



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS - CTRN**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS - UACA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CULTIVO DO ALGODÃO  
HERBÁCEO EM SISTEMA DE SEQUEIRO NO NORDESTE DO BRASIL**

**MADSON TAVARES SILVA**

**CAMPINA GRANDE – PB  
FEVEREIRO / 2010**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CULTIVO DO ALGODÃO  
HERBÁCEO EM SISTEMA DE SEQUEIRO NO NORDESTE DO BRASIL**

**MADSON TAVARES SILVA**

**ORIENTADORES:**

**Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA**

**Prof. Dr. PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO**

**CAMPINA GRANDE – PB  
FEVEREIRO / 2010**

**MADSON TAVARES SILVA**

**IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CULTIVO DO ALGODÃO  
HERBÁCEO EM SISTEMA DE SEQUEIRO NO NORDESTE DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

**Área de concentração:** Agrometeorologia e Micrometeorologia

**Subárea:** Climatologia Agrícola

**CAMPINA GRANDE – PB  
FEVEREIRO / 2010**

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG**

S586i

2010 Silva, Madson Tavares.

Impacto das mudanças climáticas no cultivo do algodão herbáceo em sistema de sequeiro no Nordeste do Brasil / Madson Tavares Silva. — Campina Grande, 2010.

101 f. : i. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientadores: Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva, Prof. Dr. Pedro Vieira de Azevedo.

1. Precipitação Pluvial. 2. Balanço Hídrico. 3. Zoneamento Agrícola. 4. Mudanças Climáticas. I. Título.


CDU – 551.577.21(043)


**MADSON TAVARES SILVA**


**IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CULTIVO DO ALGODÃO  
HERBÁCEO EM SISTEMA DE SEQUEIRO NO NORDESTE DO BRASIL**


**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 04/03/2010**

**BANCA EXAMINADORA**

  
Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande

  
Prof. Dr. PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande

  
Prof. Dr. JOSÉ IVALDO BARBOSA DE BRITO  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande

  
Prof. Dr. INAJA FRANCISCO DE SOUSA  
Departamento Engenharia Agrônômica  
Universidade Federal de Sergipe

"O que você tem capacidade de fazer,  
tem capacidade também de não fazer."

(Aristóteles)

## DEDICATÓRIA

A Deus,  
por sempre estar comigo, mesmo quando nem mesmo eu acreditava que iria conseguir superar as  
dificuldades encontradas ao longo dessa jornada.

A meus pais,  
Manoel e Justina, pela compreensão e apoio incondicional, fazendo tudo que era possível e às  
vezes quase o impossível para me proporcionar condições que me fizessem uma pessoa capaz de  
traçar meus próprios caminhos, sempre com caráter, força e dedicação.

A minha irmã Márcia Tavares,  
que sempre estive ao meu lado, não apenas como irmã, mas sempre como uma amiga com  
dedicação quase que exclusiva.

A todos os colegas e amigos do curso de Graduação e do Mestrado em Meteorologia,  
que sempre me ajudaram quando foi necessário, e que hoje fazem parte da minha vida, e estarão  
sempre comigo mesmo que por acaso do destino possamos nos separar algum dia. Agradeço em  
especial a Richele Kehrle e Pollyanna Kelly por se fazerem presentes nos momentos alegres e  
difíceis durante essa jornada.

A minha namorada,  
Stephanny Egito,  
mesmo a tão pouco tempo na minha vida, pelo companheirismo, carinho e atenção.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva, por acreditar na minha proposta de trabalho, e não menos importante pelos conselhos, nos momentos de tomadas de decisão, não apenas para minha vida acadêmica, mas para vida em construção de um ser humano justo.

Ao meu amigo e orientador de estágio José Américo Bordini do Amaral, que sempre me ajudou, não apenas com as pesquisas científicas, mas também em como saber lidar com as dificuldades ao longo do caminho que escolhemos traçar.

Aos membros da banca examinadora, pela colaboração na melhoria e engrandecimento desse trabalho.

A todos os professores que fazem parte da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, que sempre me ajudaram.

Aos funcionários da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, em particular a Divanete e Eyres, que se mostraram sempre dispostas a ajudar quando precisei.

A Universidade Federal de Campina Grande, pela excepcional estrutura de ensino e pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pelo suporte financeiro.

De forma geral, agradeço a todos que de algum modo fizeram parte dessa conquista muito importante na minha vida.



## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1</b> Localização da área de estudo	40
<b>Figura 2</b> Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de novembro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (D)	54
<b>Figura 3</b> Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de novembro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (D)	55
<b>Figura 4</b> Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de novembro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (D)	57
<b>Figura 5</b> Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de novembro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (D)	58
<b>Figura 6</b> Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de novembro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (D)	59
<b>Figura 7</b> Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de novembro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (D)	60

- Figura 8** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de janeiro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (D) 62
- Figura 9** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de janeiro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (D) 63
- Figura 10** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de janeiro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (D) 64
- Figura 11** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de janeiro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (D) 65
- Figura 12** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de janeiro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (D) 66
- Figura 13** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de janeiro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (D) 67
- Figura 14** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de março na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (D) 68
- Figura 15** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de março na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (D) 69

- Figura 16** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de março na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (D) 70
- Figura 17** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de março na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (D) 71
- Figura 18** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de março na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (D) 72
- Figura 19** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de março na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (D) 73
- Figura 20** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de maio na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (D) 74
- Figura 21** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de maio na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (D) 75
- Figura 22** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de maio na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (D) 76
- Figura 23** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de maio na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (D) 77

- Figura 24** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de maio na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (D) 78
- Figura 25** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de maio na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (D) 79
- Figura 26** Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo cultivado na região Nordeste do Brasil ao longo do seu período de cultivo, nas condições climáticas de alto risco (A), médio risco (B) e baixo risco climático (C), para o aumento de 1,5 °C na temperatura do ar e acréscimo de 10% (+10 Prec), 25% (+25 Prec) e 40% (+40 Prec) na precipitação média e nas condições climáticas atuais (CCA). Média e desvio padrão (D) do percentual de área agrícola de alto (AR), médio (MR) e baixo (BR) riscos climáticos e nas condições climáticas atuais (CCA) e cenários de +10% Prec, +25% Prec e +40% Prec 88
- Figura 27** Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo cultivado na região Nordeste do Brasil ao longo do seu período de cultivo, nas condições climáticas de alto risco (A), médio risco (B) e baixo risco climático (C), para o aumento de 1,5 °C na temperatura do ar e decréscimo de 10% (-10 Prec), 25% (-25 Prec) e 40% (-40 Prec) na precipitação média e nas condições climáticas atuais (CCA). Média e desvio padrão (D) do percentual de área agrícola de alto (AR), médio (MR) e baixo (BR) riscos climáticos e nas condições climáticas atuais (CCA) e cenários de -10% Prec, -25% Prec e -40% Prec 89
- Figura 28** Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo cultivado na região Nordeste do Brasil ao longo do seu período de cultivo, nas condições climáticas de alto risco (A), médio risco (B) e baixo risco climático (C), para o aumento de 3 °C na temperatura do ar e acréscimo de 10% (+10 Prec), 25% (+25 Prec) e 40% (+40 Prec) na precipitação média e nas condições climáticas atuais (CCA). Média e desvio padrão (D) do percentual de área agrícola de alto (AR), médio (MR) e baixo (BR) riscos climáticos e nas condições climáticas atuais (CCA) e cenários de +10% Prec, +25% Prec e +40% Prec 90
- Figura 29** Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo cultivado na região Nordeste do Brasil ao longo do seu período de cultivo, nas condições climáticas de alto risco (A), médio risco (B) e baixo risco climático (C), para o aumento de 3 °C na temperatura do ar e decréscimo de 10% (-10 Prec), 25% (-25 Prec) e 40% (-40 Prec) na precipitação média e nas condições climáticas atuais (CCA). Média e desvio padrão (D) do percentual de área agrícola de alto (AR), médio (MR) e baixo (BR) riscos climáticos e nas condições climáticas atuais (CCA) e cenários de -10% Prec, -25% Prec e -40% Prec 91

- Figura 30** Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo cultivado na região Nordeste do Brasil ao longo do seu período de cultivo, nas condições climáticas de alto risco (A), médio risco (B) e baixo risco climático (C), para o aumento de 5 °C na temperatura do ar e acréscimo de 10% (+10 Prec), 25% (+25 Prec) e 40% (+40 Prec) na precipitação média e nas condições climáticas atuais (CCA). Média e desvio padrão (D) do percentual de área agrícola de alto (AR), médio (MR) e baixo (BR) riscos climáticos e nas condições climáticas atuais (CCA) e cenários de +10% Prec, +25% Prec e +40% Prec 92
- Figura 31** Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo cultivado na região Nordeste do Brasil ao longo do seu período de cultivo, nas condições climáticas de alto risco (A), médio risco (B) e baixo risco climático (C), para o aumento de 5 °C na temperatura do ar e decréscimo de 10% (-10 Prec), 25% (-25 Prec) e 40% (-40 Prec) na precipitação média e nas condições climáticas atuais (CCA). Média e desvio padrão (D) do percentual de área agrícola de alto (AR), médio (MR) e baixo (BR) riscos climáticos e nas condições climáticas atuais (CCA) e cenários de -10% Prec, -25% Prec e -40% Prec 94

## LISTA DE TABELAS

	Pág.
<b>Tabela 1</b> Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil, com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) para o cultivo do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil para as condições climáticas atuais (CCA), aumento de 1,5 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial, aumento de 3 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial, e aumento de 5 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial	80
<b>Tabela 2</b> Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil, com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) para o cultivo do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil para as condições climáticas atuais (CCA), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial, aumento de 3 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial, e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial	81
<b>Tabela 3</b> Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil, com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) para o cultivo do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil para as condições climáticas atuais (CCA), aumento de 1,5 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial, aumento de 3 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial, e aumento de 5 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial.	83
<b>Tabela 4</b> Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil, com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) para o cultivo do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil para as condições climáticas atuais (CCA), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial, aumento de 3 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial, e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial.	84
<b>Tabela 5</b> Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil, com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) para o cultivo do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil para as condições climáticas atuais (CCA), aumento de 1,5 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial, aumento de 3 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial, e aumento de 5 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial.	85

<b>Tabela 6</b>	Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil, com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) para o cultivo do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil para as condições climáticas atuais (CCA), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial, aumento de 3 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial, e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial.	86
-----------------	--	----

**LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS**

BRASDHC	-	Brasil – Diagnóstico Hídrico das Culturas
ENOS	-	El Niño Oscilação Sul
ET <sub>m</sub>	-	Evapotranspiração máxima
ET <sub>p</sub>	-	Evapotranspiração potencial
ET <sub>r</sub>	-	Evapotranspiração real
GCM	-	General Circulation Model
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INO	-	Índice do Niño Oceânico
IOS	-	Índice de Oscilação Sul
IPCC	-	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISNA	-	Índice de Satisfação da Necessidade de Água para a cultura
K <sub>c</sub>	-	Coefficientes de cultivo
MAPA	-	Ministério da Agricultura, Pecuária, e Abastecimento
NOAA	-	National Oceanic and Atmospheric Administration
OMM	-	Organização Meteorológica Mundial
PROAGRO	-	Programa de Garantia da Atividade Agropecuária
SARRA	-	Sistema de Análise Regional do Risco Agroclimático
SIG		Sistema de Informação Geográfica
SRES	-	Special Report on Emissions Scenarios
SUDENE	-	Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
TSM	-	Temperatura da Superfície do Mar
UACA	-	Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
UNEP	-	United Nations Environment Programme
ZCIT	-	Zona de Convergência Intertropical



# IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CULTIVO DO ALGODÃO HERBÁCEO EM SISTEMA DE SEQUEIRO NO NORDESTE DO BRASIL

## RESUMO

Este estudo avalia os impactos das alterações climáticas sobre o zoneamento agrícola de risco climático do algodoeiro herbáceo (*Gossypium hirsutum* L. *latifolium* Hutch) cultivado na região Nordeste do Brasil, com base nos relatórios do IPCC. O modelo de balanço hídrico, combinado com técnicas de geoprocessamento (SIG), foi utilizado para identificar as áreas da região de estudo onde a cultura sofrerá restrições de rendimento devido às mudanças climáticas. Os dados utilizados no estudo foram as séries históricas de precipitação pluvial com no mínimo 30 anos de dados diários, coeficientes de cultura, evapotranspiração potencial e a duração do ciclo da cultura. Os cenários denominados de A, B e C são correspondentes, respectivamente, aos aumentos de temperatura do ar de 1,5; 3 e 5 °C. Esses cenários de aumento de temperatura do ar foram associados com as alterações na precipitação de  $\pm 10$ ,  $\pm 25$  e  $\pm 40\%$ , correspondentes aos eventos de El Niño (desvios negativos) e de La Niña (desvios positivos) na simulação da época de semeadura da cultura. Foi adotado como critério de corte para o Índice de Satisfação das Necessidades de Água para a cultura (ISNA), definido como a relação entre a evapotranspiração real e a evapotranspiração máxima ( $ET_r/ET_m$ ), o valor 0,55. Os resultados obtidos sugerem que as mudanças climáticas levam à redução das áreas agricultáveis favoráveis ao cultivo com o algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil; e, conseqüentemente, resultando em perdas significativas nos níveis de produção.

**Palavras-Chave:** Precipitação pluvial, balanço hídrico, zoneamento agrícola, mudanças climáticas

## **IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON COTTON CULTIVATION GROWN IN THE RAINFED SYSTEM IN NORTHEASTERN REGION OF BRAZIL**

### **ABSTRACT**

This study assesses the impacts of climate change on the agricultural zoning of climatic risk in cotton (*Gossypium hirsutum* L. *latifolium* Hutch) grown in northeastern region of Brazil, based on the IPCC reports. The water balance model, combined with geospatial technologies (GIS), was used to identify areas of the study area where the crop will suffer yield restrictions due to climate change. The data used were the time series in rainfall at least 30 years of daily data, crop coefficients, potential evapotranspiration and duration of the crop cycle. The scenarios referred here as A, B and C are corresponding to the increases in air temperature of 1.5, 3 and 5 °C, respectively. These scenarios of increase in air temperature were associated with changes in precipitation  $\pm 10$ ,  $\pm 25$  and  $\pm 40\%$ , which are associated to the El Niño events (negative deviations) and La Niña (positive deviations) in the simulation of sowing crop. It was adopted as baseline for the Water Requirements Satisfaction Index for culture (WRSI), defined as the ratio between actual evapotranspiration and maximum evapotranspiration ( $E_{Tr}/E_{Tm}$ ), the value 0.55. The results suggest that climate change leads to the reduction in agricultural areas of cotton crop growth in northeastern region of Brazil, and thus resulting in significant losses in crop production.

**Keywords:** Rainfall, water balance, agricultural zoning, climate change.

## SUMÁRIO

	Pág.
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	26
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	30
2.1. Mudanças climáticas .....	30
2.2. Os fenômenos El Niño e La Niña .....	31
2.3. Mudanças climáticas e agricultura .....	33
2.4. A cultura do algodoeiro .....	34
2.5. Modelagem agrometeorológica .....	35
2.6. Índice de satisfação das necessidades de água .....	36
2.7. Zoneamento agrícola .....	37
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	39
<b>3.1. Área de estudo</b> .....	39
3.1.1. Localização .....	39
3.1.2. Solos .....	39
3.1.3. Clima .....	40
3.1.4. Vegetação .....	43
<b>3.2. Características da cultura</b> .....	44
3.2.1. Importância econômica .....	44
3.2.2. Solos apropriados .....	45
3.2.3. Clima .....	45
<b>3.3. Balanço hídrico</b> .....	46
3.3.1. Modelos computacionais .....	47
<b>3.4. Definição do risco climático</b> .....	48
3.4.1. Dados meteorológicos .....	48
3.4.2. Softwares utilizados .....	48
3.4.3. Condições para cálculo do risco climático .....	48
3.4.3.1. Controle de qualidade dos dados .....	49
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	52
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	98
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	100

## 1. INTRODUÇÃO

O aumento acentuado na concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), monóxido de carbono (CO), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), ozônio (O<sub>3</sub>), CFCs e outros gases poluentes na atmosfera é observado a partir da revolução industrial. O acréscimo na concentração desses gases, conhecidos como “gases do efeito estufa”, propicia a ocorrência de mudanças climáticas, destacando-se o aquecimento global, que é caracterizado pelas modificações nos padrões de temperatura, ventos, pluviosidade e circulação dos oceanos (Lima et al., 2001). Apesar dos intensos esforços de diversos países em atingir as metas ambientais propostas nos acordos internacionais, as mudanças climáticas constituem uma problemática para o planeta no futuro próximo.

A preocupação com as conseqüências do aquecimento global ganhou notoriedade a partir da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada em 1992, no Brasil na cidade do Rio de Janeiro. Nessa oportunidade, importantes tratados foram firmados, destacando-se a aprovação da Convenção sobre Mudanças Climáticas, onde mais de 150 países assumiram o compromisso de reduzir suas emissões de gases do efeito estufa. Esse consenso levou a outro tratado, mais ambicioso e de extrema importância para dar suporte operacional à Convenção do Clima - o Protocolo de Kyoto - que tem como meta reduzir 5,2% das emissões de gases do efeito estufa (São Paulo, 1997). Para Marengo (2001) já são percebidos alguns efeitos adversos sobre o clima do planeta, tal como o aumento do nível do mar, alteração no suprimento de água doce, fortes e mais freqüentes tempestades de chuva e neve e ressecamento rápido do solo devido a períodos secos mais intensos. Para esse autor, a temperatura média da superfície da Terra atualmente está mais alta do que em qualquer época dos últimos 600 anos, sendo a década de 1990 a mais quente do milênio.

Diversas terminologias têm sido adotadas para definir as alterações que estão ocorrendo no planeta. O termo “mudança ambiental global”, usado por Staddon et al. (2002), envolve uma

ampla gama de eventos, incluindo o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico, que resulta não só no aquecimento global, mas, também, no aumento da concentração de ozônio na troposfera dentre outros impactos associados. Os termos “mudança biosférica” ou “mudança global” foram sugeridos como substitutos da expressão “mudança climática” por Coakley (1995), porque envolvem o conceito de que interações complexas estão ocorrendo entre o ambiente físico e o biológico. As alterações de um desses fatores afetam o outro e podem resultar em efeitos aditivos ou sinérgicos no ambiente global. A mudança climática pode afetar, de diferentes formas, um grupo de organismos, que por sua vez afeta outros; e, por fim, causar efeitos no ambiente físico (Coakley, 1995).

A problemática das mudanças climáticas globais foi reconhecida pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e a UNEP (*United Nations Environment Programme*) que criaram em 1988 o IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). O IPCC é uma entidade formada por cientistas de todo o mundo, com objetivo de divulgar abertamente as informações técnicas e sócio-econômicas e os impactos relevantes aos riscos à humanidade visando criar mecanismos para a adaptação e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas globais. Em 2001, o IPCC, por meio de modelos matemáticos baseados em dados registrados nos oceanos, biosfera e atmosfera indicou um aumento entre 1,4 e 5,8 °C da temperatura global até o final do século XXI (IPCC, 2001a e 2001b). As magnitudes de tais previsões são ainda incertas, pois pouco se sabe sobre os processos de trocas de calor, de carbono e de radiação entre os diversos setores do sistema Terra-atmosfera. Recentemente, um grupo de cientistas ingleses e americanos da Universidade de Virgínia (EUA) ratificou as informações divulgadas pelo IPCC de que a elevação da temperatura do ar ocorrida no final do Século XX foi realmente anômala e que o homem teve um papel relevante nesse processo.

Segundo Assad & Pinto (2008), o aumento das temperaturas previsto para os próximos anos poderá ser até certo ponto benéfico; por outro lado, o comportamento fisiológico das plantas é prejudicado por altas temperaturas. A fotossíntese, que pode ser beneficiada com a maior quantidade de gás carbônico disponível na atmosfera, tende a decrescer gradualmente, na maioria dos vegetais, a partir de temperaturas menores do que 22 °C e maiores do que 40 °C. Acima de 40 °C, os estômatos (estrutura na superfície das folhas onde ocorre a troca de gases com a atmosfera) se fecham, interrompendo a fotossíntese. Por causa disso, ondas de calor que geram temperaturas do ar acima de 34 °C durante três ou quatro dias consecutivos acabam sendo altamente danosas às culturas agrícolas (Assad & Pinto, 2008). Se esses índices térmicos ocorrem na fase de florescimento das plantas, as flores morrem. Assim, é necessária a definição de culturas resistentes às condições edafo-climáticas reinantes nas condições atuais como

também para futuros cenários climáticos, visto que a possibilidade de sucesso na colheita dos pequenos e grandes agricultores se torna maior à medida que os riscos climáticos são minimizados. Com base nesse pressuposto, o desenvolvimento do zoneamento agrícola se constitui numa ferramenta que busca a minimização dos riscos mais freqüentes que a cultura poderá sofrer no período de plantio até a sua colheita.

Na região semiárida do Brasil, devido a grande irregularidade do regime pluviométrico, a conciliação dos períodos chuvosos e as melhores épocas de plantio são fatores determinantes para o sucesso da exploração agrícola de qualquer cultura. A irregularidade do período chuvoso nessa região restringe a escolha de qualquer cultura a ser implantada, principalmente na maior parte do semiárido onde o déficit hídrico é ainda maior (Silva et al., 2009a). A metodologia utilizada na definição de futuros cenários de mudanças climáticas permite então que se conheça em detalhes a geografia agrícola nacional, tal como a distribuição espacial das aptidões de cada cultura em função da disponibilidade climática de cada região. Uma área, em um determinado período, é considerada de baixo risco climático quando a probabilidade máxima de ocorrência de seca ou excesso de chuvas é de 20% (Silva et al., 2009b). Para definir esses riscos são considerados, além dos dados meteorológicos de chuva e temperatura do ar, índices específicos desenvolvidos para apontar a sensibilidade das culturas a eventos extremos que possam ocorrer em fases críticas da vida da planta. Ainda, são consideradas a capacidade de retenção de água no solo, a profundidade das raízes das plantas cultivadas, a duração do seu ciclo, a quantidade de chuva e a variação desse conjunto de dados no período (Silva et al., 2009b).

Os modelos de simulação do sistema solo-planta-atmosfera constituem uma ferramenta importante para estudos que envolvem aplicações sob condições de grande variabilidade ambiental, pois permitem determinar os riscos envolvidos na produção agrícola em função dos principais componentes de produção. Eles possibilitam a repetição de diferentes condições de manejo em vários anos e locais, usando-se dados climáticos históricos (Harrison et al., 1989). Os resultados, representados em forma de funções de probabilidade, ao invés de simples médias, permitem mensurar a variabilidade do desempenho das diferentes técnicas adotadas, possibilitando a definição de estratégias mais adequadas para a obtenção de produtividades máximas e estáveis, com menor custo de produção e impacto ambiental. A interpretação e a aplicação da informação podem ser facilitadas pela representação espacial dos resultados das simulações em mapas com escala regional. Assim, o uso de modelos pode proporcionar valiosa contribuição, a um baixo custo, para o entendimento dos processos condicionantes da produtividade e para melhorar as recomendações de práticas de manejo de solo e culturas em diferentes áreas (Campos et al., 2010).

Tendo em vista a importância da agricultura para a economia brasileira, faz-se necessária a avaliação do impacto não só no estudo para variações de clima sazonais, mas também para mudança de clima, como apresentado pelo relatório de “Painel Intergovernamental em Mudanças do Clima” (IPCC 2001a e 2001b). Vários estudos evidenciam que a definição das épocas de semeadura, por meio do balanço hídrico do solo, contribui para reduzir o risco climático causado pela distribuição irregular das chuvas (Rodrigues Neto, 1991; Assad et al., 1997; Andrade Júnior et al., 2001; Silva et al., 2009). Algumas pesquisas têm sido realizadas para se determinar a época de plantio do algodão herbáceo cultivado em sistema de sequeiro na região Nordeste do Brasil (Azevedo & Silva, 2007; Amaral & Silva, 2007). Entretanto, o estudo do impacto das mudanças climáticas no cultivo do algodão herbáceo na região Nordeste do Brasil é ainda incipiente. Neste contexto, a presente dissertação de mestrado tem os seguintes os objetivos:

**(a) Geral:** Identificar os riscos climáticos associados ao algodão herbáceo cultivado em sistema de sequeiro na região Nordeste do Brasil, de acordo com os cenários de aquecimento global propostos pelo IPCC associados às ocorrências dos fenômenos El Niño e La Niña.

**(b) Específicos:**

- (i) Analisar os riscos climáticos do algodão herbáceo cultivado mediante os cenários de aquecimento de 1,5; 3 e 5 °C associados às ocorrências dos fenômenos El Niño e La Niña na região de estudo;
- (ii) Determinar as áreas da região Nordeste do Brasil onde as mudanças climáticas terão maior e menor impactos no cultivo do algodão herbáceo mediante os cenários de mudanças climática estabelecidos neste estudo;
- (iii) Determinar as melhores épocas de cultivo do algodão herbáceo na região Nordeste do Brasil mediante às condições atuais e de mudanças climática.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. *Mudanças climáticas*

As atividades antrópicas estão alterando as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera, levando a mudanças do clima do planeta (Chakraborty, 2001). A ação antrópica foi intensificada após a Revolução Industrial e se caracteriza pela emissão de gases na atmosfera devido ao uso de recursos naturais pelo homem. Como consequência, há uma maior retenção de radiação, que resulta no aumento do efeito estufa, elevando a temperatura média da superfície do planeta. Por esse motivo, a mudança climática é comumente denominada de aquecimento global, mas outros efeitos são também importantes, como alterações nos padrões de distribuição e intensidade de ventos, chuvas e circulações dos oceanos. Embora haja registro de mudanças climáticas originárias de causas naturais na história, as modificações resultantes da atividade humana estão crescendo significativamente nas últimas décadas (Chakraborty, 2001).

A idéia de que a ação do homem pode modificar os processos fundamentais do planeta é relativamente nova, pois se pensavam que os sistemas naturais seriam suficientes para eliminar as ações antropogênicas. Entretanto, o balanço dos sistemas naturais é, em muitos casos, extremamente complexo (Atkinson, 1993). O desenvolvimento de regiões urbanas e agrícolas, devido à intensificação das atividades econômicas, tem levado ao manejo inadequado dos recursos naturais. Essas atividades também têm resultado num aumento significativo de emissões de gases, oriundos da própria agricultura, queima de combustíveis fósseis e processos industriais (Manning & Tiedmann, 1995). Os problemas gerados pelas mudanças climáticas revelam uma das grandes ameaças ao planeta do futuro próximo. Desde o final do século XIX, a temperatura média da Terra aumentou entre 0,2 a 0,6 °C, e estima-se que em 2100 deve atingir valores entre 1,5 e 6 °C. O aumento da concentração de um único gás atmosférico tem efeito direto na biota do planeta; mas, além disso, se forem considerados os efeitos desse aumento no clima global, outros



fatores podem exercer significativa influência e interagir conjuntamente, como o aumento de temperatura, mudanças no regime de chuvas e de ventos (Manning & Tiedemann, 1995). Desde o início da Revolução Industrial, o CO<sub>2</sub>, por exemplo, sofreu um aumento de aproximadamente 30%; o CH<sub>4</sub>, de 145%; e o N<sub>2</sub>O, de 15% (Chakraborty et al., 2000a,b; Chakraborty, 2001).

Segundo Colhoun (1973) a importância do ambiente sobre o desenvolvimento de doenças nas plantas tem sido observada há mais de dois mil anos. Naquela época já se observava que os cereais plantados em regiões de maior altitude apresentavam menor incidência de doenças do que os cultivados em locais de menor altitude. Durante o século XVIII, e início do século XIX, iniciou-se o estudo dos efeitos da nutrição, umidade do ar e a influência dos ventos na ocorrência de doenças de plantas (Colhoun, 1973). Atualmente, sabe-se que o ambiente pode influenciar o desenvolvimento e a suscetibilidade da planta hospedeira, a multiplicação, a sobrevivência e as atividades patogênicas, assim como a interação entre a planta hospedeira e o patógeno. As variações e mudanças climáticas globais apresentam reflexos no desenvolvimento de doenças de plantas (Colhoun, 1973).

Segundo o relatório do IPCC (2007) a produção de alimentos em todo o mundo pode sofrer um impacto dramático nas próximas décadas por conta das mudanças climáticas provocadas pelo aquecimento global. O aumento da temperatura ameaça o cultivo de várias plantas agrícolas e pode piorar o já grave problema da fome nas partes mais vulneráveis do planeta. Os países pobres da África e da Ásia seriam os mais afetados; e, também, os grandes produtores agrícolas, como o Brasil, sentiriam tais efeitos já na próxima década IPCC (2007).

## *2.2. Os fenômenos El Niño e La Niña*

O El Niño/Oscilação Sul (ENOS) é um fenômeno de grande escala que acontece na região do Oceano Pacífico Equatorial e que afeta o tempo e o clima em diversos locais do Globo Terrestre (Cane, 2001). O ENOS é constituído de dois componentes, um oceânico e outro atmosférico. O componente oceânico é caracterizado por anomalias da temperatura das águas superficiais do Oceano Pacífico Equatorial e é atualmente monitorado através da Temperatura da Superfície do Mar (TSM). O componente atmosférico, também conhecido de Oscilação Sul (OS), expressa a correlação inversa existente entre a pressão atmosférica no leste e extremo oeste do Oceano Pacífico, quando a anomalia de pressão é positiva a leste usualmente é negativa a oeste e vice e versa. O Índice de Oscilação Sul (IOS) é utilizado no monitoramento do componente atmosférico e é caracterizado por anomalias de pressão atmosférica na região de Darwin, norte da Austrália (12,4°S; 130,9°E) e do Taiti, na Polinésia Francesa (17,5°S; 149,6°W)

(Philander, 1990; Glantz, 2001). A fase negativa do OS esta associada a fase quente (El Niño), enquanto a fase positiva com a fria (La Niña). A fase negativa do OS, caracteriza-se por um aquecimento das águas simultaneamente com a diminuição da pressão atmosférica no Pacífico Leste. Enquanto na fase positiva, ocorre um resfriamento das águas e um aumento na pressão atmosférica na região leste do Pacífico (Berlato & Fontana, 2003; Grimm et al., 1998).

O fenômeno ENOS inicia no começo do segundo semestre de um ano e termina no final do primeiro semestre do ano seguinte (Grimm et al., 2000; Berlato & Fontana, 2003; Berlato et al., 2005). Existem vários critérios para se definir as fases e a intensidade do fenômeno ENOS. No critério da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), um episódio de El Niño ou La Niña é definido pelo Índice do Niño Oceânico (INO) resultante da média móvel trimestral da anomalia da temperatura da superfície do mar (TSM). A TSM é coletada em quatro regiões do Pacífico e a região mais usada para pesquisa e monitoramento das águas do oceano é aquela chamada de Niño 3-4. Esse fenômeno se caracteriza quando a anomalia de temperatura é  $\geq 0,5$  °C e a La Niña quando a anomalia da temperatura for  $\leq 0,5$  °C durante, no mínimo, cinco meses consecutivos (NOAA, 2008). O fenômeno ENOS tem como região de origem o Oceano Pacífico Equatorial. Nessa região do Pacífico, em função dos ventos alísios, que sopram predominantemente de sudeste no Hemisfério Sul, há um padrão de circulação oceânica tal que, na costa da América do Sul, as águas são normalmente frias (ressurgência de águas profundas) e, no extremo oposto, região da Indonésia e costa Norte da Austrália, as águas são, em geral, quentes. Essas diferenças de temperatura das águas entre o lado leste e o oeste na bacia do Oceano Pacífico resultam em diferenças de pressão atmosférica na superfície e em uma circulação secundária da atmosfera nesta região conhecida como célula de Walker no sentido leste-oeste. Isso provoca ascensão de ar na parte oeste do Pacífico Tropical e correntes descendentes do ar atmosférico na parte leste. Essa circulação atmosférica faz com que a parte oeste do Oceano Pacífico seja uma região de chuvas frequentes e, de forma oposta, a parte leste, junto à costa na costa da América do Sul, seja uma região de chuvas escassas (Cunha, 1999).

Em anos de El Niño, verifica-se um enfraquecimento dos ventos alísios na região do Pacífico Equatorial. Com isso, há o deslocamento do ramo ascendente da célula de Walker para a parte central do Oceano Pacífico e as águas com anomalias quentes do Oceano Pacífico Tropical chegam a atingir a costa oeste da América do Sul, na altura do Peru e do Equador. Assim, passa a ocorrer ascensão de ar nessa região, fazendo com que a costa da América do Sul experimente chuvas acima da normal. Em condições de La Niña, há uma intensificação nas condições normais do oceano e da atmosfera na região tropical do Oceano Pacífico, fazendo com que a célula de Walker se intensifique, os ventos alísios sopram com mais intensidade, causando um

aumento no carregamento das águas quentes para oeste, resultando em chuvas abaixo da normal na costa oeste da América do Sul (Berlato & Fontana, 2003).

O fenômeno El Niño, por exemplo, promove severas alterações na temperatura do ar e na precipitação pluvial. Gómez et al. (1999) demonstraram que em Cuba, para o período de 1929 a 1990, houve correlação entre a ocorrência do evento El Niño e epidemias. Vários trabalhos mostram que na Região Sudeste da América do Sul, composta pelos Sul do Brasil, Nordeste da Argentina, Uruguai e Sul do Paraguai, o fenômeno ENOS apresenta forte sinal, especialmente em relação à precipitação pluviométrica (Rao & Hada, 1990; Studzinski, 1995; Diaz et al., 1998; Grimm et al., 1998). No Brasil, o impacto da fase quente e da fase fria do ENOS se dá principalmente sobre a precipitação pluviométrica das regiões Sul e Nordeste, onde em anos de El Niño, a precipitação pluviométrica fica acima da normal climatológica na região Sul, enquanto que na região Nordeste é abaixo da normal. Já para anos de La Niña, é o contrário (Grimm et al., 1996; Oliveira & Satyamurty, 1998; Marengo & Oliveira, 1998; Diaz et al., 1998; Berlato & Fontana, 2003).

