCP8.5.

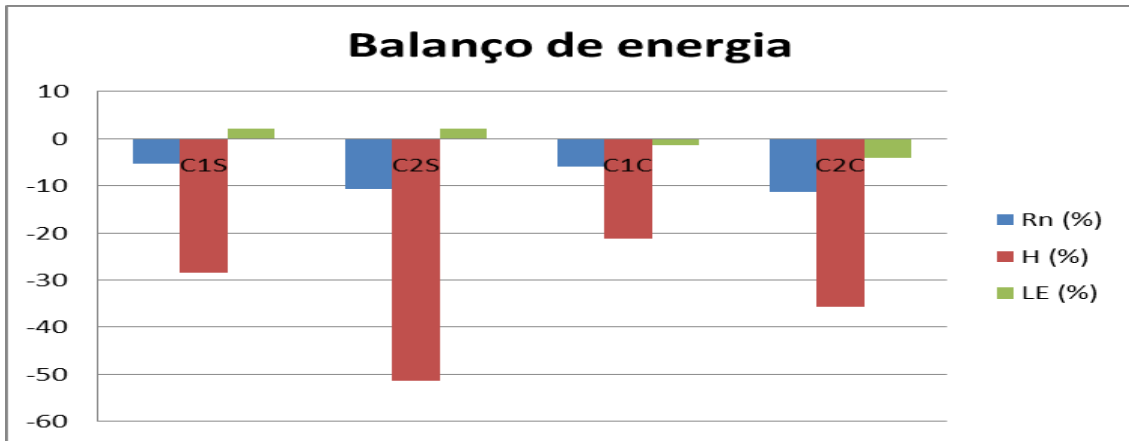


Figura 36: Variações no balanço de energia em CO₂ elevado e umidade relativa diminuindo.

Nas simulações sem ajuste na Vmax o fluxo de calor latente aumenta em pequena proporção, já quando a Vmax foi ajustada o fluxo de calor latente diminuiu como resultado da redução na evapotranspiração, como observado na figura 35. O fluxo de calor sensível diminuiu em grande proporção, devido ao investimento de uma maior parcela de energia no fluxo de calor no solo como pode ser observado na tabela 21 no anexo A. Por outro lado o saldo de radiação foi afetado negativamente em todas as simulações, em resposta a redução da umidade relativa atmosférica, que é um componente muito importante na absorção e reflexão da radiação solar incidente e na retenção da radiação terrestre.

Na figura 37 são apresentados as variações dos resultados do modelo Inland-Agro para o rendimento e IAF, considerando a concentração elevada de CO₂ e a diminuição da umidade relativa atmosférica conforme projetado pelo modelo climático Hadgem2ES para o cenário RCP8.5.

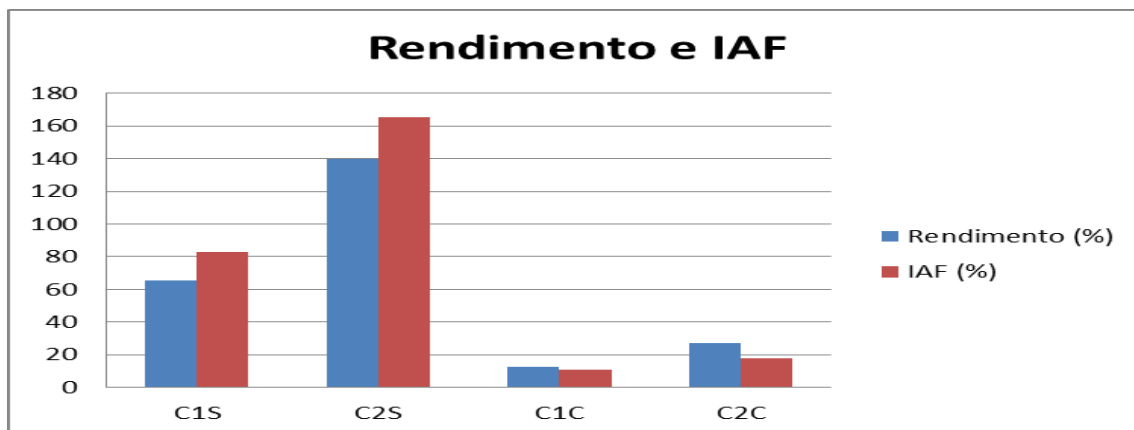


Figura 37: Variações no rendimento e IAF em CO₂ elevado e umidade relativa diminuindo.

A fotossíntese de uma cultura é proporcional à taxa de transpiração, multiplicada pelo déficit de pressão de vapor e dividido pelo coeficiente de eficiência de transpiração (Tanner e Sinclair, 1983). Com a redução da umidade relativa do ar, observam-se aumentos no rendimento em todas as simulações, com maior intensidade nas simulações utilizando a V_{max} padrão, que apresentam aumentos de 65,5 e 140%, para as concentrações de CO₂ atmosférico de 513ppm e 801ppm, respectivamente. Mesmo o modelo superestimando o rendimento da cultura em condição de CO₂ elevado, percebe-se diminuição do efeito benéfico com a redução da umidade relativa, como pode ser observado quando comparado nas simulações que consideram apenas o CO₂ aumentando, que simulam aumentos de 69,1 e 160% em CO₂ elevado em 513ppm e 801ppm, respectivamente.

Nas simulações com ajustes na V_{max}, o modelo apresentou aumentos no rendimento da cultura de 12,7 e 27,3%, mesmo com reduções na transpiração em 8,6 e 24,9%, em CO₂ elevado em 513ppm e 801ppm, respectivamente, produto do efeito no ajuste da V_{max} na aclimação da cultura. O efeito negativo da umidade relativa no rendimento foi percebido apenas para as simulações com CO₂ elevado em 801ppm, quando comparadas às simulações considerando apenas o CO₂ elevado, que apresentaram aumentos no rendimento da cultura de 12,7 e 36,4%, respectivamente.

O Inland-Agro simulou aumentos no IAF, respondendo positivamente aos incrementos na concentração de CO₂ atmosférico e à redução da umidade relativa. Nas simulações com V_{max} padrão o modelo superestima aumentos no IAF de 82,7 e 165,1%, já nas simulações com a V_{max} ajustada o modelo

apresentou aumentos de 10,8 e 17,7% em CO₂ elevado de 513ppm e 801ppm, respectivamente. Estes valores simulados mostram que a redução da umidade relativa potencializa os efeitos benéficos com o aumento da concentração de CO₂ atmosférico, para o IAF, como pode ser verificado na tabela 11 do anexo A.

