

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIA RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**ÁGUA NO SOLO E RENDIMENTO DE TRIGO, MILHO E SOJA,
ASSOCIADOS AO FENÔMENO EL NIÑO OSCILAÇÃO SUL E À
MUDANÇA CLIMÁTICA, SIMULADOS PARA SANTA MARIA, RS.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Cleber Maus Alberto

Santa Maria, RS, Brasil

2005

**ÁGUA NO SOLO E RENDIMENTO DE TRIGO, MILHO, E SOJA,
ASSOCIADOS AO FENÔMENO EL NIÑO OSCILAÇÃO SUL E À
MUDANÇA CLIMÁTICA SIMULADOS PARA SANTA MARIA, RS.**

por

Cleber Maus Alberto

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de concentração em Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Agrícola

Orientador: Prof. Nereu Augusto Streck

Santa Maria, RS, Brasil

2005

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

A comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de mestrado

**ÁGUA NO SOLO E RENDIMENTO DE TRIGO, MILHO, E SOJA,
ASSOCIADOS AO FENÔMENO EL NIÑO OSCILAÇÃO SUL E À
MUDANÇA CLIMÁTICA SIMULADOS PARA SANTA MARIA, RS.**

elaborada por

Cleber Maus Alberto

como requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Agrícola

COMISSÃO EXAMINADORA

Nereu Augusto Streck, Ph.D.
(Presidente Orientador)

Sandro Luis Petter Medeiros, Dr. (UFSM)

Alberto Cargnelutti Filho, Dr. (FEPAGRO)

Santa Maria, 20 de janeiro de 2005.

A toda minha família e, principalmente aos meus pais, Flávio José Alberto e Marlete Maus Alberto, pelo apoio durante esta etapa da minha vida.

Dedico...

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do trabalho de mestrado.

Ao professor Nereu Augusto Streck, por ter participado durante todo o processo de elaboração e execução desse trabalho sempre com muita dedicação, incentivo e amizade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

A todos os professores do Departamento de Fitotecnia e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela colaboração e atenção sempre dispensada.

À minha família pelo amor, compreensão e apoio durante o mestrado.

A todos os amigos, pelo apoio.

E a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Dissertação de Mestrado

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

ÁGUA NO SOLO E RENDIMENTO DE TRIGO, MILHO E SOJA, ASSOCIADOS AO FENÔMENO EL NIÑO OSCILAÇÃO SUL E À MUDANÇA CLIMÁTICA SIMULADOS PARA SANTA MARIA, RS.

AUTOR: Cleber Maus Alberto

ORIENTADOR: Nereu Augusto Streck

Local e data da Defesa: Santa Maria, 20 de janeiro de 2005.

O El Niño Oscilação Sul (ENOS) é um fenômeno de grande escala que afeta o tempo e o clima em diversos locais do Globo Terrestre, incluindo o Brasil, especialmente as regiões Sul e Nordeste brasileiro. A água disponível no solo para os cultivos é um importante fator de variabilidade interanual da produção agrícola no Estado do Rio Grande do Sul. Outro fator que poderá influenciar o rendimento das culturas é a possível mudança climática. A concentração de CO₂ da atmosfera terrestre está aumentando devido às atividades humanas, assim, a temperatura média do ar do Planeta poderá aumentar nos próximos anos devido ao efeito estufa do CO₂ atmosférico. O impacto de uma possível mudança climática sobre a água disponível e o rendimento em agroecossistemas é um assunto de interesse científico e político. O objetivo deste estudo foi simular a fração de água disponível no solo e sua consequência sobre o rendimento de trigo, milho e soja, associando sua variabilidade interanual com o fenômeno ENOS e, em diferentes cenários climáticos para Santa Maria, RS. Para a simulação foi utilizado o cenário meteorológico atual (1969-2003) e, criados cenários de mudança climática com diferentes aumentos de temperatura do ar com e sem aumento de precipitação pluviométrica para os próximos 100 anos. Os resultados mostraram que anos neutros constituem anos de maior risco para as culturas do trigo, milho e soja. Para anos de La Niña a tendência de déficit hídrico não foi tão clara. Anos de El Niño, normalmente, estão associados a maior disponibilidade hídrica para as plantas. Se o aquecimento global se confirmar, espera-se que o rendimento de grãos de trigo e milho seja mais afetado do que a soja.

Palavras-chave: La Niña, agricultura, balanço hídrico do solo, trigo, milho, soja.

ABSTRACT

Master's Dissertation
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria – RS, Brasil

SOIL WATER AND WHEAT, MAIZE AND SOYBEAN YIELD AND ITS ASSOCIATION WITH THE EL NIÑO SOUTHERN OSCILATION AND CLIMATE CHANGE, SIMULATED FOR SANTA MARIA, RS.

AUTHOR: Cleber Maus Alberto
ADVISER: Nereu Augusto Streck
Location and date for presentation: Santa Maria, January 20th, 2005.

The El Nino Southern Oscillation (ENSO) is a large-scale phenomenon that impacts weather and climate worldwide, including Southern and Northeast Brazil. Soil water is a major factor that affects interannual crop production in Rio Grande do Sul State. Other factor that may affect crop yield is the possible climate change. Human activities have been blamed to increase the CO₂ concentration of the Earth's Atmosphere. Earth temperature may increase in response to increasing CO₂ concentration. The Impact of the projected climate change on soil water and agroecosystems yield is an important and relevant issue both from a scientific and political viewpoint. The objective of this study was to simulate wheat, maize and soybean yields, and the fraction of transpirable soil water (FTSW) and link its interannual variability to ENSO and under climate change scenarios at Santa Maria, RS. Soil water and crop yield were simulated with models available in the literature. Air temperature and rainfall were modified to create climate change scenarios. The results showed that neutral years are the years of the largest risk to production of wheat, maize and soybean. During La Niña years the trend of water deficit is not clear and El Niño years are associated with years with greater FTSW. The increase in temperature, expected to decreases wheat and maize yields more than soybean yield.

Key words: La Niña, agriculture, soil water budget.

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

TABELA 1 - Capacidade de armazenamento de água de cada horizonte do solo da unidade São Pedro, na capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP).....	23
TABELA 2 - Datas de semeadura das culturas e sistemas de cultivos assumidos neste estudo numérico.....	24
Tabela 3 - Classificação dos anos utilizados no estudo em relação ao fenômeno El Niño Oscilação Sul. Os anos indicados se referem ao ano de início do fenômeno.....	25

CAPÍTULO II

TABELA 1 - Conteúdo de água de cada horizonte do solo da unidade São Pedro, na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP).....	56
TABELA 2 - Datas de semeadura das culturas e sistema de cultivos assumidos para este estudo numérico.....	57
TABELA 3 - Cenários meteorológicos de mudança climática para Santa Maria, RS, Brasil, utilizados neste estudo numérico.	58
TABELA 4 - Valores do coeficiente de correlação de Kendall Tau entre FTSW e anos em diferentes cenários de mudança climática simulada por dois modelos matemáticos para as culturas de trigo, soja, e milho, Santa Maria, RS.....	59
TABELA 5 - valores do coeficiente de correlação de Kendall Tau entre rendimento e anos em diferentes cenários de mudança climática para as culturas de trigo, soja, e milho, Santa Maria, RS.	60

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

- FIGURA 1 – Resíduos observados e simulados de rendimento de trigo, soja e milho. Santa Maria, RS, 1990 - 2003.26
- FIGURA 2 - Variabilidade interanual do rendimento simulado de grãos de trigo, soja e milho nas condições potencial e com limitação hídrica. Santa Maria, RS, 1969 a 2003.27
- FIGURA 3 - Distribuição do rendimento de grãos de trigo, soja e milho, no período de 1969 a 2003, associado aos eventos de El Niño (EN), La Niña (LN) e neutros (N), para Santa Maria, RS, Brasil. A linha cheia horizontal no interior da caixa representa o percentil de 50 (mediana); a linha tracejada representa a média dos anos neutros; o final das caixas os percentis de 25 e 75; as barras os percentis de 10 e 90.....28
- FIGURA 4 - Média anual e desvio padrão da fração percentual de água transpirável no solo (FTSW) simulada para as culturas do trigo, soja e milho, Santa Maria, RS, no período de 1969-2003. Cada ponto corresponde à média de FTSW do período entre a semeadura e a maturação fisiológica da cultura.29
- FIGURA 5 - Distribuição da fração percentual de água transpirável no solo (FTSW) no período de 1969 a 2003, associado aos eventos de El Niño (EN), La Niña (LN) e neutros (N), para as culturas do trigo, soja e milho, Santa Maria, RS, Brasil. A linha cheia horizontal no interior da caixa representa o percentil de 50 (mediana); a linha tracejada representa a média dos anos neutros; o final das caixas os percentis de 25 e 75; as barras os percentis de 10 e 90. Os valores de FTSW correspondem ao período entre a semeadura e a maturação fisiológica das culturas30
- FIGURA 6 - Relação entre rendimento de grãos (g.m^{-2}) e evapotranspiração acumulada (ETPac) e, rendimento e fração de água transpirável no solo (FTSW) durante o ciclo de desenvolvimento das culturas de trigo, soja e milho para o período de 1969-2003, Santa Maria, RS. Cada ponto corresponde ao valor de ETPac e FTSW da semeadura à maturação fisiológica das culturas31

CAPÍTULO II

FIGURA 1 - Alguns cenários climáticos de temperatura média anual (a) e precipitação acumulada anual (b) para Santa Maria, RS usados no estudo	61
FIGURA 2 - Resíduos observados e simulados de rendimento de trigo, soja e milho, Santa Maria, RS, 1990 - 2003.	62
FIGURA 3 - Fração percentual de água transpirável no solo (FTSW) para as culturas de trigo, soja e milho em cenário sem mudança climática e com aumento de 6°C na temperatura média do ar, Santa Maria, RS.	63
FIGURA 4 - Fração percentual de água transpirável no solo (FTSW) para as culturas de trigo, soja e milho em cenário sem mudança climática e com aumento de 6°C na temperatura média do ar e na precipitação pluviométrica (PP), Santa Maria, RS.	64
FIGURA 5 - Rendimento de grãos das culturas de trigo, soja e milho simulado em cenário sem mudança climática e com aumento de 3 e 6°C na temperatura média do ar, Santa Maria, RS.	65
FIGURA 6 - Rendimento de grãos simulado para as culturas de trigo, soja e milho em cenário sem mudança climática e com aumento de 3 e 6°C na temperatura média do ar e com aumento na precipitação pluviométrica (PP), Santa Maria, RS.	66
FIGURA 7 - Temperatura média dos meses de junho, agosto e setembro para a série sintética de dados gerados pelo LARS-WG, para um período de 100 anos, Santa Maria, RS.	67
FIGURA 8 - Mudança relativa no rendimento de grãos simulado das culturas de trigo, soja e milho em relação ao cenário sem mudança climática em diferentes cenários climáticos com aumento de CO ₂ para Santa Maria, RS. As barras representam a média dos últimos 10 anos de cada cenário. Para descrição dos cenários, consultar Tabela 3... ..	68

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	1
CAPÍTULO I	3
Resumo	3
Abstract	4
Introdução	4
Material e Métodos	7
Resultados e Discussão	12
Conclusões	17
Referências Bibliográficas	18
CAPÍTULO II	32
Resumo	32
Abstract	33
Introdução	34
Material e Métodos	36
Resultados e Discussão	41
Conclusões	46
Referências Bibliográficas	46
CONCLUSÕES GERAIS	69

INTRODUÇÃO GERAL

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), incluindo a região sul do Brasil, onde a variação da produção agrícola tem associação com o fenômeno (BERLATO & FONTANA, 2003). O El Niño (fase quente do ENOS) se caracteriza por um aquecimento acima da normal das águas do Oceano Pacífico Equatorial próximo à costa Peruana enquanto a La Niña (fase fria do ENOS) se caracteriza por temperatura das águas abaixo da normal nesta região do Oceano Pacífico (PHILANDER, 1990).

O impacto da fase quente e da fase fria do ENOS no Brasil se dá principalmente sobre a precipitação pluviométrica das regiões Sul e Nordeste. Em anos de El Niño, a precipitação pluviométrica é freqüentemente acima da normal na região Sul. Já em anos de La Niña, a precipitação pluviométrica é freqüentemente abaixo da normal na região Sul (BERLATO & FONTANA, 2003). Como a precipitação pluviométrica é a principal fonte de água para os agroecossistemas gaúchos, a variabilidade interanual da produção agrícola no Rio Grande do Sul está intimamente associada com o ENOS (FONTANA & BERLATO, 1996; CUNHA, 1999; CUNHA et al., 1999; BERLATO & FONTANA, 1999; CARMONA & BERLATO, 2002).

Outro fator que poderá afetar o rendimento das culturas gaúchas no futuro é o aumento da concentração de CO₂ da atmosfera terrestre a qual estima-se estar acontecendo a uma taxa de 0,4-0,5% ano⁻¹ (IPCC, 1995; SOMBROEK & GOMMES, 1996), o que corresponde a um aumento de 1,0 – 1,8 μmol CO₂ mol⁻¹ ano⁻¹ (ROSENBERG et al., 1983; IPCC, 1995; UNSWORTH & HOGSETT, 1996). Conseqüentemente, espera-se que a concentração de CO₂ atmosférico no final deste século seja o dobro da atual (350 μmol mol⁻¹). Como resultado do aumento da concentração de CO₂ atmosférico, a temperatura média do ar do Planeta poderá aumentar, devido ao efeito estufa do CO₂ atmosférico (ROSENBERG et al., 1983; IPCC, 1995).

Em plantas, o aumento da concentração de CO₂ atmosférico causa um aumento da taxa de crescimento, pois o CO₂ é o substrato primário para fotossíntese. No

entanto, se o aumento da concentração de CO₂ atmosférico for acompanhado de aumento da temperatura do ar, poderá não haver aumento no crescimento e rendimento das culturas devido, principalmente, ao encurtamento do seu ciclo (WIEGAND & CUELLAR, 1981; SIONIT et al., 1987; HUNT et al., 1991; BUTTERFIELD & MORISON, 1992; SHAYKEWICH, 1995) e aumento da respiração (fotorrespiração e fase escura da respiração) do tecido vegetal (ROSENBERG et al., 1983; LONG, 1991; TAIZ & ZEIGER, 1991; VU et al., 1997).

Estudos de mudança climática são difíceis de serem realizados experimentalmente devido a limitação de equipamentos, mão-de-obra e recursos financeiros (ANDRESEN et al., 2001). Além disso, é difícil controlar alguns fatores experimentalmente e as respostas da planta são afetadas por condições meteorológicas que variam no espaço e no tempo, ou seja, são diferentes de um local para outro e, em um mesmo local, variam a cada dia.

Uma opção para a simulação do rendimento de culturas é a utilização de modelos matemáticos mecanísticos simplificados, que utilizam um reduzido número de informações, são compostos por funções matemáticas robustas e podem ser usados para diversas situações, sendo intermediários entre modelos de regressão e modelos complexos. Exemplo destes tipos de modelos mecanísticos simplificados são os modelos desenvolvidos por Tom Sinclair e colaboradores (SINCLAIR, 1986; AMIR & SINCLAIR 1991a,b; MUCHOW & SINCLAIR, 1991).

Os objetivos deste trabalho foram:

- simular o rendimento das culturas de trigo, soja e milho e o conteúdo de água disponível no solo para estas culturas em Santa Maria, RS e associá-los ao fenômeno ENOS.

- avaliar o impacto da possível mudança climática sobre o balanço de água do solo e o rendimento das culturas do trigo, soja e milho em Santa Maria, RS.

CAPÍTULO I

SIMULANDO A VARIABILIDADE INTERANUAL DO RENDIMENTO DO TRIGO, SOJA E MILHO E DA ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO EM SANTA MARIA, RS, E SUA ASSOCIAÇÃO COM O FENÔMENO EL NIÑO OSCILAÇÃO SUL

SIMULATING INTERANUAL VARIABILITY OF WHEAT, SOYBEAN AND MAIZE YIELD AND THE FRACTION OF TRANSPIRABLE SOIL WATER IN SANTA MARIA, RS, AND ITS ASSOCIATION WITH THE EL NIÑO SOUTHERN OSCILATION

RESUMO

O fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) é um fenômeno de grande escala que afeta o tempo e o clima em diversos locais do Globo Terrestre, incluindo o Brasil, especialmente as regiões Sul e Nordeste brasileiro. A água disponível no solo para os cultivos é um importante fator de variabilidade interanual da produção agrícola no Estado do Rio Grande do Sul. O objetivo deste estudo foi simular o rendimento das culturas de trigo, soja e milho e o conteúdo de água disponível no solo para estas culturas em Santa Maria, RS e associá-los ao fenômeno ENOS. Dos 34 anos estudados (1969 a 2003), 13 anos foram classificados como anos de El Niño, 11 anos como La Niña e 10 anos como anos neutros. A água disponível no solo e o rendimento das culturas foram calculados com modelos matemáticos disponíveis na literatura. A água disponível no solo para as plantas foi representada pela fração de água transpirável no solo pelas plantas (FTSW). Os resultados mostraram que anos neutros constituem anos de maior risco para as culturas do trigo, soja e milho. Para anos de La Niña a tendência

de déficit hídrico não foi tão clara. Anos de El Niño, normalmente, estão associados às maiores disponibilidades hídricas para as plantas.

