



## IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA CULTURA DA SOJA NO NORDESTE DO ESTADO DO PARÁ

Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza<sup>1</sup>, Cleyson Danilo Monteiro dos Santos<sup>2</sup>, Everaldo Barreiros de Souza<sup>3</sup>, Evandro Chaves de Oliveira<sup>4</sup>, Joyse Tatiane Souza Santos<sup>5</sup>

### RESUMO

Este trabalho teve como objetivo simular a produtividade da cultura da soja (*Glycine max* (L) merril.) na região nordeste Paraense, com base nos cenários de mudanças climáticas no Estado do Pará, através do uso de um modelo de crescimento para a simulação da produtividade da soja. Para as projeções futuras, foram utilizados os cenários A2 e B2, gerados por um modelo climático regional (HadRM3P) para os anos de 2070 e 2100. Os resultados mostram que, para os cenários pessimistas (A2) e otimistas (B2) sem incremento de CO<sub>2</sub>, as alterações climáticas poderão propiciar uma redução de até 77,7% e 66,8% na produtividade da soja para região no ano de 2100, respectivamente. Considerando o incremento de CO<sub>2</sub> podem ocorrer ganhos na produtividade da cultura de 11,3% e 4,4% para o ano de 2070 para ambos os cenários futuros de mudanças climáticas, A2 e B2, respectivamente.

**Palavras-chave:** modelagem agrometeorológica, *Glycine max*, produtividade

## IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON SOYBEAN CROP IN THE NORTHEAST OF THE STATE OF PARA

### ABSTRACT

The objective of this work was to simulate soybean yield (*Glycine max* (L) merril.) in the Northeast of Paraense, based on the climatic changes scenarios in the State of Pará, using and agrometeorological soybean growth model. For the future projections, scenarios A2 and B2, generated by a regional climate model (HadRM3P) for the years 2070 and 2100, were used. The results show that, for the pessimistic (A2) and optimistic (B2) scenarios without CO<sub>2</sub> increment, climate change could lead to a reduction of up to 77.7% and 66.8% in soybean yield to the region in the year 2100, respectively. Considering the CO<sub>2</sub> increment, crop productivity

---

<sup>1</sup> Doutor em Agrometeorologia, Prof da UFRA, e-mail: paulo.jorge@ufra.edu.br

<sup>2</sup> Mestre em Agronomia, Eng Agrônomo, e-mail: danilomontsantos@yahoo.com.br

<sup>3</sup> Doutor em Meteorologia, Prof da UFPa, e-mail: everaldo.barreiros.souza@itv.org

<sup>4</sup> Doutor m Agrometeorologia, Prof do IFES-Itapina, e-mail: tche\_chaves@hotmail.com

<sup>5</sup> Doutoranda em Ciências Ambientais, UFPa, e-mail: joysetaty@hotmail.com

gains of 11.3% and 4.4% for the year 2070 may occur for both future climate change scenarios, A2 and B2, respectively.

**Keywords:** agrometeorological modeling; *Glycine max*; productivity

## INTRODUÇÃO

Segundo previsões do quinto relatório do IPCC (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas) as mudanças decorrentes das atividades humanas, já estão ocorrendo em escala global e as previsões para este século (XXI) são preocupantes (IPCC, 2014). De acordo com o primeiro relatório do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2014) poderá ocorrer reduções de 10% no regime das chuvas e aumento de 1 a 1,5 °C na temperatura do ar na Amazônia até o ano de 2040. Para o período de 2041 a 2070 são esperadas reduções mais drásticas no regime de chuvas (diminuição de 25 a 35%) e aumento de 3 a 3,5 °C na temperatura do ar, o que poderá causar sérios impactos na agricultura local e regional.

De acordo com Marengo e Soares (2003) e Hamada et al. (2011) o relatório do IPCC-SRES mostra diferentes cenários socioeconômicos futuros de mudanças climáticas, denominados de A1, A2, B1 e B2, sendo considerados mais otimistas os cenários B e mais pessimistas os cenários A. Em ambos os cenários projetados pelo relatório especial, os casos B2 e A2 são considerados os mais preocupantes, e como cenários de extrema emissão de gases de efeito estufa, com projeções de concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico até o final do século de 550 e 770 ppm (JUSTINO et al., 2013), e aumento na temperatura média do ar de 3 e 5 °C (MARENGO, 2014), respectivamente.

As relações entre os elementos climáticos e a produção agrícola são bastante complexas, existindo um efeito direto dos fatores ambientais no crescimento e desenvolvimento das plantas de diferentes formas e nas diversas fases da cultura. O desequilíbrio das condições climáticas pode resultar em sérios problemas para a agricultura, uma vez que o crescimento e o desenvolvimento das mesmas dependem

diretamente das condições climáticas e das combinações dos processos físicos e biológicos (SILVA JÚNIOR, 2007).

Uma Alternativa de quantificar e avaliar o complexo processo entre plantas e o clima é por meio da utilização de modelos de simulação de crescimento e rendimento (SILVA JÚNIOR, 2007) uma vez que modelos permitem analisar detalhadamente os diversos componentes da produção, possibilitando uma visão integrada de sua participação no sistema. Estes modelos têm se mostrado eficazes nas análises de cenários futuros de mudanças climáticas na produtividade das culturas em diferentes partes do mundo (BETTS et al. 2004) apesar das dificuldades encontradas durante o processo de construção dos mesmos, por envolver processos complexos que fazem parte do sistema solo-plantas-atmosfera.

Alguns estudos sobre simulação de produtividade em resposta às mudanças climáticas no Brasil apontam importantes impactos na produção agrícola nacional, como o trabalho de Pinto et al. (2002) que avaliaram o impacto das mudanças do clima no zoneamento regional do café, considerando os efeitos das elevações das temperaturas e das chuvas para os estados de Minas Gerais, São Paulo e Goiás. Outros resultados indicaram uma drástica redução nas áreas com aptidão agroclimática, condenando a produção de café nestas mesmas regiões nos próximos 100 anos (ASSAD et al. 2008). Na região de Santa Maria, RS, Streck e Alberto (2006) realizaram um estudo do impacto potencial das mudanças climáticas projetada pela simulação para os próximos 100 anos e concluíram que haverá influência no rendimento de trigo, soja e milho.