A figura 38 mostra as projeções, da umidade relativa do ar, do modelo climático Hadgem2ES para as médias climatológicas 1971-2000, 2031-2060, 2071-2100 no cenário RCP 8.5 e a media mensal para os dados observados para o ano 2003.

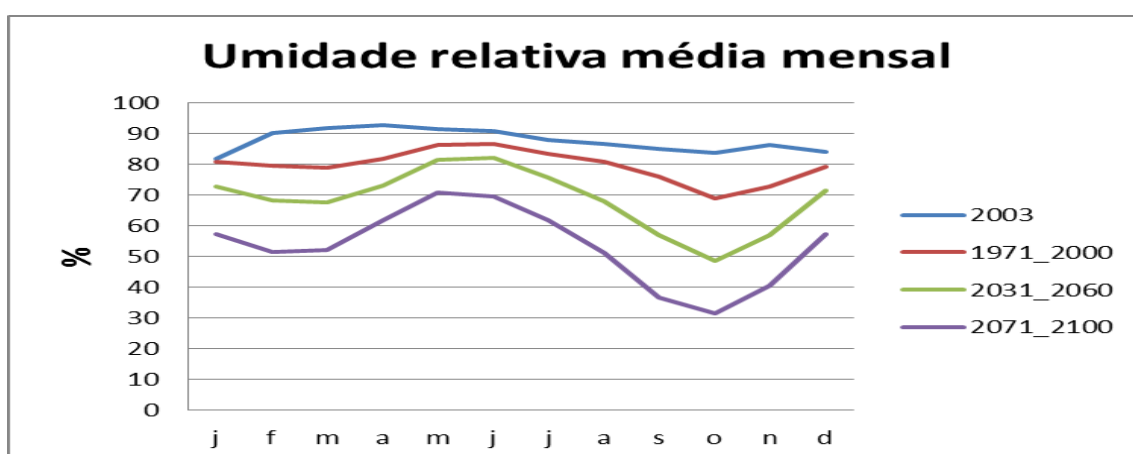


Figura 38: Umidade relativa projetada pelo modelo Hadgem2ES para o cenário RCP 8.5.

O Hadgem2ES projeta reduções na umidade relativa nas medias climatológicas 1971-2000, 2031-2060 e 2071-2100 em comparação aos dados observados para o ano 2003, de 8,4%, 16,7% e 31,9% respectivamente, durante o ciclo da cultura.

5.4.7. Simulação com todas as variáveis em estudo

Na figura 39 são apresentados os resultados no rendimento da cultura e o IAF, considerando todas as variáveis conjuntamente (CO₂ aumentando, temperatura aumentando, precipitação diminuindo, onda curta aumentando, onda longa aumentando e umidade relativa diminuindo) conforme projetado pelo modelo climático Hadgem2ES para o cenário RCP8.5.

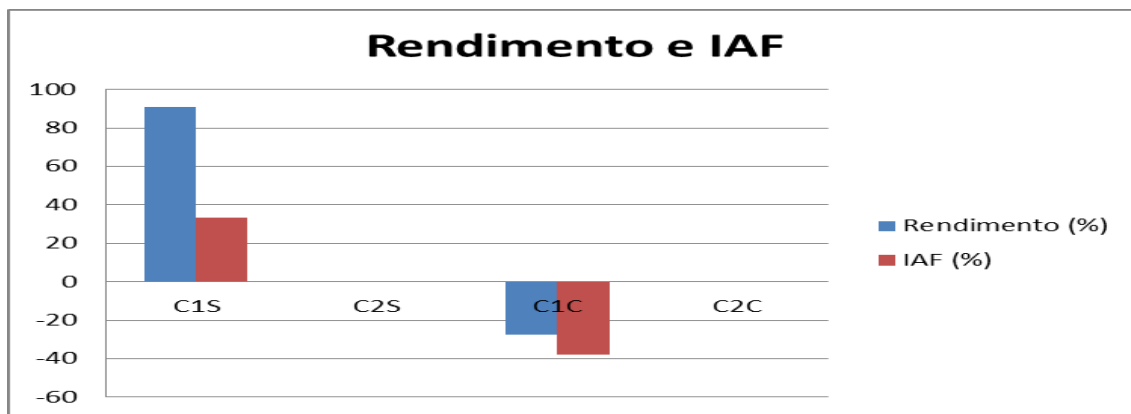


Figura 39: Variações no rendimento e IAF em CO₂ elevado e com todas as variáveis em estudo.

Ecosistemas agrícolas são fortemente influenciados pelas condições meteorológicas e climáticas, basicamente as combinações ambientais solo e clima, controlam o desenvolvimento das plantas, podendo se esperar então que alterações climáticas impactem na produtividade nas culturas agrícolas ameaçando-as ou proporcionando oportunidades para melhoras (Gornall *et al.*, 2010).

O principal efeito da resposta das plantas ao incremento na concentração de CO₂ atmosférico é o aumento na eficiência da utilização de recursos (Drake e Gonzàles-Meler, 1997). Algumas respostas observadas em experimentos de campo foram: redução na condutância estomática, redução na transpiração, melhor eficiência no uso da água, maiores taxas de fotossíntese, aumento da eficiência no uso da radiação fotossinteticamente ativa, aclimatação do aparelho fotossintético na exposição a longos períodos com CO₂ elevado, aumento da eficiência no uso de nutrientes, melhor equilíbrio da água no solo, entre outros (Drake e Gonzàles-Meler, 1997). Todas estas possibilidades, em um mundo de constante aumento na concentração de CO₂ atmosférico e mudanças climáticas têm consequências importantes para ecossistemas agrícolas e naturais.

Com a globalização da agricultura aumentos na produtividade, reduções de custos e de riscos de fracasso passaram a serem condições fundamentais para o sucesso desta atividade (Farias, 2000). Modelos agrícolas dinâmicos podem ser ferramentas de auxílio de tomada de decisões sobre potenciais riscos climáticos futuros que possam vir a ameaçar os ecossistemas agrícolas.

O modelo Inland-Agro, utilizando como forçantes as médias climatológicas das variáveis em estudo mencionadas acima, para a sequência

dos anos 2071-2100 gerada pelo modelo Hadgem2ES, com e sem ajuste na Vmax, o Inland-Agro projetou condições desfavoráveis para o desenvolvimento da cultura da soja nessas condições. Nas medias climatológicas 2031-2060, utilizando o valor padrão na Vmax, observa-se aumento no rendimento da cultura em 90,9%, potencializando-se os efeitos benéficos no aumento da concentração de CO₂ atmosférico, já quando a Vmax foi ajustada, os efeitos benéficos no aumento da concentração de CO₂ atmosférico, foram anulados, mostrando redução no rendimento da cultura de 27,3 %.