Palavras-chave: La Niña, agricultura, balanço hídrico do solo.

ABSTRACT

The El Niño Southern Oscillation (ENSO) is a large-scale phenomenon that impacts weather and climate worldwide, including Southern and Northeast Brazil. Soil water is a major factor that affects interannual crop production in the Rio Grande do Sul State. The objective of this study was to simulate wheat, soybean and maize yields, and the fraction of transpirable soil water (FTSW) in Santa Maria, RS, Brazil, and link its interannual variability to ENSO. Thirty-four years (1969-2003) of daily meteorological data were used in the study. During this time period, 13 years were classified as El Niño years, 11 years as La Niña years, and 10 years as neutral years. Soil water and yield of wheat, soybean and maize were simulated with models available in the literature. The results showed that neutral years are the years of the highest risk to production of wheat, soybean and maize. During La Niña years the trend of water deficit is not clear, and El Niño years are associated with greater FTSW.

Key words: La Niña, agriculture, soil water budget.

INTRODUÇÃO

Vários elementos meteorológicos influenciam o rendimento das culturas agrícolas. A variação dos elementos meteorológicos de alguns locais é parcialmente dependente de fenômenos de grande escala, como por exemplo, o El Niño Oscilação Sul (ENOS).

O ENOS é um fenômeno de grande escala que ocorre na região do Oceano Pacífico Equatorial e que afeta o tempo e o clima em diversos locais do Globo Terrestre (CANE, 2001), incluindo a região sul do Brasil, onde a variação da produção agrícola tem associação com o fenômeno (BERLATO & FONTANA, 2003). O fenômeno ENOS é constituído de dois componentes, um oceânico e outro atmosférico (PHILANDER, 1990; GLANTZ, 2001; BERLATO & FONTANA, 2003). O componente oceânico é

caracterizado por anomalias da temperatura das águas superficiais do Oceano Pacífico Equatorial junto à costa Oeste da América do Sul. O componente atmosférico 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).

O El Niño se caracteriza por um aquecimento acima da normal das águas do Oceano Pacífico Equatorial próximo à costa Peruana enquanto a La Niña se caracteriza por temperatura das águas abaixo da normal nesta região do Oceano Pacífico (PHILANDER, 1990). As fases quente e fria do ENOS são fenômenos cíclicos de duração e ocorrência variável ou aperiódica (GLANTZ, 2001). Normalmente, o fenômeno começa no início do segundo semestre de um ano e termina no final do primeiro semestre do ano seguinte (BERLATO & FONTANA, 2003).

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. Em anos de El Niño, a precipitação pluviométrica é freqüentemente acima da normal na região Sul e abaixo da normal na região Nordeste. Já em anos de La Niña, a precipitação pluviométrica é freqüentemente abaixo da normal na região Sul enquanto que na região Nordeste há a possibilidade de precipitação pluviométrica acima da normal na região semi-árida (BERLATO & FONTANA, 2003).

No Estado do Rio Grande do Sul, o período de maior influência do ENOS sobre a precipitação pluviométrica é nos meses de outubro a dezembro e abril a junho (FONTANA & BERLATO, 1997). Como a precipitação pluviométrica é a principal fonte de água para os agroecossistemas gaúchos, a variabilidade interanual da produção agrícola no Rio Grande do Sul está intimamente associada com o ENOS (FONTANA & BERLATO, 1996; BERLATO & FONTANA, 1999; CUNHA, 1999; CUNHA et al., 1999; CARMONA & BERLATO, 2002).

A falta ou escassez de água no solo é o fator ambiental que mais limita o crescimento e rendimento das culturas na maior parte das áreas agrícolas do Planeta (BOYER, 1982; STRECK, 2004). O conteúdo de água no solo influencia diretamente a quantidade de água disponível para as culturas, e que por sua vez afeta o seu crescimento e rendimento e a necessidade de irrigação. No Estado do Rio Grande do

Sul, assim como em demais Estados do Brasil, agroecossistemas são predominantemente não irrigados.

Uma caracterização da variabilidade interanual da água disponível no solo e do rendimento das culturas e sua associação com o fenômeno ENOS é apresentada em BERLATO & FONTANA (2003), que relacionaram a deficiência hídrica no solo com o fenômeno ENOS em diversas regiões ecoclimáticas do RS. Citam que em anos de El Niño as deficiências hídricas são menores em todo Estado. Já em anos de La Niña, a tendência é de que as deficiências hídricas sejam maiores do que em anos neutros na metade Sul do Estado, mas na metade Norte do Estado, esta tendência não se confirmou em todas as regiões ecoclimáticas, como, por exemplo, o Baixo vale do Uruguai e Missões, onde a deficiência hídrica foi maior nos anos neutros do que nos anos de La Niña. O estudo de BERLATO & FONTANA (2003) não incluiu a região ecoclimática da Depressão Central do Rio Grande do Sul, onde Santa Maria está situada, que é uma transição entre a metade Norte e Sul do Estado.

Existem muitas interações que podem modificar os componentes do ciclo hidrológico em agroecossistemas. Estas interações normalmente são muito difíceis de serem estudadas experimentalmente devido a limitação de equipamentos, mão-de-obra e recursos financeiros. Estudos associados a variabilidade interanual do rendimento das culturas com fenômenos meteorológicos envolvem um grande número de anos (décadas). Os dados de rendimento para estes estudos podem ser obtidos em órgãos governamentais como a CONAB e o IBGE (FONTANA & BERLATO, 1996; BERLATO & FONTANA, 1999; CUNHA et al., 1999), mas esses dados devem ser corrigidos para que seja levada em conta a mudança tecnológica (manejo, genótipos) ao longo dos anos, o que pode ser uma desvantagem já que esta correção é realizada por métodos estatísticos empíricos. Além disso, esses dados são regionais (a nível de Estado ou região constituída por vários municípios), o que também é uma desvantagem já que não contempla diferenças locais de clima e solo que afetam o desempenho de agroecossistemas. Modelos matemáticos, embora sendo uma simplificação da realidade e, portanto, devem ser usados com cautela, são ferramentas alternativas que podem ser usadas em tais estudos não necessitando de correções tecnológicas e

descrevem agroecossistemas específicos e a sua variabilidade interanual em séries temporais.

Uma opção para a simulação do rendimento de culturas é a utilização de modelos matemáticos mecanísticos simplificados, que utilizam um reduzido número de informações, são compostos por funções matemáticas robustas e podem ser usados para diversas situações, sendo intermediários entre modelos de regressão (MONTEITH & SCOTT, 1982) e modelos complexos (STAPPER & HARRIS, 1989). Exemplos destes tipos de modelos mecanísticos simplificados são os modelos desenvolvidos por Tom Sinclair e colaboradores (SINCLAIR, 1986; AMIR & SINCLAIR 1991a,b; MUCHOW & SINCLAIR, 1991).

O objetivo deste trabalho foi simular o rendimento das culturas de trigo, soja e milho e o conteúdo de água disponível no solo para estas culturas em Santa Maria, RS, e associá-los ao fenômeno ENOS.

MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo numérico foi realizado para as condições de Santa Maria, RS, Brasil (latitude: 29°43'S, longitude: 53°42'W e altitude: 95m). O clima da região, conforme classificação de Köppen, é do tipo Cfa subtropical úmido com verões quentes e sem estação seca definida (MORENO, 1961). Foram utilizados dados diários de temperatura máxima (Tx, em °C) e mínima (Tn, em °C), brilho solar (h) e precipitação (PP, em mm) coletados na estação climatológica principal do 8º DISME/MA localizada no campo experimental do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria durante o período de 1969 a 2003.

A densidade de fluxo de radiação solar global incidente, necessária nos modelos matemáticos de simulação do rendimento e da água disponível no solo foi estimada a partir do brilho solar pela equação de Angstrom com coeficientes mensais para Santa Maria apresentados em ESTEFANEL et al. (1990).

O solo utilizado para a simulação foi o pertencente a unidade de mapeamento São Pedro, um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico Arênico (EMBRAPA, 1999) representativo da região. Os valores do conteúdo de água no solo no ponto de murcha permanente (PMP) e na capacidade de campo (CC), necessários para os modelos,

estão na Tabela 1. Quando a camada de solo utilizada nos modelos é composta por diferentes valores de CC e PMP, foi efetuada a média ponderada entre as diferentes camadas (Tabela 1). Por exemplo, para a camada de solo de 1,05 m, utilizado no modelo de AMIR & SINCLAIR (1991 a,b), os valores de CC e PMP utilizados foram de 0,264 e 0,178, respectivamente. O conteúdo de água disponível no solo para as plantas foi representado pela fração percentual de água transpirável no solo para as plantas (FTSW):

$$FTSW = [(CA - PMP)/(CC - PMP)]*100 \quad (1)$$

onde, CA é o conteúdo atual de água no solo.

O rendimento das culturas foi simulado pelos modelos desenvolvidos por Tom Sinclair e colaboradores para a condição potencial e com restrição hídrica no solo. A condição potencial se refere ao rendimento simulado sem restrição hídrica no solo durante o ciclo de desenvolvimento da cultura. A condição com restrição hídrica se refere ao rendimento simulado considerando o efeito da FTSW sobre parâmetros de crescimento e desenvolvimento durante o ciclo da cultura.

O rendimento do trigo potencial e com restrição hídrica no solo foi calculado através dos modelos de AMIR & SINCLAIR (1991a) e AMIR & SINCLAIR (1991b), respectivamente. No modelo com limitação hídrica, o solo é dividido em duas camadas, a primeira com 0,15 m e a segunda camada de 1,05m.

Para o cálculo da soma térmica, em graus-dia (°C.dia), utilizado para o sub-modelo de desenvolvimento do trigo, a temperatura base (T_b) utilizada foi de 0°C e a temperatura média diária (T) foi calculada a partir da média aritmética da T_n e T_x diária.

O número final de folhas na haste principal e o acúmulo térmico entre o aparecimento de duas folhas sucessivas (filocrono) no trigo, necessários para o modelo de AMIR & SINCLAIR (1991a,b), foram de 11 folhas e 113 °C.dia, respectivamente (BOSCO et al., 2004), para a cultivar BRS 179, genótipo de trigo recomendado para a região Sul do Brasil.

No modelo de AMIR & SINCLAIR (1991a,b) o ciclo de desenvolvimento da cultura do trigo é dividido em três fases: emergência – crescimento da haste principal, crescimento da haste principal – antese, e enchimento de grãos, com duração de 1243, 212 e 585 °C.dia, respectivamente. Entre a antese e o início do enchimento de grãos há

um intervalo de 90 °C.dia. Para o cálculo da biomassa e rendimento do trigo, utilizou-se uma eficiência do uso de radiação (EUR) de $0,9 \text{ g.MJ}^{-1}$ (MOREIRA et al., 1999).

O rendimento da soja potencial e com restrição hídrica no solo foi calculado através do modelo de SINCLAIR (1986). Neste modelo o solo é dividido em duas camadas sendo que a primeira camada é de 0,15 m e a segunda camada é de 0,55 m. As datas de término de crescimento folhar e início do enchimento de grão foram simuladas para a cultivar Bragg com o modelo não-linear de resposta do desenvolvimento à temperatura e fotoperíodo proposto por SINCLAIR et al. (1991). Assim, utilizaram-se dados da mesma cultivar Bragg publicados em SCHNEIDER et al. (1984), onde o término do crescimento folhar corresponde ao dia de estágio de desenvolvimento 1,0 e o início do enchimento de grão corresponde ao dia de estágio 1,8 do modelo de SINCLAIR et al. (1991).

O rendimento de soja simulado sem restrição hídrica no solo foi realizado eliminando-se as funções de resposta ao déficit hídrico no algoritmo de SINCLAIR (1986).

O rendimento do milho potencial e com restrição hídrica no solo foi calculado através dos modelos de MUCHOW et al. (1990) e MUCHOW & SINCLAIR (1991), respectivamente. No modelo com limitação hídrica o solo é dividido em duas camadas, a primeira com 0,15 m e a segunda camada de 1,05 m.

Os modelos de AMIR & SINCLAIR (1991), SINCLAIR (1986) e MUCHOW & SINCLAIR (1991) simulam o balanço hídrico no solo para as culturas de trigo, soja e milho, respectivamente. Além desses modelos, o modelo de CAMPBELL & DIAZ (1988) foi utilizado para a simulação do balanço hídrico para as culturas do trigo, milho e soja. Neste modelo, o solo é dividido em seis camadas. A profundidade da primeira camada é de 0,15 m e a profundidade das demais camadas é definida de acordo com a profundidade máxima do sistema radicular de cada cultura. A profundidade máxima do sistema radicular foi a mesma utilizada na simulação pelos modelos de AMIR & SINCLAIR (1991), SINCLAIR (1986) e MUCHOW & SINCLAIR (1991), ou seja, 1,2 m, 0,7 e 1,2 m, para as culturas do trigo, soja e milho, respectivamente.

As datas de maturação fisiológica, necessárias no modelo de CAMPBELL & DIAZ (1988), foram obtidas através dos modelos de desenvolvimento e crescimento de

AMIR e SINCLAIR (1991b) para o trigo, SINCLAIR (1986) para a soja e MUCHOW & SINCLAIR (1991) para o milho.

A data de semeadura das culturas e os sistemas de cultivos adotados para a simulação estão na Tabela 2. Estas datas foram selecionadas em função da época recomendada para a cultura do trigo (EMBRAPA, 2004), soja (EMBRAPA TRIGO, 2004) e milho (MALUF & MATZENAUER, 1995) na Região Central do Rio Grande do Sul. A simulação foi iniciada em 01/01/1969 com o solo na CC e finalizada em 31/12/2003. Todos os modelos utilizados neste trabalho funcionam numa escala diária.

Para fins de simulação considerou-se que, durante o período de pousio, não havia vegetação em crescimento ativo sobre a superfície do solo e os restos culturais permaneceram sobre a superfície após a colheita.

O dia da colheita de cada cultura foi considerado como sendo o dia após àquele que completou acúmulo térmico de 233 °C.dia ($T_b = 5^\circ\text{C}$) após a completa maturação fisiológica (HAMADA et al., 1999). Caso tivesse ocorrido precipitação acima de 5 mm no dia em que os 233 °C.dia foram completados, aguardou-se dois dias após o último dia de chuva para o dia da colheita.

O cálculo da decomposição dos restos culturais após a colheita foi baseado nas equações propostas por GHIDEY et al. (1985):

$$\text{Trigo: } (M/M_0)^{1/2} = 1,000 - 0,002101*(\tau) \quad (2)$$

$$\text{Milho: } (M/M_0)^{1/2} = 0,998 - 0,0011792*(\tau) \quad (3)$$

$$\text{Soja: } (M/M_0)^{1/2} = 0,947 - 0,0013706*(\tau) \quad (4)$$

onde, M é a massa de resíduo atual (g.m^{-2}), M_0 é a massa de resíduo inicial (g.m^{-2}) e τ é a variável independente calculada por:

$$\tau = (T.t.A_m) / (C/N) \quad (5)$$

onde, T é a temperatura média diária ($^\circ\text{C}$), t é o tempo (dias após a colheita), A_m é um índice de umidade, calculado pelo algoritmo apresentado em LIGON & JOHNSON (1960), e (C/N) é a relação C/N inicial da massa de resíduo inicial na colheita. A relação C/N do resíduo sobre a superfície foi de 107, 30,8 (GHIDEY et al., 1985) e 55,5 (BERTOL et al., 2004), para as culturas do trigo, soja e milho, respectivamente.

Admitiu-se a completa decomposição do resíduo de trigo quando restasse na superfície 10% da quantidade de resíduo inicial sobre a superfície (BERTOL, 2004). O

período de decomposição foi definido como aquele entre duas colheitas sucessivas. No final do período de decomposição, a quantidade de resíduo não decomposta, se superior a 10 % da quantidade de resíduo inicial, foi acrescentada ao resíduo resultante da última colheita.