Nas últimas décadas o cultivo da soja foi intensificado no Estado do Pará, principalmente em Municípios do Nordeste do Estado, com destaque para o município de Paragominas. Diante a importância econômica desta cultura para a região e de sua dependência às condições climáticas, faz-se

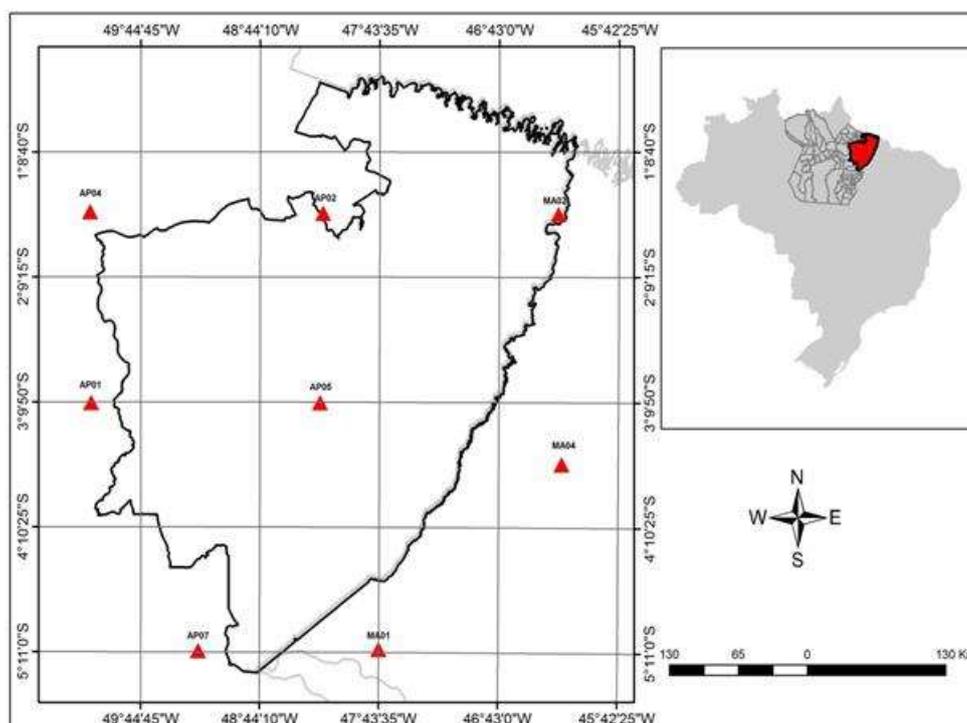
## IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA CULTURA DA SOJA NO NORDESTE DO ESTADO DO PARÁ

necessário uma análise dos possíveis impactos de cenários futuros para o clima local na produtividade da soja devido a enorme carência de estudos desta natureza na região a fim de se auxiliar no desenvolvimento de uma agricultura mais sustentável sem o risco de avanços ou migrações para outras regiões da Amazônia.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi estimar a produtividade da cultura da soja no nordeste do Estado do Pará e os impactos decorrentes dos cenários futuros de mudanças climáticas na região para os anos de 2070 e 2100 a partir dos cenários mais pessimistas (A2) e (B2).

A área do estudo se concentrou no nordeste paraense (Figura 1), abrangendo alguns pontos do Estado do Pará e Maranhão para a espacialização da produtividade da soja. A série de dados climáticos (1960-2000) foi gerada por um modelo climático regional (HadRM3P) assim como os dados de projeções de cenários futuros de mudanças climáticas, os quais eram compostos pelas variáveis temperaturas máxima e mínima ( $^{\circ}\text{C}$ ), precipitação (mm), velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ), umidade relativa (%) e radiação ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) em escala diária. Maiores detalhes sobre os dados podem ser obtidos em Justino et al. (2013).

### MATERIAL E MÉTODOS



**Figura 1.** Região de estudo abrangendo o nordeste do estado do Pará e pontos de grade de dados climáticos gerados pelo modelo HadRM3P. Pontos AP01 a AP07 correspondem às regiões do estado do Pará. Pontos MA01 à MA04 correspondem às regiões do estado do Maranhão.

Para a simulação da produtividade da soja utilizou-se um modelo agrometeorológico desenvolvido por Sinclair (2003), calibrado e validado por Souza et al. (2011) para as condições da área de estudo. O modelo simula o crescimento foliar em função da temperatura média diária. Baseado no crescimento foliar obtém-se o índice de área foliar que é usado

para determinar a radiação interceptada pela cultura. O acúmulo de biomassa é então derivado em função da eficiência do uso da radiação e da radiação interceptada pelo dossel.

A biomassa produzida é dividida em folhas e ramos (representando todo o restante da planta) até o período de início do

enchimento de grãos. A partir deste estágio o crescimento do grão é simulado em função do índice de colheita e da duração do período de enchimento, considerando a translocação de massa e de nitrogênio das partes vegetativas para o grão. Todos estes processos são penalizados por um balanço simplificado de nitrogênio e de água que também são simulados diariamente. Maiores detalhes sobre o modelo de produtividade utilizado podem ser encontrados em Souza et al. (2011).

As simulações foram realizadas para cada um dos pontos gerados pelo modelo climático, os quais passaram por tratamento de qualidade inicial para a obtenção dos dados médios de entrada do modelo. A data de semeadura estabelecida foi o dia 30 de janeiro, o qual é o período mais indicado para a região, considerando-se uma cultivar de ciclo intermediário.

A avaliação do impacto das mudanças climática na produtividade da soja foi feita baseada nos cenários pessimista A2 e otimista B2 de mudanças climáticas, para os anos de 2070 e 2100, respectivamente, gerados pelo modelo climático regional HadRM3P (TANAJURA et al. 2010).

Foram realizadas simulações de produtividade da soja em condições climáticas atuais (Controle) e em cenários futuros A2 e B2 para os anos de 2070 e 2100, com e sem incremento de CO<sub>2</sub>. De posse das produtividades estimadas pelas simulações, o resultado foi analisado em comparação com a produtividade da soja nas condições atuais.

As simulações futuras foram feitas considerando apenas os dados de cenários futuros de mudanças climáticas como também considerando incremento de CO<sub>2</sub>. O efeito do aumento de CO<sub>2</sub> foi avaliado considerando-se

um aumento de 35% na eficiência do uso da radiação (EUR) da soja, referente ao dobro da concentração de CO<sub>2</sub> atual, segundo metodologia utilizada por Wolf (2002). A espacialização dos dados de produtividade foi feita com o uso do software ArcGis 9.0, por meio de Krigagem.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A utilização de modelos de simulação de crescimento e produtividade de culturas é uma das estratégias mais adequadas para se tentar compreender a resposta da planta ao ambiente, porém, uma das exigências é que o mesmo esteja calibrado e validado. De acordo com Souza et al. (2011) o modelo utilizado apresentou bons resultados durante o processo de validação da simulação da produtividade da soja para a região de Paragominas no nordeste Paraense, apresentando 73% de precisão e 76% de exatidão, apesar de o mesmo ter superestimado a produtividade final em menos de 10% utilizando dados de produtividade e dados climáticos medidos no mesmo local de pesquisa.