O IAF aumentou 33,4% na média climatológica 2031-2060, com a Vmax padrão quando comparado às projeções do ano 2003, mas quando comparado com as projeções em que apenas o aumento do CO₂ é considerado, verificamos que o efeito benéfico do CO₂ é diminuindo em 35,7% no IAF, já nas simulações em que a Vmax foi ajustada, o IAF diminui em 37,7% em comparação ao ano 2003.

Após os resultados obtidos nas simulações utilizando a Vmax padrão e a Vmax ajustada observa-se que é imprescindível a incorporação de uma função de aclimação na estrutura do modelo para obter respostas mais próximas à realidade. As previsões das simulações do modelo Inland-Agro com os ajustes realizados, tanto para validação como para aclimação às potenciais mudanças climáticas, nos permitem ter uma visão dos possíveis impactos no ecossistema da soja em relação às variações climáticas.

Na figura 40 são apresentados os resultados no balanço de energia, considerando todas as variáveis em estudo (CO₂ aumentando, temperatura aumentando, precipitação diminuindo, onda curta aumentando, onda longa aumentando e umidade relativa diminuindo) conforme projetado pelo modelo climático Hadgem2ES para o cenário RCP8.5.

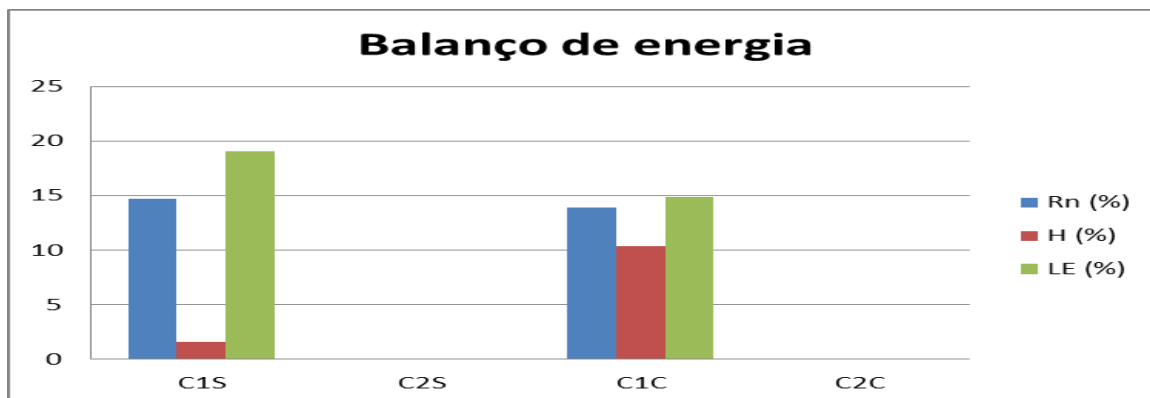


Figura 40: Variação no balanço de energia em CO₂ elevado e com todas as variáveis em estudo.

O modelo projeta aumento nos fluxos de calor latente, sensível e saldo de radiação nas simulações com medias climatológicas 2031-2060. O calor sensível teve maior aumento (10,4%) nas simulações com Vmax ajustada que nas simulações com a Vmax padrão (1,6%), produto da superestimação. O modelo projetou aumento no fluxo de calor latente de 19,1% nas simulações com a Vmax padrão e 14,9% utilizando a Vmax ajustada e, pouca diferença no saldo de radiação como pode ser observado na figura. Este aumento no fluxo de calor latente de 19,1% foi em resposta à maior evapotranspiração projetada pelo modelo para estas condições.

Na figura 41 são apresentados os resultados no fluxo de evapotranspiração, considerando todas as variáveis em estudo (CO₂ aumentando, temperatura aumentando, precipitação diminuindo, onda curta aumentando, onda longa aumentando e umidade relativa diminuindo) conforme projetado pelo modelo de circulação global Hadgem2ES para o cenário RCP8.5.

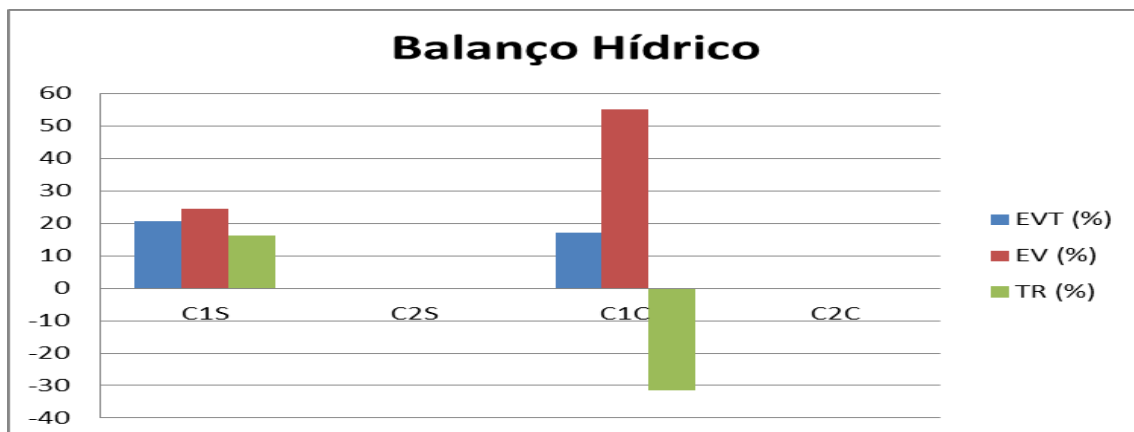


Figura 41: Variação na evapotranspiração em CO₂ elevado e com todas as variáveis em estudo.

O modelo simula maior evapotranspiração para as simulações com V_{max} padrão, em comparação com as simulações com V_{max} ajustada. A transpiração aumentou em 16,3%, produto da superestimação do modelo, devido ao CO₂ elevado, nas simulações com a V_{max} padrão. Nas simulações com a V_{max} ajustada o Inland-Agro simulou redução na transpiração em -37,7%, produto do efeito da redução na V_{max} (aclimatação), diminuindo a condutância estomática das folhas e fechamento parcial dos estômatos (Bernacchi *et al.*, 2007).

Cada variável meteorológica influencia um ecossistema de forma diferente, como vimos nos itens anteriores. Neste item analisamos a resposta do modelo às projeções de temperatura, precipitação, radiação solar incidente, radiação terrestre incidente e umidade relativa, geradas pelo modelo Hadgem2ES para os cenários em estudo.