A presença de resíduo sobre a superfície resulta na atenuação da perda de água do solo por evaporação. A diminuição da evaporação de água do solo proporcionada pelos restos culturais foi calculada pela equação proposta por GILL & JALOTA (1996):

$$E_{om}/E_o = 1.061e^{-(0.0281.MR + 0.022.Eo)} \quad (6)$$

onde, E_{om} é a evaporação atual do solo, E_o é a evaporação potencial do solo (mm.dia^{-1}) e MR é a massa residual sobre a superfície (Mg.ha^{-1}).

Os rendimentos de trigo, milho e soja durante o período de 1990 a 2003 foram obtidos do site <http://www.conab.gov.br> e é equivalente a média de rendimento de todo o Estado do Rio Grande do Sul. Estes dados foram utilizados para testar os modelos de rendimento das culturas usados no estudo. Foram calculados os resíduos de rendimento simulado e observado como sendo a diferença entre rendimento da safra e a média do período (1990-2003). A comparação entre a média de rendimento simulado e observado foi efetuado através do Teste-t Pareado, metodologia esta utilizada em outros trabalhos científicos que tratam de assunto abordado neste trabalho (ANDRESEN et al., 2001). A hipótese H_0 é que as médias dos rendimentos simulado e observado não diferem entre si, enquanto a hipótese alternativa H_1 é que a média dos rendimentos simulados difere da média dos rendimentos observados. Além do Teste t pareado, foi realizado também o teste não paramétrico de Spearman R (SIEGEL, 1975) entre média de resíduos simulados e observados.

Optou-se em não realizar a correção dos rendimentos observados em função da mudança tecnológica nos 12 anos de dados observados, metodologia usualmente empregada em séries longas (BERLATO & FONTANA, 1999; CUNHA et al., 1999; ANDRESEN et al., 2001), por se tratar de uma série temporal curta e, portanto, assumiu-se que a mudança tecnológica não afetou o rendimento de grãos das culturas.

Os anos de ocorrência e a intensidade dos eventos El Niño e La Niña foram retirados do website do Centro Integrado de Meteorologia e Recursos Hídricos (<http://www.cptec.inpe.br/enos/>) (Tabela 3). Como o fenômeno ENOS geralmente inicia

no segundo semestre de um ano e acaba no primeiro semestre do ano seguinte, os anos indicados se referem ao ano de início do fenômeno. Para relacionar a FTSW com o fenômeno ENOS, os valores diários de FTSW foram agrupados em anos de El Niño (EN), La Niña (LN) e Neutros (N), considerando-se o início do evento o dia 01 de julho do ano e o final do evento o dia 30 de junho do ano seguinte.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A diferença entre as médias de rendimentos simulados e observados não diferiu significativamente pelo Teste-t Pareado ($P = 0.05$) para as culturas do trigo, soja e milho. Isto significa que os modelos de simulação de rendimento das culturas simulam satisfatoriamente a tendência dos rendimentos anuais das culturas e, portanto, podem ser usados para a finalidade do presente estudo (ANDRESEN et al., 2001). De modo geral, a amplitude das médias de rendimento residual simuladas é maior do que as médias de rendimento residual observado (Figura 1). Isto é esperado, pois os dados observados representam o rendimento médio de uma região (Estado do Rio Grande do Sul), enquanto que os dados simulados pelos modelos matemáticos são pontuais para um local (ANDRESEN et al., 2001). A correlação entre rendimento observado e simulado pelo teste de Spearman R para as culturas do trigo, soja e milho foi de 0,51 ($p=0,074$), 0,79 ($p=0,001$) e 0,56 (0,044), respectivamente, valores que foram considerados suficientes para rejeitar a hipótese H_0 (correlação não significativa) e nos permitem concluir que os modelos de simulação de rendimento das três culturas são apropriados para o presente estudo, pois os rendimentos simulados seguem a mesma ordem de ranqueamento dos rendimentos simulados.

As diferenças entre rendimento simulado potencial e com restrição hídrica no período de 1969-2003 em Santa Maria foram maiores para as culturas de verão (soja e milho) do que para a cultura do trigo (Figura 2). O maior rendimento de trigo com restrição hídrica simulado pelo modelo de AMIR & SINCLAIR (1991 b) ocorreu no ano de 1989-90 (371 g.m^{-2}) e o menor rendimento com restrição hídrica no ano de 1993 (231 g.m^{-2}), ambos anos neutros (N) com relação ao fenômeno ENOS. O maior rendimento de soja com restrição hídrica simulado pelo modelo de SINCLAIR (1986) foi na safra de 2000-01 (486 g.m^{-2}) e o menor rendimento na safra 1985-86 (11 g.m^{-2}),

anos de La Niña (LN) e N, respectivamente. Para a cultura do milho, o maior rendimento simulado com restrição hídrica na safra 1971-72 (601 g.m^{-2}) e o menor rendimento com restrição hídrica na safra 1985-86 (178 g.m^{-2}), ambos anos N.

Como a variabilidade interanual do rendimento das culturas é maior com restrição hídrica e esta é uma condição mais realística do que a condição potencial, a análise do efeito do ENOS sobre o rendimento das culturas foi feito com os dados simulados para a condição com restrição hídrica. O efeito do ENOS sobre o rendimento das culturas do trigo, soja e milho está representado na Figura 3. Para a cultura do trigo observou-se que 63% (7/11) das safras de LN apresentaram rendimento superior à média das safras de anos N e, em 54% (7/13) das safras em anos de EN apresentaram rendimento superior a média das safras situadas em anos N. No caso das safras de anos N, em 55% (6/11) das safras situadas em períodos N apresentaram rendimento superior a média dos anos N. O maior desvio padrão em relação a média de rendimento para a cultura do trigo foi simulada para as safras de anos N (40,5) e que apresentou também a menor média de rendimento (276 g.m^{-2}).

Para a cultura da soja 73% (8/11), 69% (9/13) e 60% (6/10), das safras situadas em anos de EN, LN e N, respectivamente, apresentaram rendimento superior as safras de anos N. Para a cultura do milho, a maior proporção de rendimento acima da média das safras de anos N foi verificada para safras de LN, 82% (9/11), em safra de anos de EN 79% (10/13) e em safras situadas em anos N, 70% (7/10).

Os valores médios de FTSW anuais simulados durante o ciclo de desenvolvimento (semeadura – maturação fisiológica) das culturas do trigo, soja e milho e seu respectivo desvio padrão estão representados na Figura 4. Observa-se que o modelo de CAMPBELL & DIAZ (1988) simula valores de FTSW, na grande maioria das vezes, superiores aos simulados pelos modelos de AMIR & SINCLAIR (1991b), MUCHOW & SINCLAIR (1991) e SINCLAIR (1986). Isto se deve à estrutura e conceitualização diferentes destes dois tipos de modelos.

A FTSW simulada pelo modelo de AMIR & SINCLAIR (1991) apresentou, para a cultura do trigo, maior e menor valor nos anos de 2002 (91%) e 1969 (60%) que são anos de N e EN, respectivamente. Já para o modelo de CAMPBELL & DIAZ (1988)

verificou-se que o menor valor ocorreu no ano de 1978 (61%) e o maior valor foi obtido no ano de 2002 (99%), ambas as safras situadas em anos considerados N.

Com relação a cultura da soja verificou-se que o maior valor de FTSW, simulado pelo modelo de SINCLAIR (1986), foi simulado na safra 1997-98 (64 %) e o menor valor foi simulado na safra 1985-86 (17%), anos considerados de EN e N, respectivamente. Para o modelo de CAMPBELL & DIAZ (1988) o maior e o menor valor de FTSW foram simulados para os mesmos anos, apenas com valores diferentes, ou seja, 1997-98 (FTSW = 64 %) e 1985-86 (FTSW = 17,9 %).

Para a cultura do milho observou-se que a maior e menor FTSW foram constatadas em anos N, 1985-86 (21%) e 2000-01 (81%), com o modelo de MUCHOW & SINCLAIR (1991), enquanto que com o modelo de CAMPBELL & DIAZ (1988) a maior disponibilidade hídrica foi simulada em 1997-98 (FTSW = 89%), safra situada em período de EN e o menor valor de FTSW foi simulado na safra de 1978-79 (43%) safra situada em período de evento considerado N.

As freqüências de distribuição de FTSW durante o ciclo de desenvolvimento de trigo, soja e milho estão representados na Figura 5. Para a cultura do trigo, a proporção de FTSW abaixo da média dos anos N foi de: 15%(EN), 30%(LN) e, 60% (N) para o modelo de AMIR & SINCLAIR (1991b) e, 8% (EN), 20% (LN) e, 20% (N) para o modelo de CAMPBELL & DIAZ (1988). Para a cultura da soja, a FTSW simulada pelo modelo de SINCLAIR (1986) ficou abaixo da média dos anos N em 38% (5/13) dos anos de EN, 55% (6/11) anos de LN e, 50% (5/10) dos anos N e, pelo modelo de CAMPBELL & DIAZ (1988), 23% (3/13) dos anos de EN, 18% (2/11) anos de LN e, 50%(5/10) dos anos N apresentaram FTSW abaixo da média dos anos N. A FTSW simulada para a cultura do milho pelo modelo de MUCHOW & SINCLAIR (1991), apresentou a seguinte freqüência de distribuição de FTSW abaixo da média dos anos N: 31% (4/13), 36% (4/11) e 40% (4/10) dos anos de EN, LN e N, respectivamente e, pelo modelo de CAMPBELL & DIAZ (1988) 8%(1/13) dos anos de EN, 9% (1/11) anos de LN e, 30%(3/10) dos anos N apresentaram FTSW abaixo da média dos anos N. Estes resultados evidenciam que o conteúdo de água no solo em Santa Maria geralmente é menor para as culturas durante anos classificados como neutros em relação ao fenômeno ENOS.

BERLATO & FONTANA (2003) também encontraram maiores deficiências hídricas no solo em algumas regiões da metade Norte do Rio Grande do Sul (Baixo Vale do Uruguai e Missões) em anos neutros. Os anos neutros têm se mostrados mais irregulares em termos de distribuição de precipitação no Rio Grande do Sul durante o ciclo de desenvolvimento das culturas, especialmente as de verão. Um exemplo recente é o verão de 2003/2004, que em Santa Maria teve precipitação de 357,3 mm em dezembro de 2003, com ocorrência de enchentes, enquanto que a precipitação de janeiro de 2004 foi de 21,7 mm, causando prejuízos nas lavouras de milho e soja no Estado. O ano de 2004 foi inicialmente caracterizado como neutro e no final do ano de 2004 havia a indicação de El Niño de fraca intensidade anunciado pelas agências meteorológicas mundiais, mas até o momento em que esta dissertação foi defendida tem sido um ano de pouca precipitação (62,2 mm em dezembro de 2004) e prejuízos nas culturas de verão já foram anunciados em várias regiões do Estado.

Houve maior correlação entre rendimento de grãos e evapotranspiração acumulada, e rendimento de grãos e FTSW para as culturas de verão (soja e milho) do que para a cultura do trigo (Figura 6). Estas diferenças entre as culturas podem ser explicadas em função da cultura do trigo ser mais resistente ao déficit hídrico do que a soja e milho e, seu ciclo de desenvolvimento ocorrer em um período em que a demanda da atmosfera por água é menor e a FTSW é maior, ou seja, outono, inverno e primavera. A variabilidade interanual e a diferença entre rendimento potencial e com limitação hídrica é menor para trigo do que para as outras duas culturas de verão demonstrando que a FTSW influencia pouco no rendimento desta cultura nas condições de Santa Maria, e certamente para o restante do Estado do Rio Grande do Sul.

O rendimento potencial simulado para as três culturas apresentou tendência oposta ao rendimento com limitação hídrica (Figura 2) no sentido de que em anos com elevado déficit hídrico, o rendimento potencial tende a ser mais elevado, enquanto os valores de rendimento com limitação hídrica atingem o seu menor valor. Um exemplo deste fato é o ano de 1990-91 simulado para a cultura do milho, onde o rendimento potencial do milho apresentou seu maior valor (661 g.m⁻²) e, o rendimento com limitação hídrica o terceiro menor valor durante o período estudado (309 g.m⁻²). Estes resultados permitem inferir que o uso de irrigação em anos com deficiência hídrica pode

aumentar o rendimento de grãos, pois anos secos possuem mais dias límpidos, o que aumenta a captura de radiação solar pelo dossel vegetal.

A maior frequência de rendimento de grãos de milho em anos de LN acima da média dos anos N (82%, Figura 3) em relação às outras duas espécies pode ser devido à elevada profundidade do sistema radicular utilizada no modelo (1,2 m). A diminuição da profundidade de extração de água pelo sistema radicular aumenta a sensibilidade de rendimento de grãos simulado pelo modelo devido ao déficit hídrico. Como anos de LN possuem maior quantidade de radiação (BERLATO & FONTANA, 2003) isto pode ter feito com que o rendimento da cultura do milho fosse mais elevado nestes anos. Além disso, o milho é uma planta de metabolismo C₄, enquanto soja e trigo são plantas C₃. Plantas C₄ são mais eficientes na produção de biomassa, especialmente quando a temperatura é elevada. Uma outra diferença a favor do milho ainda é genética, pois a maior parte dos genótipos de milho cultivados são híbridos enquanto que trigo e soja são cultivares, sem vigor híbrido.

Para a cultura do trigo verificou-se que em anos de EN apresentaram desvios negativos de 62% (8/13) com relação a média de todo o período estudado. Já os anos de LN apresentaram a menor frequência de desvios negativos 45% (5/11). Estes desvios aproximam-se daqueles relatados em CUNHA et al. (1999), 57% (13/23) e 33% (5/15), para anos de EN e LN, respectivamente. Porém, para anos N os desvios negativos em relação a média de todo o período de 64% (7/11) e positivos de 36% simulados pelo modelo de AMIR & SINCLAIR (1991), foram opostos daqueles observados por CUNHA et al. (1999), 37% (15/40) para desvios negativos e 63% (25/40) para desvios positivos.

Os menores valores de rendimento simulado de soja foram verificados nas safras 1985-86 (11 m⁻²) e 1990-91 (25 g.m⁻²). Estes resultados concordam com aqueles apresentados por BERLATO & FONTANA (2003), já que estes anos caracterizaram-se por serem anos de forte estiagem no período que se estende desde o final da primavera até o final do verão (BERLATO & FONTANA, 2003).

BERLATO & FONTANA (1999) verificaram em sete eventos de EN (1975-76 a 1994-95) rendimento da soja 16% superior a média de todo o período no presente estudo, a média de rendimento de soja simulado pelo modelo de SINCLAIR (1986) para

eventos de EN foi 12% ($31,3 \text{ g.m}^{-2}$) superior a média de todo o período ($269,35 \text{ g.m}^{-2}$). No entanto, quando estes valores de rendimento da soja foram comparados com a média dos anos N, o rendimento foi 57% ($109,32 \text{ g.m}^{-2}$) superior a média dos anos N ($191,3 \text{ g.m}^{-2}$). Estes resultados evidenciam que anos N são, normalmente, mais prejudiciais ao cultivo de soja em Santa Maria. Para anos de LN constataram-se valores intermediários de rendimento em relação aos anos de EN e N durante este período de estudo.

O menor rendimento de grãos de milho simulado pelo modelo de MUCHOW & SINCLAIR (1991) foi obtido na safra 1985-86 ($178,9 \text{ g.m}^{-2}$), o mesmo ano relatado por FONTANA & BERLATO (1996). A menor frequência de rendimento de milho acima da média de todo o período foi verificada para as safras em anos N (40%) e as maiores frequências, 69 e 73%, para os anos de EN e LN, respectivamente.

Para a cultura do milho foram também realizadas simulações com sete datas de semeadura, 15/08, 15/09, 15/10, 15/11, 15/12 e 15/01 (dados não apresentados), pois a época de semeadura recomendada para esta cultura na região se estende de agosto a janeiro. Constatou-se decréscimo linear de rendimento com o atraso da época de semeadura para anos de EN e LN, com maior rendimento para a semeadura efetuada no dia 15/08 (589 e 546 g.m^{-2} , para anos de EN e LN, respectivamente) e menor rendimento para semeadura em 15/01 (452 e 470 g.m^{-2} , para anos de EN e LN, respectivamente). Para anos N não foi observada esta mesma tendência, os menores rendimentos foram simulados nas datas de semeadura de 15/01 (444 g.m^{-2}), 15/10 (450 g.m^{-2}) e 15/11 (455 g.m^{-2}) e, os maiores rendimentos nas datas de 15/08 (555 g.m^{-2}), 15/09 (512 g.m^{-2}) e 15/12 (484 g.m^{-2}).