### *2.3. Mudanças climáticas e agricultura*

A agricultura é uma atividade econômica que depende diretamente dos fatores climáticos. Qualquer mudança no clima pode afetar o zoneamento agrícola, a produtividade das diversas culturas e as técnicas de manejo. Tais alterações podem representar sérias conseqüências econômicas, sociais e ambientais (EPE, 1989). A proteção de plantas, cabe também é feita pela redução ou eliminação dos danos causados pelos problemas fitossanitários, permitindo que o potencial de aumento de produção seja alcançado. Por esse motivo, a análise dos possíveis efeitos das alterações climáticas sobre as doenças de plantas é fundamental para a adoção de medidas mitigadoras, com a finalidade de evitar prejuízos. No passado, diversas epidemias que ocorreram na agricultura brasileira poderiam ter sido evitadas ou os danos reduzidos se estudos tivessem sido realizados para a adoção de medidas preventivas (EPE, 1989).

A produtividade potencial de determinada cultura pode ser estimada por meio da técnica de modelagem, pela qual o modelo é definido como a representação matemática de um sistema ou um processo. A simulação inclui os processos necessários para a operacionalização do modelo visando simular o que acontece no sistema (Wit, 1978). Quando o desempenho de um sistema é representado matematicamente por equações, tem-se um modelo matemático, que vai definir quantitativamente as hipóteses sobre o sistema real, permitindo deduzir suas conseqüências (Dourado-Neto et al., 1998). Nesse particular, Alfonsi (1996) afirma que a grande

variabilidade dos elementos meteorológicos no tempo e no espaço aumenta a necessidade de desenvolvimento de modelos matemáticos na definição das condições climáticas em todo o mundo, além de suas interações com os organismos vivos.

#### *2.4. A cultura do algodoeiro*

A produção nacional de algodão em caroço foi de 4 milhões de toneladas em 2007, de acordo com dados do IBGE (2008), superando em 41,4% a de 2006 e em 7,9% com a safra recorde de 2004 (3,7 milhões de toneladas). Esse incremento deveu-se à ampliação da área de colheita, que alcançou 1,1 milhões de hectares, 19,8% maior que a de 2006. Hoje os principais Estados brasileiros produtores são Mato Grosso e Bahia, seguidos de Goiás, São Paulo, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul. O maior município produtor em 2007 foi São Desidério, no Cerrado baiano, responsável por 12,8% da produção nacional. De acordo com o Ministério da Agricultura, o Brasil é o quarto maior exportador de algodão e o quinto maior produtor mundial (Assad & Pinto, 2008). Porém, os autores ressaltam que a produtividade no Nordeste do Brasil é altamente sensível à precipitação e temperatura do ar. A alta variabilidade no clima em diferentes escalas temporais e espaciais tem repercussões na segurança alimentar a longo prazo e no desenvolvimento econômico da região (Assad & Pinto, 2008).

A produção agrícola da região Nordeste do Brasil tem sido fortemente afetada pelos efeitos das frequentes e longas estiagens ocorridas, principalmente no chamado "Polígono das secas", tornando a atividade agrícola nessa região primordialmente de subsistência (Assad & Pinto, 2008). A principal alternativa para tal situação é o aproveitamento das áreas com maior potencial agrícola, do ponto de vista de água e solo, com a exploração racional dos recursos hídricos e edáficos disponíveis, através da exploração das culturas economicamente mais rentáveis. Assim, tanto na agricultura irrigada quanto de sequeiro, faz-se necessário que os recursos naturais disponíveis na região sejam usados de forma racional, através da utilização de técnicas apropriadas de manejo da água, do solo e do plantio e/ou semeadura (Chaves et al., 1982).

## 2.5. Modelagem agrometeorológica

Novas tecnologias, como sistemas de informações geográficas, sensoriamento remoto e modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e produtividade de culturas, vêm sendo desenvolvidas nas últimas décadas, abrindo novos caminhos para a pesquisa de planejamento e manejo de práticas agrícolas. O uso de modelos de culturas para simulação em computadores possibilita uma economia de tempo, trabalho e quantidade de recursos para o planejamento e tomada de decisões de manejo no setor agrícola. A utilização de modelos de culturas em associação às técnicas de geoprocessamento facilita a identificação de locais e épocas mais recomendadas para o desenvolvimento das culturas, tornando-se uma importante ferramenta para o zoneamento agrícola e difusão de informações (Figueiredo Júnior, 2004).

As vantagens da utilização de modelos agrometeorológicos, segundo Pessoa et al. (1997), estão associadas ao baixo custo, velocidade de obtenção dos resultados, completa informação, criação e proposição de cenários ideais. Quanto às limitações, podem ser citados aspectos referentes à validação dos modelos e simuladores, dificuldade de decisão (quando o problema possui mais de uma solução), confiabilidade e exatidão do modelo empregado, variabilidade espacial e temporal dos dados. Na agricultura, os modelos têm sido usados na simulação do crescimento da planta e na previsão da produtividade. A relação funcional entre crescimento e desenvolvimento relativo, entre fenologia e variação temporal do índice foliar, tem sido comumente utilizada com essa finalidade. Usualmente, os modelos de simulação de produtividade potencial das culturas utilizam atributos da planta relacionados à produção de fitomassa seca, tais como área foliar, crescimento e fenologia (Yin, 1996).

A modelagem agrometeorológica tem um papel de suma importância no fornecimento de subsídio aos pesquisadores da área agrônômica, extensionistas e agricultores em geral, para que seja possível a interpretação das relações solo-planta-atmosfera e sua utilização em uma agricultura racional e sustentável. O estudo do efeito das condições do tempo e do clima na agricultura é o problema básico da agrometeorologia. Assim, para se estabelecer essa relação é fundamental o conhecimento dos elementos meteorológicos primários, tais como o vento, radiação solar, temperatura e umidade do ar. As combinações específicas desses elementos, associadas aos outros fatores locais, determinam o crescimento, desenvolvimento e produtividade dos organismos vivos (Lima, 1995).

Siqueira et al. (2001) realizando pesquisas sobre o efeito estufa, desenvolvidas a partir de modelos de equilíbrio atmosférico, projetaram elevações de temperatura em torno de 3 a 5 °C

para o Brasil, com tendência de maiores efeitos para as regiões Central, Sul e Centro-Sul. Os modelos projetaram um aumento médio no volume anual de chuvas em torno de 11%.

Segundo Siqueira et al. (2001) os impactos são mais expressivos nas latitudes maiores, com aumento no volume de chuvas para os meses de março a maio e de setembro a novembro. Esses períodos são justamente referentes às lavouras de verão na fase de colheita e cultivos de inverno em plena fase produtiva. O aumento da precipitação na primavera pode representar maiores dificuldades quanto ao manejo dos cultivos, maior probabilidade de incidência de doenças nos cultivos de inverno e maiores riscos de erosão hídrica do solo, considerando-se que, nessa época se realiza o preparo do solo para a instalação dos cultivos de verão. Para o Nordeste brasileiro, excluindo-se o aumento de 15% no volume de chuvas previsto para o trimestre de março a maio, para os demais meses do ano são projetadas reduções do volume de chuvas, especialmente no inverno (redução de 21%). Siqueira et al. (2001) ainda ressaltam que os resultados apontam a possibilidade de agravamento dos conflitos associados à disponibilidade de água para o Nordeste. Pode ocorrer encurtamento do ciclo em torno de 15% para as culturas de trigo e milho, e nenhum efeito para a soja e reduções da produtividade potencial média, em torno de 30 e 16%, para o trigo e milho, respectivamente, com reflexos positivos para a cultura da soja, em torno de 21%. As estimativas de produção anual de grãos de trigo e milho correspondem, respectivamente, a reduções em torno de 1 a 2,8 milhões de toneladas, em contraste com aumento de 3,5 milhões de toneladas para a soja. Porém, os autores alertam que pesquisas relacionadas ao manejo de pragas, de doenças e do solo se tornam cada vez mais importantes no contexto do efeito estufa, em face dos impactos ambientais esperados.

## *2.6. Índice de satisfação das necessidades de água*

Dentre os parâmetros obtidos a partir da simulação do balanço hídrico, destaca-se o Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA), obtido pela relação entre a Evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>) e a Evapotranspiração máxima (ET<sub>m</sub>), ou seja, a relação entre a quantidade de água que a planta consumiu e a que seria desejável a fim de garantir sua máxima produtividade. Segundo (Brunini et al., 2001; Farias et al., 2001; Sans et al., 2001) a utilização do balanço hídrico tem como objetivo determinar as melhores datas de plantio, a partir de dados de 15 anos de precipitação pluviométrica diária, da capacidade de armazenamento de água no solo, do coeficiente de cultura ( $K_c$ ), da evapotranspiração potencial e duração do ciclo e das fases fenológicas da cultura. Dentre as fases identificadas, o período de enchimento de grãos é considerado o mais crítico para o milho, a soja, o trigo, o feijão e o arroz em termos de

necessidade de água. Com relação ao milho, além dessas variáveis, a determinação da melhor data de plantio está diretamente relacionada com a soma térmica no período de cultivo. Assim, é necessário calcular os graus-dia durante o período para se conhecer a duração do ciclo (Brunini et al., 2001).

Determinada a duração do ciclo, calcula-se o ISNA médio da fase fenológica mais sensível, para cada ano da série histórica e, em seguida, realiza-se uma análise frequencial em relação a 20, 50 e 80% de ocorrência. A espacialização é feita indicando quando o índice é maior ou igual a um determinado valor para oito em cada 10 anos, isto é, em 80% dos anos analisados (Assad & Sano, 1998). No mapeamento das datas de plantio, são feitos fatiamentos das classes, indicando alto, médio e baixo riscos climáticos para o plantio. A transição entre uma classe considerada de baixo risco e outra de médio ou alto risco é abrupta e descontínua no espaço (Assad & Sano, 1998). Portanto, torna-se necessário testar outros métodos que possam mapear a variabilidade espacial bem como a propagação espacial do erro da interpolação.

## *2.7. Zoneamento agrícola*

Dentre diversos programas de transferência de tecnologia e informação, o programa de zoneamento agrícola do Ministério da Agricultura, Pecuária, e Abastecimento (MAPA), que teve início no Brasil em 1996, é um instrumento de apoio à Política Agrícola do Governo Federal na área de crédito e securidade rural. Além disso, ele é um instrumento de indução ao uso de tecnologia e de suporte para a tomada de decisão no Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (PROAGRO) e, também, serve de referencial para as empresas privadas que atuam na área securitária no Brasil (Cunha & Assad, 2001). O zoneamento agrícola de riscos climáticos é atualizado todos os anos com colheitas novas, cultivares, dados de clima, e métodos de interpolação, melhorando a metodologia ano após ano.

O zoneamento de risco climático da atividade agrícola constitui-se numa ferramenta fundamental para o planejamento da agricultura, que deve ser constantemente atualizado com a utilização de banco de dados cada vez mais completos e consistentes, visando melhor definição dos limites climáticos para o atendimento à adaptabilidade de novas variedades (Sediyama et al., 2001). O zoneamento agrícola se baseia na delimitação das regiões com condições edafoclimáticas homogêneas para o desenvolvimento de atividades agrícolas e gerenciamento dos recursos naturais nela existentes (Santos, 1999). Ainda, segundo Gargantini & Hernandez (2003), 25% da economia brasileira provêm da agroindústria, e o agro-negócio é responsável por 37% da mão-de-obra empregada na agroindústria. A economia globalizada exige que a

agricultura se adapte às novas exigências e complexidades do mercado externo, o que pode ser alcançado através de um sistema gerencial com o melhor aproveitamento possível dos recursos produtivos.

O clima é o fator que oferece os maiores desafios para o correto manejo das culturas. Para que haja crescimento e desenvolvimento das plantas, é necessário que os aspectos do clima, tais como temperatura do ar média (diurna e noturna), precipitação e radiação solar estejam de acordo com as exigências da cultura (Fancelli & Dourado-Neto, 2000). Segundo Wutke et al. (2000), a produção agrícola está diretamente ligada às condições climáticas; podendo, desde a época do plantio até a colheita, ser substancialmente afetada. O manejo racional do solo e da água, através de técnicas convencionais, é imprescindível para a sustentabilidade, de forma a manter esses recursos com qualidade e quantidade suficientes para manter níveis satisfatórios de produtividade Wutke et al. (2000).

Para Vianelo & Alves (1991), apesar dos grandes avanços técnicos alcançados pelo homem, o bem-estar econômico e social continua dependendo do clima, sendo bastante provável que essa dependência continue no futuro. A variabilidade do clima afeta, especialmente, e de maneira significativa, a produção de alimentos. Essa dependência assume maior importância devido à evidência do constante crescimento da população mundial Vianelo & Alves (1991). A dependência do homem ao clima não se manifesta tão somente na produção de alimentos, mas também com respeito a outros fenômenos, tais como inundações, secas ou temperaturas extremas, que afligem gravemente as comunidades urbanas, prejudicam a agricultura, a indústria e o comércio, ameaçando o desenvolvimento econômico e social Vianelo & Alves (1991).



### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Área de estudo**

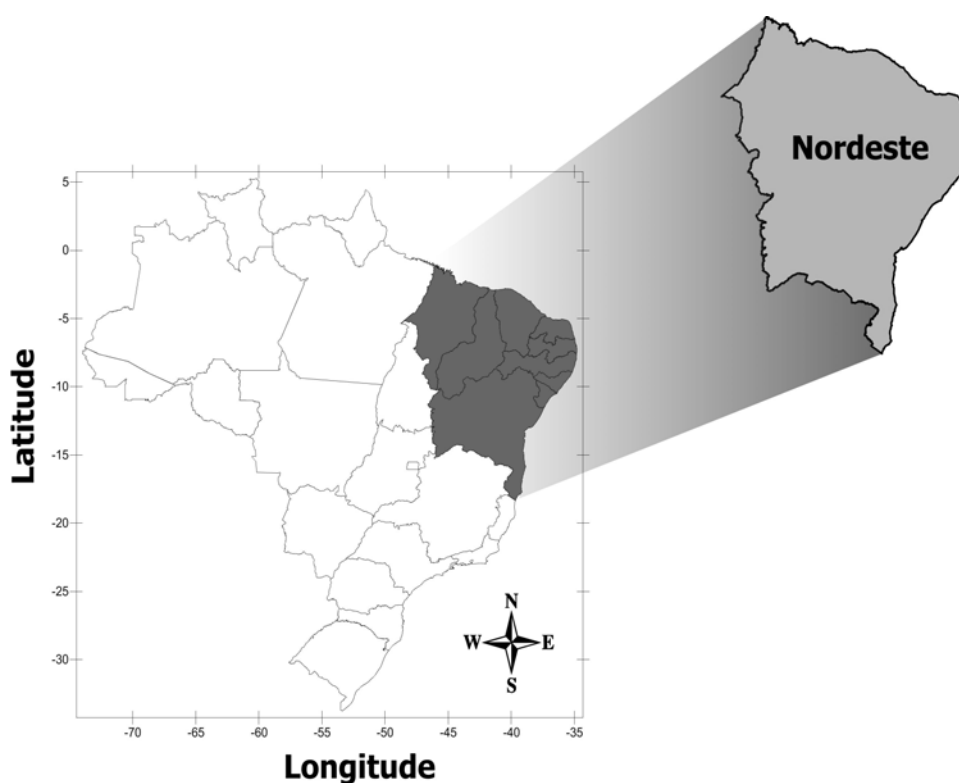
##### *3.1.1. Localização*

A área da região Nordeste brasileiro (NEB) é de 1.558,196 km<sup>2</sup>, que equivalente a 18% do território nacional, possui a maior costa litorânea. Essa região possui os estados com a maior e a menor costa litorânea, respectivamente, Bahia, com 932 km e Piauí, com 60 km de litoral. Essa região, que possui 3338 km de praias, está situado entre os paralelos de 01° 02' 30" de latitude norte e 18° 20' 07" de latitude sul e entre os meridianos de 34° 47' 30" e 48° 45' 24" a oeste do meridiano de Greenwich. Ela se limita ao norte e ao leste com o oceano Atlântico, ao sul com os Estados de Minas Gerais e Espírito Santo e a oeste com os Estados do Pará, Tocantins e Goiás (IBGE, 2009). A Figura 1 exibe a posição geográfica da área de estudo.

##### *3.1.2. Solos*

Os solos do Nordeste brasileiro podem ser agrupados em duas sub-regiões bem distintas e estreitamente relacionados com o clima. Uma delas corresponde a maior parte dos Estados do Piauí e Maranhão e a costa do Rio Grande do Norte até o sul da Bahia. Essa região é caracterizada por um clima úmido e vegetação com predominância de floresta. Os solos dessa sub-região são relativamente profundos e com altos teores de ferro e alumínio. A outra sub-região corresponde ao polígono das secas. Os solos dessa área são ricos em elementos minerais, rasos e com restrições ao seu uso pela seca e excesso de sais (Gonçalves, 1982). No relevo acentuado predominam os solos rasos, enquanto no relevo intermediário predominam os solos medianamente rasos que apresentam, com frequência, grande quantidade de pedras e cascalhos

na sua superfície (Gonçalves, 1982). Já nas baixadas são encontrados os solos salinos e aluviais. Os solos das regiões áridas e semiáridas, pelos altos teores de sais solúveis que contém nos horizontes superficiais, são salinos e alcalinos ou sódicos (halomórficos) devido às altas taxas de evapotranspiração e à baixa pluviosidade (Gonçalves, 1982). Em relação ao crescimento das plantas, os solos halomórficos podem ser classificados em: a) salinos; b) salinos-sódicos e c) sódicos. Os solos salinos são aqueles que apresentam condutividade do extrato de saturação maior que  $4,0 \text{ mhos cm}^{-1}$  a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , enquanto a porcentagem de saturação de sódio é menor que 15 e o pH é geralmente menor que 8,5 (Gonçalves, 1982).



**Figura 1.** Localização da área de estudo

### 3.1.3. *Clima*

O Nordeste brasileiro (NEB) é uma região onde predomina o clima semi-árido caracterizado por uma grande variabilidade anual na precipitação (Kousky, 1980). Historicamente, a Região sempre foi afetada por grandes secas ou grandes cheias, como por exemplo, o ano 2004, quando diversas cidades sofreram com as cheias dos rios (Santos, 2006). Relatos de secas podem ser encontrados desde o século XVII, quando os portugueses chegaram ao Brasil. Segundo Marengo & Uvo (1996), estatisticamente, acontecem de 18 a 20 anos de seca a cada 100 anos no NEB. A seca é uma característica comum da paisagem semi-árida é um fenômeno que produz destruição em muitas porções do globo. É o resultado inevitável da

variabilidade do clima, variabilidade que às vezes deixa por longos meses áreas com falta de água (AMS, 2004). No Nordeste do Brasil, um dos impactos na sociedade mais significativo das secas é a emigração de população de áreas rurais para os centros urbanos e para destinos fora da região (Gaiser et al., 2003 apud Krol & Bronstert, 2007). As conseqüências principais das secas no NEB são relacionadas à baixa produção de colheita e falta de água para os centros urbanos e comunidades rurais (Silva, 2004).

No NEB observa-se uma grande variabilidade climática, podendo-se verificar desde o clima semi-árido no interior da Região, com precipitação média total anual inferior a 500 mm/ano, até o clima tropical chuvoso, observado principalmente na costa leste da Região, com precipitação média anual superior a 1800 mm (Kousky & Chu, 1978). Enquanto, à parte norte da Região recebe entre 1000 e 1200 mm/ano (Hastenrath & Lamb, 1977).

De maneira geral, o NEB possui uma grande homogeneidade sazonal e espacial da temperatura. Somente no sul da Bahia é verificada uma maior variabilidade sazonal da temperatura, em função da penetração das massas de ar relativamente frias nos meses de inverno, ou seja, a variabilidade espacial do clima da Região é decorrente dos diferentes regimes de precipitação.

A propósito no norte da região a estação chuvosa principal é de fevereiro a maio, no sul e sudeste as chuvas ocorrem, principalmente, de dezembro a fevereiro e no leste a estação chuvosa é de abril a julho. Esta configuração temporal das chuvas levou Rao et al. (1993) a afirmarem que a principal estação chuvosa do NEB, incluindo o norte e o leste da região que explica 60% da chuva anual, é de março a junho e a estação seca, para a maior parte da região, ocorre de setembro a dezembro.

O máximo de precipitação no norte do Nordeste, que é uma região que tem período chuvoso de fevereiro a maio, deve-se ao deslocamento anual da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) para latitudes mais ao sul, o que afeta o NEB, principalmente nos meses de março e maio (Hastenrath & Lamb, 1977; Uvo et al., 1998). O máximo no sul da região está associado à penetração de frentes frias vindas do sul que alcançam latitudes mais baixas nos meses de novembro a fevereiro (Alves & Kayano, 1991). No litoral leste, o máximo de precipitação observado no período de maio a julho está relacionado com a intensificação, nesta época do ano, das ondas de leste que advecta umidade para o continente e às ações das frentes frias remanescentes que se propagam ao longo da costa (Kousky, 1979; Markhan & McLain, 1977; Alves & Kayano, 1991).

As variações interanuais de chuvas no norte do NEB podem ser atribuídas às anomalias na posição e intensidade da ZCIT, causadas por anomalias positivas na temperatura da superfície

do mar do Atlântico Sul, conforme o estudo de Moura & Shukla (1981), Alves & Repelli (1992), e pela ocorrência do El Niño no Pacífico Equatorial. Molion & Bernardo (2002) sugerem que a variabilidade interanual da distribuição de chuvas sobre o NEB, tanto nas escalas espacial quanto temporal, está intimamente relacionada com as mudanças nas configurações de circulação atmosférica de grande escala e com a interação oceano-atmosfera no Pacífico e no Atlântico tropicais.

Além da variabilidade interanual, o Nordeste do Brasil também apresenta uma variabilidade intrasazonal, com pelo menos três regimes de precipitação para três áreas distintas: uma área mais ao norte, onde as precipitações significativas ocorrem no bimestre março-abril; a faixa litorânea leste do Nordeste que se estende desde o Rio Grande do Norte até o sul da Bahia, com período chuvoso entre maio-julho; uma terceira região que abrange grande parte da Bahia e que tem máximos de precipitação nos meses de novembro e dezembro (Menezes et al., 2003).

Os mecanismos dinâmicos que produzem chuvas no NEB podem ser classificados em mecanismos de grande escala, em geral responsáveis pela maior parte da precipitação observada, e mecanismos de meso e microescalas, que completam os totais observados. Dentre os mecanismos de grande escala, destacam-se os sistemas frontais, associados à Zona de Convergência do Atlântico do Sul (ZCAS) e a Vórtices Ciclônicos da Alta Troposfera e a (ZCIT). Fazem parte dos mecanismos de mesoescala as perturbações ondulatórias no campo dos Alísios (POAs), complexos convectivos de mesoescala (CCM) e brisas marinhas e terrestres, enquanto circulações orográficas e pequenas células convectivas são os principais fenômenos de microescala atuantes na Região (Silva, 2005).

O semi-árido é a área de maior abrangência territorial dentre os espaços naturais que conformam a região Nordeste do Brasil. Do ponto de vista físico-climático, o semiárido se caracteriza por médias térmicas elevadas (acima de 26 °C) e duas estações bem distintas: uma seca na qual chove muito pouco, e uma úmida quando ocorrem precipitações irregulares que vão de um mínimo de 300 mm a um máximo de 800 mm. A ausência, escassez, irregularidade e má distribuição das precipitações pluviométricas na estação chuvosa, as intensas evaporações durante o período de estiagem e o elevado escoamento superficial das águas conjugam-se para induzir uma acentuada deficiência hídrica. O acesso à água em quantidade, qualidade e regularidade pela população rural constitui um importante fator limitante da sustentabilidade da vida no semi-árido.

### 3.1.4. *Vegetação*

Os tipos de vegetação descritos a seguir pertencem aos principais biomas do NEB, que serão brevemente descritos de acordo com o mapa de vegetação do Brasil (Veloso et al., 1991). A floresta ombrófila densa (D) ocorre sob clima ombrófila sem período seco durante o ano, com temperaturas médias oscilando entre 22 e 25 °C. Essa região fitoecológica ocupa parte do espaço amazônico e estende-se pela costa atlântica desde o sul de Natal, no RN, até o Espírito Santo. Ela é constituída por árvores de grande e médio portes. A floresta ombrófila densa é representada por quatro grupos de formação: aluvial, das terras baixas, submontana e Montana (Veloso et al., 1991). Tanto ela quanto a floresta ombrófila aberta (A) é composta de árvores mais espaçadas, com estrato arbustivo pouco denso. Esse tipo de vegetação é normalmente encontrada em clima que pode apresentar um período com mais de dois e menos de quatro meses secos, com temperaturas médias entre 24 e 25 °C (Veloso et al., 1991).

A floresta ombrófila aberta é representada por três grupos de formação: aluvial, das terras baixas e submontana, ocorre desde a Amazônia, estendendo-se por todo o Nordeste até proximidades do rio São João, no Estado do Rio de Janeiro (Veloso et al., 1991). A savana estépica nordestina (T), mais conhecida como caatinga, abrange as várias formações que constituem um tipo de vegetação estacional-decidual. As árvores são baixas, raquíticas, de troncos delgados e com esgalhamento profuso. Muitas espécies são microfoliadas e outras são providas de acúleos ou espinhos; a maioria das espécies possui adaptações fisiológicas especializadas à insuficiência hídrica. A savana estépica é representada por quatro subgrupos de formação: florestada, arborizada, parque e gramíneo-lenhosa, A caatinga ocupa uma área de cerca de 850.000 km<sup>2</sup>, cerca de 10% do território nacional englobando de forma contínua parte dos Estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e parte do Norte de Minas Gerais (Veloso et al., 1991).

A vegetação de savana (S), característica do bioma cerrado ocorre tanto em climas estacionais tropicais, com períodos secos de três a sete meses, como em climas ombrófilos sem período biologicamente seco. Geralmente, ela apresenta dois estratos distintos, sendo um arbóreo lenhoso xeromorfo, formado por árvores de pequeno a médio portes, troncos e galhos tortuosos com folhas revestidas por camadas de pêlos; e outro estrato gramíneo-lenhoso. A savana apresenta grande variabilidade estrutural, com significativas diferenças com relação ao porte e à densidade, estende-se pelos Estados do Maranhão, Piauí e Ceará (Veloso et al., 1991).

## 3.2. Características da cultura

### 3.2.1. Importância econômica

O algodão se fez presente em toda a história do Brasil como uma cultura de exportação, tendo piques de retomadas de crescimento sempre que havia problemas na produção norte-americana, tal como durante a Guerra de Independência e durante as grandes Guerras Mundiais (Takeya, 1985). Somente a partir de 1890, com o crescimento e consolidação da Indústria têxtil no Brasil, é que a produção nacional se torna firme e crescente, com o algodão assumindo a condição de principal cultura agrícola dos estados nordestinos (Takeya, 1985), produzindo de 10 a 20% de excedentes para exportação e tornando o Brasil um dos principais produtores e exportadores do mundo (Beltrão, 1996). A implantação da cultura no Nordeste teve início no Estado do Maranhão onde a cultura se estendeu e a produção se organizou no semiárido nordestino, tornando os Estados da Bahia, Ceará, Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte grandes produtores, onde era cultivado, principalmente, o algodão arbóreo, especialmente o mocó na região climática do Seridó do RN e da PB. Foi o algodão que fixou o homem no semiárido nordestino e proveu essa região de uma riqueza singular durante quase todo o Século XX (Takeya, 1985).

### 3.2.2. Solos apropriados

O algodoeiro é exigente em nutrientes minerais, de raiz pivotante, e requer solos profundos e de média a alta fertilidade. Quanto à textura, essa cultura se desenvolve satisfatoriamente em diversos tipos de solo, desde que existam condições de equilíbrio entre nutrientes, umidade e aeração (Malavolta et al., 1974). Os solos arenosos, com algumas exceções, geralmente são pobres em nutrientes e de baixo poder de retenção de água, o que pode ser melhorado com a adição de matéria orgânica. Os solos argilosos, apesar de ricos em nutrientes, podem prejudicar o desenvolvimento das plantas, por falta de oxigenação; no entanto, há solos argilosos bem estruturados, que permitem boa circulação de ar. Isso significa que o algodoeiro pode ser cultivado em solos de textura variável, porém bem estruturados, com boa drenagem, fertilidade de média a alta, profundos e relevo plano a ondulado (Malavolta et al., 1974).

O algodão é plantado em uma ampla faixa de solos, porém os de textura média a pesada, profundos e com boas características de retenção de água, são os preferidos. A faixa ideal de pH

é de 6,0 a 7,0 (Malavolta et al., 1974). Solos rasos e/ou com afloramento de rochas, e/ou relevo acentuado (acima de 12%) não devem ser usados com algodão herbáceo, devendo ser ocupados por pastagens, culturas perenes ou vegetação nativa, de forma que se obtenha o equilíbrio do meio ambiente com a situação econômica da propriedade, visando à proteção ambiental e a sustentabilidade dos sistemas de produção (Malavolta et al., 1974).

### 3.2.3. *Clima*

O algodoeiro herbáceo é uma planta de origem tropical, também explorada economicamente em países subtropicais, acima da latitude de 30° N. Um dos fatores ambientais que mais interfere no crescimento e no desenvolvimento é a temperatura do ar, por afetar significativamente a fenologia, a expansão foliar, a alongação dos internós, a produção de biomassa e a partição de assimilados em diferentes partes da planta, sendo ótima para produção entre 20 e 30 °C (Reddy et al., 1991). Amorim Neto & Beltrão (1999) relataram que a distribuição irregular de chuvas e a ocorrência de veranicos e de temperaturas baixas em algumas épocas do ano são os fatores climáticos que mais colocam em risco a produção do algodão. As noites frias ou temperaturas diurnas baixas restringem o crescimento das plantas, levando-as a produzir poucos ramos frutíferos (Amorim Neto & Beltrão, 1999). A região semiárida do Nordeste do Brasil apresenta condições climáticas favoráveis à cotonicultura, já que a semeadura é aconselhável em regiões ou épocas em que as temperaturas permaneçam entre 18 e 30 °C, nunca ultrapassando o limite inferior de 14 °C e superior a 40 °C (Amorim Neto & Beltrão, 1999). Tais autores ainda ressaltam que ao longo de seu ciclo de vida, o algodoeiro precisa de 700 a 1.300 mm de chuva, sendo que a maior parte dessa água é usada durante o período de floração. A época mais crítica é entre o surgimento da primeira flor e o primeiro capulho (cápsula que envolve a algodão). Precipitações intensas podem causar o acamamento das plantas o que, durante a floração, provoca queda dos botões florais e dos frutos jovens, enquanto que as chuvas contínuas, durante a floração e a abertura dos frutos, comprometem a polinização e reduz a qualidade da fibra (Amorim Neto & Beltrão, 1999).

O déficit hídrico ou o excesso de umidade no período que vai de 60 a 100 dias após nascer a primeira flor podem levar à queda dos frutos e comprometer toda a produção. As cultivares de ciclo curto (100 - 120 dias) e médio (130 - 150 dias) consomem entre 450 e 700 mm de água e apresentam potencial de rendimento superior a 3.000 kg ha<sup>-1</sup> de algodão em caroço (Amorim Neto & Beltrão, 1999). Na região Nordeste do Brasil, o algodão é cultivado predominantemente em condições de sequeiro, em que a estação de cultivo, que deve coincidir

com a estação chuvosa, nem sempre é adequada e suficientemente longa para suprir as necessidades hídricas da cultura em todos os seus subperíodos de desenvolvimento (Azevedo & Maciel, 1993; Steenkamp & Kock, 1996). Para minimizar tais efeitos adversos, deve-se ajustar a época de semeadura dentro da estação chuvosa, de tal forma que haja umidade no solo suficiente para a germinação, evitando-se excesso de umidade nos subperíodos de abertura dos capulhos e da colheita do algodão em caroço, o que poderá aumentar substancialmente a produtividade do algodoeiro (Laca-Buendía et al., 1997).

### **3.3. Balanço hídrico**

O balanço hídrico é um sistema contábil de monitoramento da água no solo (Tucci, 1997) e resulta da aplicação do princípio da conservação de massa da água em um volume de solo (Pereira et al., 1997). Ele permite observar a dinâmica da água no solo a partir do armazenamento, deficiência e excedentes hídricos (Camargo & Camargo, 2000). O balanço hídrico é o método mais eficiente para quantificar o potencial hídrico de uma região, pois considera a interação entre os fatores edáfico e climático. O fator edáfico interfere no armazenamento de água do solo e o climático, por sua vez, é representado pela precipitação e evapotranspiração (Amorim Neto, 1989; Moster et al., 2003).

O balanço hídrico é uma ferramenta utilizada em diversas áreas do conhecimento tais como na área agrícola (Pereira et al., 1997; Cintra et al., 2000), florestal (Moster et al., 2003) e hidrológica (Tucci, 1997; Câmara, 1999; Rodrigues Anido, 2002). Na atividade agrícola, algumas práticas estão diretamente relacionadas com o balanço hídrico; dentre elas se pode mencionar o manejo e mobilização do solo, irrigação, práticas fitossanitárias, colheita, dentre outros (Pereira et al., 1997; Tucci, 1997; Souza, 2001).

O balanço hídrico seqüencial ou contínuo normalmente é realizado para períodos pequenos de tempo e demonstra a variação da condição hídrica do local. Quanto menor for o período de estudo, maior será a interferência das variações do tempo meteorológico. Essa contabilidade permite verificar a flutuação hídrica em solo agrícola e, conseqüentemente, possibilita o manejo da irrigação. O balanço hídrico pode ser realizado para diversos períodos de tempo, variando de horas a anos. As escalas de tempo mais utilizadas estão entre a diária e a anual. A escolha de uma ou outra escala temporal depende especialmente da finalidade da contabilidade hídrica. Estudos geológicos e climáticos utilizam com freqüência as escalas anual e mensal. O monitoramento do armazenamento de água no solo para fins irrigacionistas, considera normalmente períodos de 1 a 10 dias, dependendo das condições climáticas e capacidade de



armazenamento de água dos solos da região (Pachechenick, 2004). Muitos autores consideram os períodos de 1, 5, 7 e 10 dias em trabalhos científicos na área agrícola (Cintra et al., 2000; Souza, 2001; Souza & Frizzone, 2003; Pachechenick, 2004; Pachechenick et al., 2004; Trentin, 2005). A sensibilidade da cultura ao estresse hídrico interfere na escolha da periodicidade do balanço. A disponibilidade de dados climáticos em escala igual ou mais detalhada que a do balanço hídrico, também pode limitar a escolha de uma ou outra periodicidade (Pereira et al., 1997).