A produtividade real simulada em condições atuais (Controle) é apresentada na Tabela 1, e foi usada como base para avaliar o impacto que os cenários futuros (A2 e B2) terão sobre a produtividade da cultura da soja. A produtividade média do Estado para o período de 2002 a 2012 é de aproximadamente 2.917 kg.ha<sup>-1</sup>, segundo dados disponíveis da secretaria de agricultura do estado do Pará (SAGRI, 2014). O Município de Paragominas apresenta valores acima da média estadual, em torno de 3.068 kg.ha<sup>-1</sup>.

**Tabela 1.** Produtividade real da soja em kg.ha<sup>-1</sup> e duração do ciclo em dias simulados sob condições de clima atual (Controle-1960 a 2000) para cada ponto de grade. Pontos AP01 a AP07 correspondem às regiões do estado do Pará. Pontos MA01 à MA04 correspondem às regiões do estado do Maranhão.

Pontos	Controle		Latitude	Longitude
	Produtividade	Ciclo (Dias)		
AP01	3511,1	113	-3,12	-50,0
AP02	3636,4	109	-1,27	-48,3
AP04	3520,2	110	-1,40	-50,0
AP05	3621,0	113	-3,17	-48,2
AP07	3504,7	115	-5,21	-49,1

IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA CULTURA DA SOJA NO NORDESTE DO ESTADO DO PARÁ

MA01	3449,5	113	-5,00	-48,0
MA02	3410,0	118	-2,00	-46,0
MA04	3398,0	118	-4,00	-46,0

Os resultados simulados para os cenários atuais foram superiores à produtividade média da região de estudo, o que é natural uma vez que a média fornecida pela secretaria de agricultura incorpora várias propriedades de produtores que nem sempre adotam as melhores técnicas de manejo e tratos contra pragas, e conseqüentemente ocasiona uma queda no rendimento final da cultura. Vale ressaltar que o modelo não simula impactos devido à ocorrência de doenças ou diferentes tipos de manejos.

Grande parte dos erros obtidos no processo de simulação de culturas é consequência de inúmeros processos que muitas das vezes deixam de ser considerados em alguns modelos, tendo como consequência, erros sistemáticos decorrentes da pouca robustez do mesmo. Rodrigues et al. (2012) utilizaram o modelo CSM-CROPGROW-Soybean modificado para simular o efeito da ferrugem asiática na produtividade da soja e obtiveram simulações com superestimativas de

10 a 15% para duas cultivares na região de Viçosa-MG, o que demonstra que a ferramenta da modelagem naturalmente apresenta erros uma vez que representa uma simplificação da realidade, cabendo ao pesquisador aceitar ou não a margem de erro em função dos processos simulados.

### Simulação da duração do ciclo da soja

A simulação do ciclo da cultura apresentou um padrão já esperado para cenários de mudanças climáticas pelo efeito de temperaturas mais elevadas, com um encurtamento do ciclo da soja. O encurtamento do ciclo em alguns casos foi de 17,6% menor do que a duração do ciclo da soja em condições atuais, como o observado no local AP01 para o cenário A2 no ano 2100. As reduções sempre estiveram próximas de 10% ou mais para os cenários futuros sem o incremento de CO<sub>2</sub> mas foram maiores na presença de incremento de CO<sub>2</sub> (Tabela 2)

**Tabela 2.** Impacto negativo na duração do ciclo da soja em função dos cenários B2 e A2, com e sem adição de CO<sub>2</sub> comparado ao simulado sob condições de clima atual (Controle) para cada ponto de grade. Pontos AP01 a AP07 correspondem às regiões do estado do Pará. Pontos MA01 à MA04 correspondem às regiões do estado do Maranhão.

Pontos	Duração (dias)	Redução na duração do Ciclo (%)							
		Sem adição de CO <sub>2</sub>				Com adição de CO <sub>2</sub>			
		Controle	A2 2070	A2 2010	B2 2070	B2 2100	A2 2070	A2 2010	B2 2070
AP01	113	12,4	17,7	12,4	15,0	17,7	19,5	18,6	21,2
AP02	109	9,2	8,3	8,3	8,3	9,2	17,4	8,3	8,3
AP04	110	13,6	14,5	7,3	10,9	10,9	17,3	8,2	8,2
AP05	113	15,0	13,3	15,9	15,9	18,6	20,4	23,9	23,9
AP07	115	13,9	12,2	9,6	9,6	20,0	20,9	18,3	18,3
MA01	113	15,0	21,2	8,0	10,6	22,1	27,4	12,4	12,4
MA02	118	14,4	18,6	10,2	-	15,3	21,2	-	-
MA04	118	18,6	22,0	14,4	14,4	20,3	21,2	19,5	19,5

Vários são os fatores capazes de afetar o desenvolvimento e a produtividade das culturas, seja em ganhos ou perdas como, por

exemplo, disponibilidade de água, manejo do solo, fertilização, combates as pragas, época de plantio, etc., mas o principal responsável pelas

oscilações nas safras e um dos poucos que não se pode controlar são os fatores climáticos (Moraes et al. 2011).

Muitos trabalhos mostram a forte dependência da fenologia da soja com as condições meteorológicas (COBER et al., 2001; SCHOFFEL; VOLPE, 2002; SETIYONO et al., 2007; SINCLAIR et al., 2005). Os valores ideais de temperatura do ar para o crescimento e desenvolvimento da soja ficam em torno de 30-31°C (SETIYONO et al., 2007), havendo efeitos significativos na taxa de crescimento e na retenção de legumes quando a soja fica exposta a temperaturas acima dos 40 °C (FARIAS et al., 2007). Portanto, o encurtamento obtido na simulação em função do aumento na temperatura é um processo natural uma vez que o submodelo que simula o desenvolvimento acelera o desenvolvimento da soja para temperaturas do ar entre 10 e 31 °C (SOUZA et al, 2013)