CONCLUSÕES

O El Niño Oscilação Sul influencia o rendimento das culturas de trigo, soja e milho na região de Santa Maria, RS, mas são os anos classificados como neutros em relação ao ENOS que são de maior risco para o cultivo de soja e milho.

Para a cultura do trigo, anos de La Niña são mais favoráveis ao rendimento de grãos. Para a cultura da soja, anos de El Niño são mais favoráveis ao rendimento de

grãos e para a cultura do milho anos de El Niño e La Niña favorecem o rendimento de grãos.

Anos de maior déficit hídrico no solo, normalmente estão associados a anos N, enquanto que a maior disponibilidade hídrica no solo está associada a eventos de EN. Para os eventos de LN a tendência de déficit hídrico no solo não é bem definida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMIR, J., SINCLAIR, T.R. A model of the temperature and solar radiation effects on spring wheat growth and yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 28, n. 1, p. 47-58, 1991 a.

AMIR, J., SINCLAIR, T.R. A model of water limitation on spring wheat growth and yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 29, n. 1, p. 59-96, 1991 b.

ANDRESEN, J. A. et al. Weather Impacts on Maize, Soybean, and Alfafa production in the Great Lakes Region, 1895-1996. **Agonomy Journal**, Madison, v. 93, 1059-1070, 2001.

BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C. Variabilidade interanual da precipitação pluvial e rendimento da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n.1, p. 119-125, 1999.

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**. Editora da UFRGS, Porto Alegre, 2003. 110p.

BERTOL, I.; LEITE, D.; AZOLDAN JUNIOR, W. A. Decomposição de resíduo de milho e variáveis relacionadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 369-375, 2004.

BOSCO et al. Estimativa do Filocrono de algumas cultivares brasileiras de trigo. In: XVIII Jornada Acadêmica Integrada, 2004, Santa Maria, **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2004. 1 CD-ROM.

BOYER, J. S. Plant productivity and environment. **Science**, Washington, v. 218, n. 4571, p. 443-448, 1982.

CAMPBELL, G.S., DIAZ, R. Simplified soil-water balance models to predict crop transpiration. In: BIDINGER, F.R., JOHANSEN, C. **Drought research priorities for the dryland tropics**. Parancheru, India: ICRISAT, 1988. Cap. 2, p. 15-26.

CANE, M.A. **Understanding and predicting the world's climate system**. In: Impacts of El Niño and climate variability on Agriculture. ASA Special Publication, Madison, 2001, p. 1-20.

CARMONA, L.C.; BERLATO, M.A. El Niño e La Niña e o rendimento do arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n.1, p. 147-152, 2002.

CUNHA, G.R. El Niño Oscilação Sul e perspectivas climáticas aplicadas no manejo de culturas no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n.2, p. 277-284, 1999.

CUNHA, G.R.; DALMAGO, G.A.; ESTEFANEL, V. ENSO influences on wheat crop in Brazil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n.1, p. 127-138, 1999.

EMBRAPA TRIGO. **Indicações técnicas da Comissão Sul-Brasileira de Pesquisa de Trigo – 2004**. Capturado em 20 abr. 2004. Online. Disponível na Internet <http://www.cnpt.embrapa.br/rcsbpt04/index.htm> .

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informações, 1999. 412p.

EMBRAPA. **Indicações Técnicas para a Cultura de Soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2004/2005** Capturado em 20 abr. 2004. Online. Disponível na Internet http://www.cnpt.embrapa.br/i_soja.htm

ESTEFANEL, V.; SCHNEIDER, F. M.; BERLATO, M. A.; et al., Insolação e radiação solar em Santa Maria, RS: I – Estimativa da radiação solar global incidente a partir dos dados de insolação. **Revista do Centro de Ciências Rurais**. Santa Maria, v. 20, n. 3-4, p. 203-218. 1990.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A. Influência do El Niño Oscilação Sul sobre a precipitação do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n.1, p. 127-132, 1997.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A. Relação entre El Niño Oscilação Sul (ENOS), precipitação e rendimento de milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v.2, n.1, p.39-46, 1996.

GLANDZ, M.H. **Currents of Change: Impacts of El Niño and La Niña on climate and society**. Second Edition. University Press, Cambridge, 2001. 252p.

GHIDEY, F. et al. Residue decay evaluation and prediction. **TRANSACTIONS of the ASAE**, v. 28, n. 1,1985, p. 102-105.

GILL, B. S. & JALOTA, S. K. Evaporation from soil in relation to residue rate, mixing depth, soil texture and evaporativity. **Soil Technology**, v. 8, 1996, p. 293-301.

HAMADA, Emília; PINTO, Hilton Silveira; ZULLO JUNIOR, Jurandir. Avaliação do

Desenvolvimento do Trigo em Função de Graus-Dia. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 1999, Florianópolis. CDROM.

LIGON, J. T. & JOHNSON, H. P. Infiltration Capacities of Fayette Silt Loam from Analysis of Hydrologic Data. **TRANSACTIONS of the ASAE**. V. 3, n. 1, p. 36-37, 1960.

MALUF, J.R.T. & MATZENAUER, R. **Zoneamento agroclimático da cultura do milho por épocas de semeadura no estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: FEPAGRO, 1995. (FEPAGRO. Boletim, 1)

MONTEITH, J. L., SCOTT, R. K. Weather and yield variation of crops. In: BLAXTER, K., FOWDEN, L. **Food, Nutrition and climate**. Applied science, Englewood Cliffs, 1982, p. 127-149.

MOREIRA, A. M.; ANGULO FILHO, R.; RUDORFF, B. F. T. Eficiência do uso de radiação e índice de colheita em trigo submetido a estresse hídrico em diferentes estádios de desenvolvimento. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 56, n.3, 1999.

MORENO, J.A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 46p.

MUCHOW, R.C., SINCLAIR, T.R., BENNET, J.M. Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across locations. **Agronomy Journal**, Madison, v. 82, n. 2., p. 338-343, 1990.

MUCHOW, R. C. & SINCLAIR, T. R. Water deficit effects on maize yields modeled under current and "Greenhouse" climates. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83, 1052-1059 p., 1991.

NASCIMENTO, J. L. do. **Características de umidade e disponibilidade de água do solo da unidade São Pedro, RS.** 56 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Rural), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1981.

PHILANDER, S.G. **El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation.** Academic Press, New York, 1990. 293p.

SCHNEIDER, F. M. et al. Comportamento de doze cultivares de soja à diferentes condições de drenagem e de irrigação subterrânea num solo hidromórfico. **Contribuição do Centro de Ciências Rurais à XII reunião de pesquisa de soja da Região Sul.** 1984. p. 29-42. 1984. Universidade Federal de Santa Maria – RS. Fundação de Apoio a tecnologia (FATEC).

SIEGEL, S. **Estatística não-paramétrica.** McGraw-Hill, Ltda: São Paulo, 1975, 350p.

SINCLAIR, T.R. Water and nitrogen limitations in soybean grain production. I. Model development. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 15, n. 2, p. 125-141, 1986.

SINCLAIR, T.R., KITANI, S., HINSON, K., BRUNIARD, J., HORIE, T. Soybean flowering date: Linear and Logistic Models Based on Temperature and Photoperiod. **Crop Science**, v. 31, p. 786-790, 1991.

STAPPER, M., HARRIS, H. C. Assessing de productivity of wheat genotypes in a Mediterranean climate, using a crop simulation model, **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 20, 1989, p.129-152.

STRECK, N. A. Do we know how plants sense a drying soil? **Ciência Rural**, v. 2, n. 34, p. 581-584, 2004.

Tabela 1 – Capacidade de armazenamento de água de cada horizonte do solo da unidade São Pedro, na capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP).

Horizonte	Profundidade (cm)	CC (cm ³ .cm ⁻³)	PMP (cm ³ .cm ⁻³)
A _p	0-30	0,232	0,116
A ₃	30-56	0,234	0,140
B ₂₁	56-85	0,234	0,175
B ₂₂	85-126	0,306	0,218

Fonte: NASCIMENTO (1981).

Tabela 2 – Datas de semeadura das culturas e sistemas de cultivos assumidos neste estudo numérico.

Cultura	Sistema de cultivo	Data de Semeadura
Trigo	Trigo – Pousio	14 de Junho
Soja	Pousio – Soja	15 de Novembro
Milho	Pousio – Milho	15 de Novembro

Tabela 3 – Classificação dos anos utilizados no estudo em relação ao fenômeno El Niño Oscilação Sul. Os anos indicados se referem ao ano de início do fenômeno.

Classificação	Anos
El niño	1969, 1972, 1976, 1977, 1979, 1982, 1986, 1987, 1990, 1991, 1992, 1994, 1997
La Niña	1970, 1973, 1974, 1975, 1983, 1984, 1988, 1995, 1998, 1999, 2000
Neutro	1971, 1978, 1980, 1981, 1985, 1989, 1993, 1996, 2001, 2002, 2003

Fonte: INPE (<http://www.cptec.inpe.br/enos> acessado em 25 de maio de 2004).

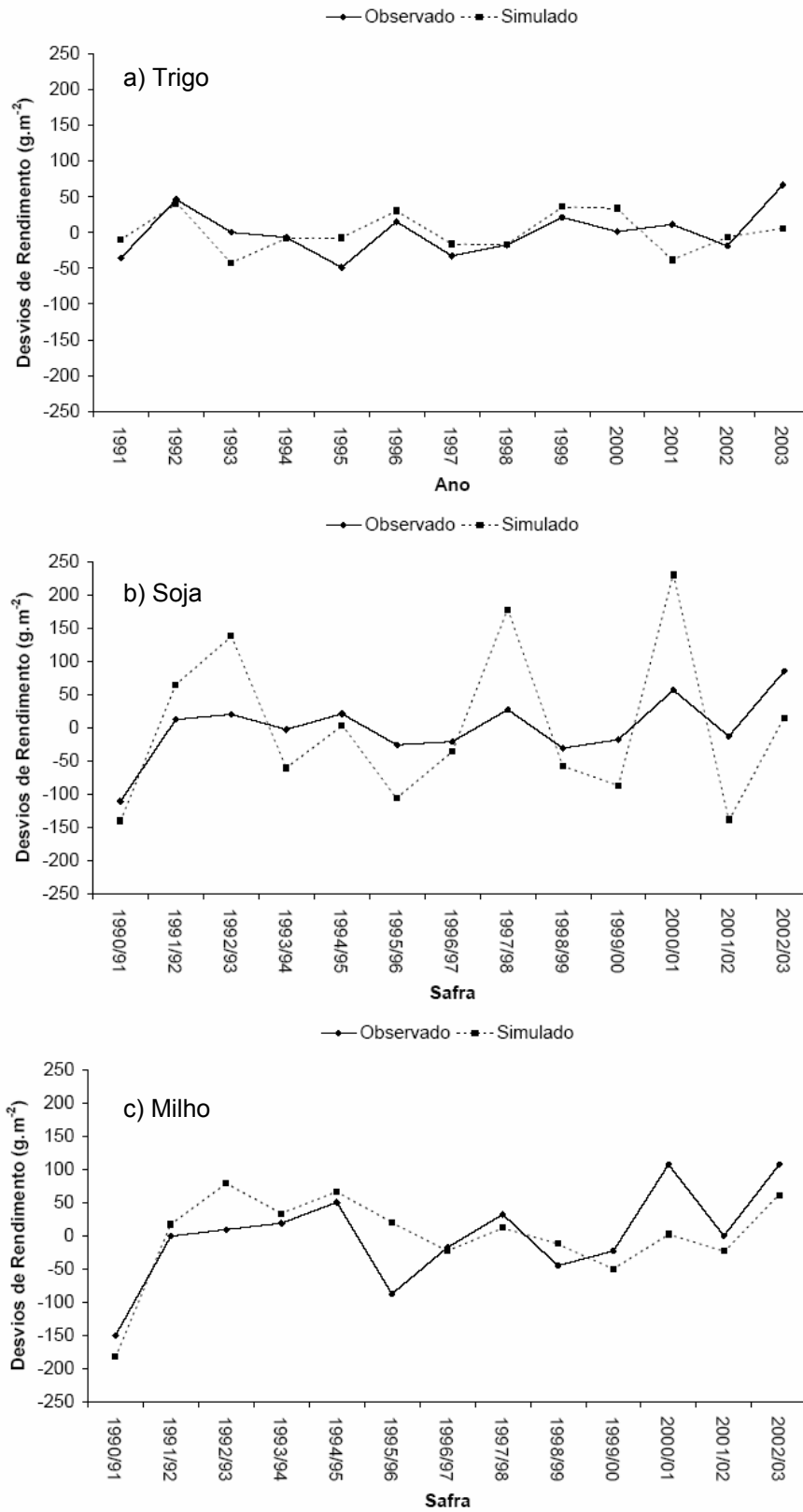


Figura 1 – Resíduos observados e simulados de rendimento de trigo, soja e milho. Santa Maria, RS, 1990 - 2003.

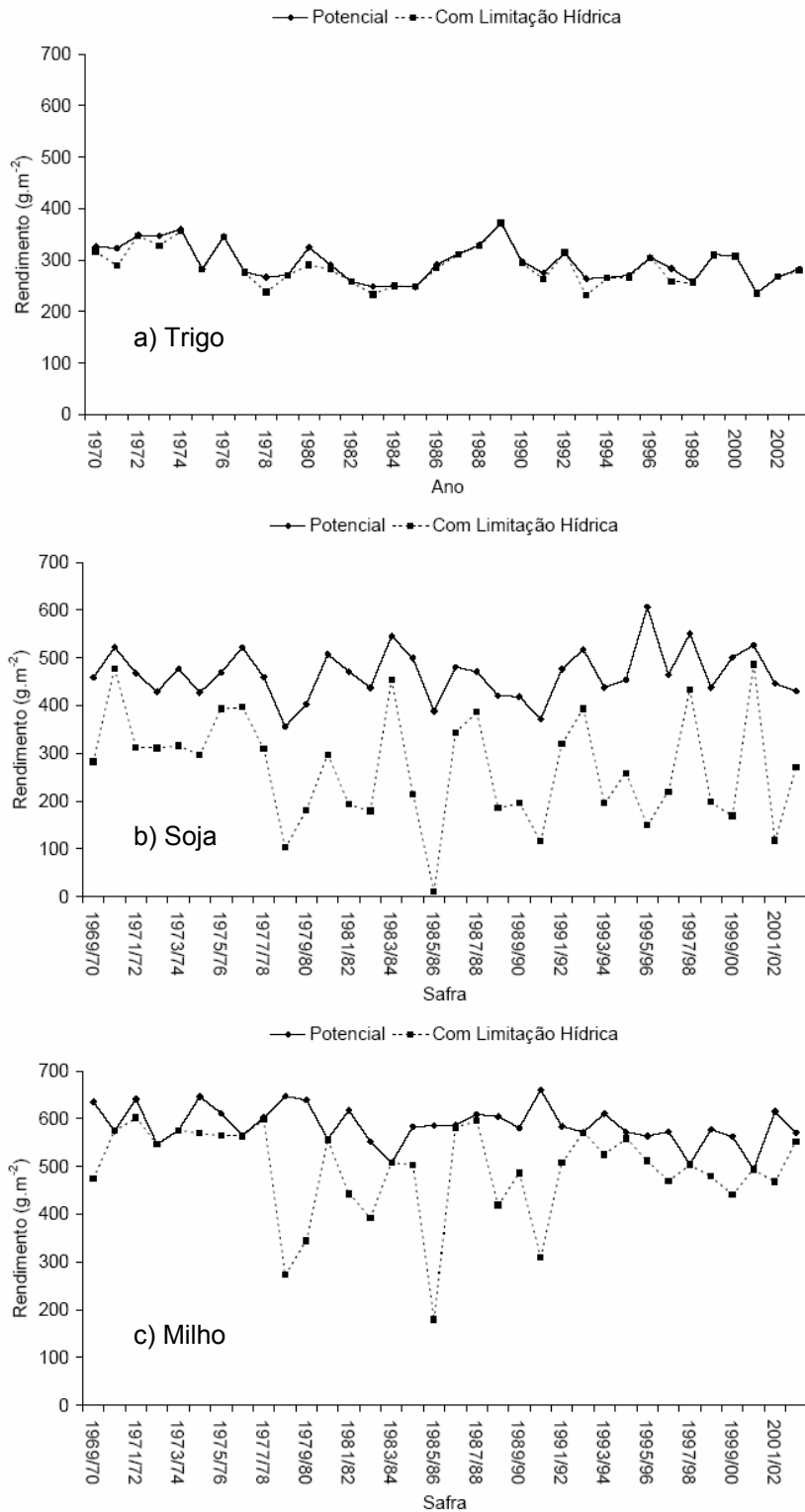


Figura 2 – Variabilidade interanual do rendimento de grãos de trigo , soja e milho simulado para as condições potencial e com limitação hídrica. Santa Maria, RS, 1969 a 2003.