### *3.3.1. Modelos computacionais*

O Modelo SARRA-Br (Sistema de Análise Regional do Risco Agroclimático-Brasil) é baseado no SARRA, proposto por Forest & Clopes (1994), e possui um módulo para simulação do balanço hídrico diário denominado BRASDHC (Brasil – Diagnóstico Hídrico das Culturas). O BRASDHC é derivado do modelo BIP ou BIPODE desenvolvido por Forest (1984), testado por Assad (1986) e modificado por Affholder (1997). Esse modelo apresenta como resultados os dados diários de evapotranspiração real e evapotranspiração sem restrição de água no solo, profundidade da frente de umedecimento do solo, armazenamento e a percolação (Affholder et al., 1997).

## **3.4. Definição do risco climático**

### *3.4.1. Dados meteorológicos*

Neste trabalho foram utilizados os dados diários de precipitação fornecidos pela UACA (Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas), provenientes do Banco de Dados Hidroclimatológicos da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste - SUDENE para todos Estados da região Nordeste de 650 postos pluviométricos.

### *3.4.2 Softwares utilizados*

Na execução deste trabalho foram utilizados três softwares computacionais:

- Estima-T - Estima a temperatura do ar (Cavalcanti et al., 2006);
- Sevap - Estima a evapotranspiração potencial por diversos métodos (Silva et al., 2005);
- SARRA - Calcula do balanço hídrico e determina o ISNA (Baron et al., 1996).

### *3.4.3. Condições para cálculo do risco climático*

O cálculo do risco climático foi realizado por intermédio de um modelo de balanço hídrico da cultura, realizado em duas partes. Na primeira, foi determinado o balanço hídrico, com base no modelo utilizado no zoneamento agrícola do MAPA, utilizando os cenários de mudanças climáticas globais para os aumentos de temperatura de 1,5; 3 e 5 °C, que correspondem aos cenários A, B e C, respectivamente. Na aplicação do modelo não foi considerada qualquer evolução tecnológica, tanto no manejo das culturas quanto no seu melhoramento genético, e qualquer adaptação fisiológica das plantas às novas condições. Essas variações de temperatura do ar foram associadas às ocorrências dos fenômenos El Niño e La Niña, respectivamente, com alterações negativas e positivas de 10, 25 e 40% na precipitação média.

Foram simulados 96 cenários agrícolas, tais cenários foram obtidos a partir da combinação dos cenários de aumentos de temperatura de 1,5; 3 e 5 °C, associados aos cenários de alterações negativas e positivas de 10, 25 e 40% na precipitação média, variando ao longo de 8 datas de semeadura, para tanto foi utilizando o Sistema de Análise Regional dos Riscos Agroclimáticos, com base no software SARRA (Baron et al., 1996). Tal modelo estima componentes do balanço hídrico de uma superfície vegetada em solo estratificado, utilizando dados diários de precipitação pluvial e de evapotranspiração potencial, além de coeficientes de cultivo (Kc), que descrevem o crescimento de culturas e as características de solos. Nesse modelo, a infiltração e a redistribuição de água no solo são governadas pela equação de Darcy-Buckingham e a evapotranspiração real é obtida em função da evapotranspiração máxima e da umidade do solo. Na segunda etapa, foram empregados os valores do ISNA (Índice de Satisfação da Necessidade de Água para a Cultura) estimados para o período fenológico compreendido entre a floração e o enchimento dos caroços (período mais crítico ao déficit hídrico), com frequência mínima de 80% nos anos utilizados em cada estação pluviométrica. Cada valor de ISNA, observado durante essa fase, foi associado à localização geográfica da respectiva estação para posterior espacialização. Também foi computado o valor das áreas de acordo com os critérios de risco climático associados ao cultivo do algodoeiro.

### 3.4.3.1. Controle de qualidade dos dados

O controle de qualidade dos dados é um pré-requisito para o cálculo do ISNA por meio do software SARRA. Portanto, neste trabalho foram utilizados os seguintes procedimentos: (i) substituição de todos os valores faltosos para formatos internos reconhecidos pelo SARRA, sendo declarado como não disponíveis; e (ii) substituição de todos os valores da matriz de dados que foram considerados não aceitáveis.

#### Variáveis de entrada do modelo

**Precipitação pluvial diária (P)** – Os dados de precipitação pluvial foram obtidos conforme descrito anteriormente, priorizando-se as séries históricas superiores a 30 anos referentes às informações de 650 postos pluviométricos utilizados neste estudo.

**Evapotranspiração potencial (ET<sub>p</sub>)** – Essa variável foi estimada pelo método de Thornthwaite & Mather (1955) e calculada para cada dez dias do ano, gerando 36 dados de evapotranspiração potencial por ano, pela seguinte equação:

$$ET_p = 0,533C_j \left( \frac{10\overline{T}_a}{I} \right)^{a_i} \quad (1)$$

em que ET<sub>p</sub> é a evapotranspiração potencial (mm dia<sup>-1</sup>); C<sub>j</sub> é o fator de correção, que varia em função do número de dias do mês considerado; a<sub>i</sub> é a função cúbica do índice anual de calor e I é o índice de calor obtido pela soma dos 12 índices mensais (i).

**Coefficientes decendiais do cultivo (K<sub>c</sub>)** – Esse coeficiente corresponde à relação entre a evapotranspiração máxima (ET<sub>m</sub>) e a evapotranspiração potencial (ET<sub>p</sub>); K<sub>c</sub>s foram determinados por médias decendiais para cada fase da cultura e gerados pela interpolação dos dados para as fases fenológicas definidas por Doorenbos & Kassam (1979):

$$K_c = \frac{ET_m}{ET_p} \quad (2)$$

**Ciclo das cultivares** – Para representar as cultivares do algodão herbáceo, recomendadas para a região Nordeste, foi considerado apenas um ciclo de 140 dias, haja vista que a diferença entre as cultivares, quanto ao ciclo, é pouco variável (< 10%). A definição e duração das fases fenológicas foi estabelecida da seguinte forma: i) fase I – da semeadura até 10% do desenvolvimento vegetativo (DV) (10 dias); ii) fase II – de 10% do DV até a floração (30 dias); iii) da floração até o enchimento dos caroços (EC) (60 dias) e iv) do EC até a maturação (40 dias). Neste estudo foram utilizados os valores de Kc da cultura na base decendial ao longo do ciclo da cultura do algodão herbáceo.

**Evapotranspiração máxima (ET<sub>m</sub>)** – Os valores da ET<sub>m</sub> foram estimados pela equação (Doorenbos & Kassam, 1979):

$$ET_m = Kc \times ETp \quad (3)$$

em que ET<sub>m</sub> é a evapotranspiração máxima da cultura (mm dia<sup>-1</sup>); ET<sub>p</sub> é a evapotranspiração potencial (mm dia<sup>-1</sup>) e Kc é o coeficiente de cultivo.

**Evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>)** – O modelo estima a evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>) por uma equação de terceiro grau, proposta por Eagleman (1971), que descreve a evolução da ET<sub>r</sub>, em função da evapotranspiração máxima - ET<sub>m</sub> e da umidade do solo - HR, expressa como segue:

$$ET_r = A + B(HR) - C(HR^2) + D(HR^3) \quad (4)$$

em que A = 0,732 – 0,05 ET<sub>m</sub>; B = 4,97 ET<sub>m</sub> – 0,66 ET<sub>m</sub><sup>2</sup>; C = 8,57 ET<sub>m</sub> – 1,56 ET<sub>m</sub><sup>2</sup>; D = 4,35 ET<sub>m</sub> – 0,88 ET<sub>m</sub><sup>2</sup> e HR = umidade do solo expressa em (g m<sup>-3</sup>).

### **Variáveis de saída do modelo**

**Índice de Satisfação da Necessidade de Água para a Cultura (ISNA)** – Definido como a razão entre a evapotranspiração real e a evapotranspiração máxima (ET<sub>r</sub>/ET<sub>m</sub>) ao longo do ciclo, para um determinado ano, numa certa data, num tipo de solo, para a leguminosa de ciclo médio. Como o ciclo da cultura do algodão foi dividido em quatro fases fenológicas, utilizou-se a fase de enchimento dos caroços como período mais determinante da produtividade final. A partir

desse cálculo, estabeleceu-se a função de frequência do ISNA e selecionou-se a data onde o valor calculado é maior ou igual ao critério de risco adotado ( $ISNA \geq 0,55$ ). Os valores do ISNA foram determinados com a frequência de ocorrência de 80%, e foram classificados em três classes qualitativas (Amaral & Silva, 2007):

- $ISNA \geq 0,55$  - a cultura do algodão herbáceo de sequeiro está exposta a um baixo risco climático
- $0,45 \leq ISNA < 0,55$  - a cultura do algodão herbáceo de sequeiro está exposta a um risco climático médio
- $ISNA < 0,45$  - a cultura do algodão herbáceo de sequeiro está exposta a um alto risco climático

Na espacialização dos resultados foram adotados os seguintes procedimentos: digitação de arquivo de pontos (em formato ASCII), organizados em três colunas, com latitude, longitude e valores de relação ISNA, com 80% de frequência de ocorrência; transformação das coordenadas geográficas em coordenadas de projeção cartográfica; leitura do arquivo de pontos; organização das amostras; e geração de uma grade regular (grade retangular, regularmente espaçada de pontos, em que o valor da cota de cada ponto é estimado a partir da interpolação de um número de vizinhos mais próximos). Por se tratar de uma análise bidimensional, onde as variações de ISNA foram espacializadas em função do tempo, foram desconsiderados os efeitos orográficos.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Índice de Satisfação da Necessidade de Água para a cultura (ISNA) foi usado para avaliar o risco climático do cultivo do algodoeiro herbáceo em sistema de sequeiro sob cenários de aumentos de temperatura do ar e de desvios positivos e negativos na precipitação pluvial. É importante destacar, no entanto, que esta análise não leva em conta o rendimento da cultura em cada cenário climático. Porém, ela avalia os impactos das alterações climáticas na área favorável ao cultivo do algodoeiro na região Nordeste do Brasil. As distribuições espaciais do ISNA para as condições de clima atual (CCA) e para os cenários de aumento da temperatura (1,5; 3 e 5 °C), associados ao aumento e decréscimo na precipitação pluvial (10, 25 e 40 % da média anual) são apresentados nas Figuras 2 a 25. As variações percentuais da precipitação estão associadas às ocorrências dos fenômenos El Niño (no caso de acréscimo) e La Niña (no caso de decréscimo), com intensidades fraca, moderada e forte.

Mesmo estabelecidos os cenários de mudança climática analisados neste estudo o algodoeiro herbáceo ainda apresenta áreas favoráveis ao seu cultivo na região Nordeste do Brasil. As reduções das áreas agricultáveis provocadas pelo aquecimento do ar são decorrentes, possivelmente, pela redução da oferta hídrica e da capacidade de retenção de água pelo solo decorrentes de uma maior taxa evaporativa. Por outro lado, diante dos cenários de aumento de precipitação, e persistindo os cenários de aumento da temperatura, observa-se que a maior oferta hídrica funciona como um regulador na manutenção de algumas áreas com médio e baixo riscos climáticos, porém com restrições de aumento na área favorável ao cultivo do algodoeiro.

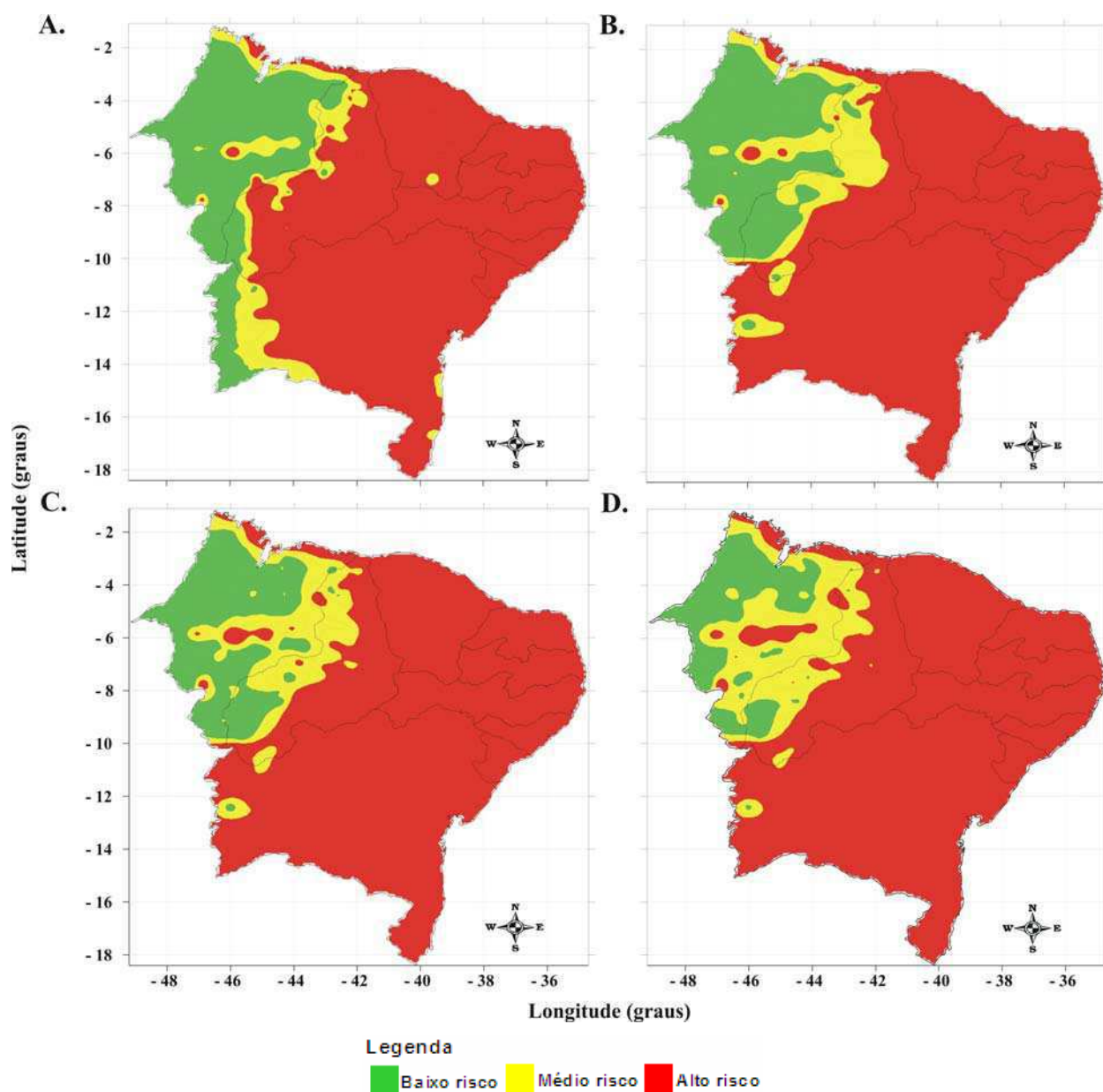
De modo geral, com o aumento da temperatura do ar e da precipitação se percebe a diminuição das áreas com baixo risco climático e, conseqüentemente, aumento das regiões cujo risco climático é maior para o cultivo do algodão. As regiões com médio risco climático permanecem praticamente inalteradas ao cultivo do algodão herbáceo. Por outro lado, com as simulações de redução na precipitação, mantendo-se constantes os acréscimos de temperatura,

verifica-se que o processo de redução das áreas de baixo risco é mais acelerado, em função do maior déficit hídrico, onde se evidencia a vulnerabilidade do cultivo em sistema de sequeiro. Por se tratar de agricultura de sequeiro no NEB, os cenários simulados compreendem os meses de novembro a junho, período de incidência da maioria dos sistemas geradores de precipitação para a região estudada (Silva, 2004). Assim, as discussões a seguir serão focadas para o segundo decêndio de cada mês, como representativo da condição média desse período.

O primeiro período simulado foi o segundo decêndio do mês de novembro (do dia 11 ao dia 20). Os riscos climáticos do algodão herbáceo semeado nesse decêndio, para os cenários de mudança na precipitação pluvial e na temperatura do ar são apresentadas nas Figuras 2 a 7. Apesar do aumento na temperatura do ar, não se verifica grandes variabilidades dos riscos climáticos sobre o algodão cultivado nas regiões situadas na porção oeste do NEB, principalmente para os cenários com aumento de precipitação (Figuras 2, 4 e 6) quando comparadas às condições climáticas atuais (Figura 2A). Porém, o aumento da temperatura do ar, associado aos cenários de decréscimos na precipitação (Figuras 3, 5 e 7), ocasiona o crescimento das áreas com alto risco climático. A força do aumento da precipitação, que resulta em maior disponibilidade hídrica, pode ser uma das causas da pouca variabilidade das áreas com médio risco climático para o desvio de  $\pm 10\%$  na precipitação pluvial (Figuras 2 e 3). Com um acréscimo de 10% na precipitação ocorre uma redução nas áreas de baixo risco climático na região oeste do Estado da Bahia (Figura 2). Contudo, mesmo para o cenário de aumento de 5 °C (Figura 2D), ainda é observado áreas favoráveis ao cultivo do algodoeiro em grande parte dos Estados do Maranhão e Piauí. De forma ainda mais evidente, verificam-se poucas áreas agrícolas favoráveis à semeadura do algodão nos casos de redução de 10% na precipitação (Figura 3). Essa situação restringe as áreas favoráveis, basicamente, apenas para os cenários de aumento de 1,5 e 3 °C (Figuras 3B e 3C), principalmente nos Estado do Maranhão, haja vista a acentuada diminuição dos setores de médio e baixo riscos climáticos para as demais regiões.

Diante dos cenários de aumento na temperatura do ar simulados, observa-se o aumento das áreas agrícolas com alto e médio riscos climáticos e, conseqüentemente, uma redução nas áreas com baixo riscos para todos os períodos simulados, fazendo com que a atividade agrícola seja ainda mais dependente da variação da precipitação pluvial na região. No entanto, as áreas com médio risco climático foram, proporcionalmente, o que mais aumentaram; porém, é importante observar que essas áreas foram incorporadas às áreas agrícolas de baixo risco climático para quase todos os cenários simulados. Assad et al. (2005), em estudos com soja para o Brasil, através de simulações para solos arenosos, verificaram que os acréscimos extremos de temperatura (5,8 °C) provocam uma redução próxima de 30 a 70% da área total do País em

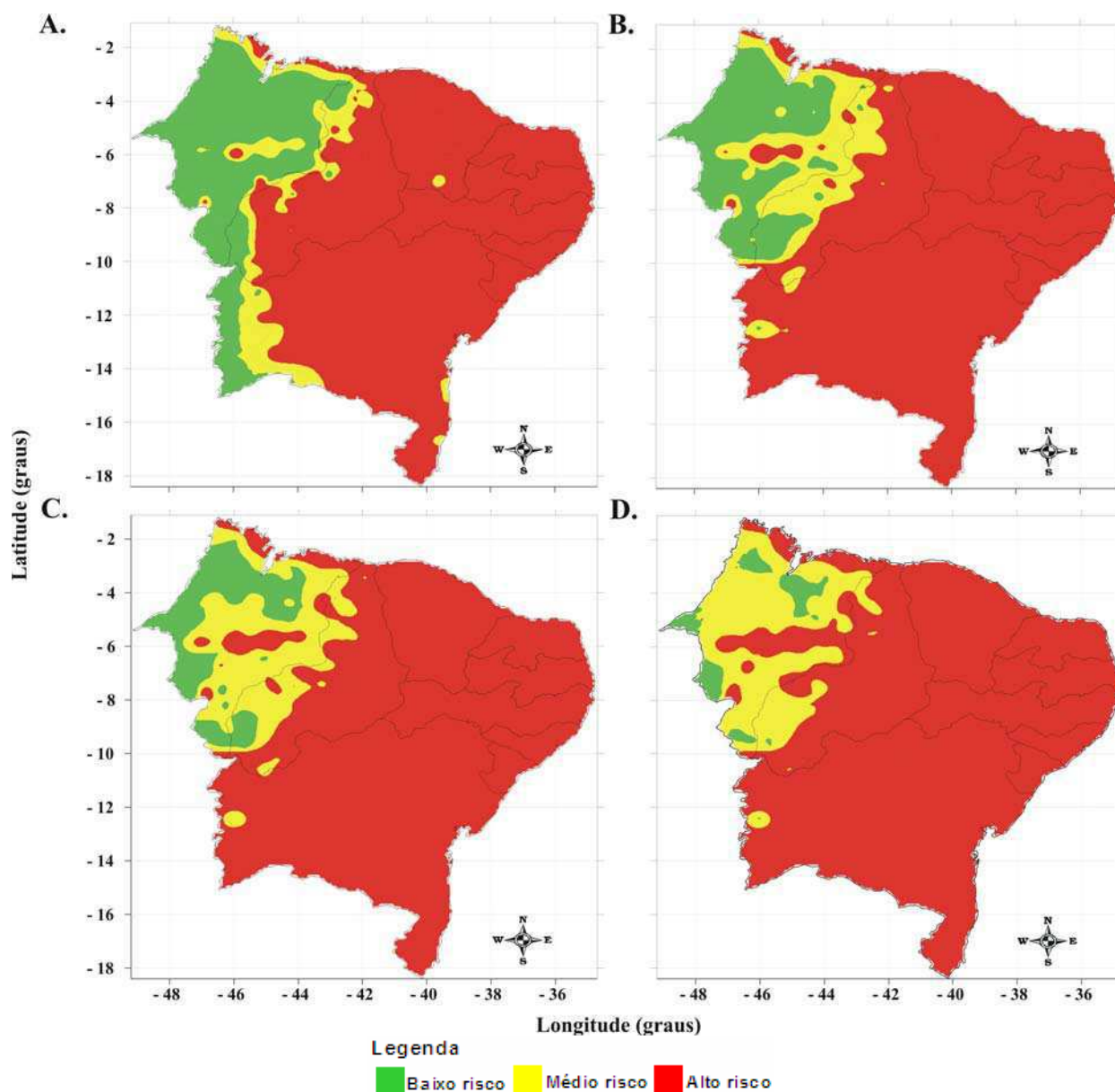
condições de baixo risco climático para cultivo da soja no período compreendido entre outubro e dezembro.



**Figura 2.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de novembro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (D).

Analisando os demais cenários de variação de precipitação para o segundo decêndio de novembro, verifica-se que o aumento da temperatura do ar praticamente não altera as áreas agrícolas com alto risco climático, mas oferece um grande efeito sobre as áreas com baixo risco (Figuras 4 a 7).



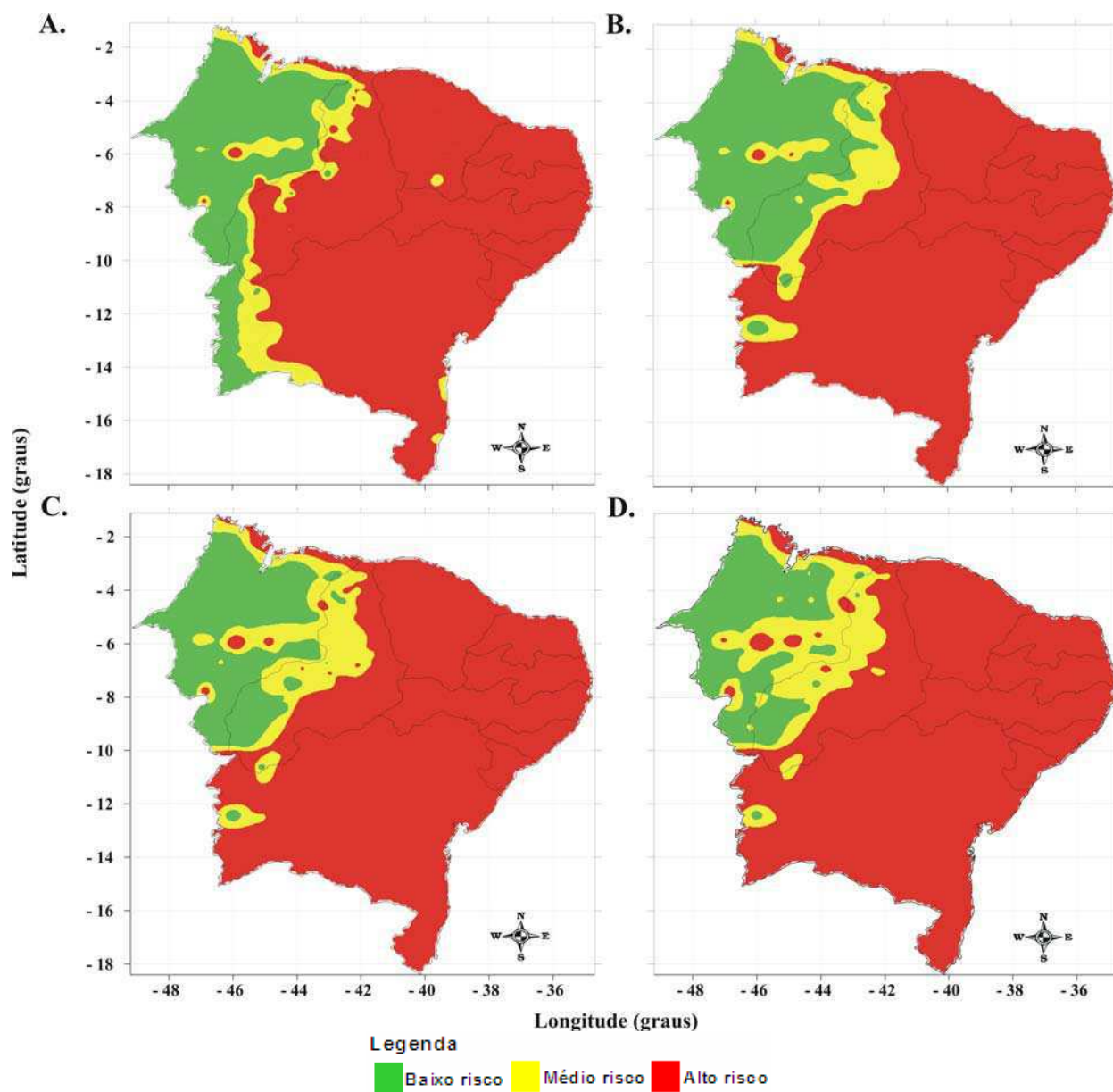


**Figura 3.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de novembro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (D).

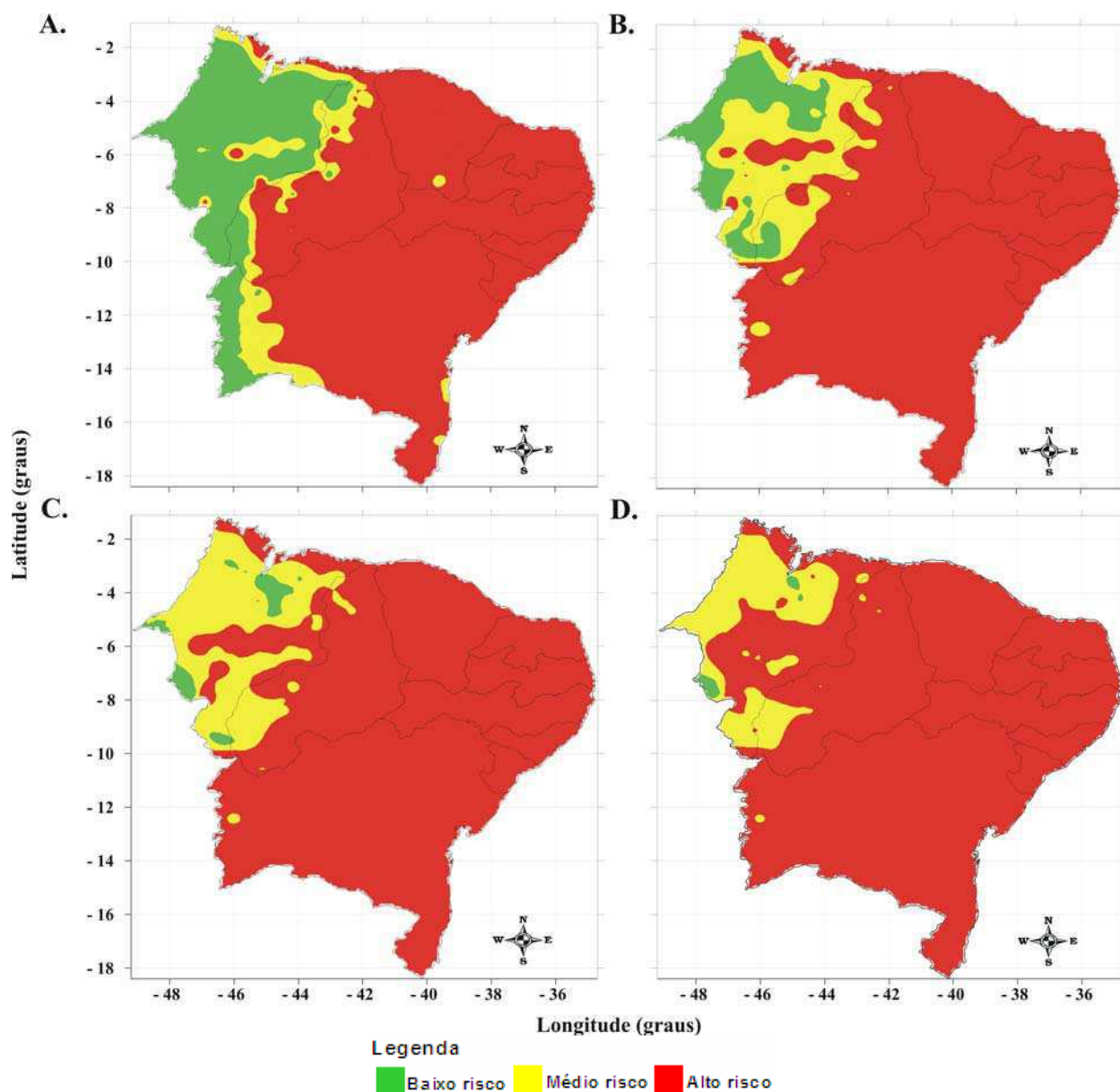
Porém, quando se analisa apenas os cenários com reduções na precipitação, verificam-se riscos climáticos extremamente críticas quanto à redução das áreas de baixo risco, para o decréscimo de 25% na precipitação (Figura 5). As áreas de baixo risco se restringem apenas para o cenário de aumento de 1,5 °C (Figura 5B); para os demais cenários de aumento de temperatura, as áreas com alto risco predominam quase em toda a região, principalmente para o cenário de 5 °C (Figura 5D).

Esse resultado ressalta a sensibilidade da cultura à variabilidade climática, que afeta as características fisiológicas da planta quando submetida a altas temperaturas. Os aumentos abruptos na temperatura também podem acarretar a diminuição de áreas de médio e baixo riscos climáticos, pois essa variável ambiental interfere no crescimento e no desenvolvimento das culturas por afetar significativamente a fenologia, a expansão foliar, a alongação dos internós, a produção de biomassa e a partição de assimilados em diferentes partes da planta.

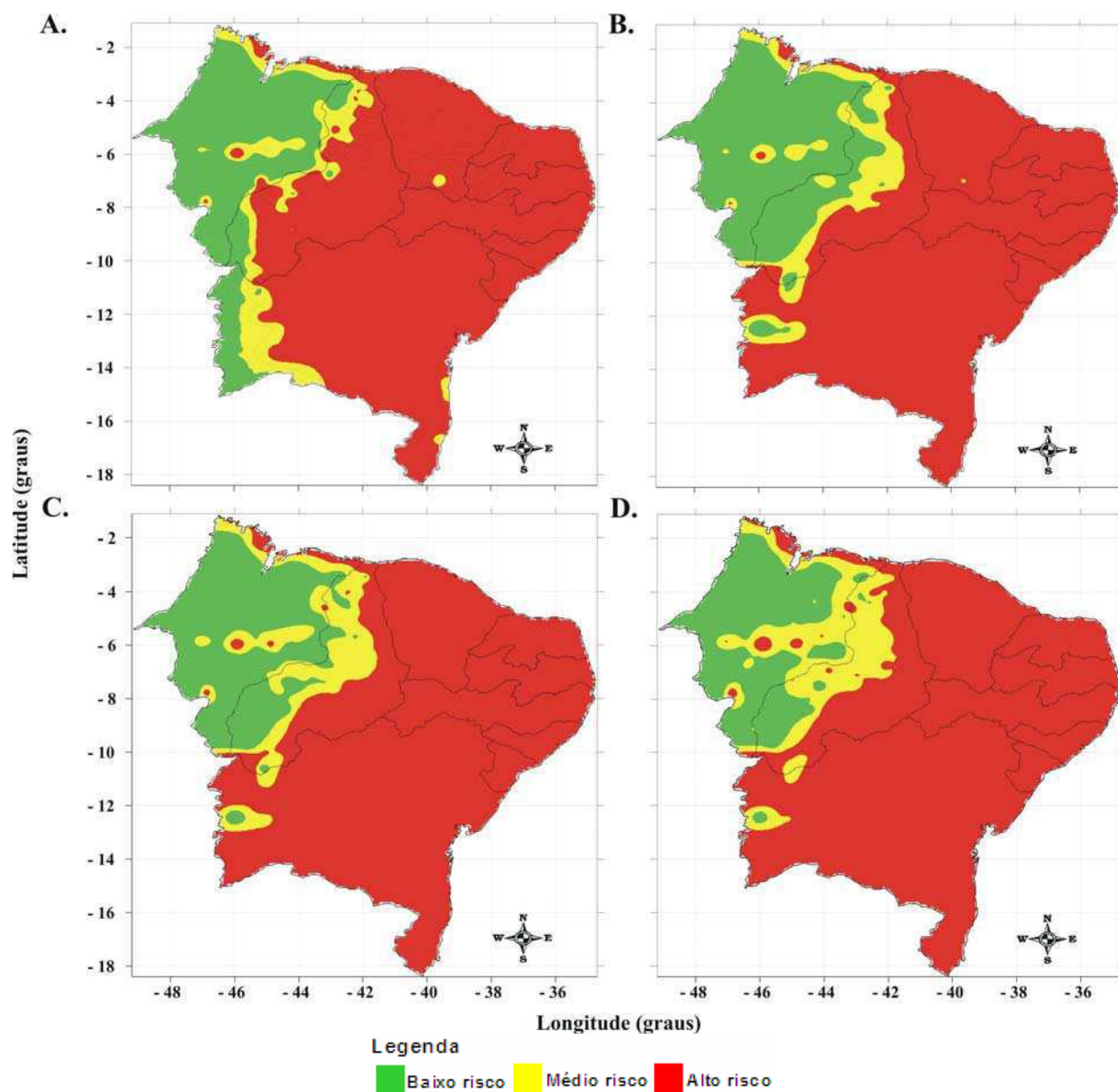
A razão disso é que as plantas possuem uma faixa ideal para o seu desenvolvimento, que para o algodoeiro a temperatura ideal para uma produção satisfatória fica entre 20 e 30 °C (Reddy et al., 1991). Ainda com relação ao primeiro período simulado (entre os dias 11 e 20 de novembro), verifica-se que um aumento de 3 °C na temperatura do ar tem praticamente a mesma magnitude do efeito sobre o risco climático do algodoeiro herbáceo como um aquecimento de 5 °C. Essa condição difere para o aumento de 1,5 °C que também leva um aumento no risco do clima, mas com pequena magnitude. Diante do cenário de decréscimo de 40% na precipitação (Figura 7), e permanência dos cenários de aumento na temperatura, os prognósticos são ainda mais graves, tendo em vista a menor oferta hídrica.