A simulação da duração do ciclo em cenários futuros com incrementos de CO<sub>2</sub> (Tabela 2) também apresentou reduções em ambos os cenários e anos. As reduções variaram de 8 a 23% na duração do ciclo da cultura em comparação ao ciclo observado em condições atuais (Tabela 2). Estas reduções são principalmente devido às projeções futuras para o clima na região apresentarem temperaturas mais elevadas, em torno de 3 a 5 °C, para cenários otimistas B2 e de 4 a 8 °C para cenários pessimistas A2 (JUSTINO et al. 2013), uma vez que o incremento da temperatura do ar aumenta a velocidade dos

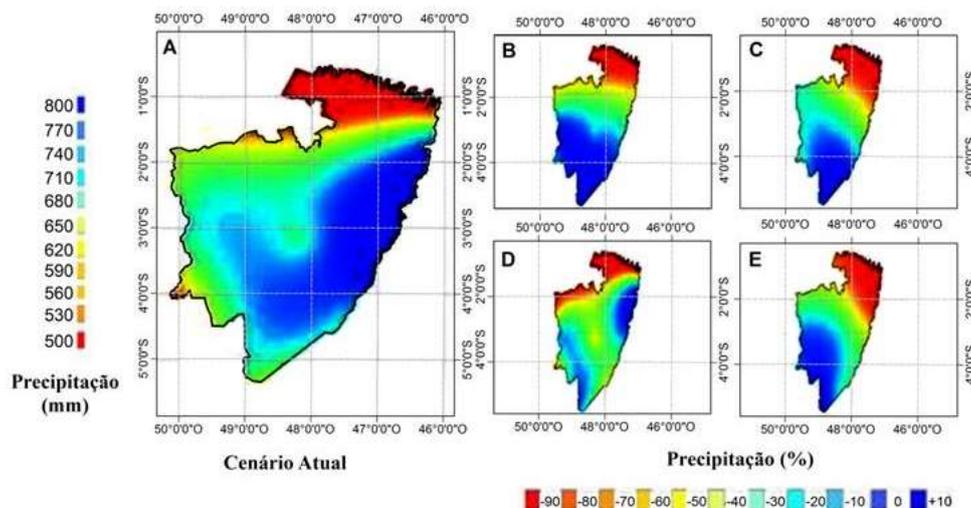
processos metabólicos das plantas (NORBY; LUO, 2004).

A variação na redução nos dias do ciclo da cultura em cenários futuros (A2 e B2) sem adição de CO<sub>2</sub> nos anos de 2070 e 2100 foi de 8 a 18% em relação às condições atuais, enquanto que em cenários futuros (A2 e B2) com incremento de CO<sub>2</sub> nos anos de 2070 e 2100 variou de 8 a 21% (Tabela 2). Os resultados para a redução no ciclo da cultura em cenários de mudanças climáticas estão de acordo com os resultados obtidos por Tao et al. (2008) onde são reportados que houve 100% de probabilidade de diminuição do ciclo quando a soja é submetida a cenários de mudança climática para a China, com incremento de CO<sub>2</sub> e temperatura.

#### **Total de chuva no ciclo da soja em cenários futuros**

A figura 2 apresenta a quantidade de precipitação ocorrida durante o ciclo da cultura, sob condição de cenários futuros A2 e B2 para os anos de 2070 e 2100 sem o incremento de CO<sub>2</sub>. A quantidade de chuvas nos cenários futuros (A2 e B2) durante o ciclo da soja foi reduzida quando comparada às condições atuais (Controle), podendo ser justificado pela redução de dias do ciclo da cultura para ambos os cenários de mudanças climáticas (Figura 2). De modo geral em cenários futuros de mudanças climáticas há diminuição na quantidade de chuvas para a região de estudo (PMBC, 2013; JUSTINO et al. 2013).

## IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA CULTURA DA SOJA NO NORDESTE DO ESTADO DO PARÁ



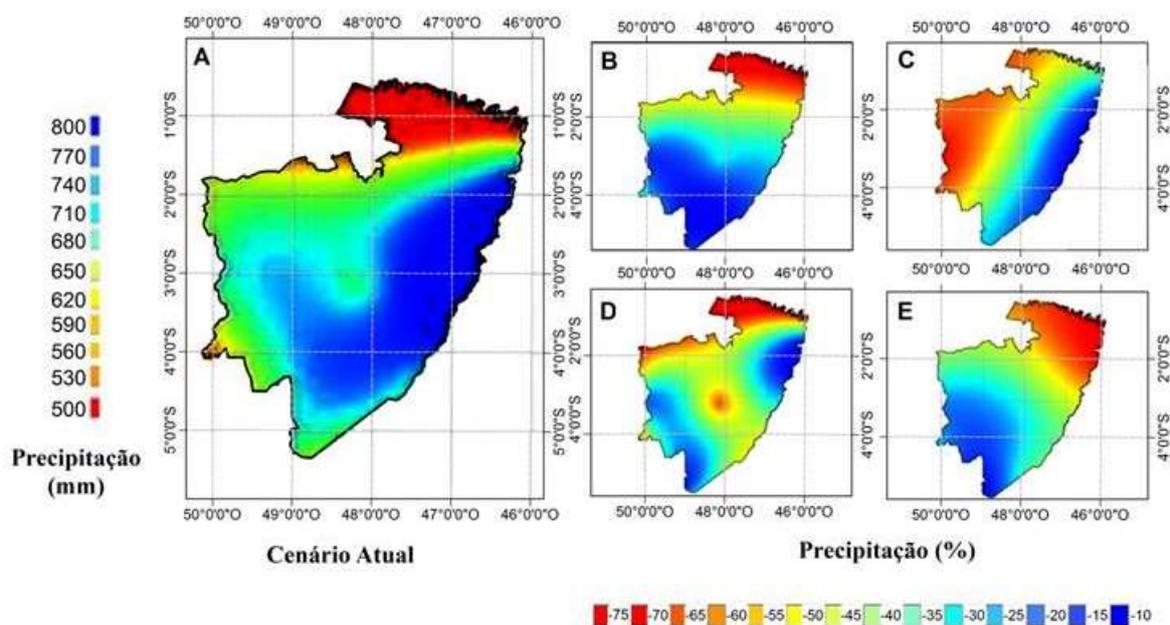
**Figura 2.** Variação espacial da chuva (mm) total no ciclo da soja sob condições de cenários futuros sem adição de CO<sub>2</sub> no nordeste Paraense. a) Cenário Atual (Controle). b) Cenários A2 – 2070; c) Cenários A2 – 2100; d) Cenários B2 – 2070 e e) Cenários B2 – 2100.