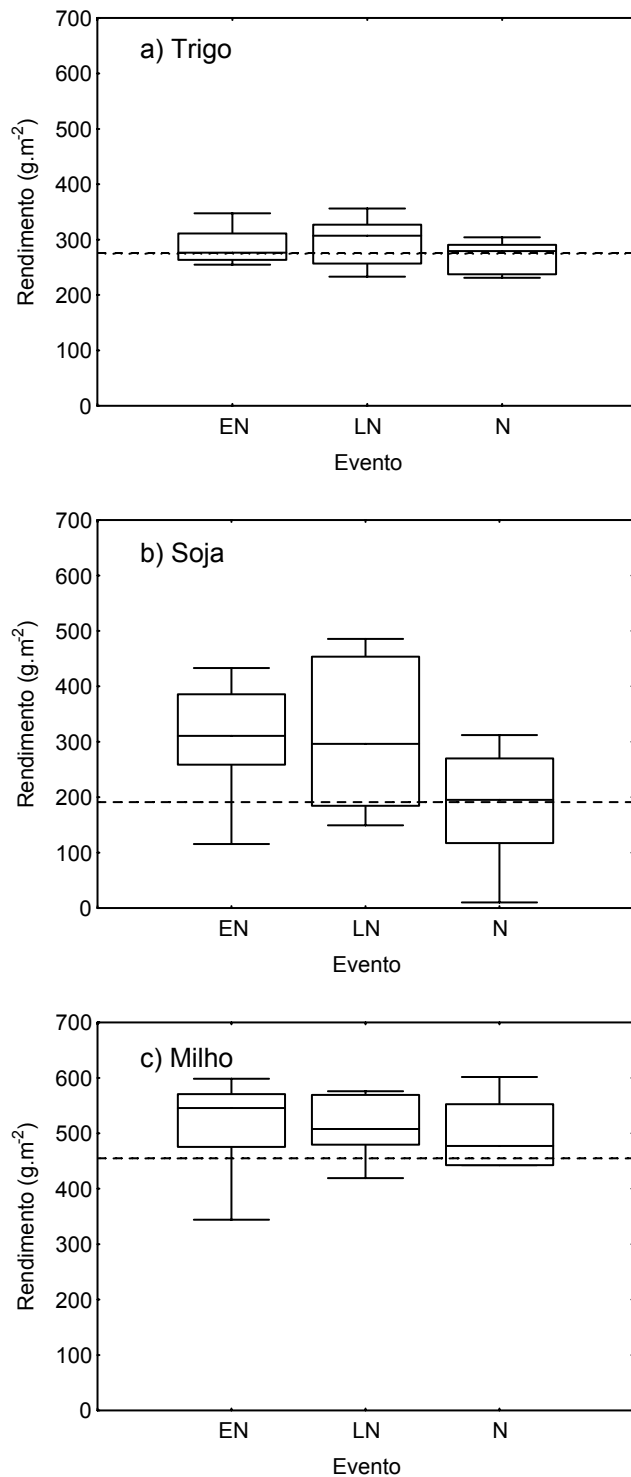


Figura 3 – Distribuição do rendimento de grãos de trigo, soja e milho, no período de 1969 a 2003, associado aos eventos de El Niño (EN), La Niña (LN) e neutros (N), para Santa Maria, RS, Brasil. A linha cheia horizontal no interior da caixa representa o percentil de 50 (mediana); a linha tracejada representa a média dos anos neutros; o final das caixas os percentis de 25 e 75; as barras os percentis de 10 e 90.

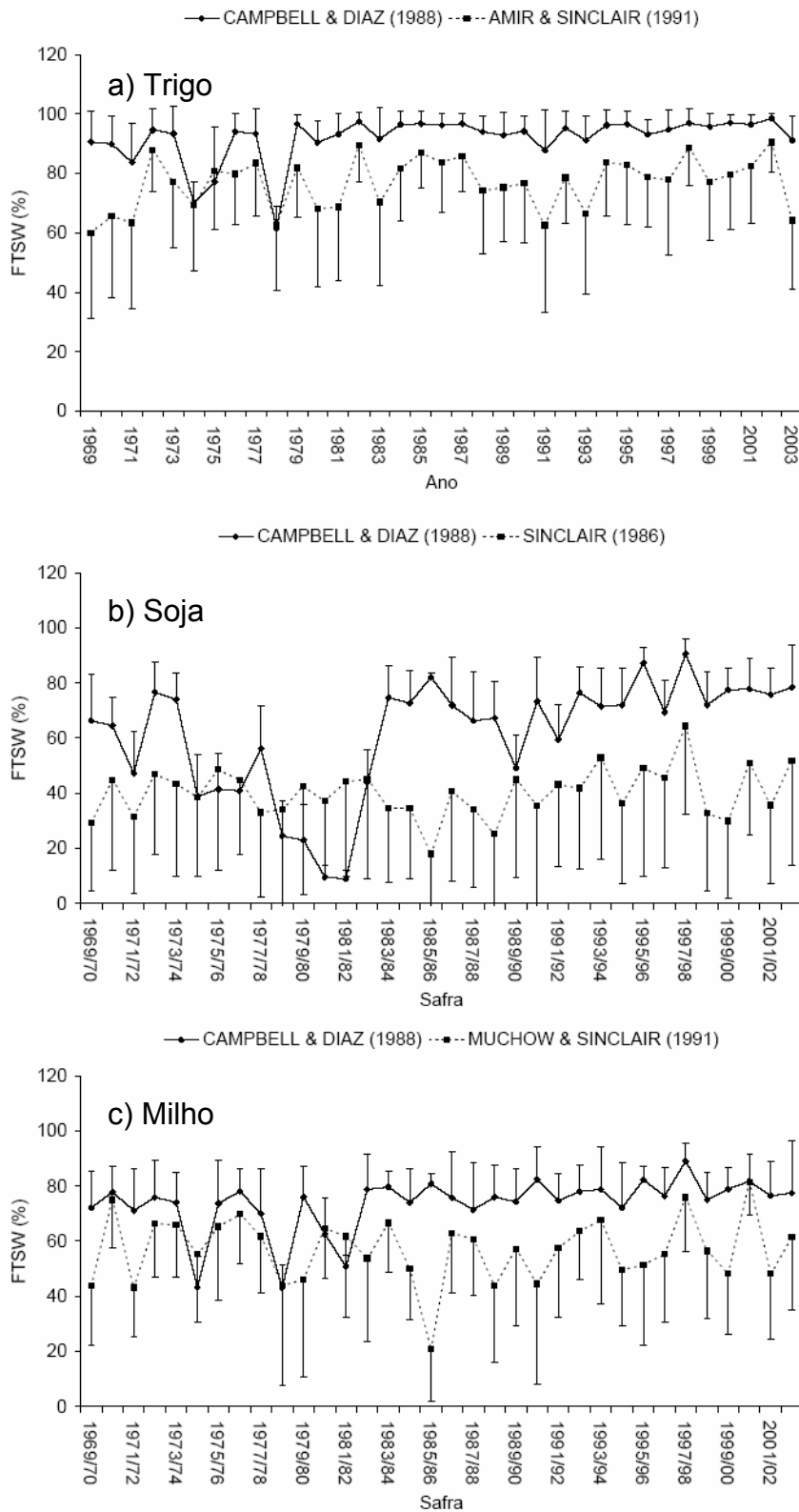


Figura 4 – Média anual e desvio padrão da fração percentual de água transpirável no solo (FTSW) simulada para as culturas do trigo, soja e milho, Santa Maria, RS, no período de 1969-2003. Cada ponto corresponde à média de FTSW do período entre a semeadura e a maturação fisiológica da cultura.

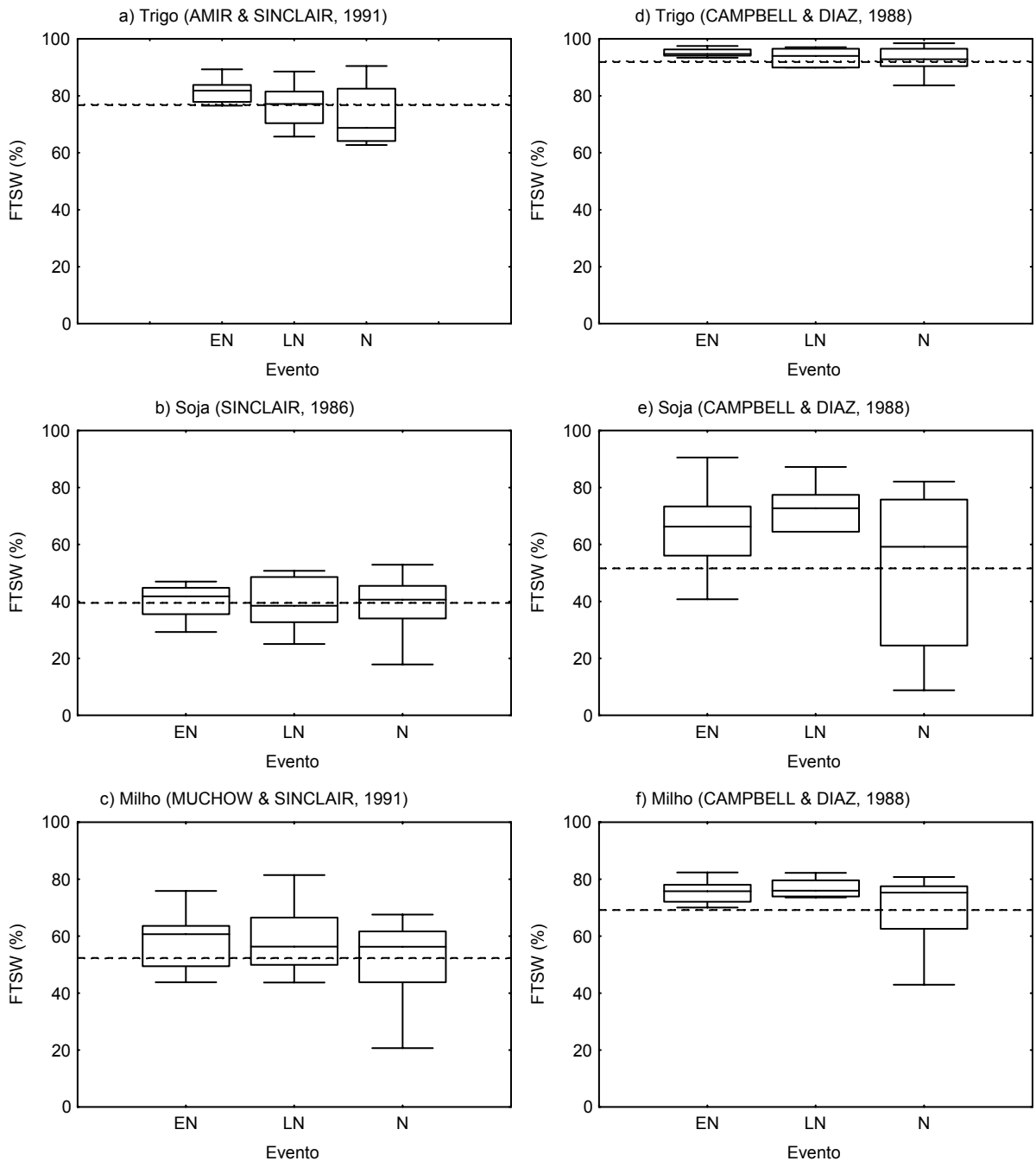


Figura 5 – Distribuição da fração percentual de água transpirável no solo (FTSW) no período de 1969 a 2003, associado aos eventos de El Niño (EN), La Niña (LN) e neutros (N), para as culturas do trigo, soja e milho, Santa Maria, RS, Brasil. A linha cheia horizontal no interior da caixa representa o percentil de 50 (mediana); a linha tracejada representa a média dos anos neutros; o final das caixas os percentis de 25 e 75; as barras os percentis de 10 e 90. Os valores de FTSW correspondem ao período entre semeadura e maturação fisiológica das culturas.

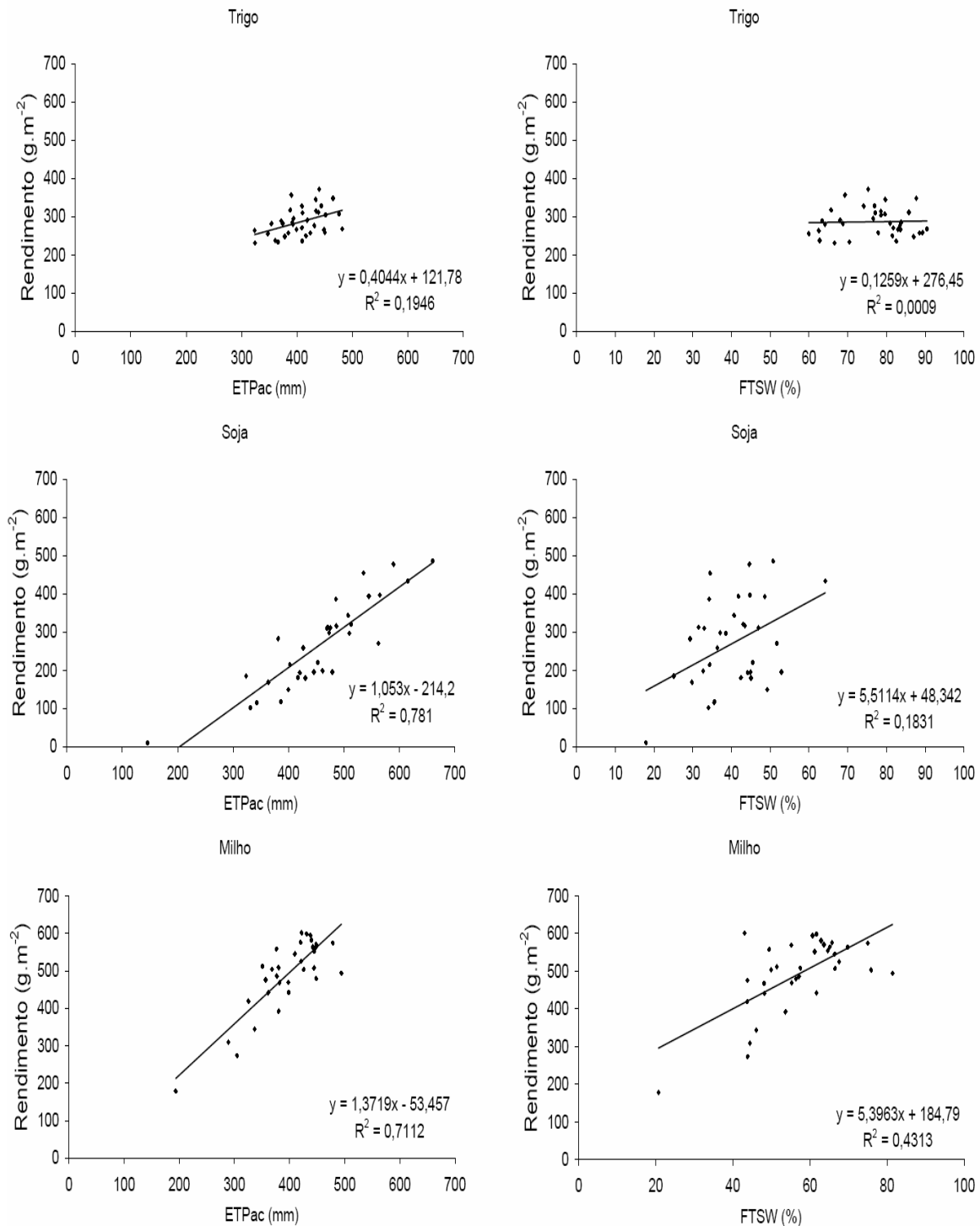


Figura 6 – Relação entre rendimento de grãos (g.m⁻²) e evapotranspiração acumulada (ETPac) e, rendimento e fração de água transpirável no solo (FTSW) durante o ciclo de desenvolvimento das culturas de trigo, soja e milho para o período de 1969-2003, Santa Maria, RS. Cada ponto corresponde ao valor de ETPac e FTSW da sementeira à maturação fisiológica das culturas.