Consequências exatas dos aumentos na concentração de CO₂ atmosférico são difíceis de prever devido à existência de interativas relações com as variáveis ambientais tais como: temperatura, radiação, disponibilidade de água, luz solar visível e ultravioleta, salinidade e nutrição do solo. Assim efeitos interativos de múltiplos fatores ambientais sobre as respostas de plantas ao aumento de CO₂ requerem de estudos minuciosos (Reddy *et al.*, 2010).

Modelos usam algoritmos interativos para descrever resposta das plantas às condições ambientais e são projetados para replicar taxas e respostas fisiológicas registradas em observações e experimentos de laboratório e campo. Estes algoritmos frequentemente incorporam valores prescritos (parâmetros) que são fixos; eles não mudam, ou seja, não respondem a estímulos ambientais. Por tanto assumem que as plantas não podem se aclimatar às mudanças das

condições ambientais (Smith e Dukes, 2012). É necessário que seja incorporado no modelo Inland-Agro algoritmos que permitam representar respostas de aclimação, da cultura da soja, respondendo a estímulos ambientais tais como CO₂ e temperatura, com variações ao longo da duração da exposição ao estímulo.

Com os resultados projetados pelo modelo Inland-Agro e, desconsiderando qualquer evolução tecnológica, tanto no manejo da cultura quanto no seu melhoramento genético, observa-se que seria praticamente impossível continuar com as plantações de soja na região de Santarém, se acontecessem às mudanças climáticas projetadas pelo Hadgem2ES para as médias climatológicas em estudo.

6. Conclusão

O modelo Inland-Agro representou de forma satisfatória os fluxos de calor latente, sensível, conteúdo de água no solo e evapotranspiração, durante o ciclo da cultura da soja para o ano 2003.

O modelo apresentou dificuldades para representar o fluxo de calor no solo e precisa de melhorias para esta variável.

O modelo respondeu linearmente aos efeitos produzidos pelo aumento na concentração de CO₂ atmosférico, superestimando a produção de biomassa da cultura da soja, nas simulações com Vmax padrão.

A superestimação do IAF pelo modelo Inland-Agro, nas simulações com Vmax padrão podem nos levar a uma incorreta interpretação das variáveis dependentes do dossel, tais como os fluxos de calor latente e sensível.

A superestimação no rendimento da cultura da soja nas simulações com Vmax padrão podem nos levar a uma incorreta interpretação dos impactos no ecossistema da soja numa provável mudança climática.

Com o ajuste na Vmax o modelo conseguiu representar satisfatoriamente as variáveis em estudo, tais como IAF, rendimento, fluxos de calor latente, sensível e evapotranspiração em elevadas concentrações de CO₂ atmosférico, quando comparadas aos resultados reportados por experimentos utilizando tecnologia FACE.

O modelo estimou redução na evapotranspiração em todas as simulações, com maior intensidade nas simulações com ajustes na Vmax em CO₂ elevado.

Nas simulações com a Vmax padrão o modelo projetou aumentos na transpiração (resultado da superestimação na biomassa da cultura), já nas simulações com ajustes na Vmax, o Inland_Agro simulou redução na

transpiração, mostrando assim certo grau de aclimatação da cultura aos efeitos relacionados com aumentos na concentração de CO₂ atmosférico, tais como fechamento parcial dos estômatos e melhor eficiência no uso da água.

O aumento na concentração de CO₂ acompanhado com aumentos de temperatura acelerou o desenvolvimento fenológico da soja, encurtando o ciclo da cultura, reduzindo a transpiração, rendimento e o IAF, diminuindo assim os efeitos benéficos fornecidos pelo aumento na concentração de CO₂ atmosférico.

Com o aumento da temperatura o modelo projetou perda total no ecossistema da soja, nas simulações com ajuste na V_{max} em CO₂ elevado em 801ppm.

O modelo projetou aumentos nos fluxos de calor latente, sensível e evapotranspiração com o aumento da temperatura em CO₂ elevado.

O aumento na concentração de CO₂ atmosférico acompanhado com diminuições na precipitação anual poderá não ter efeitos significativos no rendimento da cultura da soja, devido a que a redução da precipitação projetada pelo modelo Hadgem2ES para o período do ciclo da cultura não foi o suficiente, tanto quanto como para afetar às condições de água requeridas pela soja para um bom desenvolvimento.

Aumentos na disponibilidade de radiação solar incidente (onda curta) reduzem os efeitos benéficos de CO₂ elevado em todas as simulações, diminuindo o rendimento da cultura.

Com o incremento da evapotranspiração o fluxo de calor latente aumentou em todas as simulações, devido à maior disponibilidade (quantidade) de ondas curtas e CO₂ elevado. O calor sensível também aumentou em consequência de ter maior quantidade de energia solar disponível.

O modelo não apresentou variações significativas das variáveis em estudo com o aumento na radiação de onda longa, em todas as simulações.

O ecossistema da soja em ambiente com redução de umidade relativa e CO₂ elevado, não apresentou mudanças significativas no rendimento, IAF e evapotranspiração em todas as simulações.

Foi potencializado o efeito do CO₂ elevado no rendimento da cultura (90,9% de aumento) quando todas as variáveis em estudo (temperatura, precipitação, onda curta, onda longa, umidade relativa) são utilizadas para forçar o modelo na média climatológica 2031-2060 com a Vmax padrão, já quando a Vmax foi ajustada o Inland-Agro apresentou redução no rendimento em 27,3%.

O Inland-Agro utilizando como forçantes todas as variáveis em estudo projetou perdas totais para o ecossistema da soja para as medias climatológicas 2071-2100.

O fluxo de calor latente aumentou como resultado no aumento da evapotranspiração, quando todas as variáveis em estudo foram utilizadas para forçar o modelo em ambiente de CO₂ elevado. O fluxo de calor sensível também aumentou devido ao aumento na temperatura e maior disponibilidade de ondas curtas.

Analisando, os resultados nas simulações utilizando a Vmax padrão e a Vmax ajustada, observamos que o modelo Inland-Agro precisa a incorporação de uma função de aclimação às variações na concentração de CO₂ atmosférico, no código do modelo, com o objetivo de representar melhor os potenciais impactos no ecossistema da soja a estas variações.

Com os resultados projetados pelo modelo Inland-Agro e, desconsiderando qualquer evolução tecnológica, tanto no manejo da cultura quanto no seu melhoramento genético, observa-se que seria inviável continuar com as plantações de soja na região de Santarém, se acontecessem às mudanças climáticas projetadas pelo Hadgem2ES para as médias climatológicas em estudo.

7. Referências Bibliográficas

Ainsworth, E.A.; Long, S.P. 2005. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist*, 165: 351-72.