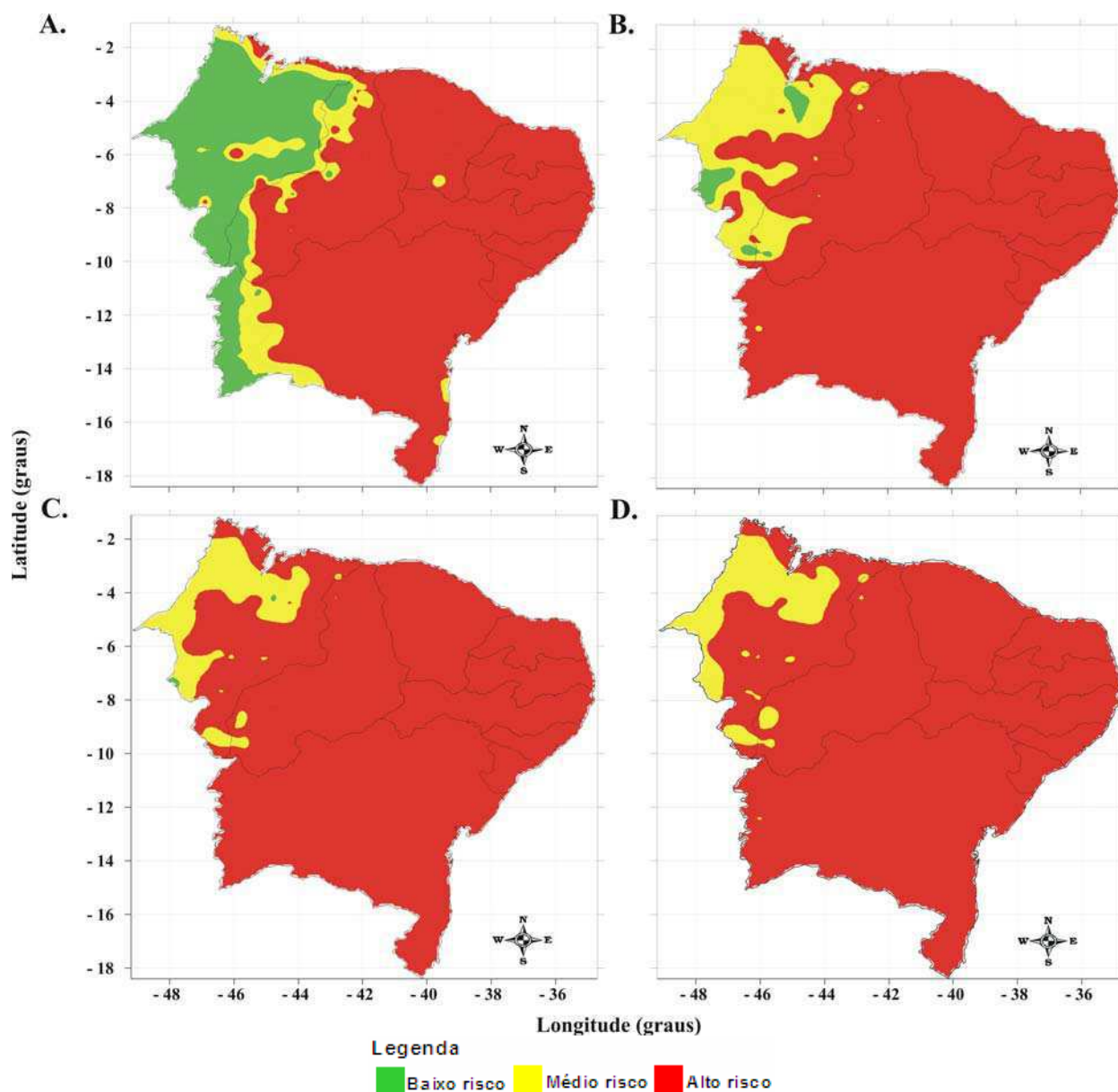
**Figura 4.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de novembro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (D).



**Figura 5.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de novembro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (D).



**Figura 6.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de novembro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (D).



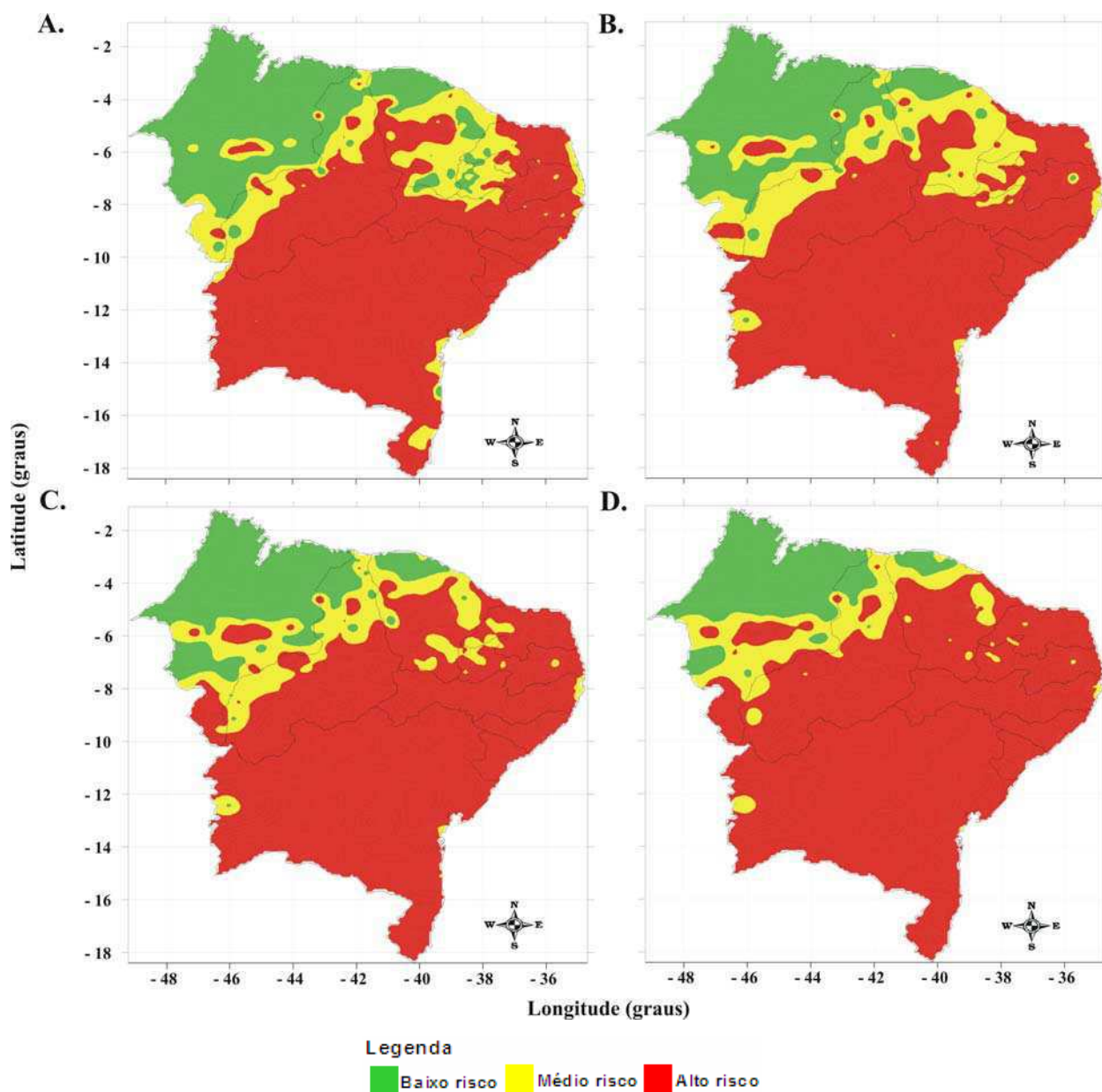
**Figura 7.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de novembro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (D).

Por outro lado, é observada uma situação oposta quando se compara os cenários de aumento de 25% (Figuras 4) e de 40% (Figura 6) na precipitação, pois se verifica um crescimento das regiões com médio e baixo riscos climáticos, mesmo diante de cenários de aumento de temperatura.

A análise do terceiro período simulado (segundo decêndio de janeiro) revela que as áreas agrícolas com baixo e médio riscos climáticos ficam localizadas na parte norte do NEB mediante todos os cenários de mudança climática, devida à influência da Zona de Convergência

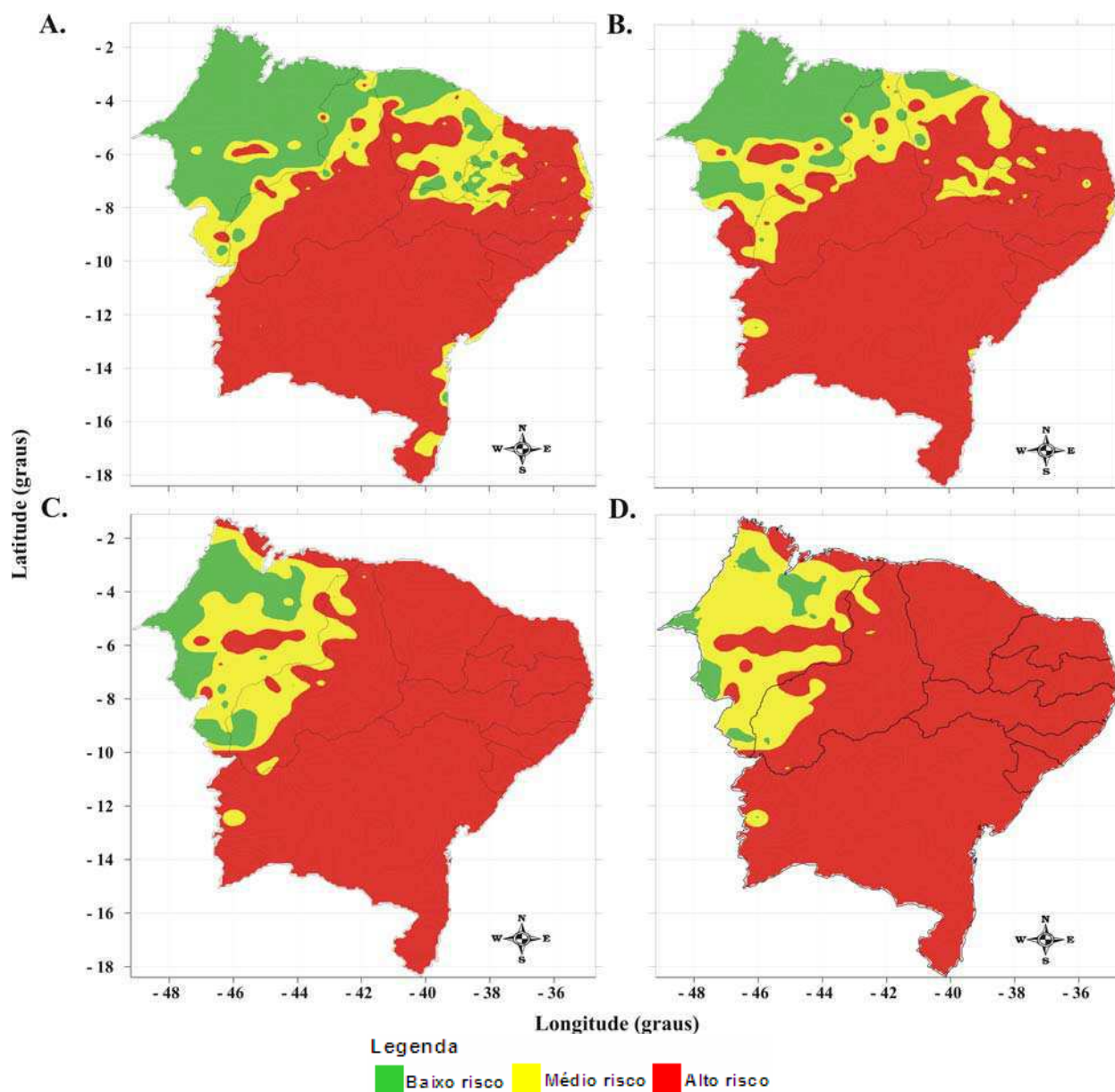
Intertropical (ZCIT). Esse fenômeno é um dos principais mecanismos de grande escala responsáveis pela precipitação na região. A ZCIT assume a posição mais ao sul do NEB no mês de março (McQuate & Hayden, 1984). No período do segundo decêndio de janeiro as demais regiões do Nordeste apresentam muitas áreas com alto risco climático também mediante aos cenários de aumento de temperatura e de flutuações na precipitação pluvial. Isso pode ser explicado pela elevada variabilidade da precipitação na região, provocada pela irregularidade espaço-temporal da ocorrência dos fenômenos produtores de chuva (Silva, 2004). Nessa área, a precipitação média anual varia entre 1500 e 2000 mm e o período chuvoso se estende de abril a julho (Silva, 2004). Na porção leste do NEB, os sistemas precipitantes são alimentados pela grande quantidade de umidade que é advectada do oceano para o continente, incluindo-se os Vórtices Ciclônicos de Ar Superior e as Ondas de Leste, dentre vários outros sistemas atuantes na região.

A análise do terceiro período simulado é apresentada nas Figuras 8 a 13. Quando se compara o primeiro com o terceiro período de simulação não se verifica grandes mudanças sobre as regiões situadas na porção oeste do NEB. Verifica-se, apenas, um pequeno deslocamento de áreas com médio risco climático na porção oriental da região e, ainda, algumas regiões com médio risco, no interior do Estado do Ceará. Essa situação é similar quando se analisa os cenários com aumento na precipitação (Figuras 8, 10 e 12), para as condições climáticas atuais. Isso torna mais evidente com o acréscimo de temperatura do ar, pois as áreas com alto risco climático se tornam maiores para todos os cenários de decréscimo na precipitação (Figuras 9, 11 e 13). A dinâmica no processo de surgimento de áreas com baixo e médio riscos climáticos, na porção mais ao leste do NEB, pode estar associada à influência dos sistemas atmosféricos que atuam sobre a região. Portanto, é possível inferir que o aumento de temperatura do ar continua sendo um fator limitante ao cultivo do algodão mesmo diante do aumento da oferta hídrica. Essa situação se torna mais evidente quando se compara os cenários de  $\pm 10\%$  na precipitação (Figuras 8 e 9). Especificamente, no cenário de aumento na precipitação (Figura 8) e de aumento de 1,5 °C na temperatura do ar, é possível observar a manutenção de áreas de médio risco climático. Entretanto, os riscos climáticos são mais acentuados para o cenário de decréscimo na precipitação (Figura 9), tendo em vista a menor oferta hídrica provocada, por exemplo, pelo fenômeno El Niño. Considerando a permanência dos cenários de aumento na temperatura do ar, as reduções nas áreas com baixo e médio riscos climáticos no cultivo do algodoeiro são bastante significativas. Portanto, o terceiro período simulado é mais sensível à variabilidade da precipitação, que afeta significativamente a disponibilidade das áreas agrícolas favoráveis ao cultivo do algodoeiro.



**Figura 8.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de janeiro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (D).

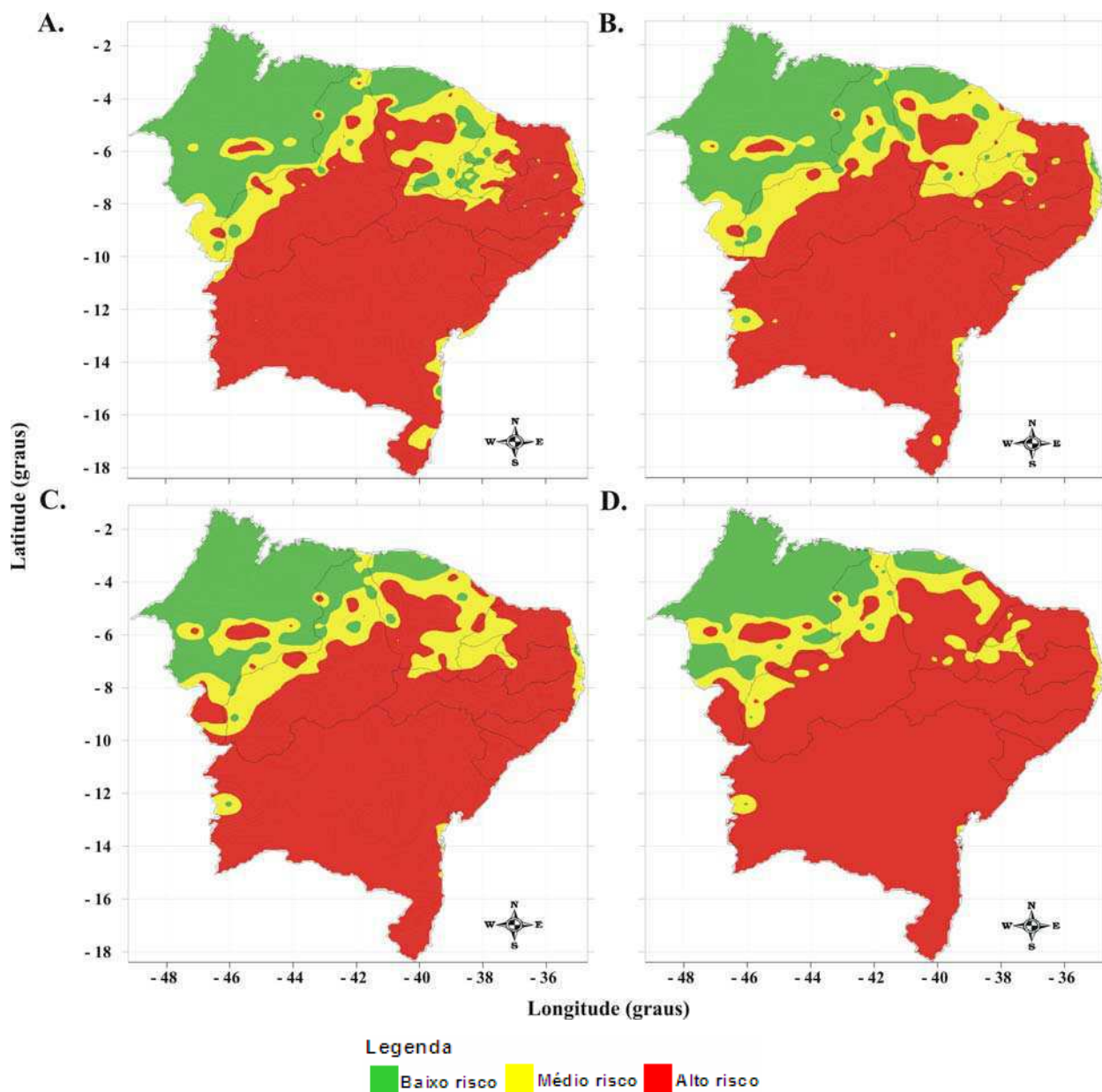




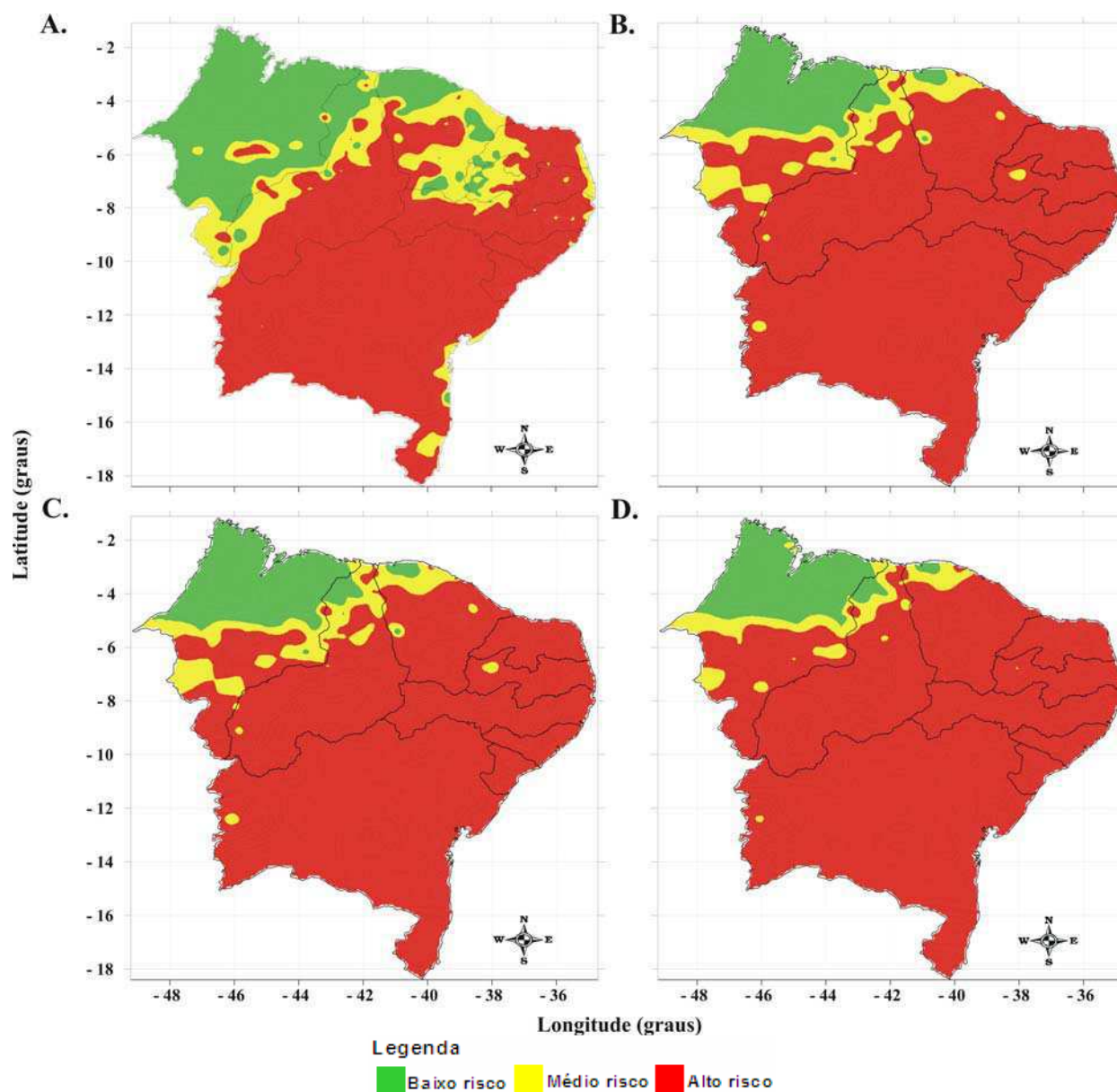
**Figura 9.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de janeiro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (D).

Com isso, os cenários de aquecimento do ar tendem a reduzir as áreas agrícolas com baixo risco climático na porção central do NEB. Isso ocorre, principalmente, durante o primeiro e terceiro períodos simulados, sendo ainda mais sensíveis quando se considera a atuação conjunta dos cenários de aumento de temperatura e diminuição na precipitação. Nessas circunstâncias, a taxa de redução das áreas com baixo e médio riscos climáticos são diretamente proporcionais ao decréscimo na precipitação, ou seja, diante da redução da oferta hídrica, a época de cultivo do algodoeiro se torna ainda menor, fazendo com que a atividade agrícola tenha

um maior risco associado ao clima. Por outro lado, os cenários de aumento de 25% (Figura 10) e de 40% (Figura 12) na precipitação possibilitam o aumento das áreas com médio e baixo riscos climáticos, principalmente, para o cenário de aumento de 40% na precipitação (Figura 12). Porém, o aumento na temperatura do ar pode afetar o desenvolvimento das fases fenológicas da cultura, desde à sementeira até à maturação dos caroços e, mais ainda, no período em torno da floração.



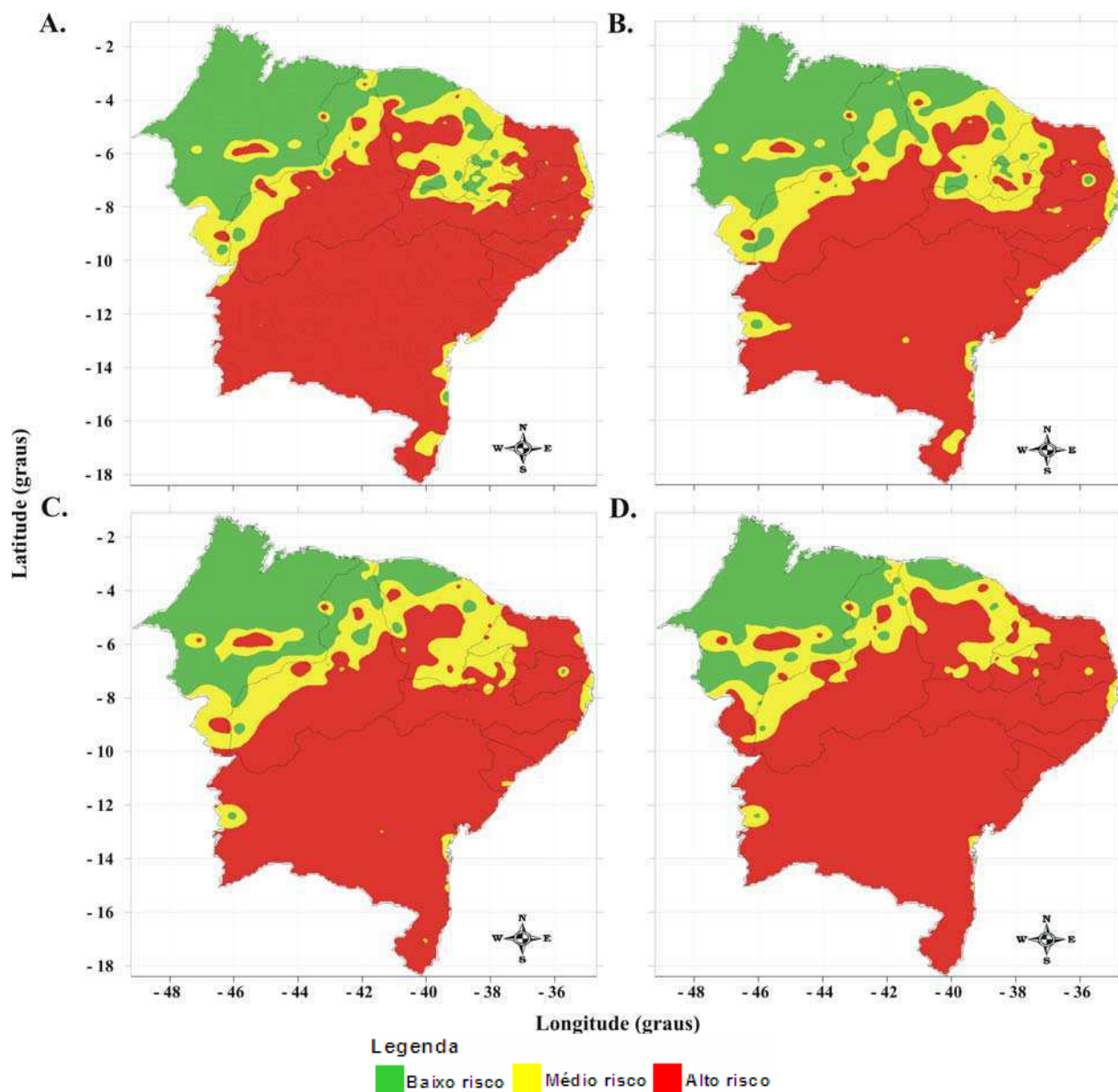
**Figura 10.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de janeiro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (D).



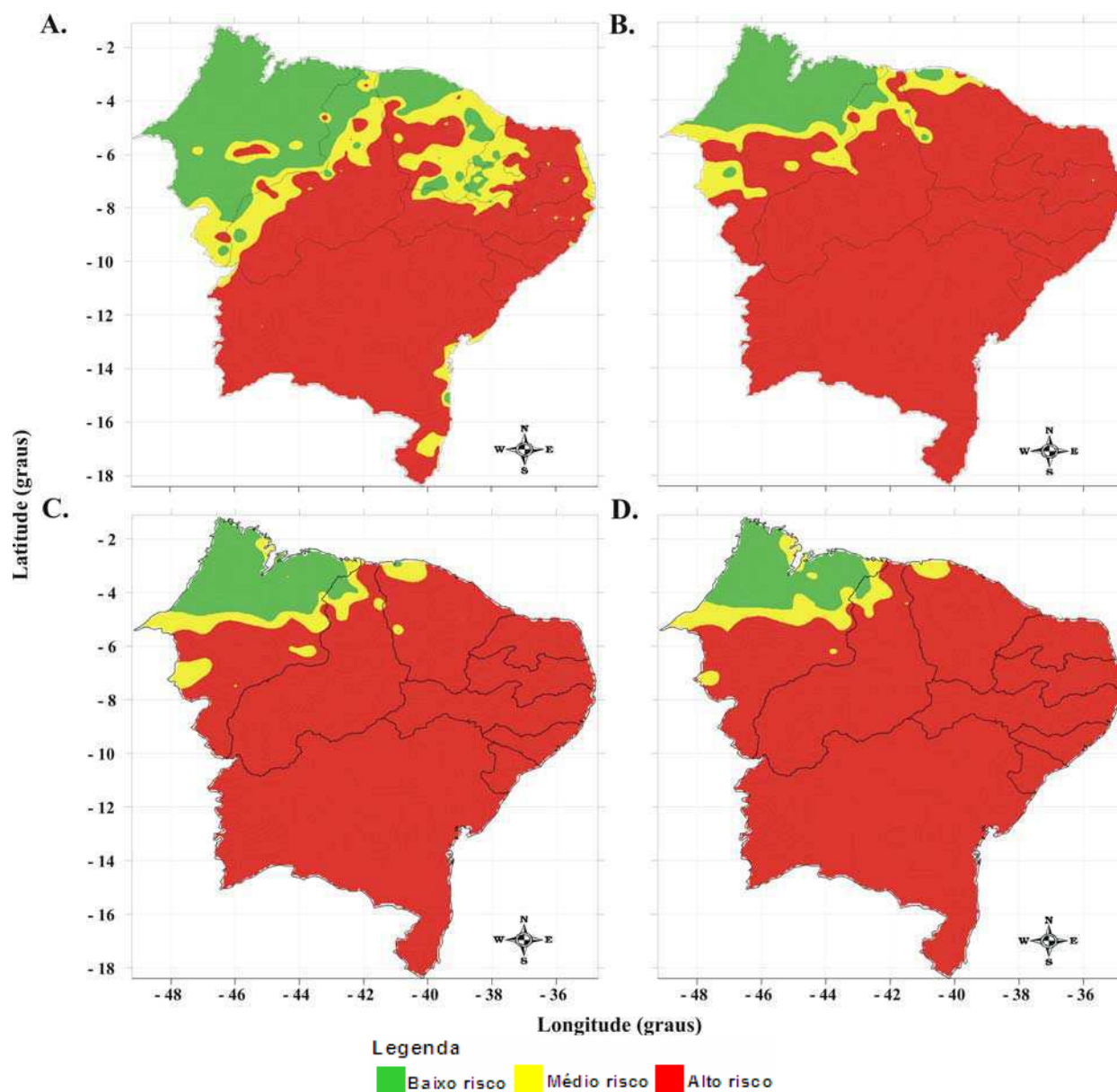
**Figura 11.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de janeiro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (D).

Os efeitos do aumento da temperatura do ar são ainda mais danosos à planta durante a fase de enchimento dos caroços. Assim, as magnitudes das variáveis ambientais atuam nos processos fenológicos da planta e são extremamente relevantes para a produção agrícola no futuro, principalmente quando se considera os cenários de mudanças climáticas. Mitchell et al. (1993), em estudos com trigo, observaram que em temperaturas mais altas, o rendimento da cultura pode diminuir até 10% para cada 1 °C de aumento na temperatura média durante o cultivo. Eles observaram, ainda, que quanto maior for a temperatura do ar, tanto a floração

quanto a maturação dos grãos do trigo podem ser consideravelmente mais precoce, encurtando, assim, o tempo de fixação de carbono e o acúmulo de biomassa antes do aparecimento das sementes.