CAPÍTULO II

**SIMULANDO O IMPACTO DA MUDANÇA CLIMÁTICA SOBRE A
ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO E O RENDIMENTO DE
AGROECOSSISTEMAS DE TRIGO, SOJA E MILHO EM SANTA MARIA,
RS.**

**SIMULATING THE IMPACT OF THE CLIMATE CHANGE ON THE
FRACTION OF TRANSPIRABLE SOIL WATER AND YIELD OF WHEAT,
SOYBEAN, AND MAIZE AGROECOSSYSTEMS IN SANTA MARIA, RS,
BRAZIL.**

RESUMO

A concentração de CO₂ da atmosfera terrestre está aumentando devido à atividades humanas. Como resultado do aumento da concentração de CO₂ atmosférico, a temperatura média do ar do Planeta poderá aumentar no futuro devido ao efeito estufa do CO₂ atmosférico. O impacto de uma possível mudança climática sobre a água disponível e o rendimento em agroecossistemas é um assunto de interesse científico e político. O objetivo deste estudo foi simular a fração de água disponível no solo e o rendimento de trigo, soja e milho em diferentes cenários climáticos para Santa Maria, RS. Foram criados cenários meteorológicos dobrando-se a quantidade de CO₂ com diferentes aumentos de temperatura do ar e com e sem aumento de precipitação pluviométrica. A água disponível no solo e o rendimento das culturas foram calculados com modelos matemáticos disponíveis na literatura. A água disponível no solo para as plantas foi representada pela fração de água transpirável no solo pelas plantas (FTSW). Os resultados mostraram que o aumento de temperatura diminui mais o rendimento do

trigo e milho do que da soja e, a diminuição na FTSW afeta mais as culturas de verão (milho e soja) do que a cultura do trigo.

Palavras-chave: mudança climática, agricultura, balanço hídrico do solo.

ABSTRACT

Human activities have been blamed to increase the CO₂ concentration of the Earth's atmosphere. Earth temperature may increase in response to increasing CO₂ concentration. The impact of the projected climate change on soil water and agroecosystems yield is an important and relevant issue both from a scientific and political viewpoint. The objective of this study was to simulate the soil water and the yield of wheat, soybean and maize under climate change scenarios at Santa Maria, RS. Air temperature and rainfall were modified to create climate change scenarios. Soil water and crop yield were simulated with models available in the literature. The results showed that the increase in air temperature decreases more wheat and corn yield than soybean yield. The fraction transpirable of soil water affects more soybean and maize yield than wheat yield.

Key words: climate change, agriculture, soil water budget.

INTRODUÇÃO

A concentração de CO₂ da atmosfera terrestre está aumentando, como resultado direto das atividades humanas, a uma taxa de 0,4-0,5% ano⁻¹ (IPCC, 1995; SOMBROEK & GOMMES, 1996), o que corresponde a um aumento de 1,0 – 1,8 μmol CO₂ mol⁻¹ ano⁻¹ (ROSENBERG et al., 1983; IPCC, 1995; UNSWORTH AND HOGSETT, 1996). Conseqüentemente, espera-se que a concentração de CO₂ atmosférico no final deste século seja o dobro da atual (360 μmol mol⁻¹). Como resultado do aumento da concentração de CO₂ atmosférico, a temperatura média do ar do Planeta deverá aumentar neste período devido ao efeito estufa do CO₂ atmosférico (ROSENBERG et al., 1983; IPCC, 1995). Estudos de HILLEL & ROSENZWEIG (1989) apontam elevações na temperatura do ar em torno de 1°C desde o ano 1880 e, citam a década de 1980 como período de maior aquecimento até o presente. Embora o aumento na temperatura global previsto para o futuro devido ao aumento de CO₂ atmosférico ainda seja um assunto em debate, estudos numéricos com modelos de circulação geral da atmosfera (GCM – General Circulation Models) indicam que é bastante provável que se verifique um aumento de 1 a 6°C na temperatura média do ar até o final deste século em vários locais do Planeta (WILSON & MITCHELL, 1987; HANSEN et al., 1988; IPCC, 1995; MITCHELL et al., 1995; MAHLMAN, 1997; IPCC, 2001), incluindo o Brasil (SIQUEIRA et al., 1994, 2000). Outros elementos meteorológicos como precipitação, nebulosidade, radiação solar incidente e evaporação apresentam tendências variáveis em função da escala (global ou regional) em que as séries meteorológicas são analisadas e os modelos são usados (HULME et al., 1994; THOMAS, 2000; SIQUEIRA et al., 2001).

A possível mudança do clima terrestre projetada para o futuro, devido a atividades humanas que aumentam a injeção de CO₂ na atmosfera (EVANS, 1996), pode afetar os componentes do ciclo hidrológico de ecossistemas terrestres e conseqüentemente a disponibilidade de recursos hídricos e os períodos de estiagem e enchente. O conteúdo de água no solo influencia diretamente a quantidade de água disponível para as culturas, o que por sua vez afeta o seu desenvolvimento,

crescimento e rendimento e a necessidade de irrigação. No Estado do Rio Grande do Sul, assim como em outros Estados do Brasil, agroecossistemas são predominantemente não irrigados.

Em agroecossistemas não irrigados, a disponibilidade de água para a cultura depende, entre outros fatores, da quantidade de água armazenada no solo e oriunda da precipitação pluviométrica. Como as culturas tem diferente eficiência de uso da água disponível no solo, é importante o estudo do balanço hídrico do solo em agroecossistemas com diferentes sistemas de cultivo.

Em plantas, o aumento de $[CO_2]$ atmosférico causa um aumento da taxa de crescimento, pois o CO_2 é o substrato primário para fotossíntese (ROSENBERG et al., 1983; TAIZ & ZEIGER, 1991). Plantas com metabolismo C_3 são mais beneficiadas pelo aumento de $[CO_2]$ atmosférico do que plantas com metabolismo C_4 (SIQUEIRA et al., 2001; TUBIELLO et al., 2000; STRECK, 2005). Em geral, estudos indicam que se a $[CO_2]$ dobrar em relação a $[CO_2]$ atual, deverá ocorrer um aumento médio de 30% e 10% no rendimento de culturas do grupo C_3 e C_4 , respectivamente (ALLEN, 1979; CURE & ACOCK, 1986; KIMBALL, 1983; IDSO et al., 1987; BAKER et al., 1989; CLIFFORD et al., 1993; KIMBALL et al., 1995; RUDORFF et al., 1996; UNSWORTH & HOGSETT, 1996; USUDA & SHIMOGAWARA, 1998). No entanto, se o aumento da $[CO_2]$ for acompanhado de aumento da temperatura do ar, poderá não haver aumento no crescimento e rendimento das culturas devido, principalmente devido ao encurtamento do seu ciclo (WIEGAND & CUELLAR, 1981; SIONIT et al., 1987; HUNT et al., 1991; BUTTERFIELD & MORISON, 1992; SHAYKEWICH, 1995) e aumento da respiração (fotorrespiração e fase escura da respiração) do tecido vegetal (ROSENBERG et al., 1983; LONG, 1991; TAIZ & ZEIGER, 1991; VU et al., 1997).

Análises de impacto do tempo meteorológico e do clima durante longo período de tempo cronológico sobre a agricultura são importantes a nível regional, estadual e nacional devido ao seu impacto social e econômico. No entanto, estes estudos são difíceis de serem realizados experimentalmente devido a limitação de equipamentos, mão-de-obra e recursos financeiros (ANDRESEN et al., 2001). Além disso, é difícil controlar alguns fatores experimentalmente e as respostas da planta são afetadas por

condições meteorológicas que variam no espaço e no tempo, ou seja, são diferentes de um local para outro e, em um mesmo local, variam a cada dia.

Modelos matemáticos são uma simplificação da realidade que nos permitem descrever as complicadas interações que existem em agroecossistemas e assim tornar possível o estudo do impacto de mudanças nos elementos meteorológicos e no clima sobre agroecossistemas. Existem vários modelos de simulação de rendimento das culturas de trigo, milho e soja na literatura, desde modelos mecanísticos de elevada complexidade e número de coeficientes (STAPPER & HARRIS, 1989) até modelos empíricos simples (MONTHEITH & SCOTT, 1982). Numa faixa intermediária de complexidade e número de coeficientes estão os modelos mecanísticos simplificados, que utilizam um reduzido número de informações, são compostos por funções matemáticas robustas e podem ser usados para diversas situações, sendo intermediários entre modelos de regressão e modelos complexos. Os modelos de Sinclair e colaboradores (SINCLAIR, 1986; AMIR & SINCLAIR, 1991; MUCHOW & SINCLAIR, 1991), se enquadram neste último tipo de modelo e foram utilizados neste estudo.

O trigo é a principal cultura de inverno (BERLATO & FONTANA, 2003), enquanto que a soja e o milho são as principais culturas de sequeiro de verão do Estado do Rio Grande do Sul (SIQUEIRA et al., 1994). Assim, este trabalho teve por objetivo avaliar o impacto da possível mudança climática sobre o balanço de água do solo e o rendimento das culturas do trigo, soja e milho em Santa Maria, RS.

MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo numérico foi realizado para as condições de Santa Maria, RS, Brasil (latitude: 29°43'S, longitude: 53°42'W e altitude: 95m). O clima da região, conforme classificação de Köppen, é do tipo Cfa subtropical úmido com verões quentes e sem estação seca definida (MORENO, 1961). Foram utilizados dados diários de temperatura máxima (Tx, em °C) e mínima (Tn, em °C), brilho solar (h) e precipitação (PP, em mm) coletados na Estação Climatológica Principal do 8º DISME/MA localizada no campo experimental do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria durante o período de 1969 a 2003.

A densidade de fluxo de radiação solar global incidente, necessária nos modelos matemáticos de simulação do rendimento das culturas e da água disponível no solo, usados neste estudo e descritos adiante, foi estimada a partir do brilho solar pela equação de Angstrom com coeficientes mensais para Santa Maria apresentados em ESTEFANEL et al. (1990).

O solo considerado na simulação foi o solo da unidade de mapeamento São Pedro, um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico Arênico (EMBRAPA, 1999), representativo da região. Os valores do conteúdo de água no solo, nas diferentes camadas de solo, no ponto de murcha permanente (PMP) e na capacidade de campo (CC), necessários nos modelos, estão na Tabela 1. O conteúdo de água disponível para as plantas foi representado pela fração percentual de água transpirável no solo pelas plantas (FTSW):

$$FTSW = [(CA - PMP)/(CC - PMP)] * 100 \quad (1)$$

onde, CA é o conteúdo atual de água no solo ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$).

A FTSW foi simulada pelo modelo de CAMPBELL & DIAZ (1988) para as culturas do trigo, soja e milho. Neste modelo o solo é dividido em seis camadas. A profundidade da primeira camada é de 0,15 m e a profundidade das demais camadas é definida de acordo com a profundidade máxima do sistema radicular de cada cultura foi de 1,2 m, 0,7 m e 1,2 m, para as culturas do trigo, soja e milho, respectivamente. A FTSW foi simulada também pelos modelos de AMIR & SINCLAIR (1991), MUCHOW & SINCLAIR (1991) e SINCLAIR (1986), para as culturas de trigo, soja e milho, respectivamente,

As datas de maturação fisiológica de cada cultivo, necessárias no modelo de CAMPBELL & DIAZ (1988), foram obtidas através dos modelos de desenvolvimento e crescimento de AMIR e SINCLAIR (1991) para o trigo, SINCLAIR (1986) para a soja e MUCHOW & SINCLAIR (1991) para o milho.

O rendimento do trigo foi calculado através do modelo de AMIR & SINCLAIR (1991). Neste modelo é considerado o rendimento em função da possível restrição hídrica no solo.

No modelo de AMIR & SINCLAIR (1991) o desenvolvimento da cultura do trigo é dividido em três fases: emergência – crescimento da haste principal, crescimento da haste principal – antese, e enchimento de grãos, com duração de 1243, 212 e 585

°C.dia, respectivamente. Entre a antese e o início do enchimento de grãos há um intervalo de 90 °C.dia. Para o cálculo da soma térmica, em graus-dia (°C.dia), a temperatura base (T_b) utilizada foi de 0°C e a temperatura média diária (T) foi calculada a partir da média aritmética da T_n e T_x diária.

O número final de folhas na haste principal e o acúmulo térmico entre o aparecimento de duas folhas sucessivas (filocrono) do trigo, necessários para o modelo de AMIR & SINCLAIR (1991), foram de 11 folhas e 113 GD, respectivamente, para a cultivar BRS 179 (BOSCO et al., 2004), genótipo de trigo cultivado pelos agricultores da região Sul do Brasil.

As datas de término de crescimento folhar e início do enchimento de grão foram simuladas para a cultivar Bragg com o modelo não-linear de resposta do desenvolvimento à temperatura e fotoperíodo proposto por SINCLAIR et al. (1991). Assim, utilizaram-se dados da mesma cultivar Bragg publicados em SCHNEIDER et al. (1984), onde o término do crescimento folhar corresponde ao dia de estágio de desenvolvimento 1,0 e o início do enchimento de grão corresponde ao dia de estágio 1,8 do modelo de SINCLAIR et al. (1991).

O rendimento do milho com restrição hídrica no solo foi calculado através do modelo de MUCHOW & SINCLAIR (1991).

A data de semeadura e os sistemas de cultivos adotados neste estudo numérico estão na Tabela 2. Estas datas foram selecionadas em função da época recomendada para as três culturas na região central do Rio Grande do Sul (EMBRAPA, 2004).

Considerou-se que, durante o período de pousio, não havia vegetação em crescimento ativo sobre a superfície do solo e os restos culturais permaneceram sobre a superfície após a colheita.

O dia da colheita de cada cultivo foi considerado como sendo o dia após àquele em que o acúmulo térmico de 233 °C.dia ($T_b = 5^\circ\text{C}$) após a maturação fisiológica (HAMADA et al., 1999). Caso tenha ocorrido precipitação acima de 5 mm no dia em que os 233 °C.dia foram completados, esperou-se dois dias após o último dia de chuva para o dia da colheita.

O cálculo da decomposição dos restos culturais após a colheita foi baseado nas equações propostas por GHIDEY et al. (1985):

$$\text{Trigo: } (M/M_o)^{1/2} = 1,000 - 0,002101*(\tau) \quad (2)$$

$$\text{Milho: } (M/M_o)^{1/2} = 0,998 - 0,0011792*(\tau) \quad (3)$$

$$\text{Soja: } (M/M_o)^{1/2} = 0,947 - 0,0013706*(\tau) \quad (4)$$

onde, M é a massa de resíduo atual, M_o é a massa de resíduo inicial e τ é a variável independente calculada por:

$$\tau = T.t.A_m / C/N \quad (5)$$

onde, T é a temperatura média diária (°C), t é o tempo (em dias, após a colheita), A_m é um índice de umidade, calculado pelo algoritmo apresentado em LIGON & JOHNSON (1960), e (C/N) é a relação C/N inicial da massa de resíduo inicial. A relação C/N do resíduo sobre a superfície foi de 107, 30,8 (GHIDEY et al., 1985) e 55,5 (BERTOL et al., 2004), para as culturas do trigo, soja e milho, respectivamente.

Admitiu-se a completa decomposição do resíduo de trigo quando restasse na superfície 10% da quantidade de resíduo inicial na colheita sobre a superfície (BERTOL et al., 2004). O período de decomposição foi definido como o período entre duas colheitas sucessivas. No final do período de decomposição a quantidade de resíduo não decomposta, se superior a 10 % da quantidade de resíduo inicial, é acrescentada ao resíduo resultante da última colheita.

A presença de resíduo sobre a superfície resulta na atenuação da perda de água por evaporação. A diminuição da evaporação de água do solo proporcionada pelos resíduos culturais foi calculada pela equação proposta por GILL & JALOTA (1996):

$$E_{om}/E_o = 1.061e^{-(0.0281.MR + 0.022.Eo)} \quad (5)$$

onde, E_{om} é a evaporação atual do solo (mm.dia⁻¹), E_o é a evaporação potencial do solo (mm.dia⁻¹) e MR é a massa residual sobre a superfície (Mg.ha⁻¹).

Os cenários climáticos para os próximos 100 anos utilizados na simulação estão na Tabela 3. Estes cenários foram criados com base em trabalho realizado por SIQUEIRA et al. (2001). Foi considerado um incremento de CO₂ de 350ppm (situação atual –SIQUEIRA et al., 2000) até 700 ppm (mudança climática - IPCC, 1995). Este incremento de CO₂ atmosférico foi efetuado de forma linear do início ao final dos 100 anos. O cenário sem mudança climática, projetada para 100 anos, foi criado com o

weather generator LARS-WG (SEMENOV et al., 1998) utilizando como base dados observados o período de 01/01/1969 a 31/12/2003 e um “rand seed” de 577. Os aumentos de temperatura e precipitação propostas pelos diferentes cenários foram efetuados linearmente, sendo que o aumento total de temperatura só ocorreu no final do período de 100 anos. O aumento linear de temperatura, eficiência no uso de radiação (EUR) e precipitação pluviométrica para cenários de mudança climática foram criados a partir de algoritmo escrito em SAS. Optou-se em usar o SAS já que um teste preliminar revelou que o LARS-WG cria cenários de mudança climática aumentando ou diminuindo o valor dos elementos meteorológicos sobre o cenário sem mudança climática. Como considerou-se um aumento de temperatura e precipitação pluviométrica na escala anual, para cada cenário seria necessário rodar 100 vezes o LARS-WG, o que com o SAS foi realizado através de um único algoritmo, um único “run” e, portanto mais rápido.