Baker, J.T. 2004. Yield responses of southern US rice cultivars to CO₂ and temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 122: 129-137.

Barreto, N.J.C.; Mendes, D.; Lucio, P.S. 2013. Avaliação Preliminar da Sensibilidade dos Modelos do CMIP5 a Precipitação Sazonal do Brasil Tropical. *Revista Brasileira de Geografia Física*. 6(4): 875-887.

Barnard, H.R.; Ryan, M.G. 2003. A test of the hydraulic limitation hypothesis in fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. *Plant, Cell and Environment*, 26:1235-1245.

Bastos, T. X. 1972. O estado atual dos conhecimentos das condições climáticas da amazônia brasileira. In: Zoneamento agrícola da Amazônia: 1ª aproximação. Belém, PA: IPEAN: SUDAM, 68-122. (IPEAN. Boletim Técnico, 54).

Bazzaz, F.A.; Sombroek, W.G. 1996. Global Climate Change and Agricultural Production: Direct and Indirect Effects of Changing Hydrological, Pedological, and Plant Physiological Processes. *Food and Agriculture Organization of the United Nations and John Wiley and Sons*, 345pp.

Bernacchi, C.J.; Kimball, B.A.; Quarles, D.R.; Long, S.P.; Ort, D.R. 2007. Decreases in Stomatal Conductance of Soybean under Open-Air Elevation of CO₂ Are Closely Coupled with Decreases in Ecosystem Evapotranspiration. *Plant Physiology*, 143: 134-144.

Bernardo, S.; Soares, A. A.; Mantovani, E. C. 2006. *Manual de Irrigação*. 8. ed. Universidade federal de Viçosa. Minas Gerais. 625pp.

Bunce, J.A. 2004. Carbon dioxide effects on stomatal responses to the environment and water use by crops under field conditions. *Oecologia*, 140: 1-10.

Collatz, G.J.; Ribas-Carbo, M.; Berry, J.A. 1992. Coupled Photosynthesis-Stomatal Conductance Model for Leaves of C₄ Plants. *Australian Journal of Plant Physiology*, 19(5): 519-538.

Comissão Mista Especial Sobre Mudanças Climáticas. Relatório Final (<http://www.senado.gov.br/atividade/materia/getPDF.asp?t=56862>). Acesso: 12/08/12.

Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. 2015. Indicadores da Agropecuária. Observatório Agrícola. (http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_06_09_15_39_58_revista_maio_2015_-_versao_finalizada_internet.pdf). Acesso: 20/06/2015.

Costa, J.P.R. 2008. *Modelagem e simulação das interações biosfera-atmosfera em plantio de soja na Amazônia*. Tese de Doutorado em Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 127pp.

Cuadra, S.V. 2010. *Desenvolvimento de um Modelo Biofísico de Crescimento da cana-de-açúcar para Estudos Globais*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. 82pp.

Demmig, B.; Cleland, R.E.; Bjorkman, O. 1987. Photoinhibition, 77K chlorophyll fluorescence quenching and phosphorylation of the light-harvesting chlorophyll-protein complex of photosystem II in soybean leaves. *Planta*, 172:378-385.

Donner, S.D.; Kucharik, C.J. 2008. Corn-based ethanol production compromises goal of reducing nitrogen export by the Mississippi River. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 105(11): 4513–4518.

Donner, S.D.; Kucharik, C.J. 2003. Evaluating the impacts of land management and climate variability on crop production and nitrate export across the Upper Mississippi Basin. *Global Biogeochem Cycles* 17 (3): 1085-1089.

Drake, B.G.; Gonzàles-Meler, M.A.; Long, S.P. 1997. More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO₂?. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 48:609-639.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. 2007. Ecofisiologia da Soja. Londrina, Pernambuco. 8pp. (Circular Técnica, 48).

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. 2008. Tecnologias de produção de soja: região Central do Brasil. Paraná. 282pp.(Sistemas de produção, 12).

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. 2009. Modelagem do Crescimento de Culturas: Aplicações à Cultura do Milho. Sete Lagoas, Minas Gerais. 67pp. (Documentos, 91).

Favarin, J.L.; Dourado-Neto, D.; García, A.G.; Villa Nova, N.A.; Favarin, M.G.G.V. 2002. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 37(6): 769-773.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. 2014. O Agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro. Londrina, Pernambuco. 37pp. (Documentos, 349).

Farquhar, G.D.; Von Caemmerer, S. Berry, J.A. 1980. A Biochemical Model of Photosynthetic CO₂ Assimilation in Leaves of C₃ Species. *Planta*, 149: 78-90.

Fitzjarrald, D.R.; Sakai, R.K. 2010. LBA-ECO CD-03 Flux-Meteorological Data, km 77 Pasture Site, Para, Brazil: 2000-2005. Data set. Available on-line [<http://daac.ornl.gov>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. doi:10.3334/ORNLDAAAC/962.

Foley, J.A.; Prentice, I.C.; Ramankutty, N.; Levis, S.; Pollard, D.; Sitch, S.; Haxeltine, A. 1996. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, 10:603-628.

Frisina, V.A.; Escobedo, J.F.; Gomes, E.N. 2003. Estimativa da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) em estufa de polietileno. In *Proceedings of the 3. Encontro de Energia no Meio Rural*, Campinas - SP, Brazil.

Gifford, R.M. 2004. The CO₂ fertilising effect—does it occur in the real world?. *New Phytol*, 163: 221–225.

Gornall, J.; Betts, R.; Burke, E.; Clark, R.; Camp, J.; Willet, K.; Wiltshire, A. 2010. Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 365: 2973-2989.

Goudrian, J.; Van Laar, H.H. 1994. Modelling potential crop growth processes - Textbook with exercises. In: LEFFELAAR, P.A. (Ed.). *Current Issues in Production Ecology*, Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2: 238 pp.

Gray, S.B.; Strellner, R.S.; Puthuval, K.; Leakey, A.D.B. 2010. Free-Air CO₂ enrichment does not lessen the impact of drought on soybean photosynthesis under field conditions.

Imbuzeiro, H. M. A. 2005. *Calibração do modelo IBIS na floresta amazônica usando múltiplos sítios*. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 92 pp.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2013. *Climate Change 2014: The Physical Science Basis. Working Group I Report*. (http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf). Acesso: 29/06/15.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate change: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I Report. (<http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>). Acesso: 25/09/12

Khader , C.A.M.; Roberti, D.R.; Da Silva, R.; Arbage, M.C.A. 2010. Estimativa das trocas líquidas de CO₂ para diferentes coberturas de solo em um agroecossistema na região oeste do Pará, km77, em Santarém, PA. *Ciência e Natura*, 171:174.