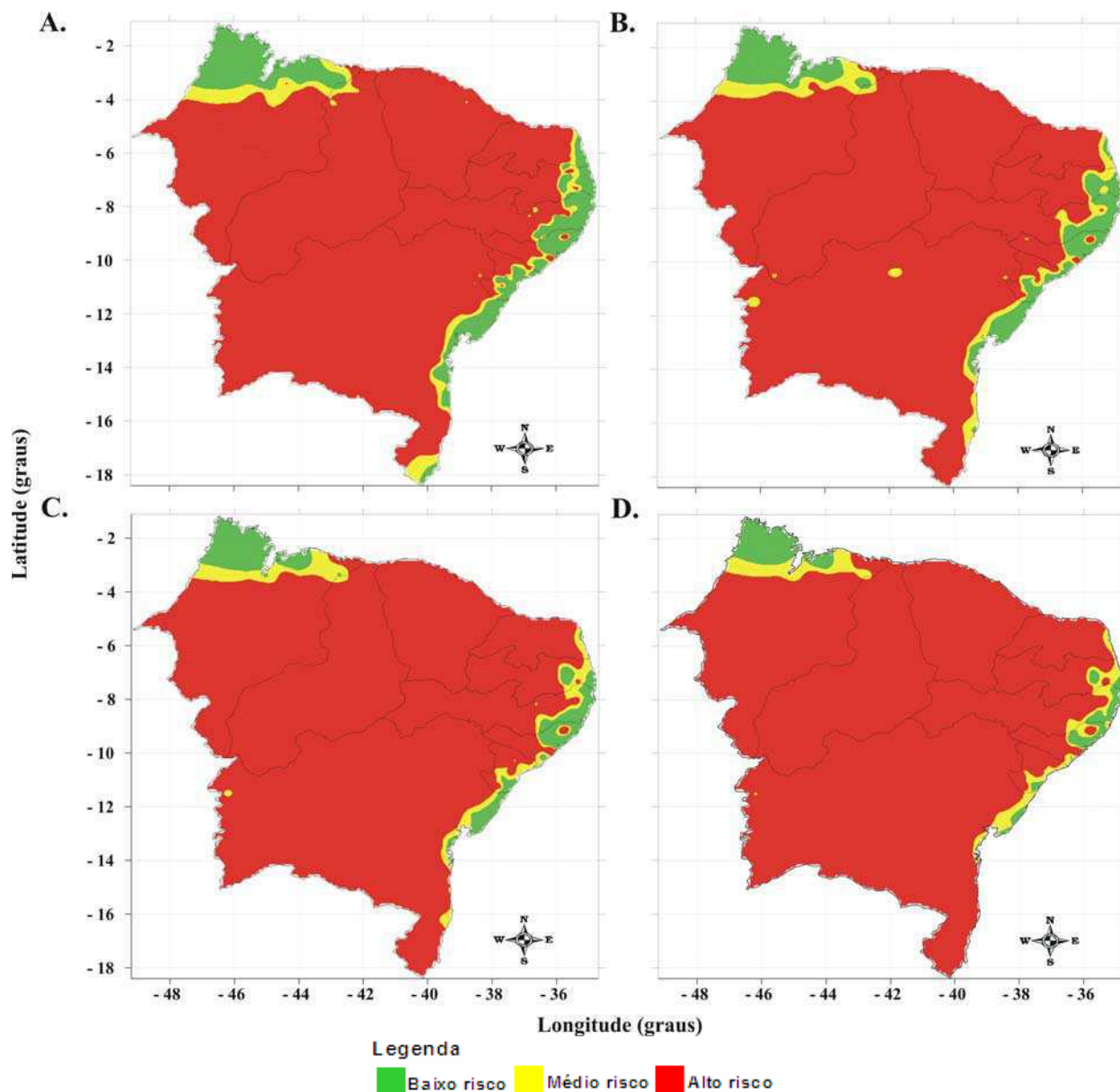
**Figura 12.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de janeiro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (D).



**Figura 13.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de janeiro na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (D).

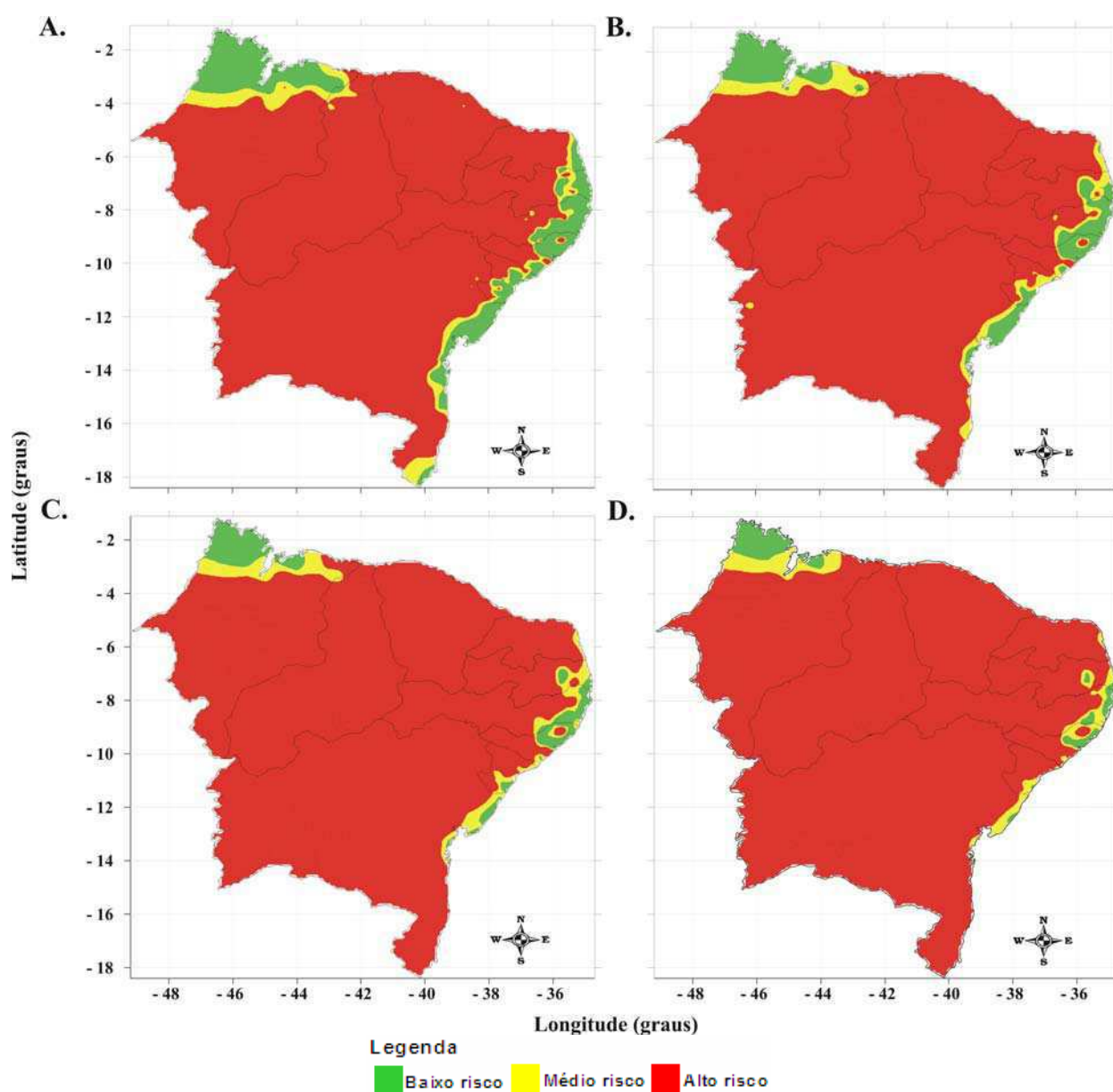
As Figuras 14 a 19 exibem os efeitos negativos das mudanças climáticas sobre as áreas consideradas favoráveis à semeadura do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil. Com semeadura no segundo decêndio de março, de acordo com o modelo do zoneamento de risco climático, as alterações resultantes do aumento da temperatura são perceptíveis quanto às áreas com baixo risco climático para os cenários de acréscimo de precipitação (Figuras 14, 16 e 18). Nessas circunstâncias, observa-se a concentração de áreas favoráveis ao cultivo do algodão próximas ao litoral do Nordeste, tanto na porção mais ao norte quanto na porção mais oriental,

como resultado da maior oferta hídrica nessas áreas, proporcionada pela grande quantidade de umidade advectada do oceano e pelo deslocamento para o sul da ZCIT nesse período. Por outro lado, o manejo do algodoeiro em regiões de grande umidade requer maiores cuidados, devido principalmente à atuação de organismos patogênicos, que em função das alterações ambientais, também podem atuar de forma diferenciada sobre seus hospedeiros (Silva et al., 2009a).

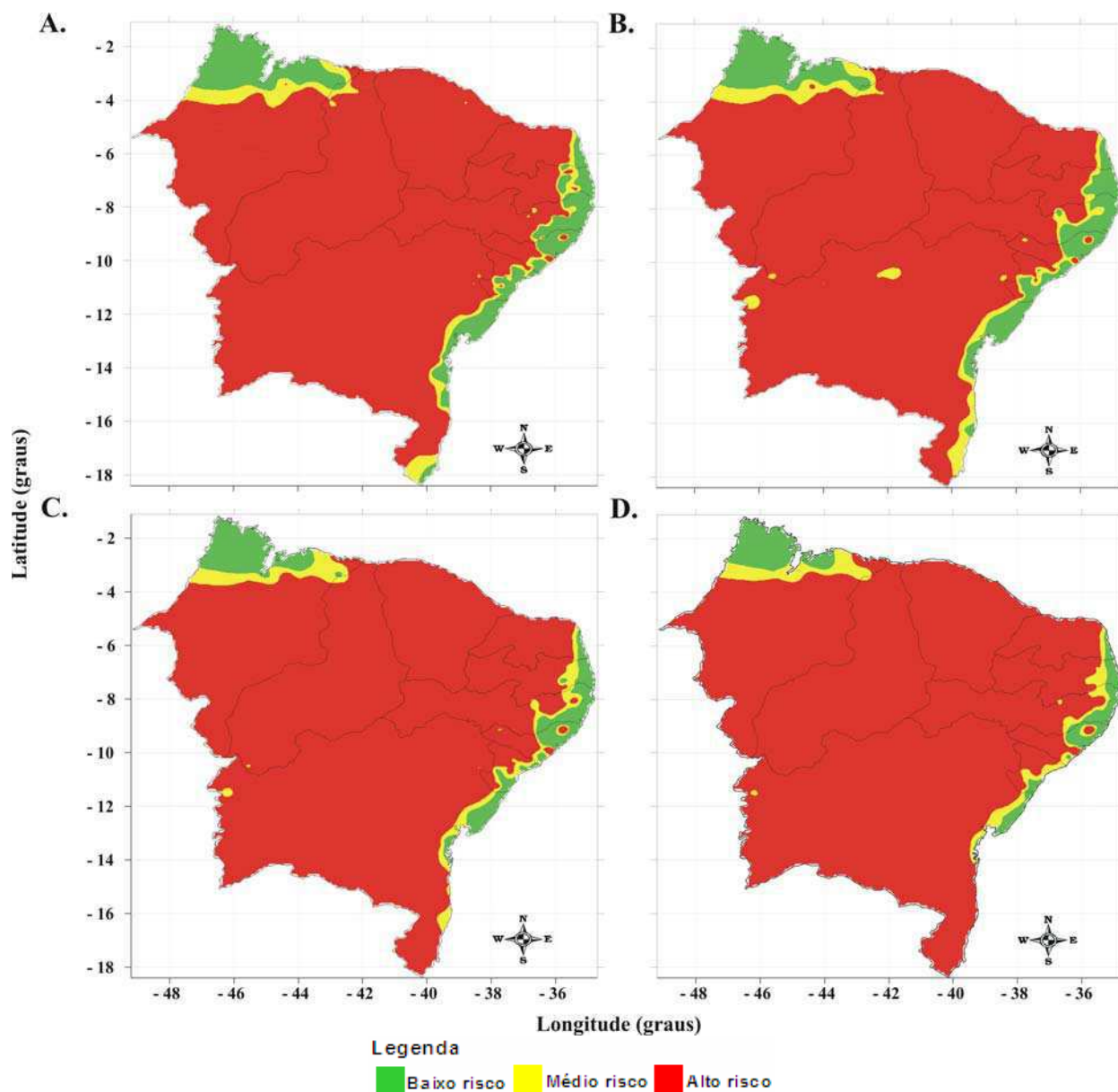


**Figura 14.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de março na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (D).

Os cenários de redução na precipitação (Figuras 15, 17 e 19) se caracterizam por uma menor oferta hídrica nas áreas favoráveis ao cultivo do algodoeiro herbáceo, de tal forma que os efeitos oriundos dos cenários de aumento de temperatura são mais intensos. Esses efeitos são evidentes no prolongamento do período de seca durante as épocas chuvosas, fazendo com que o déficit hídrico seja superior àqueles verificados nas condições climáticas atuais (Figura 15A). Assim, as condições de manejo de culturas perenes tendam a ter maiores dificuldades em se adaptar a menor oferta hídrica.



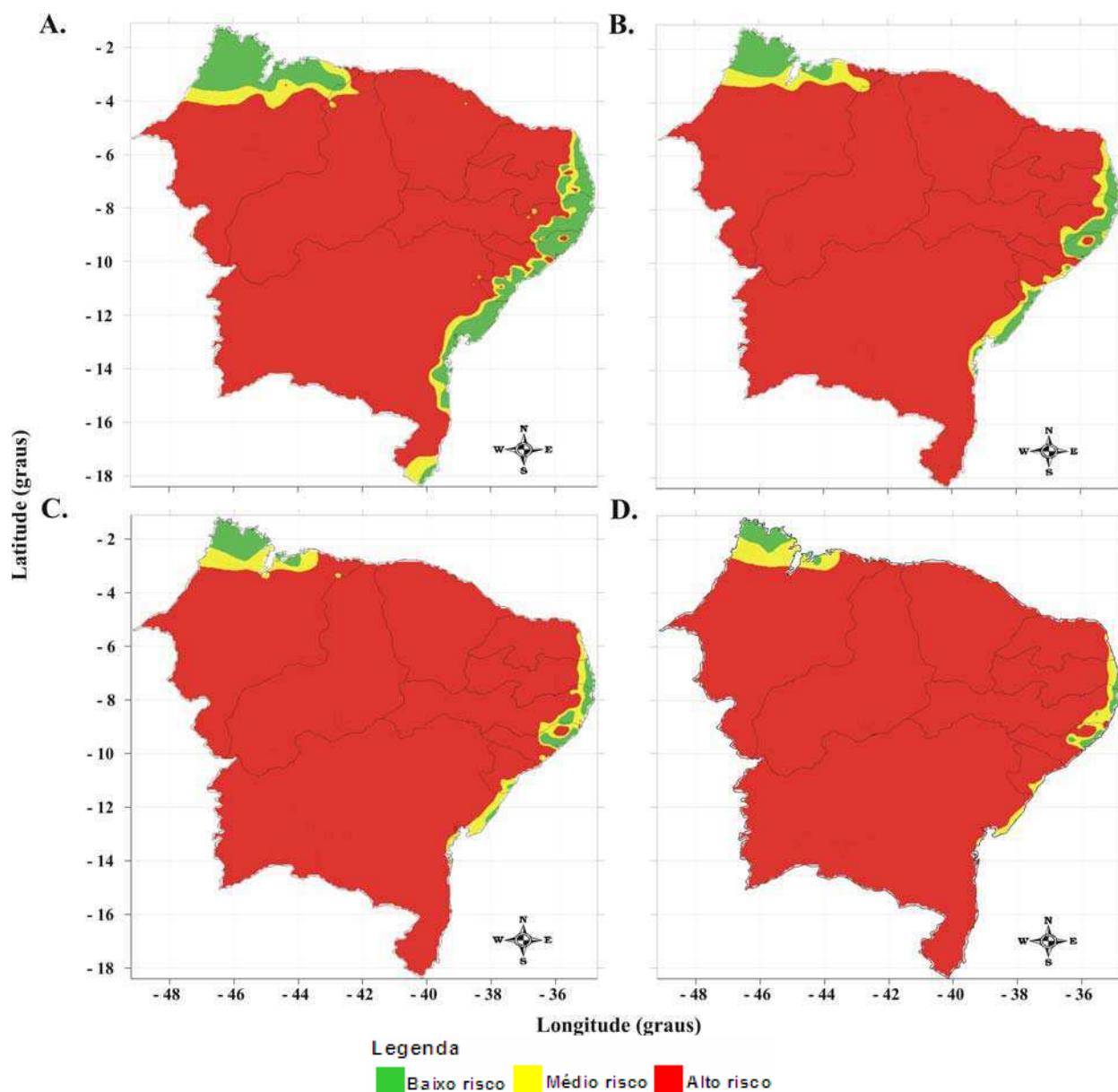
**Figura 15.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de março na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (D).



**Figura 16.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de março na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (D).

O rendimento agrícola é reduzido em função da degradação do solo, disponibilidade de água durante o período de crescimento das culturas e pelo aumento da temperatura do ar. Em função da diminuição da oferta hídrica, para os cenários de decréscimo de precipitação, espera-se que as áreas irrigadas sejam expandidas. Para manutenção das áreas agricultáveis, no entanto, torna-se necessário estudos de impactos ambientais diante das novas condições de manejo. A eficiência do uso da água pode diminuir no futuro, em função da taxa evapotranspiração que será alterada diante dos cenários de mudança climática.

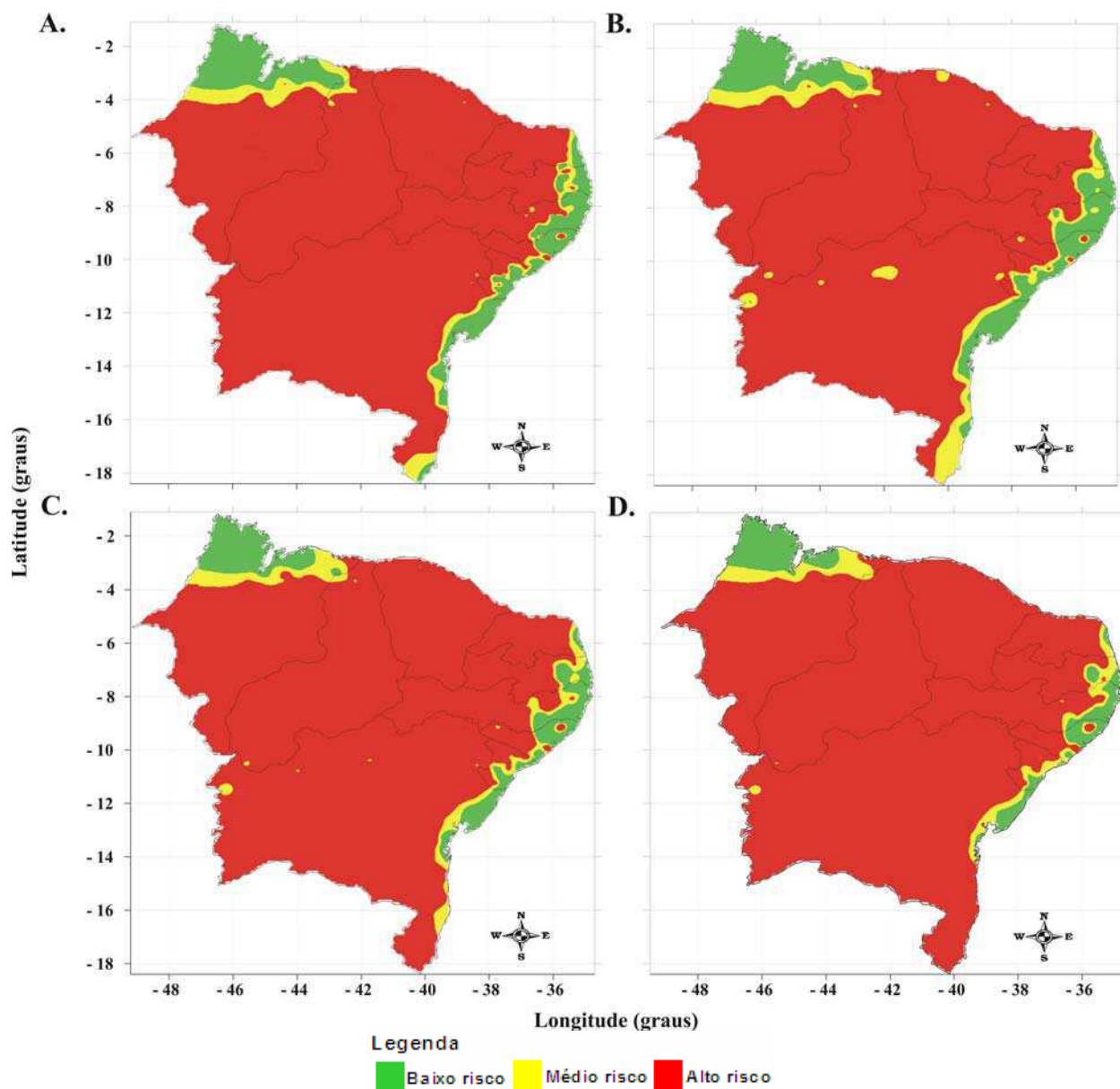




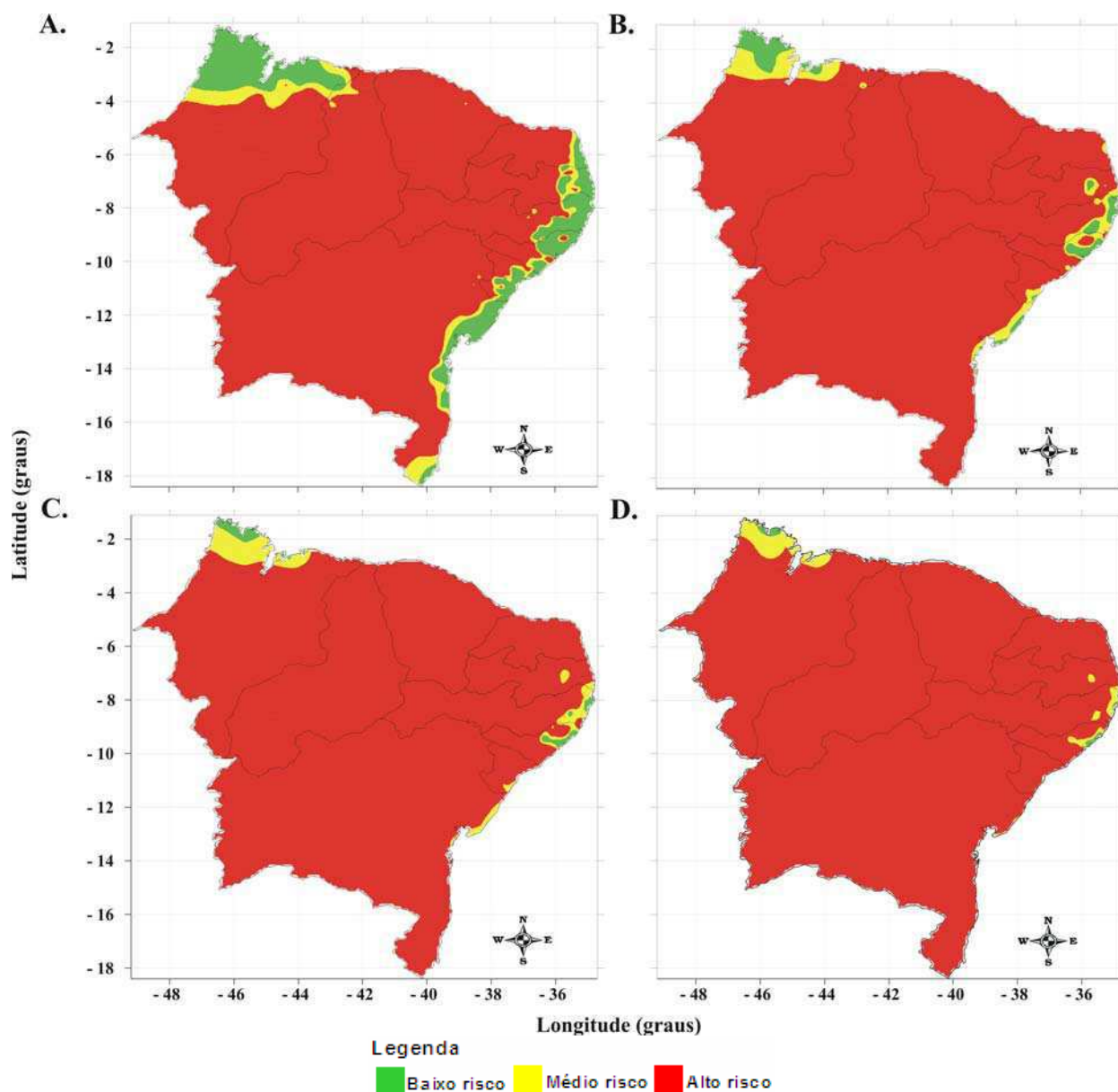
**Figura 17.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de março na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (D).

Apesar do aumento na temperatura do ar, não se verifica grandes mudanças sobre as áreas agricultáveis localizadas nas regiões situadas na porção leste do NEB, principalmente para os cenários de aumento na precipitação (Figuras 20, 22 e 24) quando comparadas às condições climáticas atuais. Essas figuras exibem a variação nas áreas de cultivo consideradas como potencialmente favoráveis ao cultivo do algodoeiro mediante os acréscimos de precipitação pluvial de 10, 25 e 40%, associados à ocorrência, por exemplo, do fenômeno La Niña, com

intensidades fraca, moderada e forte, respectivamente, associados com os aumentos nas temperaturas médias do ar de 1,5;3 e 5 °C.



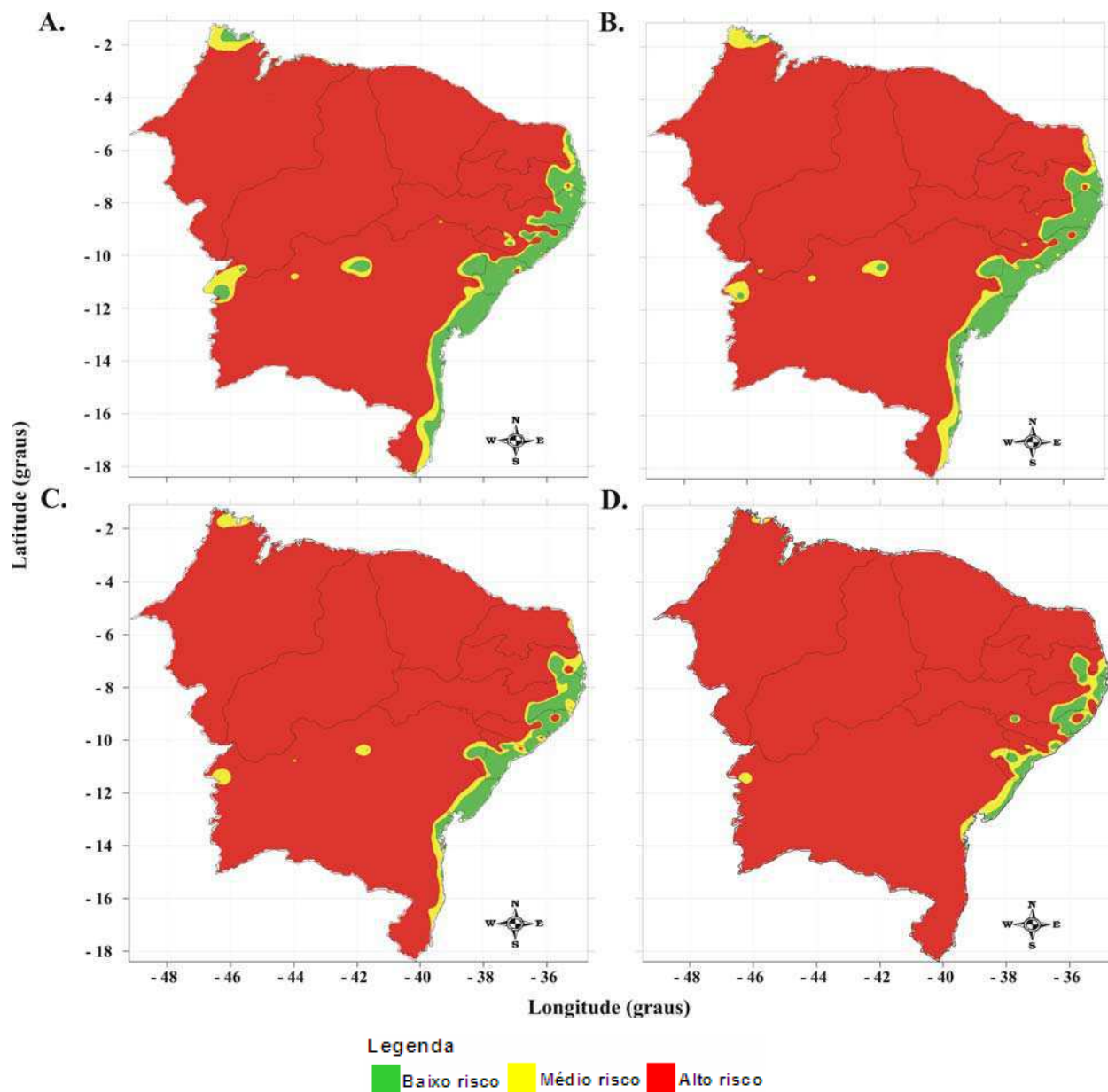
**Figura 18.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de março na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (D).



**Figura 19.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de março na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (D).

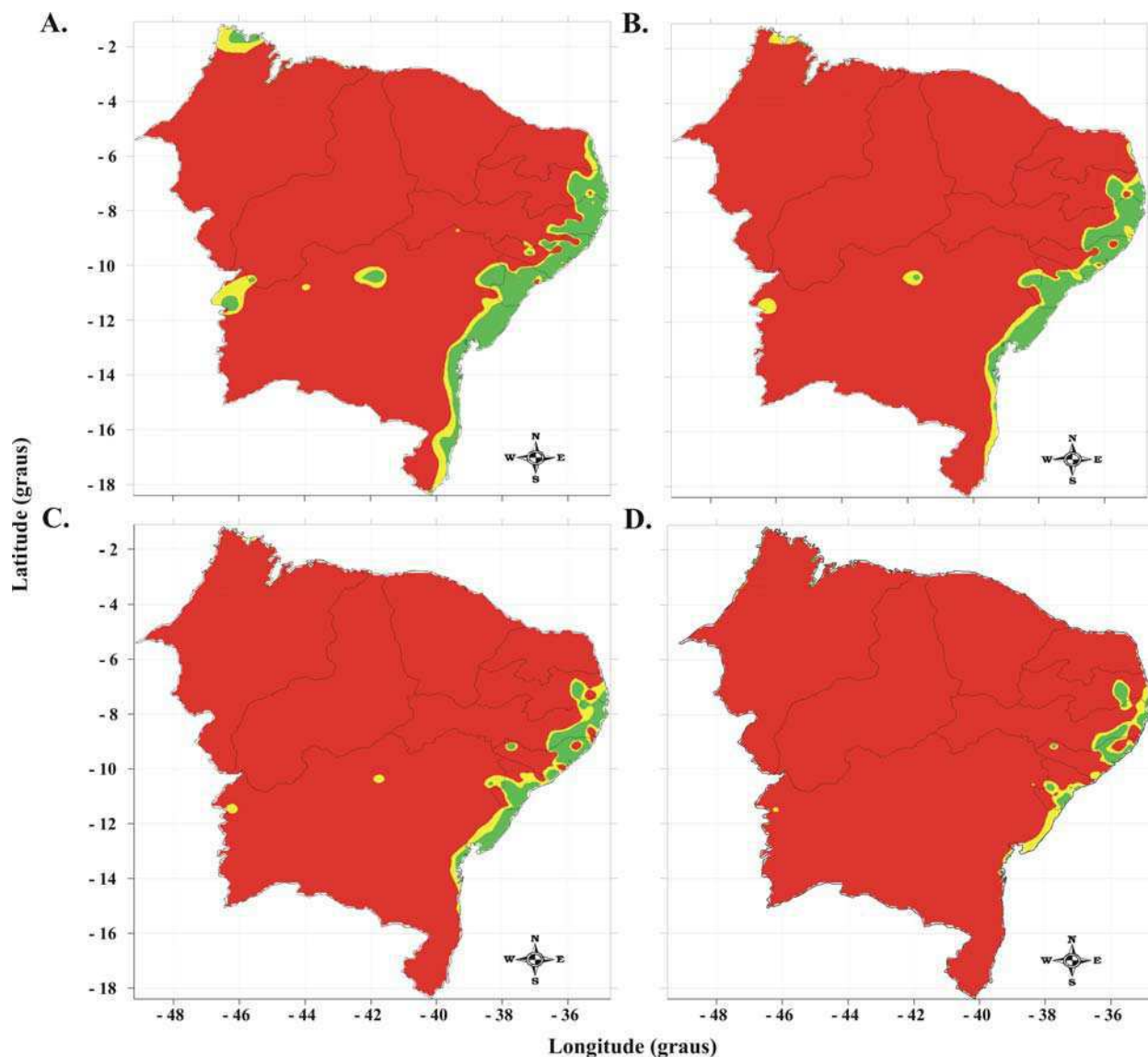
As áreas de inaptidão da cultura do algodoeiro predominam em todos os cenários de aumento de temperatura, sendo as áreas com baixo risco sensivelmente reduzidas. Essas áreas tendem a se deslocar progressivamente para o Leste e para as regiões mais elevadas, em busca de clima mais ameno. Nos cenários de aumento da precipitação, mesmo com o acréscimo de temperatura do ar, verificam-se condições menos pessimistas, em função, evidentemente, da uma maior oferta hídrica.

Por outro lado, os aumentos da temperatura associados aos cenários de decréscimos na precipitação ocasionam o crescimento das áreas de alto risco climático como pode ser observado nas Figuras 21, 23 e 25.

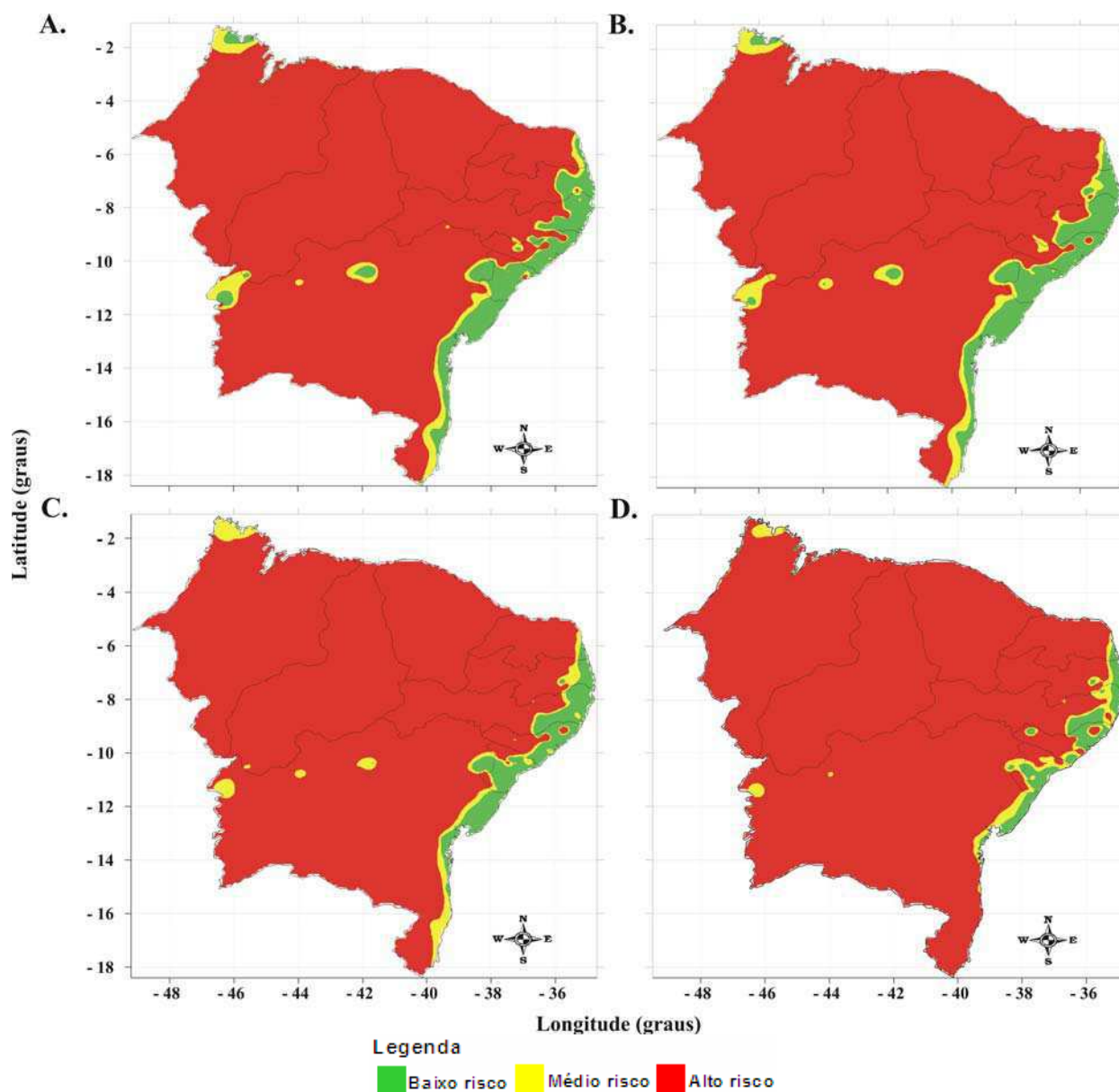


**Figura 20.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de maio na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial (D).