Sabendo que a necessidade hídrica da cultura da soja varia de 300 a 850 mm de água, dependendo da cultivar e das condições edafoclimáticas (SOUZA et al., 2016) nota-se que algumas regiões apresentaram valores inferiores á demanda da cultura, com totais durante o ciclo de 270, 135 e 295mm, nos pontos AP01, AP02 e AP05 (Figura 2B), respectivamente.

De forma geral observa-se que em todos os casos com cenários futuros A2 e B2 (sem adição de CO<sub>2</sub>) houve reduções na quantidade de chuva durante o ciclo da cultura da soja. As

reduções mais evidentes foram para os anos de 2100, onde o total de chuva no ciclo foi reduzido de 36 a 73% no cenário A2 entre 9 a 57% para B2.

Por apresentarem projeções distintas em relação à precipitação, os cenários futuros com adição de CO<sub>2</sub> também apresentaram diferenças na quantidade total de chuva acumulada durante o ciclo da soja (Figura 3). O volume total de chuvas apresentou elevadas reduções quando comparado ao tratamento controle, com variação de 10 a 80% para cenários futuros com adição de CO<sub>2</sub>.



**Figura 3.** Variação espacial da chuva (mm) total no ciclo da soja sob condições de cenários futuros com adição de CO<sub>2</sub> no nordeste Paraense. A) Cenário Atual (Controle). B) Cenários A2 – 2070; C) Cenários A2 – 2100; D) Cenários B2 – 2070 e E) Cenários B2 – 2100.

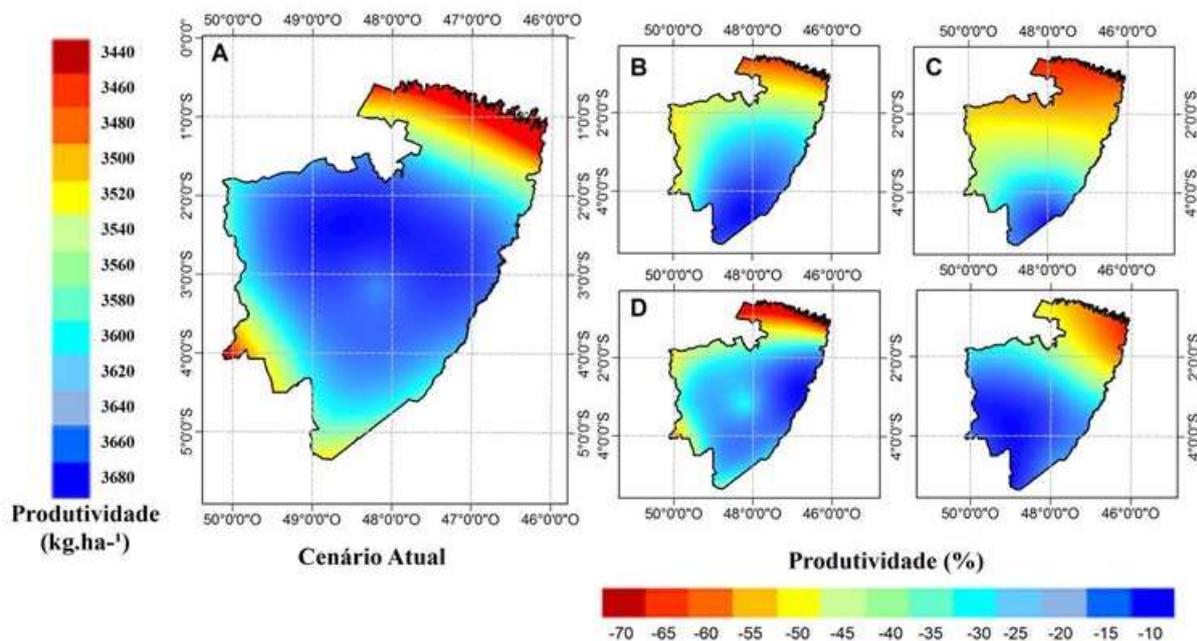
Os maiores impactos negativos no total de chuva no ciclo são encontrados no cenário A2 (pessimista), principalmente para o ano de 2100, o qual apresenta reduções de 42 a 75% em relação às condições atuais.

A justificativa da não proporcionalidade entre a redução de dias do ciclo da soja e a redução na quantidade de chuva acumulada durante o ciclo pode ser justificada pelas projeções geradas em cada cenário futuro de mudança climática. Para cada cenário e ano há uma série de fatores que contribuem para a redução da precipitação durante a época da simulação para qual a soja foi submetida.

#### **Impactos na produtividade da soja sem incremento de CO<sub>2</sub>**

Os maiores valores de produtividade real da soja observados na região de estudo são encontrados ao leste do Nordeste Paraense, com valores em torno de 2.900 kg.ha<sup>-1</sup> (SAGRI, 2014). A produtividade simulada sob condições atuais, embora superestimadas, apresentou o mesmo padrão observado na região, com os maiores valores ocorrendo a leste da região Nordeste do Pará, de até 3.636,4 kg.ha<sup>-1</sup> (Figura 4). Durante o ciclo da cultura, a região que apresentou maior quantidade de chuva para o cenário atual foi a região sul, com 681,7mm, enquanto que ao norte observou-se a menor quantidade de chuvas durante o ciclo (510,2mm) (Figuras 2 e 3).

## IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA CULTURA DA SOJA NO NORDESTE DO ESTADO DO PARÁ



**Figura 4.** Espacialização da Produtividade Real da soja ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) e dos impactos (%) em Cenários Futuros sem incremento de  $\text{CO}_2$  para o nordeste Paraense. A) Cenário Atual (Controle). B) Cenários A2 – 2070; C) Cenários A2 – 2100; D) Cenários B2 – 2070 e E) Cenários B2 – 2100.