Kimball, B.A.; Kobayashi, K.; Bindi, M. 2002. Responses of agricultural crops to free-air CO₂ enrichment. *Advances in Agronomy*, 77: 293 – 368.

Krinner, G.; Viovy, N.; Noblet-Ducoudré, N.; Ogée.; Polcher, J.; Philippe, C.; Sitch, S.; Prentice, I.C. 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*, 19: 1-95.

Kucharik, C.J.; Foley, J.A.; Delire, C.; Fisher, V.A.; Coe, M.T.; Lenters, J.D.; Young-Molling, C.; Ramankutty, N.; Norman, J.M.; Gower, S.T. 2000. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance, and vegetation structure. *Global Biogeochemical cycles*, 14(3): 795-825.

Kucharik, C.J., 2003. Evaluation of a process-based agro-ecosystem model (Agro-IBIS) across the U.S. Cornbelt: simulations of the interannual variability in maize yield. *Earth Interact.* 7: 1–33.

Kucharik, C.J.; Brye, K.R. 2003. Integrated Biosphere Simulator (IBIS) yield and nitrate loss predictions for Wisconsin maize receiving varied amounts of Nitrogen fertilizer. *J. Environ. Qual*, 32:247–268.

Kucharik, C.J.; Twine, T.E. 2007. Residue, respiration, and residuals: Evaluation of a dynamic agroecosystem model using eddy flux measurements and biometric data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 146: 134-158.

Kumar, K. K., Kumar, K. R., Ashrit, R. G., Deshpande, N. R. & Hansen, J. W. 2004. Climate impacts on Indian agriculture. *International Journal of Climatology*, 24:1375–1393.

Long, S.P.; Ainsworth, E.A.; Rogers, A.; Ort, D.R. 2004. Rising Atmospheric Carbon Dioxide: Plants FACE the Future. *Plant Biology*, 55: 591-628.

Luo, Y.; Su, B.; Currie, W.S.; Currie, W.S.; Dukes, J.S.; Finzi, A.; Hartwig, U.; Hungate, B.; Zak, D.R.; Field, C.B. 2004. Progressive nitrogen limitation of ecosystem responses to rising atmospheric carbon dioxide. *BioScience*, 54(8): 731–739.

Lukac, M.; Calfapietra, C.; Lagomarsino, A.; Loreto, F. 2010. Global climate change and tree nutrition: effects of elevated CO₂ and temperature. *Tree Physiology*, 30: 1209–1220.

Moreira, V.S. 2012. *Balanço de água no ciclo da cultura de soja: representação no modelo de vegetação dinâmica agro-ibis*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, RS. 80 pp.

Morison, J. I. L. and Lawlor, D. W. 1999. Interactions between increasing CO₂ concentration and temperature on plant growth. *Plant Cell Environ*, 22:659–682.

Morgan, J.A.; Pataki, D.E.; Körner, C.; Clark, H.; Del Grosso, S.J.; Grünzweig, J.M.; Knapp, A.K.; Mosier, A.R.; Newton, P.C.D.; Niklaus, P.A.; Nippert, J.B.; Nowak, R.S.; Parton, W.J.; Polley, H.W.; Shaw, M.R. 2004. Water relations in

grassland and desert ecosystems exposed to elevated atmospheric CO₂. *Oecologia*, 140: 11-25.

Moss, R.H.; Edmons, J.A.; Hibbard, K.A.; Manning, M.R.; Rose, S.K.; Van Vuuren, D.P.; Carter, T.R.; Emori, S.; Kainuma, M.; Kram, T. Meehl, G.A.; Mitchell, J.F.B.; Nakicenovic, N.; Riahi, K.; Smith, S.J.; Stouffer, R.J.; Thomson, A.M.; Weyant, J.P.; Wilbanks, T.J. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463: 747-756.

Norby, R.J. ; Delucia, E.H.; Gielen, B.; Calfaprieta, C.; Giardina, C.P.; King, J.S.; Ledford, J.; McCarthy, H.R.; Moore, D.J.P.; Ceulemans, S.; De Angelis, P.; Lucak, M.; Oren, R. 2005. Forest response to elevated CO₂ is conserved across a broad range of productivity. *The National Academy of Sciences of the USA*, 102(50): 18052–18056.

Oliveira, L.J.C. 2007. *Mudanças climáticas e seus impactos nas produtividades das culturas do feijão e do milho no Estado de Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado em Meteorologia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 67pp.

Oliveira, L.J.C.; Costa, M.H.; Soares-Filho, B.S.; Coe, M.T. 2013. Large-scale expansion of agriculture in Amazonia may be a no-win scenario. *Environmental Research Letters*, 8:1-10.

Pellegrino, G.Q.; Assad, E.D.; Marin, F.R.; Pinto, H.S.; Zullo Jr, J. 2009. Simulação de Cenários Agrícolas Futuros: Em Busca do Imprevisível Cenário Futuro Real. In: XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. 5. 2009. Belo Horizonte. MG.

Pinto, H.S.; Assad, E.D. 2008. Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil, Campinas, SP. 84pp.

Reddy, A.R.; Rasineni, G.K.; Raghavendra, A.S. 2010. The impact of global elevated CO₂ concentration on photosynthesis and plant productivity. *Current Science*, 99(1):46-57.

Reilly, J.; Tubiello, F.N.; McCarl, B.; Abler, D.; Darwin, R.; Fuglie, K.; Hollinger, S.; Izarralde, C.; Jagtap, S.; Jones, J.; Mearns, L.; Ojima, D.; Paul, E.; Paustian, K.; Riha, S.; Rosenberg, N.; Rosenzweig, C. 2003. U.S. Agriculture and Climate Change: New Results. *Climatic Change*, 57: 43-69.

Santos, S.N.M.; Costa, M.H. 2003. Simulações de fluxo de carbono em um ecossistema de floresta tropical. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 18(1): 87-96.

Smith, N.G.; Dukes, J.S. 2012. Plant Respiration and photosynthesis in global-scale models: incorporating acclimation to temperature and CO₂. *Global Change Biology*, 19 pp.

Soler, C.M.T. 2004. Uso do Modelo Ceres-Maize Para Previsão de Safra do Milho Safrinha. Tese de doutorado, Escola Superior de Agricultura "Luis de Queiroz", Universidade de São Paulo, SP. 146pp.

Streck, N.A. 2005. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. *Ciência Rural*, 35(3): 730-740.