Nesses cenários de precipitação associado com o aumento de temperatura média do ar de 1,5; 3 e 5 °C, a oferta hídrica é reduzida drasticamente, fazendo com que os riscos climáticos aumente significativamente. Com isso, as áreas de cultivo consideradas como potencialmente favoráveis ao cultivo do algodoeiro nas condições climáticas atuais sofrem um processo de redução bastante acentuado em todos os períodos simulados neste estudo.

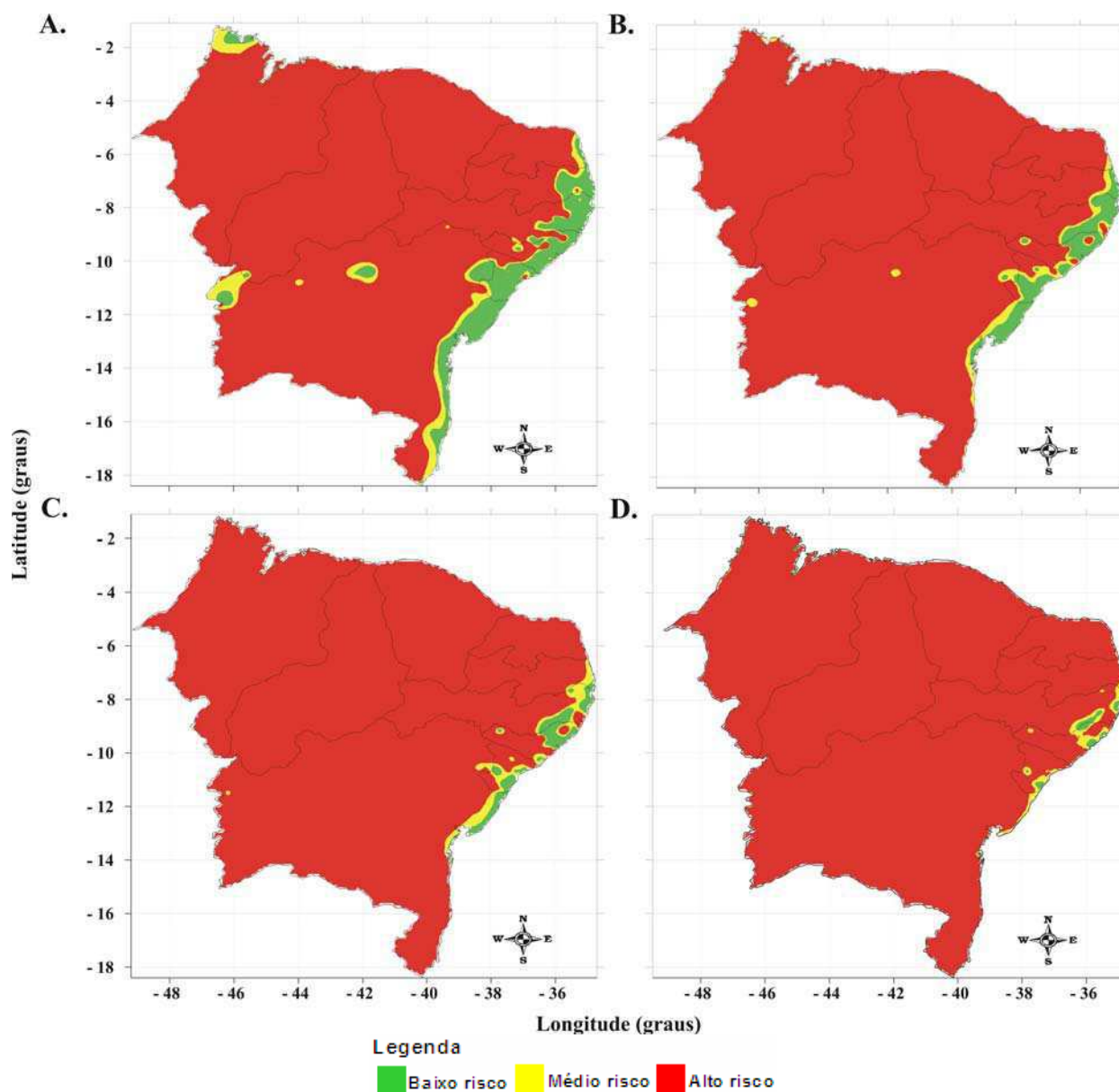


**Figura 21.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de maio na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial (D).



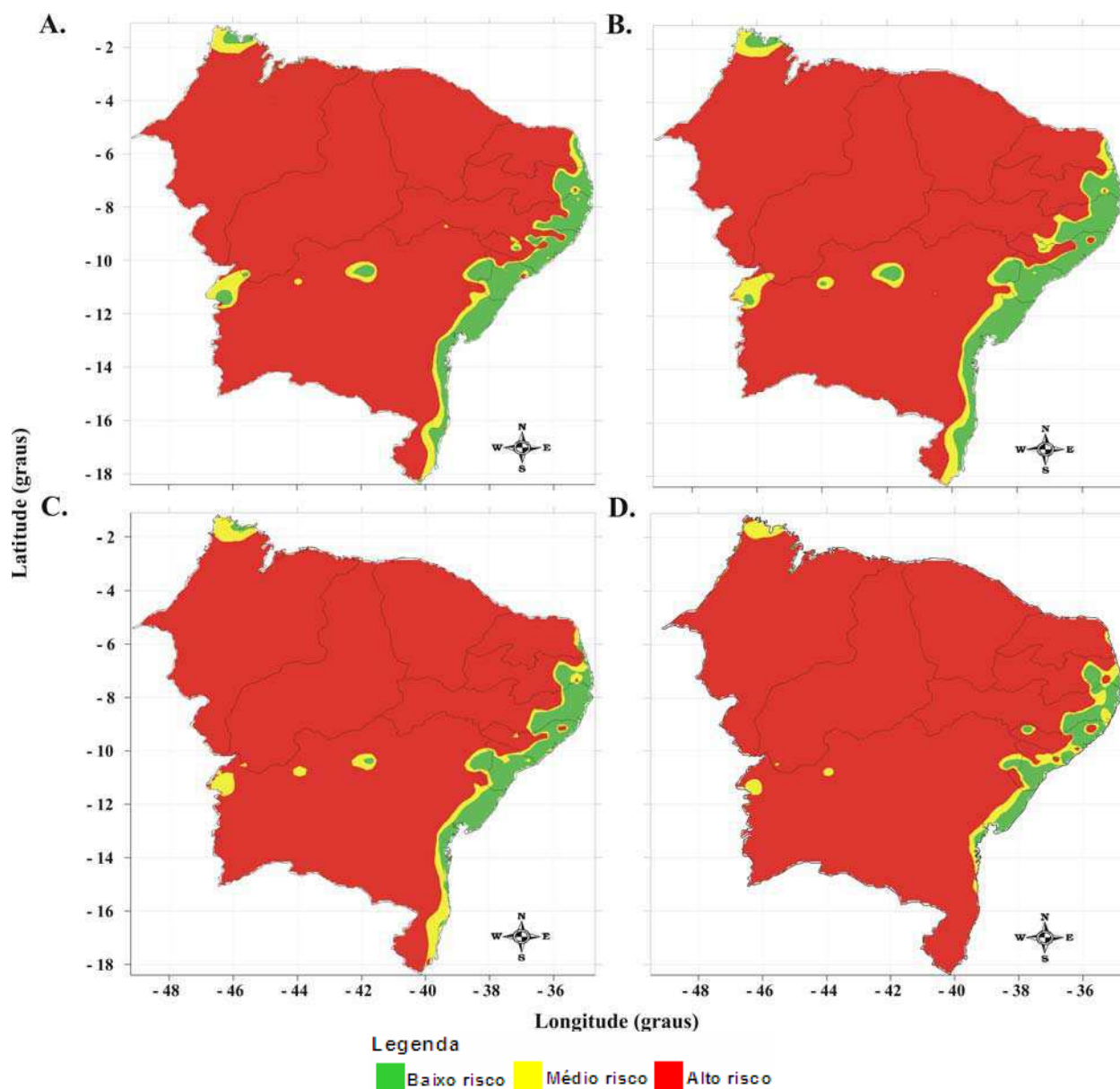
**Figura 22.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de maio na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial (D).

Como consequência das mudanças climáticas, os cultivares do algodoeiro herbáceo mais adaptados às altas temperaturas devem ser cultivadas na região Nordeste do Brasil. A razão disso é porque o aumento da temperatura do ar pode levar a vegetação do semiárido da região Nordeste do Brasil ser substituída por vegetação de clima árido (Nobre et al., 2005). Diante de novas condições de manejo da cultura, em função das restrições climáticas, algumas regiões do Nordeste do Brasil perdem áreas agricultáveis, reduzindo também a produtividade.



**Figura 23.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de maio na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial (D).

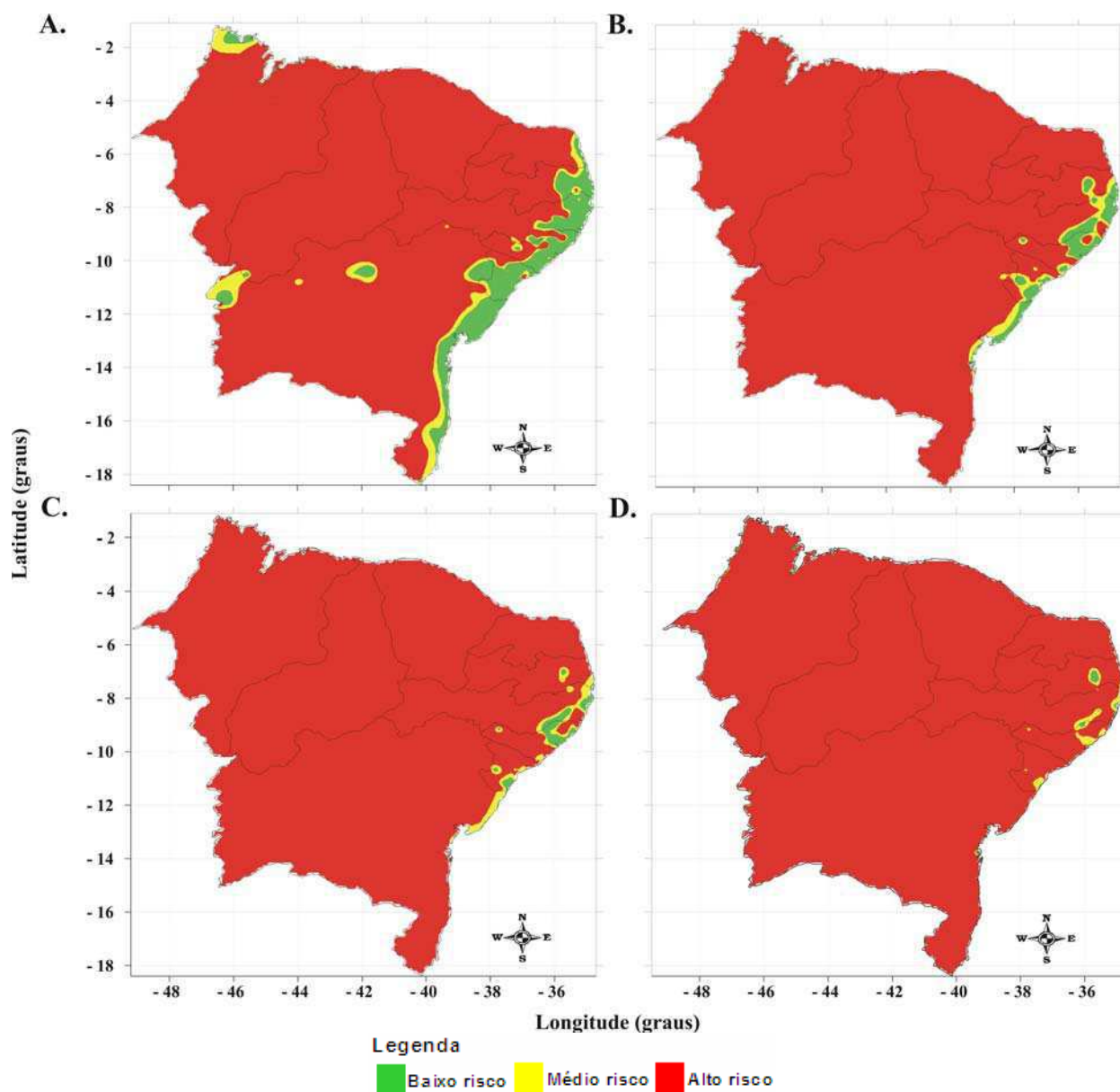
As modificações climáticas provocadas pelo aumento da temperatura do ar e redução da precipitação, em relação às condições climáticas atuais, provocam acréscimos significantes da proporção de áreas agrícolas com alto risco climático para o algodoeiro herbáceo. Porém, o cenário de aquecimento de 1,5 °C produz um aumento significativo nas áreas de baixo e médio riscos climáticos, particularmente durante os três primeiros períodos simulados.



**Figura 24.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de maio na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial (D).

A Tabela 1 sumariza a variação da área agrícola com alto, médio e baixo riscos climáticos no cultivo do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (CCA) e para os cenários de aumentos de temperatura e de 10% na precipitação pluvial. A área total do NEB é 1.558,196 km<sup>2</sup>, mas, as áreas agrícolas com baixo risco climático nas condições climáticas atuais variaram de 3,8 a 29,1%; todavia essa área se torna decrescente para os cenários de aumento na temperatura do ar, e atinge o valor mínimo de 0,3% mediante o aquecimento de 5 °C durante o último período simulado (segundo decêndio de junho) e aumento de 10% na precipitação média anual.





**Figura 25.** Risco climático do algodão herbáceo semeado no segundo decêndio de maio na região Nordeste do Brasil, para as condições climáticas atuais (A), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (B), aumento de 3 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (C), e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial (D).

**Tabela 1.** Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil, com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) para o cultivo do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil para as condições climáticas atuais (CCA), aumento de 1,5 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial, aumento de 3 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial, e aumento de 5 °C na temperatura e 10% na precipitação pluvial.

Períodos de semeadura	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR
	CCA			Aumento de 1,5 °C			Aumento de 3 °C			Aumento de 5 °C		
11 a 20 / 11	65,2	13,3	21,5	66,4	8,4	25,2	68,1	10,4	21,5	70,4	12,8	16,8
11 a 20 / 12	64,7	10,8	24,5	60,7	9,9	29,4	64	9,2	26,8	64	11,7	24,3
11 a 20 / 01	55,7	15,2	29,1	56,7	16,7	26,6	61,3	17,2	21,5	66,4	16,9	16,7
11 a 20 / 02	71,2	12,5	16,3	75,8	10,3	13,9	81,1	7,8	11,1	84,5	6,2	9,3
11 a 20 / 03	84	5,6	10,4	85,4	5,6	9	89	4,2	6,8	91,4	3,6	5
11 a 20 / 04	84,9	4,8	10,3	86,3	4,8	8,9	89,5	4	6,5	92,9	2,8	4,3
11 a 20 / 05	87,7	3,9	8,4	88,7	4	7,3	91,3	3,6	5,1	94,4	2,8	2,8
11 a 20 / 06	94	2,2	3,8	94,9	1,8	3,3	96,5	1,7	1,8	98,2	1,5	0,3

De acordo com os resultados da Tabela 2, verifica-se que os impactos das mudanças climáticas podem ser ainda mais pessimistas do ponto de vista da distribuição de áreas com baixo risco climático ao longo do período de cultivo do algodoeiro no NEB. Diante das condições de menor oferta hídrica, para o mesmo cenário de aumento de 5 °C, as áreas com baixo risco climático representam apenas 0,1% da área total, no último período simulado. Durante todo o período analisado, esses valores variaram entre 0,1-16,7% ao longo dos cenários analisados, que são bem inferiores quando comparados com aqueles dos cenários com aumento de 10% na precipitação.

De modo geral, no cenário de acréscimo de 10% na precipitação, para o primeiro e segundo períodos simulados, os cenários de aumento de 1,5 e 3 °C apresentam crescimento ou manutenção nas áreas de baixo risco climático. No primeiro período simulado a área agrícola foi de 335.000 km<sup>2</sup> nas CCA e de 392.700 e 335.000 km<sup>2</sup> para os cenários A e B, respectivamente. Para o segundo período simulado, verificou-se um aumento da área de baixo risco nas CCA, que também é mantido nos cenários de aumento de temperatura. Nesse período, as CCA apresentaram uma área agricultável de 381.800 km<sup>2</sup>, enquanto que nos cenários A e B se verificaram os valores de 458.100 e 417.600 km<sup>2</sup>, respectivamente. No cenário de aumento de 5 °C não se observa crescimento nas áreas de baixo risco; no entanto, o crescimento das áreas de alto risco é pouco significativo.

As condições anteriores não são verificadas para o cenário de redução de 10% na precipitação pluvial (Tabela 2). Nos mesmos períodos e cenários de aumento de temperatura, verificou-se uma redução significativa nas áreas de baixo risco climático e aumento nas áreas de alto risco. Para as CCA durante o primeiro período simulado, a área de baixo risco representava

335.000 km<sup>2</sup>, enquanto que para os cenários A, B e C verificam-se 314.800, 235.300 e 129.300 km<sup>2</sup>, respectivamente. Para o segundo período, a área de baixo risco nas CCA é de 381,800 km<sup>2</sup> tendo, portanto, um pequeno crescimento no cenário de aumento de 1,5 °C, registrando cerca de 416.000 km<sup>2</sup>. Entretanto, para os cenários B e C a tendência de redução na área persiste, chegando aos valores de 352.200 e 260.200 km<sup>2</sup>, respectivamente. Silva (2008) em estudos com feijão-caupi analisou às alterações climáticas nas microrregiões do Estado da Paraíba, usando SARRA e três cenários de aumento de temperatura. Ele verificou que, na microrregião de Itabaiana, um acréscimo de 3 °C na temperatura do ar resulta no decréscimo de 100 para 63,9% nas áreas com baixo risco climático do cultivo do feijão-caupi. Com o acréscimo de 6 °C, esse decréscimo é de 21,9%, ou seja, a área favorável decresce de 1.652,197 km<sup>2</sup> para 1.055,75 km<sup>2</sup> da área total da microrregião. Com o aumento médio da temperatura do ar de 6 °C, a área favorável ao plantio de feijão passa a ser de apenas 361,83 km<sup>2</sup> e, desse modo, a redução da área agricultável é significativamente reduzida em cerca de 80%.

A disponibilidade de áreas agronomicamente adequadas, ou seja, que representem o menor risco climático ao cultivo do algodoeiro conduz ao sucesso das colheitas, com uma faixa aceitável de produtividade. Assim, faz-se necessário o conhecimento das áreas que sofrerão os menores impactos com as mudanças climáticas, e que sejam mais adaptáveis as novas condições ambientais e de manejo.

**Tabela 2.** Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil, com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) para o cultivo do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil para as condições climáticas atuais (CCA), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial, aumento de 3 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial, e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 10% na precipitação pluvial.

Períodos de semeadura	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR
	CCA			Aumento de 1,5 °C			Aumento de 3 °C			Aumento de 5 °C		
11 a 20 / 11	65,2	13,3	21,5	68,9	10,9	20,2	71,8	13,1	15,1	74,5	17,2	8,3
11 a 20 / 12	64,7	10,8	24,5	64,5	8,8	26,7	67,6	9,8	22,6	70,3	13	16,7
11 a 20 / 01	55,7	15,2	29,1	61,2	17,4	21,4	67,3	16,6	16,1	73,4	13,6	13
11 a 20 / 02	71,2	12,5	16,3	81,3	7,5	11,2	85	6	9	87,5	5,2	7,3
11 a 20 / 03	84	5,6	10,4	88,7	4,1	7,2	91,1	3,8	5,1	92,9	3,5	3,6
11 a 20 / 04	84,9	4,8	10,3	89,6	4,1	6,3	92,4	2,7	4,9	94,6	2,5	2,9
11 a 20 / 05	87,7	3,9	8,4	91,4	3,1	5,5	93,8	2,3	3,9	96,3	2,2	1,5
11 a 20 / 06	94	2,2	3,8	96,2	1,6	2,2	97,5	1,6	0,9	99	0,9	0,1

Como consequência de possíveis aumentos de temperatura do ar e maior variabilidade da precipitação, a região Nordeste, por possuir condições ambientais mais vulneráveis aos efeitos das alterações climáticas, torna-se mais sensível quando comparada a outras regiões do Brasil. Isso é constatado quando se analisa a variabilidade espaço-temporal das áreas favoráveis ao cultivo do algodoeiro através dos períodos e cenários simulados, verificando-se, então, que as regiões com alto e médio riscos aumentam; no entanto, as regiões de baixo risco climático diminuíram ao longo do período de cultivo na região. Dessa forma, algumas áreas se tornaram desfavoráveis em função do aumento no grau de risco climático associado ao cultivo do algodoeiro na região. Siqueira et al. (1994) apresentaram, para alguns pontos do Brasil, os efeitos das mudanças globais na produção de trigo, milho e soja. Pinto et al. (2001) simularam os efeitos das elevações das temperaturas e das chuvas no zoneamento de riscos climáticos para o café arábica nos Estados de São Paulo e Goiás. Os resultados das simulações mostraram uma redução significativa nas áreas com aptidão agroclimática.

Considerando os cenários de aumentos das temperaturas, pode-se admitir que as regiões anteriormente adequadas ao plantio do algodoeiro serão drasticamente reduzidas mais ainda em função do decréscimo de precipitação pluvial. Quanto maior a anomalia, menos apta se tornará a região, até o limite máximo de tolerância biológica ao calor ou à seca provocada pelo aumento térmico. Por outro lado, outras culturas mais resistentes a altas temperaturas ou estiagens mais longas, provavelmente serão beneficiadas, até o seu limite próprio de tolerância ao estresse térmico ou hídrico. No caso de baixas temperaturas, as regiões que atualmente apresentam limitações para o desenvolvimento de culturas susceptíveis a geadas, com o aumento do nível térmico devido ao aquecimento global, passarão a exibir condições de menor risco ao desenvolvimento da planta. É o caso típico da cultura cafeeira que poderá ser deslocada futuramente do Sudeste para o Sul do país.

A Tabela 3 apresenta a variação percentual em área agrícola do algodoeiro herbáceo cultivado na região Nordeste do Brasil para as condições climáticas atuais (CCA) e para os cenários de aumento de temperatura de 1,5; 3 e 5°C e de aumento de 25% na precipitação pluvial. Nessas condições, durante o terceiro período simulado, tendo em vista a maior oferta hídrica, as áreas agrícolas com baixo risco climático nas CCA, que variaram de 3,8 a 29,1%, sofrem acréscimos significativos passando a variar entre 3,9-30,1%; 2,3-23,9% e 0,6-19,9% para os cenários de aumentos de temperatura de 1,5; 3 e 5 °C, respectivamente. Todavia, a disponibilidade de áreas com baixo risco se torna decrescente em consequência dos cenários de aumento na temperatura do ar até um valor mínimo de 0,6% para o aquecimento de 5 °C durante o último período simulado associada com o aumento de 25% na precipitação média. Na tentativa

de se identificar o impacto das mudanças do clima na produção regional do café, Assad et al. (2004) verificaram que ao acrescentar 1 °C na temperatura, ocorre um aumento na demanda evapotranspirativa, provocando maior deficiência hídrica, mesmo considerando um acréscimo de 15% na precipitação pluvial. O acréscimo de 1 °C na temperatura provoca um aumento de 61,6% para 85,9% nas áreas inaptas para o cafeeiro da espécie *Coffea* arábica. Por outro lado, ao aumentar para 3 °C, 99,9% do Estado de Goiás passaria à condição de inapto, inclusive para o café irrigado.

**Tabela 3.** Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil, com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) para o cultivo do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil para as condições climáticas atuais (CCA), aumento de 1,5 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial, aumento de 3 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial, e aumento de 5 °C na temperatura e 25% na precipitação pluvial.

Períodos de semeadura	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR
	CCA			Aumento de 1,5 °C			Aumento de 3 °C			Aumento de 5 °C		
11 a 20 / 11	65,2	13,3	21,5	64,7	7,9	27,4	66,7	8,8	24,5	68,5	10,6	20,9
11 a 20 / 12	64,7	10,8	24,5	58,3	10,5	31,2	62	9,5	28,5	64,8	9,2	26
11 a 20 / 01	55,7	15,2	29,1	53,6	16,3	30,1	59	17,1	23,9	63,2	16,9	19,9
11 a 20 / 02	71,2	12,5	16,3	72,3	11,8	15,9	78,6	8,9	12,5	82,7	7,1	10,2
11 a 20 / 03	84	5,6	10,4	83,1	6,6	10,3	87,4	4,9	7,7	90,3	3,8	5,9
11 a 20 / 04	84,9	4,8	10,3	84,5	4,9	10,6	87,5	4,8	7,7	91,6	3,2	5,2
11 a 20 / 05	87,7	3,9	8,4	87,3	4,1	8,6	89,7	4,3	6	93,5	3	3,5
11 a 20 / 06	94	2,2	3,8	94,1	2	3,9	95,8	1,9	2,3	97,7	1,7	0,6

A Tabela 4 exibe a variação das áreas com alto, médio e baixo risco climático durante os os cenários de mudanças climáticas. É possível verificar que as condições de decréscimo de 25% na precipitação podem ser ainda mais pessimistas do ponto de vista da distribuição de áreas de baixo risco ao longo do período de cultivo do algodoeiro no NEB, diante da ocorrência de um fenômeno El Niño classificado como moderado. Para o cenário de aumento de 5 °C e decréscimo de 25% na precipitação pluvial, as áreas com baixo risco climático, no último período simulado, variaram entre 0,0-11,1%. Tais valores são bem inferiores quando comparados com aqueles dos cenários com aumento de 25% na precipitação.

**Tabela 4.** Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil, com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) para o cultivo do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil para as condições climáticas atuais (CCA), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial, aumento de 3 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial, e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 25% na precipitação pluvial.

Períodos de semeadura	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR
	CCA			Aumento de 1,5 °C			Aumento de 3 °C			Aumento de 5 °C		
11 a 20 / 11	65,2	13,3	21,5	73,1	12,9	14	76,2	16,8	7	81,3	16,3	2,4
11 a 20 / 12	64,7	10,8	24,5	67,6	10,6	21,8	70,7	14	15,3	74	14,9	11,1
11 a 20 / 01	55,7	15,2	29,1	67,8	16,5	15,7	73,9	13,7	12,4	79,7	9,4	10,9
11 a 20 / 02	71,2	12,5	16,3	85,1	5,9	9	87,7	5,2	7,1	89,6	4,3	6,1
11 a 20 / 03	84	5,6	10,4	90,9	3,5	5,6	92,9	3,4	3,7	94,7	3	2,3
11 a 20 / 04	84,9	4,8	10,3	92,3	2,8	4,9	94,4	2	3,6	96,2	2,4	1,4
11 a 20 / 05	87,7	3,9	8,4	93,8	2,1	4,1	95,5	2	2,5	97,8	1,7	0,5
11 a 20 / 06	94	2,2	3,8	97,2	1,5	1,3	98,6	1,1	0,3	99,7	0,3	0

A Tabela 5 evidencia que o potencial atual de cultivo do algodoeiro da região Nordeste apresenta menor risco climático nos três primeiros períodos simulados, com uma área agricultável do algodoeiro variando entre 335.000-453.400 km<sup>2</sup>, que corresponde à variação de 21,5 a 29,1% da área total da região. Por outro lado, para o cenário de aumento de 40% na precipitação média, associado ao aumento da temperatura do ar de 1,5 °C, a área favorável ao cultivo do algodoeiro passa a ser 450.300 km<sup>2</sup>, no primeiro período simulado, cerca de 30% maior do que a área nas CCA, chegando ao valor máximo de 522.000 km<sup>2</sup> no terceiro período simulado, representando um acréscimo de 20%. No caso extremo, considerando o aumento de temperatura do ar de 5 °C, a área favorável a semeadura do algodoeiro fica sendo de apenas 17.100 km<sup>2</sup>, para o último período simulado, ou seja, 1,1% da área total da região.

Os períodos entre os meses de fevereiro e maio tendem a manter uma média de 10% nas áreas de baixo risco nas CCA; nesse intervalo de tempo as áreas favoráveis se concentram em sua maioria na costa oriental do NEB. Para o cenário de aumento de 1,5 °C, tais valores sofrem acréscimos significativos ou tendem a manter os valores das CCA. Tal crescimento está associado ao aumento na oferta hídrica, pois para quase todos os cenários de aumento na precipitação se verifica essa condição, mesmo persistindo os cenários de aumento na temperatura do ar.

**Tabela 5.** Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil, com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) para o cultivo do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil para as condições climáticas atuais (CCA), aumento de 1,5 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial, aumento de 3 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial, e aumento de 5 °C na temperatura e 40% na precipitação pluvial.

Períodos de semeadura	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR
	CCA			Aumento de 1,5 °C			Aumento de 3 °C			Aumento de 5 °C		
11 a 20 / 11	65,2	13,3	21,5	63,1	8	28,9	65,5	8,2	26,3	67,3	9,2	23,5
11 a 20 / 12	64,7	10,8	24,5	54,5	12,4	33,1	59	11,2	29,8	62,9	9,7	27,4
11 a 20 / 01	55,7	15,2	29,1	51,1	15,4	33,5	55,8	17,1	27,1	61,1	16,7	22,2
11 a 20 / 02	71,2	12,5	16,3	69	13,2	17,8	75,5	10,5	14	80,6	8	11,4
11 a 20 / 03	84	5,6	10,4	81,1	7	11,9	85,2	6,2	8,6	89,2	4	6,8
11 a 20 / 04	84,9	4,8	10,3	83,5	4,4	12,1	85,9	5,1	9	90,7	3,4	5,9
11 a 20 / 05	87,7	3,9	8,4	86,1	3,9	10	88,5	4,3	7,2	92,4	3,1	4,5
11 a 20 / 06	94	2,2	3,8	92,9	2,7	4,4	95	2	3	96,9	2	1,1

As variações percentuais na área agricultável, que é projetado para os três cenários de aquecimento do ar atmosférico e decréscimo de 40% na precipitação média estão resumidas na Tabela 6. Praticamente, 80% da área agronomicamente adequadas ao cultivo do algodão é drasticamente reduzido das CCA para o aquecimento de 1,5 °C durante o primeiro período simulado na região de estudo. Durante esse período, a porcentagem da área total com baixo risco climático são 4,5; 0,9 e 0,1% para os cenários de aumento de temperatura do ar de 1,5, 3 e 5 °C, respectivamente. Por outro lado, durante o terceiro período simulado as áreas de baixo risco sofrem acréscimos significativos, passando para 11,8; 10,1 e 8,9% nos cenários de acréscimo de temperatura de 1,5, 3 e 5 °C, respectivamente. Para o cenário de redução de 40% na precipitação (Tabela 6), verifica-se uma redução significativa nas áreas de baixo risco climático e aumento nas áreas de alto risco. Praticamente não aparecem áreas agricultáveis para o algodão em nenhum período simulado para o cenário de aumento de 5 °C.

**Tabela 6.** Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil, com alto risco (AR), médio risco (MR) e baixo risco climático (BR) para o cultivo do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil para as condições climáticas atuais (CCA), aumento de 1,5 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial, aumento de 3 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial, e aumento de 5 °C na temperatura e redução de 40% na precipitação pluvial.