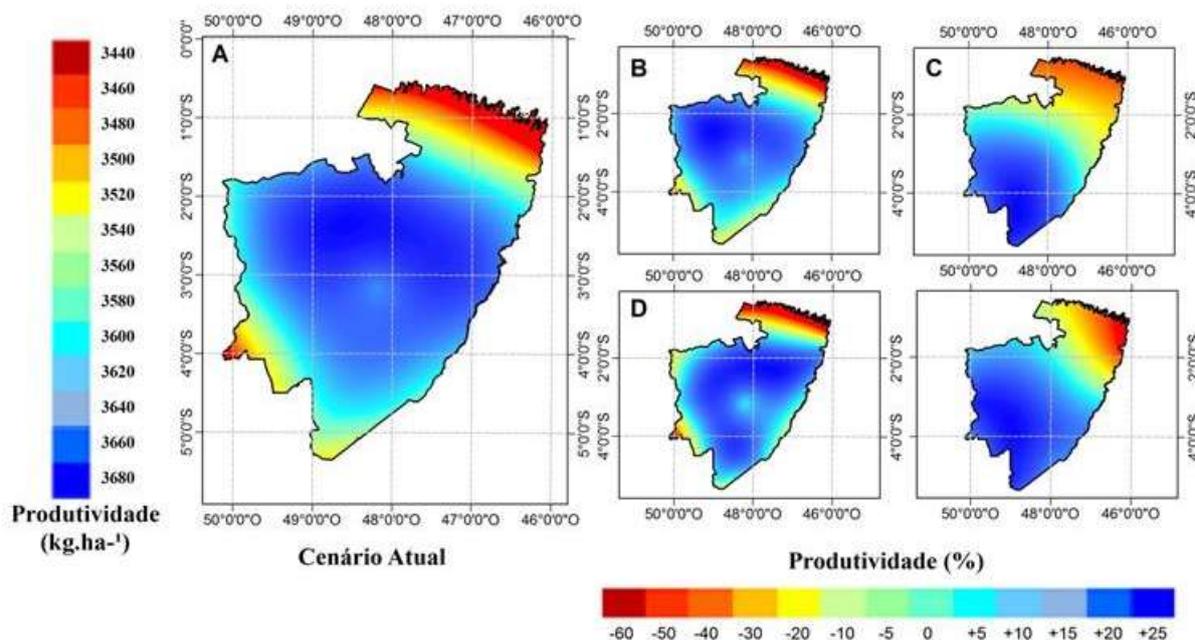
Para o cenário otimista (B2) onde se estabelece um aumento de 3 a 5 °C na temperatura do ar (JUSTINO et al. 2013), sem a fertilização de  $\text{CO}_2$ , observou-se uma tendência na diminuição da produtividade da soja na região do estudo para os anos de 2070 e 2100, em relação à produtividade em condições atuais. O cenário B2 – 2070 (Figura 4D) apresentou perda média de 13,2%, e apesar de uma grande perda, foi a menor entre os outros cenários e anos (Figura 4B, C, E).

Para o cenário pessimista A2 (Figura 4B e 4C) onde as projeções de aumento de temperaturas do ar podem chegar de 4 a 8 °C (JUSTINO et al. 2013), as perdas foram maiores, chegando a reduções de até 77%, para o ano de 2100, ao Norte da região do estudo, em relação à produtividade do mesmo ponto

sob condições atuais (Figura 4A). Perdas de mais de 50% também foram observadas no cenário A2 para o ano de 2100 a oeste da região de estudo. A menor perda na produtividade foi observada no cenário pessimista A2 no ano de 2070, onde a diferença entre a produtividade controle e a simulada para as condições A2 - 2070 foi de 8,5% na região sul da área de estudo.

### Impactos na produtividade da soja com incremento de $\text{CO}_2$

É possível observar que houve tendência ao aumento de produtividade quando a cultura da soja é submetida à fertilização de  $\text{CO}_2$ , mas os impactos positivos foram mais generalizados no ano de 2070 em ambos os cenários (A2 e B2).



**Figura 5.** Espacialização da Produtividade real da soja ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) e dos impactos (%) em Cenários Futuros com incremento de  $\text{CO}_2$  no nordeste Paraense. A) Cenário Atual (Controle). B) Cenários A2 – 2070; C) Cenários A2 – 2100; D) Cenários B2 – 2070 e E) Cenários B2 – 2100

Os ganhos na produtividade com efeito do aumento de  $\text{CO}_2$  para o cenário A2 no ano de 2070 foram de 3,7 a 11,3%. Para o mesmo cenário (A2) e mesmo ano (Figura 5B) o maior impacto na produtividade foi encontrado na parte central da mesorregião de estudo, próximos do Município de Paragominas. O aumento da concentração de  $\text{CO}_2$  atmosférico induz o aumento da taxa de desenvolvimento nas plantas, pelo fato do  $\text{CO}_2$  ser o substrato primário para a fotossíntese (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Para o cenário B2 no ano de 2070, percebe-se o mesmo efeito com ganhos no rendimento da cultura em função do incremento de  $\text{CO}_2$ . Porém este aumento foi menor quando comparado aos ganhos no cenário A2 no ano de 2070, sendo considerado como um cenário pessimista. Nota-se que as maiores produtividades para este cenário (B2-2070) se concentram mais ao sul da mesorregião nordeste Paraense (Figura 5D).

Streck (2005) apresentou resultados experimentais que mostram aumento na biomassa seca e rendimento de algumas culturas em resposta ao dobro da concentração do  $\text{CO}_2$ . O aumento varia de acordo com a cultura, sendo que o incremento médio foi de

23%, 32%, 42%, 54% e 52% para frutas, cereais C3, folhosas, legumes e raízes, respectivamente (STRECK, 2005). Este ganho na produtividade em função da fertilização de  $\text{CO}_2$  ocorre devido a redução da condutância estomática que diminui a evapotranspiração, aumentando a eficiência no uso da água e reduzindo a perda de  $\text{CO}_2$  pela fotorrespiração (STRECK et al. 2005, TRNKA et al. 2004).

Para os cenários A2 – 2100 e B2 – 2100 houve perda no rendimento da soja, mesmo com o aumento da concentração de  $\text{CO}_2$ . Nota-se uma maior abrangência espacial de redução da produtividade para o cenário A2-2100 (Figura 5C) localizada numa faixa mais ao norte da mesorregião, onde as perdas nos rendimentos da cultura foram superiores, chegando a até 58% menos do que nas condições climáticas atuais. Apenas na parte sul da região de estudo houve ganho de 2,6% na produtividade.

O mapa para o cenário B2 referente ao ano de 2100 (Figura 5E) apresenta maiores impactos positivos na produtividade localizados numa faixa maior da região de estudo, abrangendo desde a parte central até o sul da região. Já as perdas neste cenário são também expressivas e variam entre 9 a 42%,

havendo uma maior perda nos rendimentos no extremo nordeste da área de estudo.