Silva Junior, J.L.C. 2007. Simulação da produtividade das culturas do milho e do feijão, baseada nos cenários de mudanças climáticas globais, do estado de Minas Gerais. Dissertação Doutorado em Meteorologia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 101pp.

Singer, J.; Heitman, J.L.; Hernandez - Ramirez, G.; Sauer, T.; Prueger, J.H.; Hatfield, J.L. 2010. Contrasting methods for estimating evapotranspiration in soybean. *Agricultural Water Management*, 98:157-163.

Sitch, S.; Smith, B.; Prentice, I.C. 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 9: 161–185.

Smith, P.; Lanigan, G.; Kutsch, W.L.; Buchmann, N.; Eugster, W.; Aubinet, M.; Moors, E. J.; Brut, A.; Saunders, M.; Jones, M. 2010. Measurements necessary for assessing the net ecosystem carbon budget of croplands. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 139:302:315.

Sokolov, A.P.; Kicklighter, D.W.; Melillo, J.M.; Felzer, B.S.; Schlosser, C.A.; Cronin, T.W. 2008. Consequences of considering carbon-nitrogen interactions on the feedbacks between climate and the terrestrial carbon cycle. *Journal of Climate*, 21: 3776–3796.

Suyker, A. E.; Verma, S. B. 2010. Coupling of carbon dioxide and water vapor exchanges of irrigated and rainfed maize–soybean cropping systems and water productivity. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150: 553-563.

Taiz, L.; Zieger, E. 2004. *Fisiologia vegetal*. 3.ed. Porto Alegre, Artemed. 719pp.

Thornton, P.E.; Doney, S.C.; Lindsay, K.; Moore, J.K.; Mahowald, N.; Randerson, J.T.; Fug, I.; Lamarque, J.F.; Feddema, J.J.; Lee, Y.H. 2009. Carbon-nitrogen interactions regulate climate-carbon cycle feedbacks: results from an atmosphere-ocean general circulation model. *Biogeosciences*, 6: 2099–2120.

Tubiello, F.N.; Amthor, J.S.; Boote, K.J.; Donatelli, M.; Easterling, W.; Fischer, G.; Gifford, R.M.; Howden, M.; Reilly, J.; Rosenzweig, C. 2006. Crop response to elevated CO₂ and world food supply A comment on “Food for Thought. . .”. *Science*, 312: 1918-1921.

Tubiello, F.N.; Ewert, F. 2002. Simulating the effects of elevated CO₂ on crops: approaches and applications for climate change. *European Journal of Agronomy*, 18: 57-74.

Twine, T.E.; Bryant, J.J.; Richter, K.T.; Bernacchi, C.J.; McConnaughay, K.D.; Morris, S.J.; Leakey, A.D.B. 2013. Impacts of elevated CO₂ concentration on the productivity and surface energy budget of the soybean and maize agroecosystem in the Midwest USA. *Global Change Biology*, 19: 2838–2852.

Vu, J.C.V.; Allen, L.H.; Boote, K.J.; Bowes, G. 1997. Effects of elevated CO₂ and temperature on photosynthesis and Rubisco in rice and soybean. *Plant, Cell and Environment*, 20:68-76.

Walter, L.C.; Streck, N.A.; Rosa, H. T.; Krüger, C.A.M.B. 2010. Mudanças climáticas e seus efeitos na cultura do arroz. *Ciência Rural*, 40(11): 2411-2418.

Webler, G. 2011. *Validação do modelo agro-ibis para um sítio experimental de soja no Rio Grande do Sul*. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Universidade Federal de Santa Maria, RS. 60 pp.

Wullschleger, S. D.; Tschaplinski, T. J.; Norby, R. J. 2002. Plant water relations at elevated CO₂ – implications for water-limited environment. *Plant Cell Environ*, 25:319–331.

Zak, D.R.; Pregitzer, K.S.; Kubiske, M.E.; Burton, A.J. 2011. Forest productivity under elevated CO₂ and O₃: positive feedbacks to soil N cycling sustain decade-long net primary productivity enhancement by CO₂. *Ecology Letters*, 14: 1220–1226.

Anexo A: Diferenças entre as simulações 2003, 2031-2060 e 2071-2100

Tabela 06: Variação do balanço de energia simulado (apenas CO₂ aumentando)

Ajuste Vmax	Climatologia	Rn (%)	H (%)	LE (%)	G (%)
Sem	2031-2060	0,4	1,6	0,1	-10,4
Sem	2071-2100	0,2	6,6	-1,7	-20,8
Com	2031-2060	-0,4	7,2	-2,9	-4,5
Com	2071-2100	-0,9	16,7	-6,7	-12,9

Tabela 07: Variação umidade no solo simulado (apenas CO₂ aumentando)

Ajuste Vmax	Climatologia	CO ₂	T	P	OC	OL	UR	TV
Sem	2031-2060	0,1	-0,1	0,8	-1,4	0,1	-0,2	-0,9
Sem	2071-2100	0,4	-0,9	-2,0	-1,4	0,4	-0,1	-
Com	2031-2060	0,5	0,4	1,2	-0,7	0,5	0,3	-0,1
Com	2071-2100	1,2	-	-1,2	-0,3	1,2	0,9	-

Tabela 08: Variação Balanço Hídrico simulado (apenas CO₂ aumentando)

Ajuste Vmax	Climatologia	EVT	EV	TR	ET	ES	D
Sem	2031-2060	-0,4	-12,9	15,4	0,1	-1,5	0,3
Sem	2071-2100	-2,6	-18,0	16,9	2,0	-3,0	2,4
Com	2031-2060	-3,2	4,12	-12,5	2,9	-0,2	3,2
Com	2071-2100	-7,2	8,1	-26,6	7,0	-0,6	7,48

Tabela 09: Variação Rendimento simulado (CO₂ aumentando e todas as variáveis variando)

Ajuste Vmax	Climatologia	CO ₂	T	P	OC	OL	UR	TV
Sem	2031-2060	69,1	43,6	81,8	50,9	69,1	65,5	90,9
Sem	2071-2100	160,0	-29,1	141,8	121,8	160,0	140,0	-
Com	2031-2060	12,7	-34,6	20,0	-5,5	12,7	12,7	-27,3
Com	2071-2100	36,4	-	30,9	16,4	36,4	27,3	-

Tabela 10: Variação IAF simulado (CO₂ aumentando e todas as variáveis variando)

Ajuste Vmax	Climatologia	CO ₂	T	P	OC	OL	UR	TV
Sem	2031-2060	69,1	-4,5	69,1	105,1	69,1	82,7	33,4
Sem	2071-2100	140,0	-46,6	136,4	209,1	139,1	165,1	-
Com	2031-2060	7,9	-44,9	7,9	14,7	7,9	10,8	-37,7
Com	2071-2100	21,1	-	18,5	23,9	21,1	17,7	-