A resposta das culturas ao aumento de CO₂ atmosférico foi considerada modificando-se a eficiência do uso de radiação e a eficiência do uso da água (EUA). A modificação na EUA foi realizada através da redução da transpiração pelas culturas em ambiente com elevado CO₂ (GOTTSCHALCK et al., 2001). Para o cálculo da biomassa e rendimento do trigo a EUR utilizada foi de 0,9 g.MJ⁻¹ (MOREIRA et al., 1999) para o cenário sem mudança climática. Utilizou-se aumento total de 25% na EUR para as culturas do trigo e soja e de 10% para cultura do milho (TUBIELLO et al., 2001). A transpiração foi reduzida em 23% para o trigo (CURE & ACOCK, 1986) e, 38 e 40% para as culturas de soja e milho, respectivamente (GOTTSCHALCK et al., 2001). O aumento total na EUR e na EUA só ocorreu no final do período de simulação quando a concentração de CO₂ atingiu 700 ppm, o dobro da atual.

O teste estatístico para verificar se o cenário sintético de 100 anos tem as mesmas estatísticas da série de dados observados foi realizado pelo programa LARS-WG. Para análise da tendência da série de dados meteorológicos observados e dos cenários de mudança climática foi utilizado o teste não paramétrico de Kendall tau que testa a significância das tendências (SIEGEL, 1975). Os rendimentos de trigo, soja e milho durante o período de 1990 a 2003 foram obtidos do site <http://www.conab.gov.br> e é equivalente a média de rendimento de todo o Estado do Rio Grande do Sul. Estes

dados foram utilizados para testar os modelos de rendimento das culturas usados no estudo. Foram calculados os resíduos de rendimento simulado e observado como sendo a diferença entre rendimento da safra e a média do período (1990-2003). A comparação entre a média de rendimento simulado e observado foi efetuado através do Teste-t Pareado, metodologia esta utilizada em outros trabalhos científicos que tratam de assunto abordado neste trabalho (ANDRESEN et al., 2001). A hipótese H_0 é que as médias dos rendimentos simulado e observado não diferem entre si, enquanto a hipótese alternativa H_1 é que a média dos rendimentos simulados difere da média dos rendimentos observados. Além do Teste t pareado, foi realizado também o teste não paramétrico de Spearman R (SIEGEL, 1975) entre média de resíduos simulados e observados.

Optou-se em não realizar a correção dos rendimentos observados em função da mudança tecnológica nos 12 anos de dados observados, metodologia usualmente empregada em séries longas (BERLATO & FONTANA, 1999; CUNHA et al., 1999; ANDRESEN et al., 2001), por se tratar de uma série temporal curta e, portanto, assumiu-se que a mudança tecnológica não afetou o rendimento de grãos das culturas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 são apresentados alguns dos cenários climáticos gerados e utilizados no estudo, como os cenários sem aumento de temperatura e com aumento de 3 e 6°C na temperatura média anual (Figura 1a) e os cenários sem e com aumento de precipitação pluviométrica acumulada anual (Figura 1b). Nota-se um aumento gradual dos dois elementos meteorológicos até atingir o aumento no final do século. Os outros cenários de aumento de temperatura foram intermediários entre sem e com aumento de temperatura de 6°C.

A diferença entre as médias de rendimento simulados e observados não diferiu significativamente pelo Teste-t Pareado ($P = 0.05$) para as culturas do trigo, soja e milho. Isto significa que os modelos de simulação de rendimento das culturas simulam satisfatoriamente a tendência dos rendimentos anuais das culturas e, portanto, podem ser usados para a finalidade do presente estudo (ANDRESEN et al., 2001). De modo geral a amplitude das médias de rendimento residual simuladas é maior do que as

médias de rendimento residual observado (Figura 2). Isto é esperado, pois os dados observados são o rendimento médio de uma região (Estado do Rio Grande do Sul), enquanto que os dados simulados pelos modelos matemáticos são pontuais para um local (ANDRESEN et al., 2001). A correlação entre rendimento observado e simulado pelo teste de Spearman R para as culturas do trigo, soja e milho foi de 0,51 ($p=0,074$), 0,79 ($p=0,001$) e 0,56 (0,044), respectivamente, valores que foram considerados suficientes para rejeitar a hipótese H_0 (correlação não significativa) e concluiu-se que os modelos de simulação de rendimento das três culturas são apropriados para o presente estudo, pois os rendimentos simulados seguem a mesma ordem de ranqueamento dos rendimentos simulados. Este fato pode ser observado na Figura 2, onde a maioria dos desvios negativos e positivos de rendimento de grãos simulados e observados coincidem.

O modelo de CAMPBELL & DIAZ (1988) simulou valores de FTSW, na grande maioria das vezes, maior do que os simulados pelos modelos de AMIR & SINCLAIR (1991b), MUCHOW & SINCLAIR (1991) e SINCLAIR (1986) para as culturas de trigo soja e milho, respectivamente, (Figuras 3 e 4). O efeito da mudança climática sobre a FTSW foi variável em função do cenário, da cultura e do modelo matemático usado, como mostram os valores de coeficiente de correlação do teste de Kendall Tau entre FTSW e anos (Tabela 4). O aumento de FTSW foi significativo para a cultura do trigo nos cenários de até mais 4°C com aumento de precipitação pluviométrica (cenários 8, 9, 10 e 11), para a cultura da soja até 3°C sem aumento na precipitação pluviométrica ou até 5°C com aumento na precipitação pluviométrica (cenários 2, 3, 4, 8, 9, 10, 11 e 12) e para a cultura do milho em em todos os cenários de mudança climática. Já a FTSW calculada pelos modelos de Tom Sinclair e colaboradores geralmente apresentaram tendência de diminuição com aumento de temperatura (Tabela 4), mas apenas para o trigo no cenário de mais 6°C (cenário 7) e milho nos cenários de mais 5 e 6°C (cenário 7, 8 e 13) estas tendências foram significativas ($p < 0,01$).

Em todos os modelos a FTSW apresentou tendência de diminuição da correlação, tornando-a mais negativa com o aumento de temperatura, porém, a FTSW calculada pelo modelo de CAMPBELL & DIAZ (1988) apresentou correlações positivas e a FTSW simulada pelos modelos propostos por Tom Sinclair e colaboradores as

correlações foram negativas. Isto se deve à estrutura e conceitualização diferentes destes dois modelos. Nos modelos propostos por Tom Sinclair e colaboradores, a transpiração e a evaporação são calculadas de forma separada e, a diminuição na transpiração promovida pelo aumento de CO₂ atmosférico não é suficiente para promover o aumento de FTSW em cenários com aumento de CO₂ e temperatura. No modelo de CAMPBELL & DIAZ (1988) a evaporação e a transpiração são calculadas a partir da evapotranspiração potencial. Os valores de evapotranspiração potencial calculados pelo algoritmo proposto no modelo de CAMPBELL & DIAZ (1988) subestima a evapotranspiração real em temperaturas mais elevadas (LAGO et al., 2004), fazendo com que a FTSW seja superior ao cenário sem mudança climática, devido à diminuição na transpiração ocasionada pelo aumento de CO₂ atmosférico.

A simulação do rendimento de grãos de trigo para o cenário sem mudança climática evidenciou um pequeno acréscimo no rendimento do trigo (Figura 5), porém não significativo ($p < 0,01$) pelo Teste de Kendall tau (Tabela 5). Esta tendência de acréscimo de trigo se deve ao fato do LARS-WG ter gerado valores de temperatura do ar decrescentes para os meses de junho, agosto e setembro ao longo dos 100 anos (Figura 7), período em que a cultura do trigo se desenvolve na região. MARENGO (2001) também relata decréscimo na temperatura média do trimestre junho–julho–agosto no Rio Grande do Sul, no período de 1960 a 2000, indicando que o cenário gerado pelo LARS-WG de decréscimo na temperatura durante o inverno em Santa Maria é realístico. Temperaturas mais baixas aumentam a duração do ciclo de desenvolvimento da planta, aumentando a quantidade de radiação interceptada e a fotossíntese e, conseqüentemente, a biomassa e o rendimento das culturas (BUTTERFIELD & MORISON, 1992; STRECK, 2005).

Nos cenários com mudança climática, um aumento de temperatura de 3 e 4°C (cenários 4, 5, 10 e 11) anularam os efeitos positivos do aumento de CO₂ sobre o rendimento de grãos de trigo. Um aumento de CO₂ e de temperatura de 2°C tanto com como sem aumento de precipitação pluviométrica (cenários 2, 3, 8 e 9) promoveu um aumento no rendimento de grãos de trigo (Tabela 5). Já um aumento de 5 e 6°C (cenários 6, 7, 12 e 13) diminuíram o rendimento de grãos de trigo ($p < 0,01$). Isto,

demonstra os efeitos favoráveis do aumento de CO₂ cultura do trigo para aumentos na temperatura do ar de até 2°C e os efeitos deletérios de aumentos acima de 5°C.

Para a cultura da soja, houve correlação significativa e positiva ($p < 0,01$) entre rendimento de grãos e anos apenas para o cenário 8 (aumento de CO₂ sem aumento de temperatura e com aumento na precipitação pluviométrica). Já para a cultura do milho, o rendimento de grãos simulado teve correlação positiva significativa ($p < 0,01$) com anos nos cenários 2 e 8, ou seja, aumento de CO₂ sem aumento na temperatura do ar. Aumentos de temperatura de 2 e 3°C (cenários 3, 4, 9 e 10) tendem a anular o efeito positivo do aumento de CO₂ no rendimento de grãos de milho, enquanto que aumentos de 4°C ou mais (cenários 5, 6, 7, 11, 12 e 13) causam redução no rendimento de grãos de milho ($p < 0,01$).

Na Figura 8 são apresentadas as mudanças relativa no rendimento de grãos das culturas simulado para cada cenário climático em relação à média de rendimento de grãos simulada nos últimos dez anos do cenário sem mudança climática (cenário 1, Tabela 3). Para a cultura do trigo observa-se uma forte tendência de decréscimo no rendimento no final do século a medida que a temperatura aumenta, independente se a precipitação aumenta ou não. Os desvios do rendimento de trigo são positivos até um aumento de 3°C. Um aumento de temperatura do ar acima de 3°C anulam os efeitos positivos do aumento de CO₂ sobre o rendimento de trigo e causa desvios negativos no rendimento de grãos. Estes resultados concordam com STRECK (2005) que reporta que aumentos de temperatura do ar acima de 2°C podem anular os efeitos positivos do aumento de CO₂ sobre o rendimento do trigo. O menor rendimento do trigo foi obtido no cenário com aumento de 6°C na temperatura e sem mudança na precipitação pluviométrica (-0,31) e o maior rendimento foi obtido no cenário 8 (0,26).

Para a cultura da soja observou-se redução dos desvios de rendimento com aumento de temperatura, mas apenas um aumento de 6°C (cenário 7) causaria um desvio negativo (-0,01). O maior rendimento de grãos de soja em relação ao cenário sem mudança climática foi obtido nos cenário 8 (0,31). Este valor concorda com valores citados na literatura que sugerem aumento de rendimento de 10 – 53% para plantas C₃ (BERNARDE, 1991) para concentração de CO₂ equivalente ao dobro da atual.

Cenários com aumento de temperatura do ar reduziram o rendimento de grãos de milho quando comparados com o cenário que considerou somente o aumento de CO₂. (Figura 8) O maior aumento de rendimento de grãos de milho foi simulado para o cenário 8 (0,30) e a maior diminuição de rendimento de grãos foi obtido no cenário 7 (-0,36). SIQUEIRA et al. (2001) simularam uma diminuição de 17% no rendimento de grãos de milho até o ano de 2060 quando a temperatura seria 4,5°C mais elevada. A principal causa da diminuição do rendimento de grãos de milho é o encurtamento do ciclo da cultura em cenário com aumentos de temperatura (SIQUEIRA et al., 2001). No entanto, a deficiência hídrica no solo também contribui para reduzir o rendimento de grãos de milho, uma vez que no cenário com aumento de precipitação pluviométrica a redução no rendimento é um pouco menor do que se o aumento de temperatura em Santa Maria vier acompanhada de nenhuma mudança na precipitação pluviométrica (Figura 8).

Ainda existem muitas incertezas a respeito de uma possível mudança climática até o final deste século (STRECK, 2005). O aumento de CO₂ atmosférico parece ser inevitável na medida em que a queima de combustíveis fósseis não deve diminuir em nível global a curto e médio prazos especialmente após a não ratificação pelos Estados Unidos da América, o principal emissor de CO₂ do Planeta, do Tratado de Kyoto. Apesar de causar inquietação, angústia e indignação em grande parte da população deste Planeta, a injeção de CO₂ na atmosfera terrestre pode ser altamente benéfica para a agricultura, já que a atual concentração de CO₂ do planeta (em torno de 360 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) é insuficiente para saturar a ribulose 1,5 – bifosfato carboxilase (Rubisco), a enzima responsável pela carboxilação primária em plantas C3 (BOWES, 1991; TAIZ & ZEIGER, 1991). A fotossíntese em plantas C3 aumenta até uma concentração de CO₂ de 800 – 1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ (AMTHOR, 2001). A grande dúvida é, no entanto, se o aumento de CO₂ vier acompanhado de aumento de temperatura e de modificação em outros elementos meteorológicos, até que ponto estas modificações poderão afetar o efeito positivo do aumento de CO₂ sobre o crescimento vegetal? A comunidade científica tem se preocupado e tentado responder a estas inquietações. A limitação ainda, é que a grande maioria destes estudos é feita utilizando modelos matemáticos, que embora calibrados e testados, são uma simplificação da realidade, por mais

complexos que possam ser. Os resultados do presente estudo devem, portanto, ser interpretados como tendências e não como verdades absolutas e sem direito a contestações.

Como tendência, este estudo se une a muitos outros estudos anteriores que apontam que os efeitos positivos do aumento de CO₂ sobre o rendimento de grãos das principais culturas agrícolas podem ser anulados pelo aquecimento global, se este vier a acontecer (STRECK, 2005). Não surpreendente, medidas de adaptação para o setor primário para este futuro desafio são muito mais difíceis em países e regiões menos desenvolvidas (FUHRER, 2003; ENGVILD, 2003, STRECK 2005), o que aumenta a responsabilidade da comunidade científica na busca de alternativas tecnológicas que auxiliem na mitigação dos possíveis impactos da mudança climática sobre agroecossistemas.

CONCLUSÕES

A mudança climática projetada para os próximos 100 anos em Santa Maria, RS, influenciará o rendimento das culturas de trigo, soja e milho e o balanço de água no solo.

Aumento de CO₂ associados a aumentos de temperatura de até 6°C influenciam a diminuição do conteúdo de água no solo.

O aumento na temperatura do ar de 3°C, 6°C e 2°C pode anular os efeitos benéficos do aumento de CO₂ para as culturas de trigo, soja e milho, respectivamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, L.H. JR. Potentials for carbon dioxide enrichment. In: BARFIELD, B.J., GERBER, J.F. **Modification of the Aerial Environment of Plants**. St Joseph: American Society of Agricultural Engineering - Monograph 2, 1979. Cap. 8, p. 500-519.

AMIR, J., SINCLAIR, T.R. A model of water limitation on spring wheat growth and yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 29, n. 1, p. 59-96, 1991.

AMTHOR, J. S. Effects of atmospheric CO₂ on wheat yield : review of results from experiments using various approaches to control CO₂ concentration. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 73, p. 1-34, 2001.

ANDRESEN, J. A. et al. Weather Impacts on Maize, Soybean, and Alfafa production in the Great Lakes Region, 1895-1996. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, 1059-1070, 2001.

BAKER, J.T., ALLEN, L.H., BOOTE, K.J., et al.. Response of soybean to air temperature and carbon dioxide concentration. **Crop Science**, Madison, v. 29, n. 1, p. 98-105, 1989.

BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C. Variabilidade interanual da precipitação pluvial e rendimento da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n.1, p. 119-125, 1999.

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**. Editora da UFRGS, Porto Alegre, 2003. 110 p.

BERNARDE, M. A. **Global Warming**. John Wiley and Sons, p. 317, 1991.