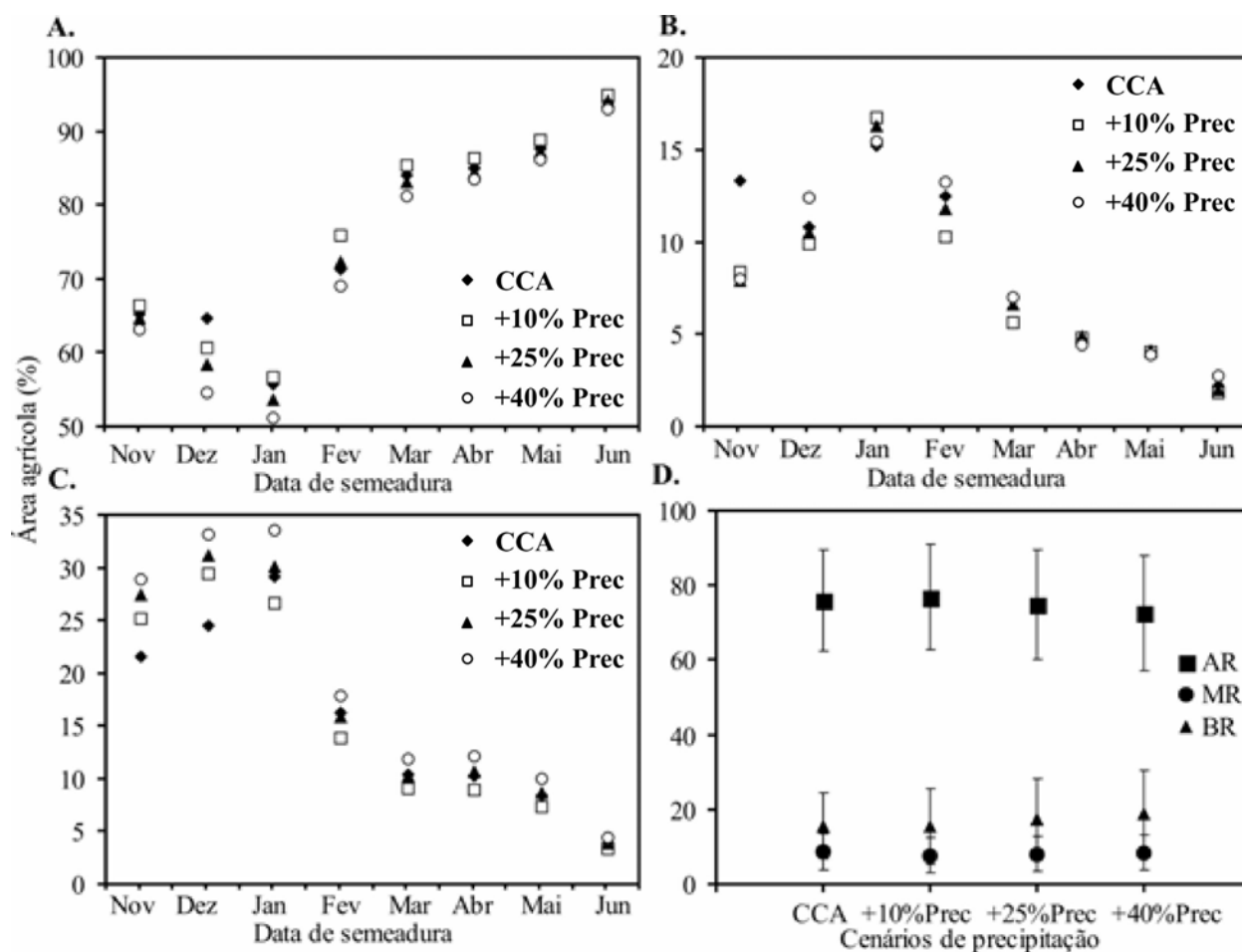
Períodos de semeadura	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR	AR	MR	BR
	CCA			Aumento de 1,5 °C			Aumento de 3 °C			Aumento de 5 °C		
11 a 20 / 11	65,2	13,3	21,5	79,9	15,6	4,5	85,6	13,5	0,9	92,1	7,8	0,1
11 a 20 / 12	64,7	10,8	24,5	73	13,1	13,9	77,5	12,4	10,1	83,5	8,4	8,1
11 a 20 / 01	55,7	15,2	29,1	77,1	11,1	11,8	82,7	7,2	10,1	86,5	4,6	8,9
11 a 20 / 02	71,2	12,5	16,3	88,5	5	6,5	90,7	4,2	5,1	92,2	3,8	4
11 a 20 / 03	84	5,6	10,4	93,4	2,9	3,7	95,3	2,9	1,8	96,6	2,9	0,5
11 a 20 / 04	84,9	4,8	10,3	94,4	2	3,6	95,8	2,2	2	97,9	1,6	0,5
11 a 20 / 05	87,7	3,9	8,4	95,6	1,9	2,5	97,2	1,8	1	99	0,7	0,3
11 a 20 / 06	94	2,2	3,8	98,3	1,2	0,5	99,4	0,5	0,1	99,9	0,1	0

Esse cenário se torna ainda mais pessimista com a redução de precipitação, pois restringe ainda mais a semeadura da cultura para alguns períodos mediante os cenários de aquecimentos de 1,5 e 3 °C. No primeiro período simulado (segundo decêndio de novembro), a área com baixo risco climático nos cenários de aquecimento de 1,5; 3 e 5 °C são de 216.600, 157.400 e 126.200 km<sup>2</sup>, respectivamente. Para o segundo período (segundo decêndio de dezembro), a área com baixo risco climático é de 183.900 e 157.400 km<sup>2</sup> para os cenários de aquecimento de 1,5 e 3 °C, respectivamente. Os valores das áreas de área agricultável com baixo risco climático tendem a diminuir do terceiro período em diante, pois nesse período as áreas agricultáveis são de 101.300 e 79.500 km<sup>2</sup> para os cenários de aquecimento de 1,5 e 3 °C, respectivamente. Com os cenários de mudanças climáticas se tornam necessários estudos que avaliem as respostas da cultura quanto à disponibilidade de áreas agricultáveis e de seu potencial produtivo. Thornton et al. (2009), em estudos com milho e feijão, analisou as alterações climáticas na África oriental usando GCM e quatro cenários de emissões (A1FI, A2, B1, B2) SRES (Special Report on Emissions Scenarios). Eles encontraram perda de rendimento para essas culturas de até 20% entre as condições atuais e o cenário para o ano de 2050. Outros pesquisadores também mostraram os efeitos das alterações climáticas sobre outras culturas, tal como Harmsen et al. (2009) para as culturas genéricas em Porto Rico e Jones et al. (2003) para a produção de milho na África e na América Latina. Isso significa que em consequência dos aumentos de temperatura do ar, uma questão importante é a redução esperada da área agricultável para o cultivo de muitas culturas em diferentes partes do mundo.



Segundo Assad & Pinto (2008) calculando-se proporcionalmente a perda ou ganho de áreas cultiváveis com as culturas consideradas, em função da migração causada pelo aquecimento, os resultados indicaram ganho econômico da ordem de R\$ 27 bilhões por ano com a cana-de-açúcar em 2020 no pior cenário (A2). A soja deverá perder R\$ 4,3 bilhões/ano e o milho cerca de R\$ 1,2 bilhões/ano no mesmo período. No cenário B2, de menor aquecimento previsto, o saldo negativo de produção chega a R\$ 6,7 bilhões/ano e o positivo, devido principalmente ao aumento de áreas potenciais para a cana-de-açúcar, pode atingir R\$ 29 bilhões/ano. Dados recentes coletados por Assad & Pinto (2008) mostram, ainda, que para a obtenção de uma nova cultivar de planta agrícola o prazo necessário é de dez anos além de mais três para multiplicação de sementes. O custo anual é da ordem de US\$ 500 mil, ou seja, US\$ 6 milhões para cada cultivar nova. Esse fato mostra a importância dos trabalhos de melhoramento genético em busca de plantas tolerantes à seca e às altas temperaturas o quanto antes sob pena de obsolescência das cultivares existentes antes da produção de novas plantas adaptadas às novas condições climáticas futuras.

A variabilidade percentual temporal das áreas agrícolas cultivadas com algodoeiro herbáceo na região de estudo sob às CCA e os cenários de aquecimento do ar são apresentados nas Figuras 26 a 31. A Figura 26 exibe a área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil ao longo do período de cultivo, que se estende entre os meses de novembro a junho, para as condições de alto risco (Figura 26A), médio risco (Figura 26B) e baixo risco climático (Figura 26C). Nessa análise é mantido o aumento de 1,5 °C na temperatura do ar e acréscimos de 10, 25 e 40% na precipitação média anual. A média e o desvio padrão do percentual de área agrícola com alto, médio e baixo riscos climáticos nas condições climáticas atuais (CCA) e nos cenários (+10% Prec); (+25% Prec) e (+40% Prec) são apresentados na (Figura 26D). A porcentagem de área agrícola com alto risco climático (Figura 26A) para o cenário de aumento de 1,5 °C apresentou valores entre 50-95% ao longo do período, sendo os menores riscos entre os meses de novembro a janeiro, onde os seus valores não ultrapassam os 70% da área da região. As áreas com alto risco climático tendem a crescer após o mês de janeiro, registrando os maiores valores no mês de junho. Como os riscos climáticos estão associados, principalmente, à oferta hídrica, então os menores impactos são verificados nos cenários de maior acréscimo na precipitação. Como esperado, a porcentagem das áreas agrícolas sob médio e baixo riscos climáticos apresentaram basicamente um padrão de comportamento inverso aquele das áreas de alto risco ao longo dos cenários analisados (Figuras 26B e 26C).

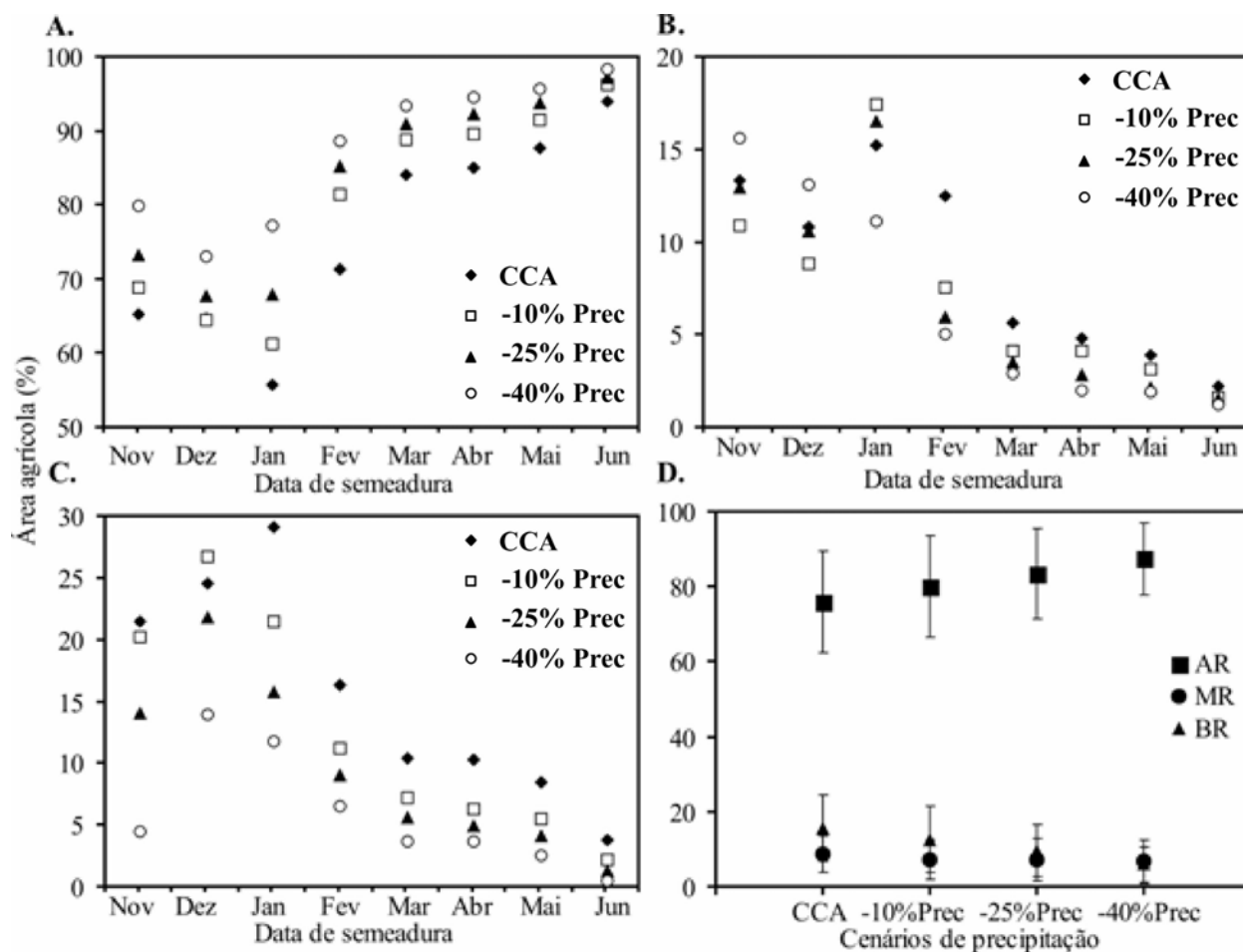


**Figura 26.** Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo cultivado na região Nordeste do Brasil ao longo do seu período de cultivo, nas condições climáticas de alto risco (A), médio risco (B) e baixo risco climático (C), para o aumento de 1,5 °C na temperatura do ar e acréscimo de 10% (+10 Prec), 25% (+25 Prec) e 40% (+40 Prec) na precipitação média e nas condições climáticas atuais (CCA). Média e desvio padrão (D) do percentual de área agrícola de alto (AR), médio (MR) e baixo (BR) riscos climáticos e nas condições climáticas atuais (CCA) e cenários de +10% Prec, +25% Prec e +40% Prec

Assim, como resultado, tem-se o aumento da área agrícola de médio e baixo riscos climáticos entre os meses de novembro a janeiro e decréscimos a partir do mês de fevereiro. As áreas efetivamente favoráveis ao cultivo do algodoeiro são aquelas que apresentam baixo risco, todavia as áreas de médio risco apresentam potencial agricultável com algumas restrições. Durante esse período, verificaram-se valores da ordem de 20-35% de área favorável (Figura 26 C), variando de acordo com os cenários de acréscimo de precipitação.

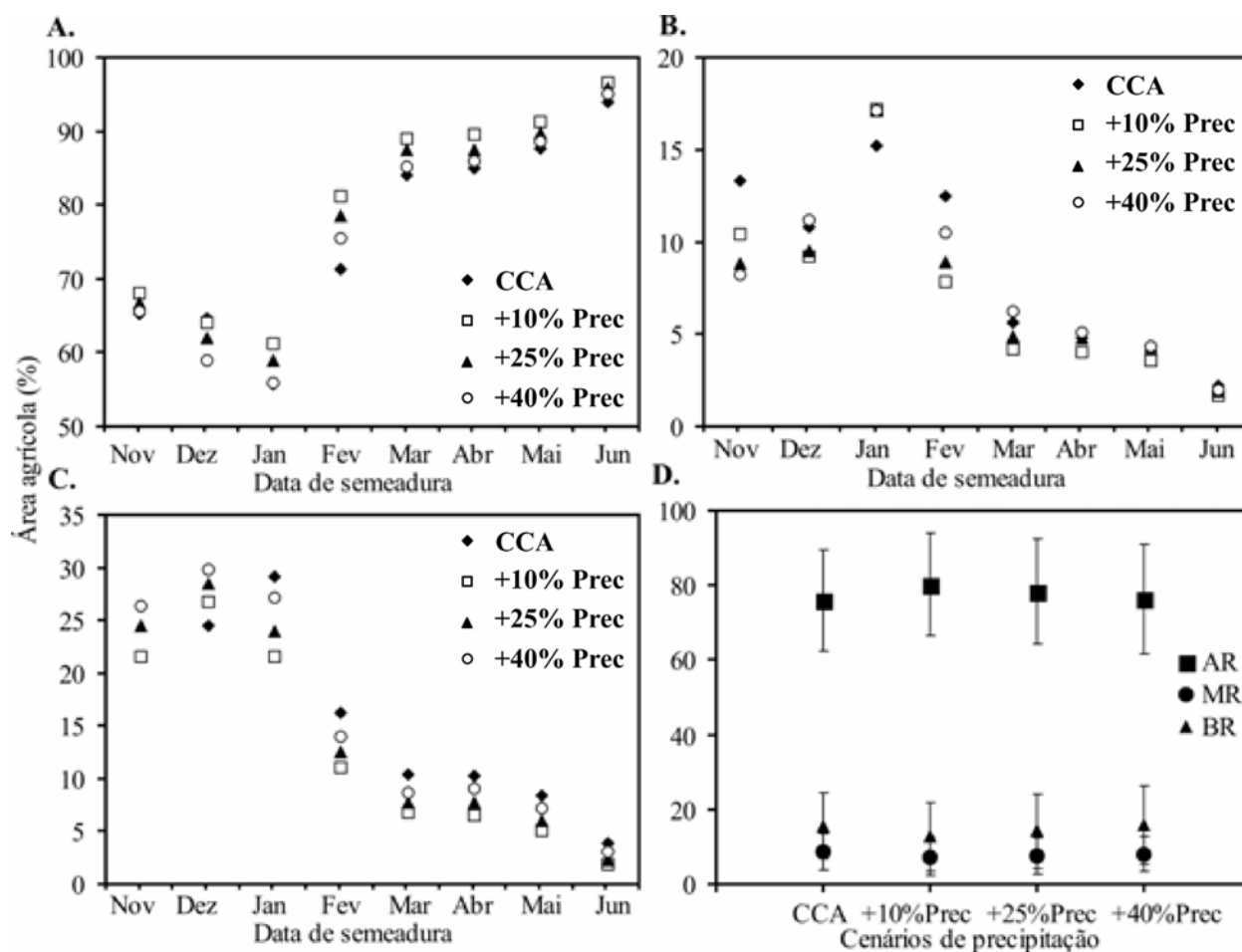
O padrão da variação percentual da área agrícola com alto, médio e baixo riscos climáticos, considerando-se o aumento de temperatura do ar de 1,5 °C, três cenários de redução de precipitação e, ainda, as condições climáticas atuais (CCA) é apresentado na Figura 27. As porcentagens das áreas agricultáveis com o algodoeiro são decrescentes ao longo da estação de cultivo para médio (Figura 27B) e baixo riscos climáticos (Figura 27C) em todos os cenários de

acréscimo de precipitação. Porém, para alto risco climático (Figura 27A) essa tendência é significativamente crescente no mesmo período. As áreas com baixo risco climático representam entre 1 a 30% da área total da região (Figura 27C). Esses baixos valores se devem a menor oferta hídrica, fazendo com que as áreas agricultáveis com alto e médio riscos climáticos sejam predominantes na região.



**Figura 27.** Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo cultivado na região Nordeste do Brasil ao longo do seu período de cultivo, nas condições climáticas de alto risco (A), médio risco (B) e baixo risco climático (C), para o aumento de 1,5 °C na temperatura do ar e decréscimo de 10% (-10 Prec), 25% (-25 Prec) e 40% (-40 Prec) na precipitação média e nas condições climáticas atuais (CCA). Média e desvio padrão (D) do percentual de área agrícola de alto (AR), médio (MR) e baixo (BR) riscos climáticos e nas condições climáticas atuais (CCA) e cenários de -10% Prec, -25% Prec e -40% Prec.

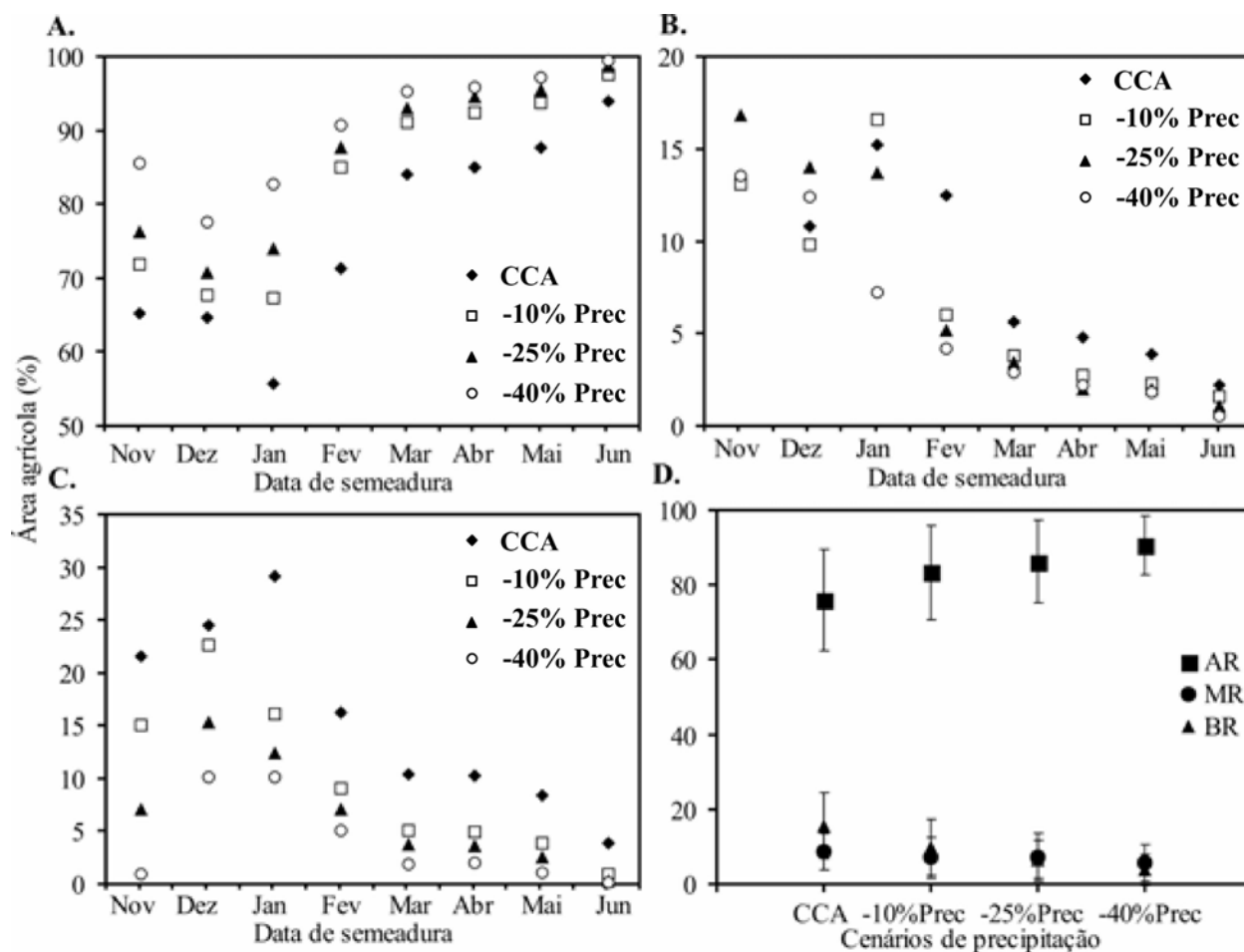
Os efeitos das mudanças climáticas sobre o algodoeiro cultivado na região Nordeste do Brasil para o aumento de 3 °C sob às CCA e os três cenários de aumento na precipitação são apresentados na Figura 28. Observa-se que a variação percentual da área agrícola total para os alto, médio e baixo riscos climáticos nessas condições são condicionadas aos cenários de precipitação, pois os maiores valores de área desfavorável à semeadura do algodão são verificados para o cenário de aumento de 10% na precipitação (Figura 28A).



**Figura 28.** Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo cultivado na região Nordeste do Brasil ao longo do seu período de cultivo, nas condições climáticas de alto risco (A), médio risco (B) e baixo risco climático (C), para o aumento de 3 °C na temperatura do ar e acréscimo de 10% (+10 Prec), 25% (+25 Prec) e 40% (+40 Prec) na precipitação média e nas condições climáticas atuais (CCA). Média e desvio padrão (D) do percentual de área agrícola de alto (AR), médio (MR) e baixo (BR) riscos climáticos e nas condições climáticas atuais (CCA) e cenários de +10% Prec, +25% Prec e +40% Prec.

No cenário de aumento de 3 °C, a demanda evapotranspirativa aumenta consideravelmente, fazendo com que a cultura esteja exposta a um maior estresse hídrico. A Figura 28D apresenta a média e desvio padrão da variação percentual da área agrícola total dos alto, médio e baixo riscos climáticos para o aumento de 3 °C sob às CCA e nos três cenários de aumento na precipitação. Verifica-se que a média da área agrícola exposta às condições de alto risco é proporcional a oferta hídrica, porque mediante às CCA e de aumento de 40% na precipitação as áreas agricultáveis ao cultivo do algodoeiro apresentam valores semelhantes. A maior média foi observada para o cenário de aumento de 10% na precipitação, com desvio padrão variando de 70 a 95% no período de 8 meses. Sultan et al. (2005), em estudo usando o SARRAH para investigar o impacto da variabilidade de grande escala das monções no Oeste Africano, verificaram que sobre o rendimento das culturas locais ocorrem os maiores desvios

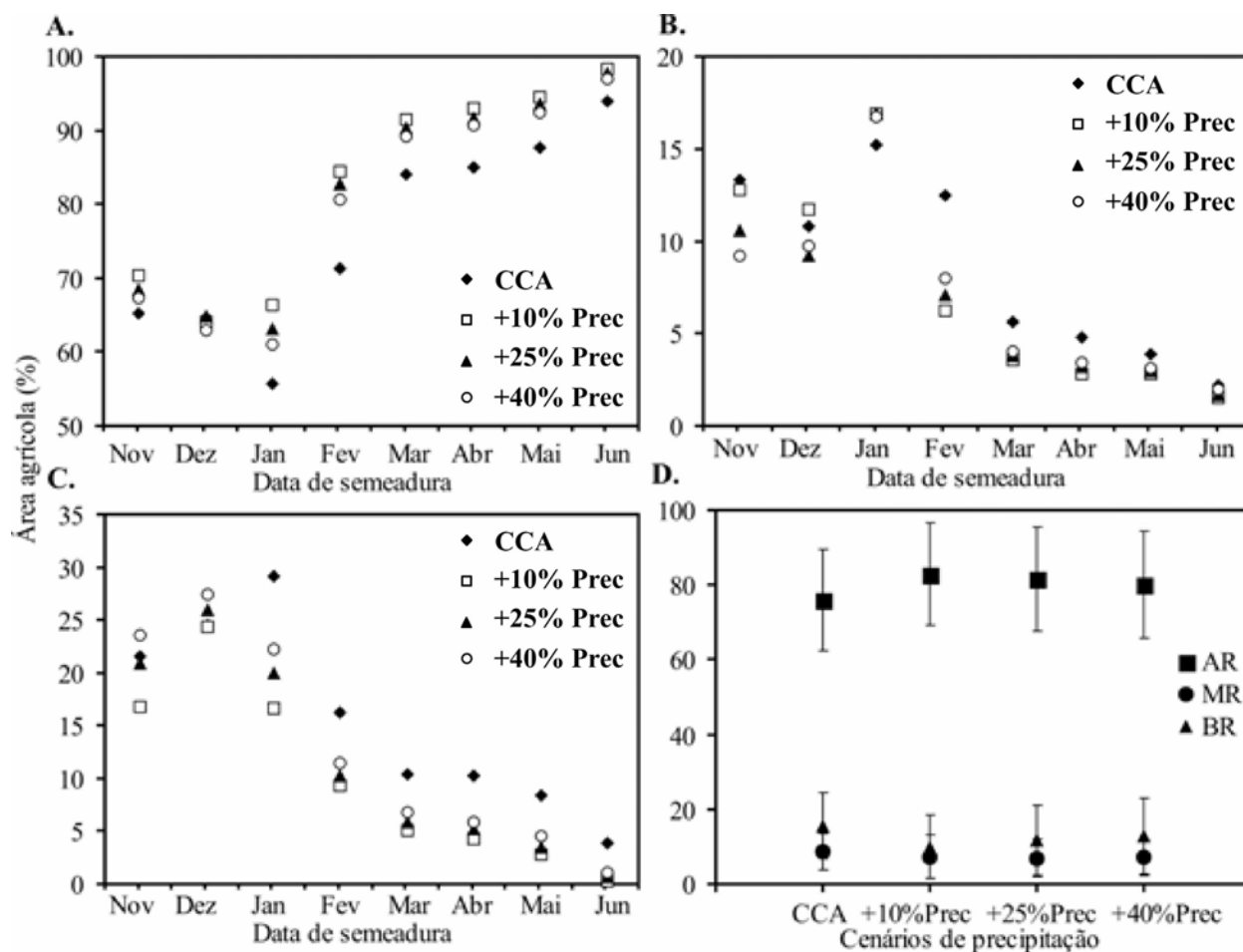
padrão na produção de milho. Isso é atribuído às variações anuais e intra-anuais dos totais de chuvas. O desvio padrão das áreas com alto risco climático é comparativamente menor para os cenários de decréscimo de precipitação com o aumento de temperatura de 3 °C (Figura 29D) em relação aos desvios nos cenários de maior oferta hídrica.



**Figura 29.** Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo cultivado na região Nordeste do Brasil ao longo do seu período de cultivo, nas condições climáticas de alto risco (A), médio risco (B) e baixo risco climático (C), para o aumento de 3 °C na temperatura do ar e decréscimo de 10% (-10 Prec), 25% (-25 Prec) e 40% (-40 Prec) na precipitação média e nas condições climáticas atuais (CCA). Média e desvio padrão (D) do percentual de área agrícola de alto (AR), médio (MR) e baixo (BR) riscos climáticos e nas condições climáticas atuais (CCA) e cenários de -10% Prec, -25% Prec e -40% Prec.

No cenário de redução de 40% na precipitação, está associado a ocorrência do fenômeno El Niño com intensidade forte. Nessas condições, os desvios padrão variam entre 85 e 100%; enquanto nas áreas com baixo risco climático esses valores foram entre 0 e 7%. A média da área agrícola total com risco climático médio foi pouco variável, entre 5 e 10% nas CCA e entre 0 e 10% no cenário de -40% na precipitação pluvial.

A Figura 30 exibe a área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo na região Nordeste do Brasil ao longo do período de cultivo, que se estende entre os meses de novembro a junho, para condições de alto risco climático (Figura 30A), médio risco climático (Figura 30B) e baixo risco climático (Figura 30C), para aumento de 5 °C na temperatura do ar e acréscimos de 10, 25 e 40% na precipitação média, bem como sob às CCA.

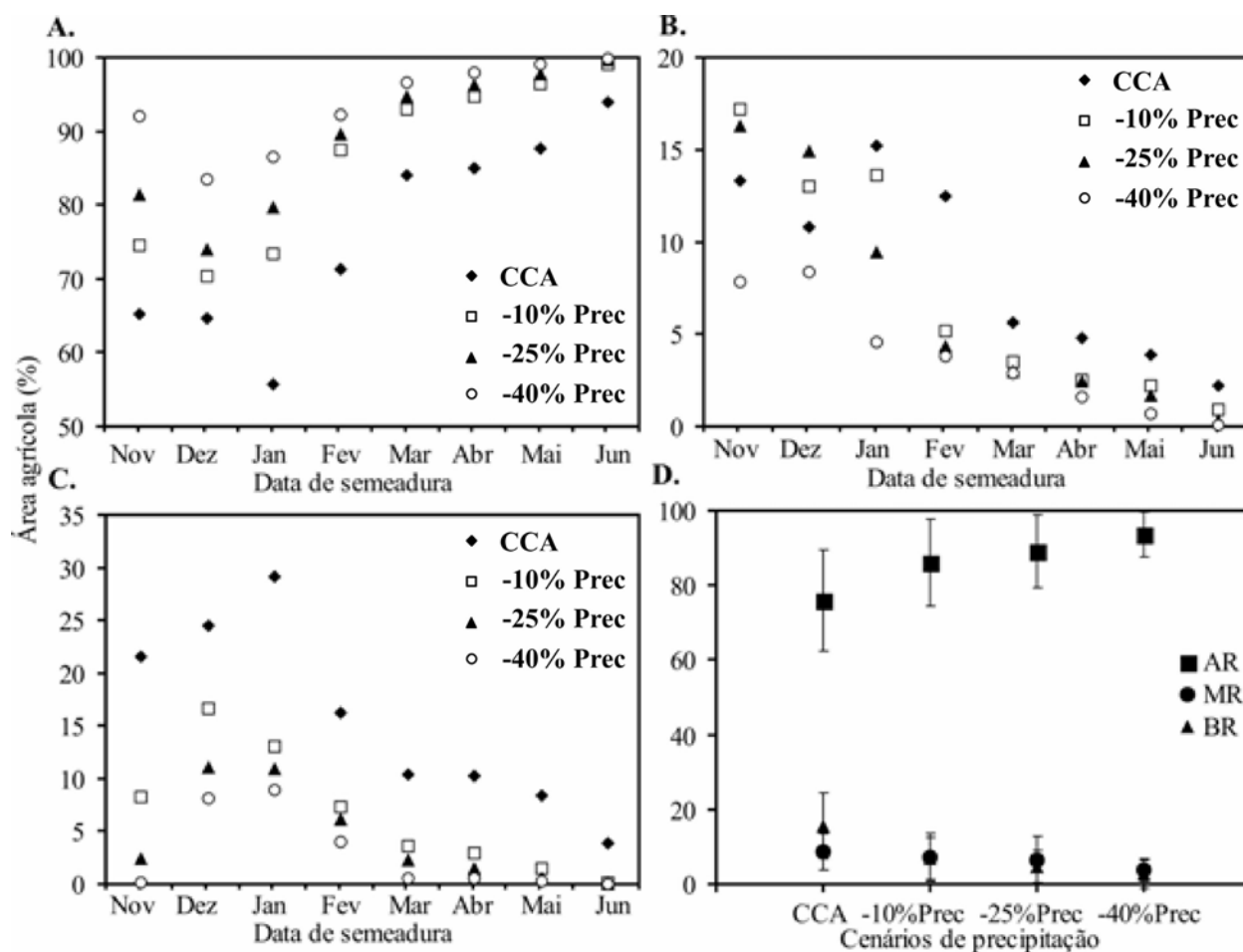


**Figura 30.** Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo cultivado na região Nordeste do Brasil ao longo do seu período de cultivo, nas condições climáticas de alto risco (A), médio risco (B) e baixo risco climático (C), para o aumento de 5 °C na temperatura do ar e acréscimo de 10% (+10 Prec), 25% (+25 Prec) e 40% (+40 Prec) na precipitação média e nas condições climáticas atuais (CCA). Média e desvio padrão (D) do percentual de área agrícola de alto (AR), médio (MR) e baixo (BR) riscos climáticos e nas condições climáticas atuais (CCA) e cenários de +10% Prec, +25% Prec e +40% Prec.

A média e o desvio padrão do percentual de área agrícola com alto, médio e baixo riscos climáticos nas condições climáticas atuais (CCA) e nos cenários de acréscimo na precipitação de 10, 25 e 40% estão associados à ocorrência do fenômeno La Niña, com intensidades fraca, moderada e forte, respectivamente. A porcentagem de área agrícola com alto risco climático no cenário de aumento de temperatura do ar de 5 °C apresentou valores entre 55 e 100% ao longo do período de cultivo do algodão, sendo os menores valores entre os meses de novembro a janeiro.

As áreas com alto risco climático tendem a crescer após o mês de janeiro, registrando os maiores valores no mês de junho. A Figura 30D apresenta a média e o desvio padrão da variação percentual da área agrícola total com alto, médio e baixo riscos climáticos para o aumento de 5 °C na temperatura do ar sob às CCA e os três cenários de aumento na precipitação. A maior média de áreas com alto risco climático foi observada para o cenário de aumento de 10% na precipitação, com valores variando entre 70 e 95% da área total da região ao longo do período simulado. No cenário de aumento de 5 °C na temperatura média do ar, os maiores riscos de cultivo do algodoeiro são encontrados nos cenários de menor oferta hídrica. O desvio padrão das áreas com alto risco climático é comparativamente mais elevado para os cenários de decréscimo de precipitação com o aumento de 5 °C de temperatura do ar (Figura 31D). Já no cenário de redução de 40% na precipitação pluvial, esses valores variam entre 90 e 100%; enquanto nas áreas com baixo risco climático o desvio padrão se encontra entre 0 e 5%.