Observaram-se grandes impactos negativos na produtividade da soja na região, com perdas que chegam a até 70% ao norte do mapa, independente do cenário. Uma das causas na diminuição no rendimento da soja em cenários futuros pode ser atribuída à diminuição da quantidade de chuvas observadas durante seu ciclo, o que foi observada na região norte da área de estudo que apresentou as menores quantidades de chuvas durante o ciclo da soja, para o cenário A2, de cerca de 344,4 mm e de 134,3 mm para os anos de 2070 e 2100, com produtividades de 2.026 e 811,6 kg.ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Segundo Siqueira et al. (2001), outra causa na redução da produtividade de grãos é o encurtamento do ciclo de desenvolvimento, em cenários com aumentos de temperatura. Porém, a deficiência hídrica no solo também contribui para diminuir a rendimento da soja (STRECK; ALBERTO, 2006).

Embora ainda existam dúvidas sobre as respostas quantitativas das mudanças climáticas para este século, sabe-se, porém, que o aumento de CO<sub>2</sub> atmosférico é algo inevitável para os próximos anos, principalmente porque a queima de combustíveis fósseis não deve diminuir a curto e médio prazo a nível global (MORAES et al. 2011).

O efeito do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na fotossíntese da soja foi obtido através de um aumento linear na eficiência do uso da radiação (EUR) (WOLF, 2002). Em experimentos que utilizaram câmaras de topo aberto com ambiente enriquecido com CO<sub>2</sub>, Weerakoon et al. (2000) encontraram aumento médio de 25% na EUR do arroz com o dobro da concentração de CO<sub>2</sub>, em diferentes estações de cultivo.

O efeito do incremento de CO<sub>2</sub> simulado em função do aumento na EUR proporcionou ganhos de até 25% na produtividade em alguns pontos do mapa, em especial na região sul, enquanto que em cenários sem o efeito da adição de CO<sub>2</sub> o ganho de produtividade observado em alguns locais não ultrapassou 10%. Pesquisas em ambientes controlados

apresentaram aumento na produtividade das culturas C3 (Feijão, Soja) de 24 e 43%, respectivamente, quando as mesmas foram submetidas ao dobro da concentração de CO<sub>2</sub> (SILVA JÚNIOR, 2007).

Entretanto, Slingo et al. (2000) indicam que em condições de campo, o enriquecimento benéfico de CO<sub>2</sub> pode ser menor, ou seja, entre 8 a 15%, devido ao aumento da temperatura e da radiação solar que estimulam o aumento da evapotranspiração, e a produtividade das culturas tendem a diminuir, se estiverem sob condições de estresse hídrico (TRNKA et al. 2004).

Se o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> for acompanhado de aumento da temperatura do ar, poderá não haver aumento no crescimento e produtividade das culturas, devido ao encurtamento do ciclo (BUTTERFIELD; MORISON, 1992; SIQUEIRA et al. 2001) e aumento da respiração do tecido vegetal (TAIZ; ZEIGER, 2004; STRECK, 2005), ou seja, as plantas consumiriam mais energia na respiração, reduzindo os fotoassimilados disponíveis para os órgãos de reserva da planta.

Plantas do grupo C3 são mais favorecidas pelo enriquecimento de CO<sub>2</sub> na atmosfera do que plantas que pertencem aos grupos C4 (TUBIELLO et al. 2000; SIQUEIRA et al. 2001; STRECK, 2005). Soltani et al. (2001), encontraram um aumento de 30% no rendimento do arroz, quando duplicaram a concentração de CO<sub>2</sub>. Resultados de estudos na Europa obtiveram ganhos de produtividade para o trigo de inverno acima de 20% até o ano de 2050, quando foram submetidos ao dobro da concentração de CO<sub>2</sub> (HARISSON et al. 2000).

Lal et al. (1998) avaliaram a vulnerabilidade da cultura da soja diante das mudanças futuras no clima, para a região central da Índia, utilizando o modelo CROPGRO e encontraram efeitos positivos do dobro da concentração de CO<sub>2</sub> no rendimento da soja, com ganhos de 50%. No entanto, este aumento seria reduzido ao se considerar um aumento de 3°C na temperatura do ar, anulando os efeitos positivos de elevação da concentração de CO<sub>2</sub> sobre o rendimento.

Segundo os autores, a diminuição da quantidade de chuva diária em 10% restringiu esse ganho de rendimento em cerca de 32%.

Os resultados encontrados nesta pesquisa estão de acordo com os obtidos por Justino et al. (2013) que utilizaram o modelo DSSAT para toda a Amazônia e encontraram reduções na produtividade real da soja de 12 a 70% para o norte do estado do Pará mas simularam ganhos entre 14 a 30% para o sul, sudeste e parte do nordeste Paraense, em ambos os cenários B2 e A2.

## CONCLUSÕES

De forma geral os cenários futuros de mudanças climáticas para a região Nordeste do Estado do Pará indicam impactos positivos sobre a produtividade da soja ao se considerar que haja incremento de CO<sub>2</sub> atmosférico para ambos os cenários A2 e B2 no ano de 2070.

Em todos os cenários (A2 e B2) e ambos os anos (2070 e 2100) houve perdas expressivas de produtividade quando a cultura não é beneficiada pelo incremento de CO<sub>2</sub> Atmosférico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULLO JR., J.; ÁVILA, A. M. H. DE. Impacto das Mudanças Climáticas no Zoneamento Agroclimático do Café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, p.1057-1064, 2008.
- ASSAD, E.D.; PINTO, H.S. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. Embrapa, São Paulo, 2008, 84p.
- BETTS, R.A.; COX, P.M.; COLLINS, M.; HARRIS, P. P.; HUNTINGFORD, C.; JONES, C. D. The role of ecosystem-atmosphere interactions in simulated Amazonian precipitation decrease and forest dieback under global climate warming. **Theoretical and Applied Climatology**, Viena, v.78, p.157–175, 2004.
- BUTTERFIELD, R.E.; MORISON, J. I. L. Modeling the impact of climate warming on winter cereal development. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.62, p.241-261, 1992.
- HAMADA, E; GHINI, R.; MARENGO, J. A.; THOMAZ, M. C. **Projeções de Mudanças Climáticas para o Brasil no final do século XXI**. In: GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. (eds). Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, p. 41-73, 2011
- HARRISON P.A, PORTER JR, DOWNING T.E. Scaling-up the AFRCWHEAT2 model to assess phenological development for wheat in Europe. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.101, p.167–186, 2000.
- IPCC. **Climate change 2013: the physical Science Basis – Contribution of Working Group I to the Fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 1:1-996, 2014. ([www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm](http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm)). Acesso em 15/09/2016.
- JUSTINO, F.; OLIVEIRA, E.C., RODRIGUES, R.A.; GONÇALVES, P.H.L.; SOUZA, P.J.O.P.; STORDAL, F.; MARENGO, J.; SILVA, T.G.; DELGADO, R.C.; LINDEMANN, D.S., COSTA, L.C. Mean and interannual variability of maize and soybean in Brazil under global warming conditions. **American Journal of Climate Change**, v.2 p.237-253, 2013.
- LAL, M.; SINGH, K.K.; RATHORE, L.S.; SRINIVASAN, G.; SASEENDRAN, S.A. Vulnerability of rice and wheat yields in NW India to future changes in climate. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v89, p.101-114, 1998.
- MARENGO, J, SOARES, W. **Impacto das modificações da mudança climática-Síntese do Terceiro Relatório do IPCC**. Condições

**climáticas e recursos hídricos no Norte do Brasil. Chapter 6** in: *Clima e Recursos Hídricos 9*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos/FBMC-ANA. Porto Alegre, Brasil, pp 209-233, 2003.