Tabela 11: Variação do balanço de energia simulado (CO₂ e Temperatura aumentando)

Ajuste Vmax	Climatologia	Rn (%)	H (%)	LE (%)	G (%)
Sem	2031-2060	5,6	11,4	4,0	-0,5
Sem	2071-2100	18,8	36,3	13,4	58,5
Com	2031-2060	5,1	16,7	1,5	-5,6
Com	2071-2100	-	-	-	-

Tabela 12: Variação Balanço Hídrico (CO₂ e Temperatura aumentando)

Ajuste Vmax	Climatologia	EVT	EV	TR	ET	ES	D
Sem	2031-2060	7,9	26,1	-15,2	-8,3	-0,9	-8,9
Sem	2071-2100	25,1	85,4	-51,5	-21,9	-1,6	-23,4
Com	2031-2060	5,6	45,0	-44,4	-5,5	-0,4	-5,9
Com	2071-2100	-	-	-	-	-	-

Tabela 13: Variação umidade no solo (CO₂ e temperatura aumentando)

Ajuste Vmax	Climatologia	CO ₂	T	P	OC	OL	UR	TV
Sem	2031-2060	0,1	-0,1	0,8	-1,4	0,1	-0,2	-0,9
Sem	2071-2100	0,4	-0,9	-2,0	-1,4	0,4	-0,1	-
Com	2031-2060	0,5	0,4	1,2	-0,7	0,5	0,3	-0,1
Com	2071-2100	1,2	-	-1,2	-0,3	1,2	0,9	-

Tabela 14: Variação do balanço de energia simulado (CO₂ aumentando e precipitação diminuindo)

Ajuste Vmax	Climatologia	Rn (%)	H (%)	LE (%)	G (%)
Sem	2031-2060	0,4	0,4	0,6	-8,3
Sem	2071-2100	-0,5	11,7	-4,0	-35,5
Com	2031-2060	-0,2	5,9	-2,2	-2,9
Com	2071-2100	-1,6	20,9	-8,8	-27,9

Tabela 15: Variação Balanço Hídrico (CO₂ aumentando e precipitação diminuindo)

Ajuste Vmax	Climatologia	EVT	EV	TR	ET	ES	D
Sem	2031-2060	0,1	-12,0	15,6	10,8	11,5	10,7
Sem	2071-2100	-4,7	-20,6	15,6	-51,9	-16,4	-54,6
Com	2031-2060	-2,6	5,3	-12,6	13,3	12,9	13,3
Com	2071-2100	-9,0	5,6	-27,5	-47,3	-13,9	-49,8

Tabela 16: Variação do balanço de energia simulado (CO₂ e onda curta aumentando)

Ajuste Vmax	Climatologia	Rn (%)	H (%)	LE (%)	G (%)
Sem	2031-2060	17,1	31,4	12,7	-9,5
Sem	2071-2100	21,6	42,0	15,4	-19,8
Com	2031-2060	16,0	38,0	8,9	0,7
Com	2071-2100	20,2	57,2	8,1	-12,1

Tabela 17: Balanço Hídrico (CO₂ e onda curta aumentando)

Ajuste Vmax	Climatologia	EVT	EV	TR	ET	ES	D
Sem	2031-2060	12,6	-7,2	37,9	-17,3	-2,4	-18,4
Sem	2071-2100	14,7	-11,0	47,4	-21,7	-4,2	-23,0
Com	2031-2060	9,2	17,4	-1,2	-13,1	-0,4	-14,1
Com	2071-2100	8,5	28,1	-16,4	-13,7	-0,8	-14,6

Tabela 18: Variação do balanço de energia simulado (CO₂ e onda longa aumentando)

Ajuste Vmax	Climatologia	Rn (%)	H (%)	LE (%)	G (%)
Sem	2031-2060	0,4	1,6	0,1	-10,4
Sem	2071-2100	-0,2	5,1	-1,8	-15,8
Com	2031-2060	-0,4	7,2	-2,9	-4,5
Com	2071-2100	-0,9	16,7	-6,7	-12,9

Tabela 19: Variação Balanço Hídrico (CO₂ e onda longa aumentando)

Ajuste Vmax	Climatologia	EVT	EV	TR	ET	ES	D
Sem	2031-2060	-0,4	-12,9	15,4	0,1	-1,5	0,3
Sem	2071-2100	-2,7	-18,2	17,0	2,3	-3,0	2,7
Com	2031-2060	-3,2	4,1	-12,5	2,9	-0,2	3,2
Com	2071-2100	-7,2	8,1	-26,6	6,7	-0,6	7,5

Tabela 20: Variação do balanço de energia simulado (CO₂ aumentando e umidade relativa diminuindo)

Ajuste Vmax	Climatologia	Rn (%)	H (%)	LE (%)	G (%)
Sem	2031-2060	-5,3	-28,5	2,0	25,7
Sem	2071-2100	-10,8	-51,3	2,0	20,1
Com	2031-2060	-5,9	-21,3	-1,4	30,0
Com	2071-2100	-11,4	-35,6	-4,2	17,9

Tabela 21: Variação Balanço Hídrico (CO₂ aumentando e umidade relativa diminuindo)

Ajuste Vmax	Climatologia	EVT	EV	TR	ET	ES	D
Sem	2031-2060	-0,7	-19,3	23,1	-2,1	-1,3	-2,2
Sem	2071-2100	-1,7	-24,4	27,3	-2,1	-2,5	-2,0
Com	2031-2060	-3,9	-0,2	-8,6	1,3	0,2	1,3
Com	2071-2100	-7,2	6,7	-24,9	4,1	0,4	4,3

Tabela 22: Variação do balanço de energia simulado (CO₂ aumentando e todas as variáveis variando)

Ajuste Vmax	Climatologia	Rn (%)	H (%)	LE (%)	G (%)
Sem	2031-2060	14,7	1,6	19,1	28,8
Sem	2071-2100	-	-	-	-
Com	2031-2060	13,9	10,4	14,9	21,8
Com	2071-2100	-	-	-	-

Tabela 23: Balanço Hídrico (CO₂ aumentando e todas as variáveis variando)

Ajuste Vmax	Climatologia	EVT	EV	TR	ET	ES	D
Sem	2031-2060	20,8	24,4	16,3	-18,7	11,8	-21,0
Sem	2071-2100	-	-	-	-	-	-
Com	2031-2060	17,1	55,2	-31,5	-13,9	12,9	-15,9
Com	2071-2100	-	-	-	-	-	-