A vulnerabilidade climática é o grau de susceptibilidade ou de incapacidade de um sistema para contornar efeitos climáticos adversos à permanência no ambiente em que subsiste Assad & Pinto (2008). Na agricultura, essa vulnerabilidade é responsável pela quebra de produção das espécies produtoras de alimentos. Em todos os cenários climáticos analisados neste estudo, o aumento na temperatura do ar acentuará, dentre muitos outros efeitos, o abortamento de flores, que é um fator restritivo para manutenção da produtividade do algodoeiro. Os impactos oriundos dos cenários simulados podem ser minimizados, considerando-se duas situações. A primeira, se rapidamente forem implantadas práticas de manejo mitigadoras, ou seja, elaboração de processos que tentam minimizar os efeitos sobre as plantas da elevação das temperaturas ou do aumento dos períodos de estiagem. A segunda situação trata de estudos genéticos para a adaptação da cultura as novas condições climáticas. Tal adaptação pode ser forçada através do chamado melhoramento genético, convencional ou pela engenharia genética. Os trabalhos de Moraes (2007), dentre outros, fortalecem a observação de que o aumento de temperatura do ar é evidente. Dentre as possibilidades de mitigação dos efeitos das mudanças climáticas nos sistemas agrícolas é possível citar o manejo adequado de solo, cujos benefícios são encontrados no plantio direto. O Brasil é um dos poucos países do mundo que pratica esse tipo de plantio, com uma área atual em torno de 23 milhões de hectares. Esse tipo de plantio é altamente eficiente no sequestro de carbono. Primeiro, porque reduz a quantidade de implementos, demandando, por exemplo, menos combustível e máquinas para a aplicação de adubos, fertilizantes e defensivos agrícolas. Segundo, porque basta uma única etapa para efetuar o plantio.



**Figura 31.** Área agrícola (%) do algodoeiro herbáceo cultivado na região Nordeste do Brasil ao longo do seu período de cultivo, nas condições climáticas de alto risco (A), médio risco (B) e baixo risco climático (C), para o aumento de 5 °C na temperatura do ar e decréscimo de 10% (-10 Prec), 25% (-25 Prec) e 40% (-40 Prec) na precipitação média e nas condições climáticas atuais (CCA). Média e desvio padrão (D) do percentual de área agrícola de alto (AR), médio (MR) e baixo (BR) riscos climáticos e nas condições climáticas atuais (CCA) e cenários de -10% Prec, -25% Prec e -40% Prec.

Uma máquina adaptada para plantio direto já possibilita efetuar a semeadura sobre o resíduo da cultura anterior. Terceiro, porque aumenta a produção de biomassa. Vários estudos no Brasil demonstram que nas regiões Norte, Centro-Oeste e Sul, a utilização do sistema de plantio direto garante a produtividade em sistema de sequestro de aproximadamente 500 Kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de carbono, o que significa que são absorvidos 12 milhões de toneladas de carbono por hectare por uma única prática agrícola. No caso da integração pecuária-lavoura-floresta, há um sequestro de carbono da ordem de 2,5 ton ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Cardoso et al., 2001).

Independente do conceito ambientalista sobre a produção de cultivares com o uso de transgênicos, paralelamente ao melhoramento genético convencional, essa é uma das alternativas mais promissoras para a adaptação dos principais cultivos agrícolas no futuro (Assad & Pinto, 2008). Segundo Campos et al. (2010) com o aumento na temperatura do ar nas próximas



décadas, a agricultura de sequeiro continua sendo uma prática de alto risco no semiárido brasileiro; dessa forma, a identificação de áreas que apresentam maior potencial de produção e estejam expostas ao menor risco climático possível é imprescindível para a inserção de qualquer cultura. Para a melhor adaptação da cultura é necessário utilizar técnicas da biotecnologia que possibilitem introduzir novos genes nas plantas, criando tolerância à seca e às temperaturas elevadas. A biotecnologia também pode contribuir para mapear os genes tolerantes ao calor e à seca, tornando o processo independente de genes mapeados em países estrangeiros, já que é plenamente possível encontrar esses genes tolerantes nas plantas da biodiversidade brasileira Assad & Pinto (2008). Assim, preservar a biodiversidade, além de ser uma prática absolutamente necessária e importante para o meio ambiente, pode ser também fundamental para a manutenção e sustentabilidade da agricultura. Assim, para manter a produção do algodoeiro no Nordeste do Brasil, nos próximos anos, tanto no que diz respeito à qualidade e à quantidade, deve-se tomar medidas que levem em consideração a possibilidade da temperatura média do ar sofrer acréscimos acentuados durante este século.

## 5. CONCLUSÕES

A presente pesquisa apresenta um estudo sobre os efeitos das mudanças climáticas sobre o algodoeiro herbáceo cultivado em sistema de sequeiro na região Nordeste do Brasil, em resposta às preocupações recentes sobre o aumento de temperatura do ar e de variabilidade da precipitação pluvial. As principais conclusões do estudo são as seguintes:

1. Os cenários de mudanças climáticas de aumento de temperatura do ar divulgados pelo IPCC levam à redução significativa das áreas agricultáveis favoráveis ao cultivo com o algodoeiro herbáceo em sistema de sequeiro em toda a região Nordeste do Brasil. Os riscos climáticos para o cultivo do algodão nessa região aumentam substancialmente quando os aumentos da temperatura do ar são associados ao decréscimo de precipitação pluvial;
2. Os cenários de aumentos da temperatura do ar associados com a ocorrência do fenômeno El Niño poderão provocar uma redução significativa na área agricultável do algodão na região Nordeste do Brasil, quando comparadas com as áreas anteriormente adequadas ao plantio dessa cultura. Quanto maior a anomalia negativa de chuva, menos apta se tornará a região, até o limite máximo da tolerância biológica ao calor ou à seca provocada pelo aumento térmico.
3. As modificações climáticas provocadas pelo aumento da temperatura do ar e redução da precipitação, em relação às condições climáticas atuais, provocam acréscimos significantes da proporção de áreas agrícolas com alto risco climático para o algodoeiro. Entretanto, o cenário de aquecimento de 1,5 °C, com alterações nos níveis pluviométricos, produz um aumento significativo nas áreas de baixo e médio riscos climáticos, particularmente durante os três primeiros meses de cultivo do algodoeiro na região (novembro a janeiro). Entretanto, o aumento de temperatura do ar continua sendo um fator limitante ao cultivo do algodão mesmo diante do aumento da oferta hídrica;

4. Diante das condições de menor oferta hídrica, para o cenário de aumento de 5 °C, as áreas com baixo risco climático representam apenas 0,1% da área total anteriormente agricultável durante o último período simulado (segundo decêndio de junho).
5. Mediante os cenários de mudanças climáticas, as áreas agricultáveis na região registraram os maiores valores com baixo risco climático no mês janeiro e os menores valores no mês de junho, em diferentes áreas do Nordeste do Brasil. O potencial atual de cultivo do algodoeiro nessa região apresenta o menor risco climático nos três primeiros períodos simulados (novembro a janeiro).

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Affholder, F.; Rodrigues, G. C.; Assad, E. D. Modelo agroclimático para avaliação do comportamento do milho na região dos cerrados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. v.32, n. 10, 1997.
- Alfonsi, R. R. Agrometeorologia e sua importância para uma agricultura racional. *Boletim Climatológico*. UNESP, Presidente Prudente, 1996.
- Alves, J. M. B.; Kayano, M. T. Estudos Preliminares da Precipitação no Sul do Ceará durante a Pré-Estação das Chuvas. *Climanálise*, v.6, p.42-50, 1991.
- Alves, J. M. B.; Repelli, C. A. The Rainfall Variability Over the Northeast Brazil Region and the ENSO events. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.7, n.2, p.583-592, 1992.
- Amaral, J. A. B. do; Silva, M. T. Zoneamento Agrícola do Algodão Herbáceo no Nordeste Brasileiro Safra 2007/2008 – Estado do Ceará. Embrapa-CNPQ, Campina Grande, 8p. 2007 (Comunicado Técnico 321).
- AMS. Climate Change Research: Issues for the Atmospheric and Related Sciences. *Bull. Amer. Met. Soc.*, v.84, p.508-515, 2003.
- Amorim Neto, M. S. A. Balanço hídrico segundo Thornthwaite e Mather (1955). Embrapa, Brasília, 18p. 1989. (Comunicado Técnico 34)
- Amorim Neto, M.; Beltrão, N. E. de M. Zoneamento do algodão herbáceo no Nordeste. In: EMBRAPA ALGODÃO. O agronegócio do algodão no Brasil. Embrapa Brasília, Comunicação para transferência de tecnologia. 1999. 1023p.
- Andrade Júnior, A. S.; Sentelhas, P. C.; Lima, M. G.; Aguiar, M. J. N.; Leite, D. A. S. R. Zoneamento agroclimático para as culturas de milho e de soja no Estado do Piauí. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.9, n. 3, p.544-550, 2001.
- Assad, E. D. Simulation de l'irrigation et du drainage pour les cultures pluviales de riz et de maïs en sols de bas-fonds à Brasília. *Memoires et Travaux de IRAT*, n.13, p.10, 1986.

- Assad, E. D.; Evangelista, B. A.; Sans, L. M. A.; Farias, J. R.; Silva, S. C. Zoneamento agroclimático para grãos na região do Meio-Norte Brasileiro. In: Simpósio sobre os Cerrados do Meio-Norte, 1, 1997, Teresina. Anais...Teresina: Embrapa Meio-Norte, 1997, CD ROM
- Assad, E. D.; Pinto, H. S. Aquecimento global e cenários futuros da agricultura brasileira. São Paulo: Embrapa Agropecuária - Cepagri/Unicamp, 2008. 84p.
- Assad, E. D. ; Pinto, H. S.; Zullo Junior, J.; Fonseca, M. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento de riscos climáticos para a cultura da soja no Brasil. In: XIV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2005, Campinas. Agrometeorologia, Agroclimatologia e Agronegócio. Campinas : SBAGRO, 2005.
- Assad, E. D.; Pinto, H. S.; Zullo Junior, J.; Ávila, A. M. H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.39, n.11, p.1057-1064, 2004.
- Assad, E. D.; Sano, E. E. Sistema geográfico de informações: aplicações na agricultura. Embrapa-SPI/Embrapa-CPAC, Brasília, 1998. 480p.
- Atkinson, D. Global climate change: its implications for crop protection. Surrey: BCPC, 1993. 102p.
- Azevedo, P. V. de, Maciel, G. F. Estação de cultivo e época de semeadura para o algodão herbáceo na região de Sousa-PB. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.1, n.1, p.81-85, 1993.
- Azevedo, P. V.; Silva, F. D. S. Risco climático para o cultivo do algodoeiro na região Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Meteorologia, v.22, p.408-416, 2007.
- Baron, C.; Clopes, A.; Perez, P.; Muller, B.; Maraux, F. 1996. Manuels d'utilisation de: SARRAMET 45p. SARRABIL 35p. et SARRAZON 29p. CIRAD, Montpellier, France.
- Beltrão, N. E. de M. Informações sobre o algodão no Brasil: situação, problemas, perspectivas e possíveis soluções. Embrapa-CNPQ, Campina Grande, 20p. 1996. (Documento 48)
- Berlato, M. A.; Farenzena, H.; Fontana, D. C. Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade do milho no Estado do Rio Grande do Sul. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.40, n.5, p.423-432, 2005.
- Berlato, M. A.; Fontana, D. C. El Niño e La Niña: Impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul; aplicações de previsões climáticas na agricultura. Porto Alegre: Ed. Da UFRGS, 2003. 110p.
- Brunini, O.; Zullo Junior, J.; Pinto, H. S.; Assad, E. D.; Sawazaki, E.; Duarte, P. D.; Paterniani, M. E. Riscos climáticos para a cultura do milho no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.9, n.3, p.519-526, 2001.
- Camargo, A. P de; Camargo, M. B. P. de. Uma revisão analítica sobre evapotranspiração potencial. Revista Bragantia. v.2, n.59, p.125-137, 2000.

- Campos, J. H. B. da C.; Silva, M. T.; Silva, V. P. R. Impacto do aquecimento global no cultivo do feijão-caupi, no Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n.4, p.396-404, 2010.
- Cane, M. A. Understanding and predicting the world's climate system. In: *Impacts of El Nino and climate variability on Agriculture*. ASA Special Publication, 2001. p.1-20.
- Cardoso, A. N.; Saminêz, T. C.; Vargas, M. A. Fluxo de gases-traço de efeito estufa na interface solo-atmosfera em solos de cerrado. *Embrapa-Cerrados, Planaltina*, 23p. 2001. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 17)
- Cavalcanti, E. P.; Silva, V. P. R.; Sousa, F. A. S. Programa computacional para a estimativa da temperatura do ar para a região Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, n.1, p.140-147, 2006.
- Chakraborty, S. Effects of climate change. In Waller, J. M. L.; Waller, S. J. (Ed.). *Plant pathologist's pocketbook*. CAB International, 2001. p.203-207.
- Chakraborty, S.; Pangga, I. B.; Lupton, J.; Hart, L.; Room, P. M.; Yates, D. Production and dispersal of *Colletotrichum gloeosporioides* spores on *Stylosanthes scabra* under elevated CO<sub>2</sub>. *Environmental Pollution*, v.108, p.381-387, 2000b.
- Chakraborty, S.; Tiedemann, A. V.; Teng, P. S. Climate change: potential impact on plant diseases. *Environmental Pollution*, v.108, p.317-326, 2000a.
- Chaves, I. B.; Freire, O.; Amorim Neto, M. S. Características da precipitação e riscos de erosão na região tropical semi-árida brasileira. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.20, n.9, p.991-998, 1982.
- Coakley, S. M. Biospheric change: will it matter in plant pathology? *Canadian Journal of Plant Pathology*, v.17, p.147-153, 1995.
- Colhoun, J. Effects of environmental factor on plant disease. *Annual Review of Phytopathology*, v.11, p.343-364, 1973.
- Cunha, G. R. El Niño Oscilação Sul e perspectivas climáticas aplicadas no manejo de culturas no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.7, n.2, p.277-284, 1999.
- Cunha, R. G.; Assad, E. D. Uma visão geral sobre zoneamento agrícola no Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.9, n.3, p.377-385, 2001.
- Diaz, A. F.; Studzinski, C. D.; Mechoso, R. C. Relationship between precipitation anomalies in Uruguay and southern Brazil and sea surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. *Journal of Climate*, v.11, p.251-271, 1998.
- Doorenbos, J., Kassan, A.H. Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, FAO, Rome, n.33, 193p, 1979.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O. Guidelines to predicting water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, FAO, Rome, n.24, 179p, 1977.

- Dourado-Neto, D.; Teruel, D. A.; Reichardt, K.; Nielsen, D. R.; Frizzzone, J. A.; Bacchi, O. O. S. Principles of crop modeling and simulation. I. Uses of mathematical models in agricultural science. *Scientia Agricola*, v.55, p.46-50, 1998.
- Eagleman, A. M. An experimentally derived model for actual evapotranspiration. *Agricultural Meteorology*, v.8, n.4/5, p.385-409, 1971.
- EPE (2008): EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2008: Ano base 2007 – Rio de Janeiro: EPE, 2008. 244p.
- Fancelli, A. L.; Dourado-Neto, D. Produção de milho. *Agropecuária*, 2000. 360p
- Farias, J. R.; Assad, E. D.; Almeida, I. R.; Evangelista, B. A.; Lazzarotto, C.; Neumaier, N.; Nepomuceno, A. L. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.9, n.3, p.415-421, 2001.
- Fischer, G.; Tubiello, F.; van Velthuisen, H. Climate change impacts on irrigation water requirements: effects of mitigation, 1990-2080. *Technol Forecast Social Change*, v.74, p.1080-1107, 2007.
- Figueiredo Júnior, L. G. M. Modelo para estimação da produtividade de grãos de milho no Estado de São Paulo. Piracicaba: ESALQ, 2004. 68p. Tese de Doutorado
- Forest, F.; Clopes, A. Contribution à l'explication de la variabilité du rendement d'une culture de maïs plus ou moins intensifiée à l'aide d'un modèle de bilan hydrique amélioré. In: Reyniers, F.N.; Netoyo, L. (Eds.). *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale: Vers une gestion des flux hydriques par les systèmes de culture?* Paris: J. Libbey, 1994. p.3-15.
- Forest, F. Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. Présentation et utilisation du logiciel BIP. Montpellier: IRAT-CIRAD, 1984.
- Fréteaud, J. P.; Poss, R. E.; Saragoni, H. Ajustement d'un modèle de bilan hydrique à des mesures tensio-neutroniques in situ sous culture de maïs. *Agronomie Tropicale*, v.42, n.2, p.94-103, 1987.
- Gaiser, T.; Krol, M.S.; Frischkorn, H.; Araújo, J.C. de. Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the Semi-arid Northeast of Brazil. Springer-Verlag. *Global Change and Regional Impacts*. 2003.
- Gargantini, P. E.; Hernandez, F. B. T. A Cidade: Desenvolvendo com a Agricultura Irrigada e o Agronegócio. Ribeirão Preto: 2003. 3p.
- Glantz, M. H. Introduction. IN: Glantz, M. H; Richard, W. K.; Nicholls, N. *Teleconnection linking worldwide climate anomalies*. New York: Cambridge University. 2001. p.43-72.
- Gómez, G.; Padrón, J.; Meulenert, A. Influencia del evento meteorológico El Niño-oscilación sur sobre Epifitotias del Tizón Tardío de la papa y el Moho Azul del Tabaco em Cuba. *Fitosanidad*, v.3, n.3, p.21-26, 1999.

- Gonçalves, A. N. Fatores Limitantes para o crescimento e desenvolvimento de árvores em regiões áridas e semi-áridas do Nordeste Brasileiro. IPEF. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, v.3, n.10, p.99-105, 1982.
- Grimm, A. M.; Barros, V. R.; Doyle, M. E. Climate variability in Southern South America associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, v.13, n.1, p.35-58, 2000.
- Grimm, A. M.; Teleginski, S. E.; Freitas, E. D. de; Costa, S. M. S. da; Ferlizi, P. G.; Gomes, J. Anomalias de precipitação no sul do Brasil em eventos El Niño. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 9., 1996. Campos do Jordão, SP. Anais... Campos do Jordão: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1996. v.2, p.1098-1102.
- Grimm, A.; Ferraz, S. E. T.; Gomes, J. Precipitation anomalies in southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, v.11, p.2863-2880, 1998.
- Harmsen, E. W.; Miller, N. L.; Schlegel, N. J.; Gonzalez, J. E. Seasonal climate change impacts on evapotranspiration, precipitation deficit and crop yield in Puerto Rico. *Agricultural Water Management*, v.96, n.7, p.1085-1095, 2009.
- Harrison, S. R.; Thornton, P. K.; Dent, J. B. The role of simulation experiments. *Agrotechnology Transfer*, v.9, n.8, p.10-11, 1989.
- Hastenrath, S.; Lamb, P. *Climatic Atlas of the Tropical Atlantic and Eastern Pacific Oceans*. University of Wisconsin Press, 113p, 1977.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. <http://www.ibge.gov.br>. 25 ago 2009.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (2001a) Working Group I. Third Assessment Report. Summary for Policymakers. WMO, 17p. [http://www.meto.gov.uk/sec5/CR\\_div/ipcc/wg1/WG1-SPM.pdf](http://www.meto.gov.uk/sec5/CR_div/ipcc/wg1/WG1-SPM.pdf). 30 ago 2009
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (2001b) Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability. Working Group II. TAR: Summary for Policymakers. [http://www.meto.gov.uk/sec5/CR\\_div/ipcc/wg1/WG1-SPM.pdf](http://www.meto.gov.uk/sec5/CR_div/ipcc/wg1/WG1-SPM.pdf). 30 ago 2009
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policy Makers Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>. 30 ago 2009
- Jones, C. D.; Cox, P. M.; Essery, R. L. H.; Roberts, D. L.; Woodage, M.J. Strong carbon cycle feedbacks in a climate model with interactive CO<sub>2</sub> and sulphate aerosols. *Geophysical Research Letters*, v.30, n.9, p.1479, 2003.
- Kousky, V. E. Diurnal rainfall variation in Northeast Brazil. *Monthly Weather Review*, v.108, p.488-498, 1980.
- Kousky, V. E.; Chu, P. S. Flutuations in annual rainfall for Northeast Brazil. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, v.56, p.457- 465, 1978.



- Krol, M. S.; Bronstert, A. Regional integrated modelling of climate change impacts on natural resources and resource usage in semi-arid Northeast Brazil. *Environmental Modelling & Software*, v.22, p.259-268, 2007.
- Laca-Buendia, J. P.; Cardoso Neto, L. Estudo de plantio com cultivares de ciclo precoce de algodão herbáceo na região do Triângulo Mineiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 1., 1997, Fortaleza. Anais... Campina Grande: Embrapa-CNPMA, 1997.
- Lima, M. A. de; Cabral, O. M. R.; Miguez, J. D. G. (Ed.). Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira. Embrapa-CNPMA, Jaguariúna, 2001. 397p.
- Lima, M. G. Calibração e validação do modelo CERES-Maize em condições tropicais do Brasil. Piracicaba: ESALQ, 1995. 119p. Tese de Doutorado
- Malavolta, E.; Haag, H. P.; Mello, F. A. F.; Brasil Sobrinho, M. O. C. Nutrição mineral e adubação de plantas cultivadas. São Paulo: Pioneira, 1974. 752 p.
- Manning, W. J.; Tiedemann, A. V. Climate change: potential effects of increased atmospheric carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), ozone (O<sub>3</sub>), and ultraviolet-B (UV-B) radiation on plant diseases. *Environmental Pollution*, v.88, n.2, p.219-245. 1995.
- Marengo, J. A. Mudanças climáticas globais e regionais: avaliação do clima atual do Brasil e projeções de cenários climáticos do futuro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.16, p.1-18, 2001.
- Marengo, J. A.; Oliveira, G. S. Impactos do fenômeno La Niña no tempo e clima do Brasil: desenvolvimento e intensificação do La Niña 1998/1999. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10, 1998. Brasília, DF. Anais... Brasília: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1998. CDROM.
- Marengo, J.; Uvo, C. Long-term streamflow and rainfall fluctuations in tropical South America: Amazonia, Eastern Brazil and Northwest Peru. 1996.
- Markham, C. G. E McLain, D. R. Sea Surface Temperature Related to Tain in Ceará Northeastern Brazil. *Nature*, v.265, p.320-323, 1977.
- McCarthy, J. J.; Canziani, O. F.; Leary, N. A.; Dokken, D. J.; White, K. S. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University Press, 1032p, 2001.
- McQuate, G. T.; Hayden, B. P. Determination of intertropical convergence zone rainfall in northeastern Brazil using infrared satellite imagery. *Arch. Met. Geophys. Biocl.*, v.34, n.4, p.319-328. 1984.
- Menezes, H. E. A.; Silva, R. M.; Alves, L. M.; Camargo Júnior, H. Análise Subjetiva da Simulação de Precipitação do Modelo Eta Climático para o Nordeste do Brasil no Período entre Janeiro e Março de 2003. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, XIII, 2003, Santa Maria-RS. Anais: Santa Maria-RS: SBA, 2003, p.811-12.
- Mitchell, R. A. C.; Mitchell, V.; Driscoll, S. P.; Franklin, J.; Lawlor, D. W. Effects of increased CO<sub>2</sub> concentration and temperature on growth and yield of winter wheat at two levels of nitrogen application. *Plant, Cell and Environment*, v.16, p.521-529, 1993.

- Molion, L. C. B.; Bernardo, S. O. Uma Revisão das Chuvas no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.17, n.1, p.1-10, 2002.
- Moraes, O. C. C. Ameaça na floresta submersa. *Scientific American*, n.24, 2004. [http://www2.uol.com.br/sciam/conteudo/materia/materia\\_44html](http://www2.uol.com.br/sciam/conteudo/materia/materia_44html). 12 maio 2009.
- Moster, C.; Lima, W.de P.; Zakia, M. J. B.; Câmara, C. D. Determinação do ano hidrológico visando a quantificação do balanço hídrico em microbacias experimentais. *Circular Técnica IPEF (Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais)*. n.197. 2003.
- Moura, A. D.; Shukla, J. On the dynamics of the droughts in Northeast Brazil: observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. *Journal Atmospheric Science*, v.38, n.12, p.2653-2673, 1981.
- NOAA. ENSO: Cold and warm episodes by season. [http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/insostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/insostuff/ensoyears.shtml). 20 set 2009.
- Nobre, C.; Assad, E.; Oyama, M. Mudança ambiental no Brasil – o impacto do aquecimento global nos ecossistemas da Amazônia e na agricultura. *Scientific American Brasil*, edição especial A Terra na Estufa, 2005.
- Oliveira, G. S.; Satyamurty, P. O El Niño de 1997/98: Evolução e impactos no Brasil. In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10, 1998, Brasília, DF. Anais... Brasília: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1998. CDROM.
- Pachechenik, P. E. Caracterização hidrológica e da fragilidade ambiental na bacia do rio das pedras, Guarapuava-PR. Curitiba: UFPR, 2004. 79p. Dissertação de Mestrado
- Pachechenik, P. E.; Souza, J. L. M. de; Gomes, S. Estudo da precipitação provável na bacia do rio das pedras-PR, utilizando cinco distribuições de probabilidade. In: XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA. São Pedro. 2004.
- Pereira, A. R.; Vila Nova, N. A.; Sedyama, G. C. Evapotranspiração. Piracicaba: ESALQ, 1997. 183p.
- Pessoa, M. C.; Luchiari Junior, A.; Fernandes, E. N.; Lima, M. A. Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para a análise de impactos ambientais das atividades agrícolas. Embrapa-CNPMA, Jaguariúna, 83p. 1997. (Documento 8).
- Pinto, H. S.; Assad, E. D.; Zullo Jr., J.; Brunini, O.; Evangelista, B. A. Impacto do aumento da temperatura no zoneamento climático do café nos Estados de São Paulo e Goiás: avaliação dos cenários do IPCC. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA; 12., 2001. Fortaleza. Anais... Fortaleza, 2001, p. 605-606.
- Philander, S. G. El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. Academic Press, New York, 1990. 293p.
- Rao, V. B.; Hada, K. Characteristics of rainfall over Brazil, annual variations and connections with the southern oscillation. *Theoretical and Applied Climatology*, v.2, p.81-91, 1990.

- Rao, V.B., Lima, M.; Franchito, S.H. Seasonal and Interannual Variations of 62 Rainfall over Eastern Northeast Brazil. *Journal of Climate*, v.6, p.1754-1763, 1993.
- Reddy, V. R.; Reddy, K. R.; Baker, D. N. Temperature effect on growth and development of cotton during the fruiting period. *Agronomy Journal*, v. 83, p. 211-217, 1991.
- Rodrigues Anido, N. M. Caracterização hidrológica de uma bacia experimental visando identificar indicadores de monitoramento ambiental. Piracicaba: ESALQ, 2002. 69p. Dissertação de Mestrado
- Rodrigues Neto, F. R. Orientação de culturas aptas às condições do Estado do Piauí, segundo as distribuições espacial e temporal. Viçosa: UFV, 1991. 49p. Dissertação de Mestrado
- Sans, L. M. A.; Assad, E. D.; Guimarães, D. P.; Avellar, G. Zoneamento de riscos climáticos do milho para a região Centro-Oeste do Brasil e para o Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.9, n.3, p.527-535, 2001.
- Santos, A. R. Zoneamento agroclimático para a cultura do café conilon (*Coffea canephora* L.) e arábica (*Coffea arabica* L.), na bacia do Itapemirim, ES. Viçosa: UFV, 1999. 59p. Dissertação de Mestrado
- Santos, C.A.C. Estimativas e Tendências de Índices de Detecção de Mudanças Climáticas com Base na Precipitação Diária no Rio Grande do Norte e na Paraíba. Campina Grande: UFCG, 2006. 115p. Dissertação de Mestrado
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Estado do Meio Ambiente. Entendendo o meio ambiente. Volume 6. Convenção sobre mudança do clima. Secretaria de Estado do Meio Ambiente de São Paulo Fábio Feldmann. São Paulo: SMA. 1997.
- Sediyama, G. C.; Melo Junior, J. C.; Santos, A. R.; Ribeiro, A.; Costa, M. H.; Hamakawa, P. J.; Costa, J. M. N.; Costa, L.C. Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) Para o Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.9, p.501-509, 2001.
- Silva C. S.; Weatherhead, E. K.; Knox, J. W. Predicting the impacts of climate change – a case study of paddy irrigation water requirements in Sri Lanka. *Agric Water Manage*; v.93, p.19-29, 2007
- Silva, D. F. da. Variabilidade Espacial e Temporal de Componentes dos Balanços de Água e de Energia sobre a Bacia do Rio São Francisco com Ênfase para a Região da ZCAS. Campina Grande: UFCG, 2005. 131p. Dissertação de Mestrado
- Silva, M. T. Impacto do aquecimento global no cultivo do feijão-caupi de sequeiro no Estado da Paraíba. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, 2008. 49p. Monografia de Conclusão de Curso de Graduação
- Silva, M. T.; Amaral, J. A. B. Zoneamento de risco climático para a cultura do amendoim no Estado do Rio Grande do Norte. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v.7, n.2, p.93-99, 2007.

- Silva, M. T.; Sousa, E. P.; Oliveira, S. D.; Silva, V. P. R. Impactos das mudanças climáticas no zoneamento de risco climático do algodão herbáceo no Estado do Ceará. In: III Simpósio Internacional de Climatologia, 2009, Canela - RS. Anais... Rio de Janeiro - RJ : SBMET, 2009a. CDROM.
- Silva, V. P. R. On climate variability in Northeast of Brazil. *Journal of Arid Environments*, v.58, n.4, p.575-596, 2004.
- Silva, V. P. R.; Campos, J. H. B. C.; Azevedo, P. V. Water-use efficiency and evapotranspiration of mango orchard grown in northeastern region of Brazil. *Scientia Horticulturae*, v.102, p. 467-472, 2009b.
- Silva, V. P. R.; Belo Filho, Adelgício F.; Silva, B. B.; Campos, J. H. B. da C. Desenvolvimento de um sistema de estimativa da evapotranspiração de referência. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, n.4, p.547-553, 2005.
- Siqueira, O. J. W. de; Salles, L. A. B. de; Fernandes, J. M. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: Lima, M. A. de; Cabral, O. M. R.; Miguez, J. D. G. (Ed.). *Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira*. Embrapa-CNPMA, Jaguariúna, 2001. p.33-63.
- Siqueira, O. J. W. de; Farias, J. R. B. de; Sans, L. M. L. Potential Effects of Global Climate Change for Brazilian Agriculture and Adaptive Strategies for Wheat, Maize and Soybean. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.2, p.115-129, 1994.
- Souza, J. L. M. Modelo de análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para cultura do cafeeiro. Piracicaba: ESALQ, 2001. 253p. Tese de Doutorado
- Souza, J. L. M. de; Frizzone, J. A. Modelo aplicado ao planejamento da cafeicultura irrigada: I. Simulação do balanço hídrico e do custo com água. *Acta Scientiarum*, n.1, v.25, p.103-112, 2003.
- Staddon, P. L.; Heinemeyer, A.; Fitter, A. H. Mycorrhizas and global environmental change: research at different scales. *Plant and Soil*, v.244, p.253-261, 2002.
- Steenkamp, C. J.; Kock, H. de. Cost of production: Short season vs conventional cotton. In: International Cotton Advisory Committee: Short season cotton: how far can it go? Tashkent, Uzbekistan, Technical Seminar at the 55th Plenary Meeting of the ICAC, p.25-27, 1996.
- Studzinski, C. D. Um estudo da precipitação na região sul do Brasil e sua relação com os oceanos Pacífico e Atlântico tropical e sul. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1995. 79p. Dissertação de Mestrado
- SUDENE, Dados pluviométricos mensais do Nordeste. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, Recife, 1990 (Série Pluviometria 1 a 10).
- Sultan, B.; Baron, C.; Dingkuhn, M.; Sarr, B.; Janicot, S. Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon. *Agr. Forest. Meteorol.* v.128, p.93-110. 2005

- Takeya, D. M. Um outro Nordeste: o algodão na economia do Rio Grande do Norte (1880-1915). Fortaleza: BNB/ETENE, 1985. 138p.
- Thomas, A. Agricultural irrigation demand under present and future climate scenarios in China. *Glob Planet Change*; v.60, p. 306-26, 2008
- Thornton, P. E.; Doney, S. C.; Lindsay, K.; Moore, J. K.; Mahowald, N.; Randerson, J. T.; Fung, I.; Lamarque, J.F.; Feddema, J. J.; Lee, Y.H.. Carbon-nitrogen interactions regulate climate-carbon cycle feedbacks: results from an atmosphere-ocean general circulation model, *Biogeosciences*, v.6, p.2099-2120, 2009.
- Thornthwaite, C.W.; Mather, J.R. The water balance. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publications in Climatology, v.3, n.1)
- Trentin, C. V. Diagnóstico voltado ao planejamento do uso de águas residuárias para irrigação nos cinturões verdes da região metropolitana de Curitiba-PR. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2005. 115p. Dissertação de Mestrado
- Tucci, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 2. Ed, Porto Alegre: UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) – Editora da Universidade, 1997.
- Veloso, H. P.; Rangel Filho, A. L. R.; Lima, J. C. A. Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal. Rio de Janeiro: IBGE, 1991. 124 p.
- Vianelo, R. L.; Alves, A. R. Meteorologia Básica e Aplicações. Viçosa, UFV, Imprensa Universitária 1991.
- Wit, C. T. Simulation of assimilation, respiration, and transpiration of crops. Wageningen: Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1978. 141p.
- Wutke, E. B.; Arruda, F. B.; Fancelli, A. L.; Pereira, J. C.; Sakai, E.; Fujiwara, M.; Ambrosano, G. M. B. Propriedades do solo e sistema radicular do feijoeiro irrigado em rotação de culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.24, n.3, p.621-633, 2000.
- Yin, X. Quantifying the effects of temperature and photoperiod on phenological development to flowering in rice. 1996. 173p. Thesis (Ph.D.) - Wageningen Agricultural University, Wageningen.