MARENGO, J. A. O futuro clima no Brasil. **Revista USP**, n. 103, p.25-32, 2014.

MORAES, W. B.; JESUS JUNIOR, W. C.; MORAES, W. B.; CECÍLIO, R. A. Potenciais impactos das mudanças climáticas globais sobre a agricultura. **Revista Trópica - Ciências Agrárias e Biológicas**, Chapadinha, v.5, p.3-14, 2011.

PBMC. **Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas** [Ambrizzi, T., Araujo, M. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 464p, 2014.

PINTO, H. S.; ASSAD, E. D.; ZULLO JR., J.; BRUNINI, O. O aquecimento global e a agricultura. **Revista Eletrônica do Jornalismo Científico**, Campinas, v.35, p.1-6, 2002.

NORBY, R. J.; LUO, Y. Evaluating ecosystem responses to rising atmospheric CO<sub>2</sub> and global warming in a mult-factor world. **New Phytologist**, v.162, p.281-293, 2004.

RODRIGUES, R. A.; PEDRINI, J. E.; FRAISSE, C. W. FERNANDES, J. M. C.; JUSTINO, F. B.; HEINEMANN, A. B.; COSTA, L. C.; VALE, F. X. R. DO. Utilization of the cropgro-soybean model to estimate yield loss caused by Asian rust in cultivars with different cycle. **Bragantia**, Campinas, v.71, p.308-317, 2012.

SAGRI. **SOJA: SAFRA 2002-2012**. ([www.sagri.pa.gov.br/pagina/agricultura](http://www.sagri.pa.gov.br/pagina/agricultura)). Acesso em 30/10/2016, 2014.

SILVA JÚNIOR, J. L. C. ; COSTA, L. C.; AMORIM, M. C. DE ; BARBOSA, F. J. Mudanças climáticas e agricultura: um estudo de caso para as culturas do milho e do feijão em minas gerais. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v.30, p.57-61, 2007.

SINCLAIR, T. R.; FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Modeling nitrogen accumulation and use by soybean. **Field Crops Research**, v.81, p.149-158, 2003.

SIQUEIRA, O.J.W.; STEINMETZ, S.; SALLES, L.A.B. DE. **Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas**. In: Lima, M.A.; Cabral, O.M.R.; Miguez, J.D.G. (Ed.). *Mudanças climáticas globais e a agropecuária Brasileira*, Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, São Paulo, p. 3-63, 2001.

SLINGO, J.M.; CHALLINOR, A.J.; HOSKINS, B.J.; WHEELER, T.R. Introduction: food crops in a changing climate. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, Londres, v.360, p.1983-1989, 2005.

SOLTANI, A.; ZEINALI, E.; GALESHI, S.; NIARI, N. Simulating GFDL predicted climate change impacts on rice cropping in Iran. **Journal of Agricultural Science and Technology**, Tehran, v.3, p.81-90, 2001.

SOUZA, P. J. O. P.; FARIAS, J. R. B.; ABREU, J. P. M. DE M. E.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P. DA.; BOTELHO, M. DO N.; SOUSA, A. M. L. de. Simulation of soybean growth and yield under northeastern Amazon climatic conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, p.567-577, 2011.

SOUZA, P. J. O. P.; SOUSA, A. M. L.; SAMPAIO, L. S. Soybean development and thermal requirement under the climatic conditions of Paragominas, Pará state, Brazil.

**Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v.56, p.371-375, 2013.

SOUZA, P. J. O. P.; ORTEGA-FARIAS, S.; ROCHA, E.J.P.; SOUSA, A. M. L.; SOUZA, E.B. S. Consumo hídrico da soja no nordeste Paraense. **Irriga**, Botucatu, ed. Especial irrigação, p.218-231, 2016.

STRECK, N.A.; ALBERTO, C.M. Simulação do impacto da mudança climática sobre a água disponível do solo em agroecossistemas de trigo, soja e milho em Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, p.424-433, 2006.

STRECK, N.A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and temperature and crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, p.730-740, 2005.

TAIZ, L. & ZIEGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3ª ed. Artemed, Porto Alegre, 719p, 2004.

TANAJURA, C.A.S.; GENZ, F.; ARAUJO, H. A. Mudanças climáticas e recursos hídricos na Bahia: Validação da simulação do clima presente do HadRM3P e comparação com os cenários A2 e B2 para 2070-2100. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v.25, p.345-358, 2010.

TAO, F.; HAVASHI, Y.; ZHANG, Z.; SAKAMOTO, T.; YOKOZAWA, M. Global warming, rice production, and water use in China: Developing a probabilistic assessment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.148, p.94-110, 2008.

TRNKA, M., DUBROVSKY, M., SERERÁDOVÁ, S.; ZALUD, Z. Projections of uncertainties in climate change scenarios into expected winter wheat yields. **Theoretical and Applied Climatology**, Viena, v.77, p.229-249, 2004.

TUBIELLO, F. N.; DONATELLI, M.; ROSENZWEIG, C.; STOCKLE, C. O. Effects of climate change and elevated CO<sub>2</sub> on cropping systems: Model predictions at two Italian locations. **European Journal of Agronomy**, Montpellier, v.13, p.179-189, 2000.

WEERAKOON, W. M. W.; INGRAM, K. T.; MOSS, D. N. Atmospheric carbon dioxide and fertilizer nitrogen effects on radiation interception by rice. **Plant and Soil**, Netherlands, v.220, p.99-106, 2000.

WOLF, J. Comparison of two soya bean simulation models under climate change. II. Application of climate change scenarios. **Climate Research**, Oldendorf, v.20, p.71 – 81, 2002.