BERTOL, I.; LEITE, D.; AZOLDAN JUNIOR, W. A. Decomposição de resíduo de milho e variáveis relacionadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 369-375, 2004.

BOSCO et al. Estimativa do Filocrono de algumas cultivares brasileiras de trigo. In: XVIII Jornada Acadêmica Integrada, 2004, Santa Maria, **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2004. 1 CD-ROM.

BOWES, G. Growth at elevated CO₂: photosynthesis response mediated through Rubisco. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 14, p. 795-806, 1991.

BOYER, J. S. Plant productivity and environment. **Science**, Washington, v. 218, n. 4571, p. 443-448, 1982.

BUTTERFIELD, R.E., MORISON, J.I.L. Modeling the impact of climate warming on winter cereal development. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 62, n. 3, p. 241-261, 1992.

CAMPBELL, G.S., DIAZ, R. Simplified soil-water balance models to predict crop transpiration. In: BIDINGER, F.R., JOHANSEN, C. **Drought research priorities for the dryland tropics**. Parancheru, India: ICRISAT, 1988. Cap. 2, p. 15-26.

CLIFFORD, S.C., STRONACH, I.M., MOHAMED, A.D., et al. The effects of elevated atmospheric carbon dioxide and water stress on light interception, dry matter production and yield in stands of groundnut (*Arachis hypogaea* L.). **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 44, n. 269, p. 1763-1770, 1993.

CUNHA, G.R. El Niño Oscilação Sul e perspectivas climáticas aplicadas no manejo de culturas no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n.2, p. 277-284, 1999.

CURE, J.D., ACOCK, B.. Crop response to Carbon Dioxid doubling: A literature survey. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 38, n. 1-3, p. 127-145, 1986.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 1999. Brasília: Embrapa Produção de Informações, 1999. 412p.

EMBRAPA. Indicações técnicas da Comissão Sul-Brasileira de Pesquisa de Trigo – 2004. Capturado em 20 abr. 2004. Online. Disponível na Internet <http://www.cnpt.embrapa.br/rcsbpt04/index.htm> .

EMBRAPA. **Indicações Técnicas para a Cultura de Soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2004/2005** Capturado em 20 abr. 2004. Online. Disponível na Internet http://www.cnpt.embrapa.br/i_soja.htm

ENGVILD, K. C. A review of the risks of sudden global cooling and its effects on the agriculture. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 115, p. 127-137, 2003.

ESTEFANEL, V.; SCHNEIDER, F. M.; BERLATO, M. A.; et al., Insolação e radiação solar em Santa Maria, RS: I – Estimativa da radiação solar global incidente a partir dos dados de insolação. **Revista do Centro de Ciências Rurais**. Santa Maria, v. 20, n. 3-4, p. 203-218. 1990.

EVANS, T.E. The effects of changes in world hydrological cycle on availability of water resources. In: BAZZAZ, F., SOMBROEK, W. **Global climate change and agricultural production**. New York: John Wiley & Sons, 1996. Cap. 2, p. 15-48.

FUHRER, J. Agroecosystem response to combination of elevated CO₂, ozone, and global climate change. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 97, p. 1-20, 2003.

GHIDEY, F. et al. Residue decay evaluation and prediction. **TRANSACTIONS of the ASAE**, v. 28, n. 1, 1985, p. 102-105.

GILL, B. S. & JALOTA, S. K. Evaporation from soil in relation to residue rate, mixing depth, soil texture and evaporativity. **Soil Technology**, v. 8, 1996, p. 293-301.

GOTTSCHALK, J. C., GILLIES, R. R., CARLSON, T. N. The simulation of canopy transpiration under doubled CO₂: The evidence and impact of feedbacks on transpiration in two 1-D soil-vegetation-atmosphere-transfer models. **Agriculture and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 106, 2001, p. 1-21.

HAMADA, Emília; PINTO, Hilton Silveira; ZULLO JUNIOR, Jurandir. Avaliação do Desenvolvimento do Trigo em Função de Graus-Dia. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 1999, **Anais...** Florianópolis. CDROM.

HANSEN, J., FUNG, I., LACIS, A. et al. Global climate changes as forecast by the GISS 3-D model. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 98, p. 9341-9364, 1988.

HILLEL, D.; ROSENZWEIG, C. **The greenhouse effect and its implications regarding global agriculture**. Amherst: Massachusetts Agricultural Experiment Station/University of Massachusetts, 1989. 36p. (Research Bulletin, 724)

HULME, M., ZHAO, Z.C., JIANG, T. Recent and future climate change in East Asia. **International Journal of Climatology**, New York, v. 14, n. 4, p. 637-658, 1994

HUNT, L.A., VAN DER POORTEN, G., PARARAJASINGHAM, S. Postanthesis temperature effects on duration and rate of grain filling in some winter and spring wheats. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 71, n. 5, p. 609-617, 1991.

IDSO, S.B., KIMBALL, B.A., ANDERSON, M.G., et al. Effects of atmospheric CO₂ enrichment on plant growth: the interactive role of air temperature. **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 20, n. 1, p. 1-10, 1987.

IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change]. **Climate Change – The IPCC Scientific Assessment**. Cambridge: University Press, 1995. 288p.

KIMBAL, B.A. **Carbon dioxide and agricultural yield**: An assemblage and analysis of 770 prior observations. Phoenix: US Water Conservation Laboratory, 1983b. 154 p. (Water Conservation Laboratory Report No. 14)

KIMBALL, B.A., PINTER Jr., P.J., GARCIA, R.L., et al. Productivity and water use of wheat under free-air CO₂ enrichment. **Global Change Biology**, Oxford, v. 1, n. 3, p. 429-442, 1995.

LAGO, I. et al. Estimativa da evapotranspiração potencial em cenários meteorológicos atual e de mudança climática para Santa Maria, RS. In: XVIII Jornada Acadêmica Integrada, 2004, Santa Maria, **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2004. 1 CD-ROM.

LIGON, J. T. & JOHNSON, H. P. Infiltration Capacities of Fayette Silt Loam from Analysis of Hydrologic Data. **TRANSACTIONS of the ASAE**. V. 3, n. 1, p. 36-37, 1960.

LONG, S.P. Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO₂ concentrations: Has its importance been underestimated? **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 14, n. 6, p. 729-739, 1991.

MAHLMAN, J.D. **Uncertainties in projections of human induced climate warnings**. **Science**, Washington, v. 278, n. 5342, p. 1416-1417, 1997.

MARENGO, J. A. Impacto das condições climáticas e da variabilidade e mudança do clima sobre a produção e os preços agrícolas: ondas de frio e seu impacto sobre a cafeicultura nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil. In: LIMA, M. A., CABRAL, O. M. R., MIGUEZ, J. D. G. **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. **Jaguariúna**, SP: EMBRAPA meio ambiente, 2001, 397 p.

MITCHELL, J.F.B, JOHNS, T.C., GREGORY, J.M. et al. **Climate response to increasing levels of greenhouse gases and sulfate aerosols**. *Nature*, London, v. 376, n. 6540, p. 501-504, 1995.

MONTEITH, J. L., SCOTT, R. K. Weather and yield variation of crops. In: BLAXTER, K., FOWDEN, L. **Food, Nutrition and climate**. Applied science, Englewood Cliffs, 1982,p. 127-149.

MOREIRA, A. M.; ANGULO FILHO, R.; RUDORFF, B. F. T. Eficiência do uso de radiação e índice de colheita em trigo submetido a estresse hídrico em diferentes estádios de desenvolvimento. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 56, n.3, 1999.

MORENO, J.A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 46p.

MUCHOW, R. C., SINCLAIR, T. R. Water deficit effects on maize yields modeled under current and "Greenhouse" climates. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83, 1052-1059 p., 1991.

ROSENBERG, N.J., BLAD, B.L., VERMA, S.B. **Microclimate**: The biological environment. New Yourk: John Wiley & Sons, p. 1983. 495.

RUDORFF, B.F.T., MULCHI, C.L., DAUGHTRY, C.S.T, et al. Growth, radiation use efficiency, and canopy reflectance of wheat and corn grown under elevated ozone and carbon dioxide atmospheres. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 55, n. 2, p. 163-173, 1996.

SCHNEIDER, F. M. et al. Comportamento de doze cultivares de soja à diferentes condições de drenagem e de irrigação subterrânea num solo hidromórfico. **Contribuição do Centro de Ciências Rurais à XII reunião de pesquisa de soja da Região Sul**. 1984. p. 29-42. 1984. Universidade Federal de Santa Maria – RS. Fundação de Apoio a tecnologia (FATEC).

SEMENOV, M.A., BROOKS, R.J., BARROW, E.M. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. **Climate Research**, London, v. 10, n. 1, p. 95-107, 1998.

SHAYKEWICH, C.F. An appraisal of cereal crop phenology modeling. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 75, n. 2, p. 329-341, 1995.

SIEGEL, S. **Estatística não-paramétrica**. Ed. McGraw-Hill, Ltda. São Paulo, 1975, 350 p.

SINCLAIR, T.R. Water and nitrogen limitations in soybean grain production. I. Model development. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 15, n. 2, p. 125-141, 1986.

SINCLAIR, T.R., KITANI, S., HINSON, K., BRUNIARD, J., HORIE, T. Soybean flowering date: Linear and Logistic Models Based on Temperature and Photoperiod. **Crop Science**, v. 31, p. 786-790, 1991.

SIONIT, N., STRAIN, B.R., FLINT, E. P. Interaction of temperature and CO₂ enrichment on soybean: photosynthesis and seed yield. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 67, n. 5, p. 629-636, 1987.

SIQUEIRA, O.J.F., FARIAS, J.R.B., SANS, L.M.A. Potential effects of global climate changes for brazilian agriculture and adaptative strategies for wheat, maize and soybean. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, n. 1, p.115-129, 1994.

SIQUEIRA, O.J.W., STEINMETZ, S., FERREIRA, M.F. Mudanças climáticas projetadas através dos modelos GISS e reflexos na produção agrícola brasileira. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 2, p. 311-320, 2000.

SIQUEIRA, O.J.W., STEINMETZ, S., SALLES, L. A. B. de. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M. A., CABRAL, O. M. R., MIGUEZ, J. D. G. **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. Jaguariúna, SP: EMBRAPA meio ambiente, 2001, 397 p.

SOMBROEK, W.G., GOMES, R. The climate change-Agriculture conundrum. In: BAZZAZ, F., SOMBROEK, W. **Global climate change and agricultural production**. New York: John Wiley & Sons, 1996. Cap. 1, p. 1-14.

STAPPER, M., HARRIS, H. C. Assessing de productivity of wheat genotypes in a Mediterranean climate, using a crop simulation model. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 20, 1989, p.129-152.

STRECK, N. A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmosphere CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência rural**, v. 35, n. 3, 2005. (no prelo, aceito para publicação).

TAIZ, L., ZEIGER, E. **Plant physiology**. Redwood City: The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc. ,1991. 559p.

THOMAS, A. Climatic changes in yield index and soil water deficit trends in China. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 102, n. 2-3, p. 71-81, 2000.

TUBIELLO, F. N., DONATELLI, M, ROSENZWEIG, C., STOCKLE, C. O. Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Italian locations. **European Journal of Agronomy**, v.13, 2000,179-189 p.

UNSWORTH, M.H., HOGSETT, W.E. Combined effect of changing CO₂, temperature, UVB radiation, and O₃ on crop growth. In: F. BAZZAZ , SOMBROEK, W. **Global climate change and agricultural production**. New York: John Wiley & Sons, 1996. Cap. 8, p. 171-198.

USUDA, H., SHIMOGAWARA, K.. The effects of increased atmospheric carbon dioxide on growth , carbohydrates and photosynthesis in radish, *Raphanus sativus*. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 39, n. 1, p.1-7, 1998.

VU, J.C.V., ALLEN, L.H., BOOTE, J.R., et al.. Effects of elevated CO₂ and temperature on photosynthesis and Rubisco in rice and soybean. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 20, n. 1, p. 68-76, 1997.

WIEGAND, C.L., CUELLAR, J.A. Duration of grain filling and kernel weight of wheat as affected by temperature. **Crop Science**, Madison, v. 21, n. 1, p. 95-101, 1981.

WILSON, C.A., MITCHELL, J.F.B. A double CO₂ climate sensitivity experiment with a global climate model, including a simple ocean. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 92, p. 13315-13343, 1987.

Tabela 1- Conteúdo de água de cada horizonte do solo da unidade São Pedro, na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP).

Horizonte	Profundidade (cm)	CC (cm ³ .cm ⁻³)	PMP (cm ³ .cm ⁻³)
A _P	0-30	0,232	0,116
A ₃	30-56	0,234	0,140
B ₂₁	56-85	0,234	0,175
B ₂₂	85-126	0,306	0,218

Fonte: NASCIMENTO (1981).

Tabela 2. Datas de semeadura das culturas e sistema de cultivos assumidos para este estudo numérico.

Cultura	Sistema de cultivo	Data de Semeadura
Trigo	Trigo – Pousio	14 de Junho
Soja	Pousio – Soja	15 de Novembro
Milho	Pousio – Milho	15 de Novembro

Tabela 3 – Cenários meteorológicos de mudança climática para Santa Maria, RS, Brasil, utilizados neste estudo numérico.

Cenário	Temperatura média (°C)	[CO ₂] (ppm)	Precipitação (%)			
			Dez-Fev	Mar-Mai	Jun-Ago	Set-Nov
1	-	350	-	-	-	-
2	-	700				
3	+ 2°C	700	-	-	-	-
4	+3°C	700	-	-	-	-
5	+4°C	700	-	-	-	-
6	+5°C	700	-	-	-	-
7	+6°C	700	-	-	-	-
8	-	700	+7	+17	+4	+25
9	+ 2°C	700	+7	+17	+4	+25
10	+3°C	700	+7	+17	+4	+25
11	+4°C	700	+7	+17	+4	+25
12	+5°C	700	+7	+17	+4	+25
13	+6°C	700	+7	+17	+4	+25

Tabela 4 – Valores do coeficiente de correlação de Kendall Tau entre FTSW e anos em diferentes cenários de mudança climática simulada por dois modelos matemáticos para as culturas de trigo, soja, e milho, Santa Maria, RS.

Cenário Climático	Trigo		Soja		Milho	
	AMIR & SINCLAIR (1991)	CAMPBELL & DIAZ (1988)	SINCLAIR (1986)	CAMPBELL & DIAZ (1988)	MUCHOW & SiINCLAIR (1991)	CAMPBELL & DIAZ (1988)
	1	-0,051717	-0,033535	0,013812	-0,023294	-0,001443
2	-0,029091	0,143838	0,086786	0,311482*	0,166357	0,294991*
3	-0,074747	0,117576	0,024119	0,256648*	-0,131313	0,278912*
4	-0,096566	0,105051	-0,005566	0,225727*	-0,146568	0,262420*
5	-0,116768	0,111515	-0,035663	0,153164	-0,175015	0,273552*
6	-0,149091	0,092525	-0,069882	0,078128	-0,204700*	0,233560*
7	-0,179798*	0,075960	-0,106164	0,001443	-0,236446*	0,204288*
8	0,024646	0,218182*	0,130489	0,391878*	0,184910*	0,322614*
9	-0,040404	0,160000*	0,070707	0,318491*	-0,088848	0,305298*
10	-0,068687	0,155960*	0,034426	0,290868*	-0,109050	0,325500*
11	-0,090101	0,143434*	-0,006803	0,285920*	-0,146155	0,318491*
12	-0,107475	0,130505	-0,034014	0,226964*	-0,167182	0,293754*
13	-0,132929	0,124848	-0,066996	0,165533	-0,189858*	0,287982*

* significativo a 1% de probabilidade, pelo teste F.

Tabela 5 – Valores do coeficiente de correlação de Kendall Tau entre rendimento e anos em diferentes cenários de mudança climática para as culturas de trigo, soja, e milho, Santa Maria, RS.

Cenário Climático	Trigo	Soja	Milho
1	0,170909	0,006465	0,022626
2	0,421010*	0,121212	0,288081*
3	0,214949*	0,051717	-0,082020
4	0,069495	0,035556	-0,141414
5	-0,124040	0,008889	-0,195960*
6	-0,265859*	-0,005253	-0,257374*
7	-0,397576*	-0,012525	-0,298182*
8	0,419394*	0,144242*	0,329697*
9	0,226263*	0,085253	-0,060606
10	0,083636	0,061818	-0,111515
11	-0,111515	0,060202	-0,176970*
12	-0,253737*	0,040808	-0,224646*
13	-0,386667*	0,005657	-0,267071*

* significativo a 1% de probabilidade, pelo teste F.

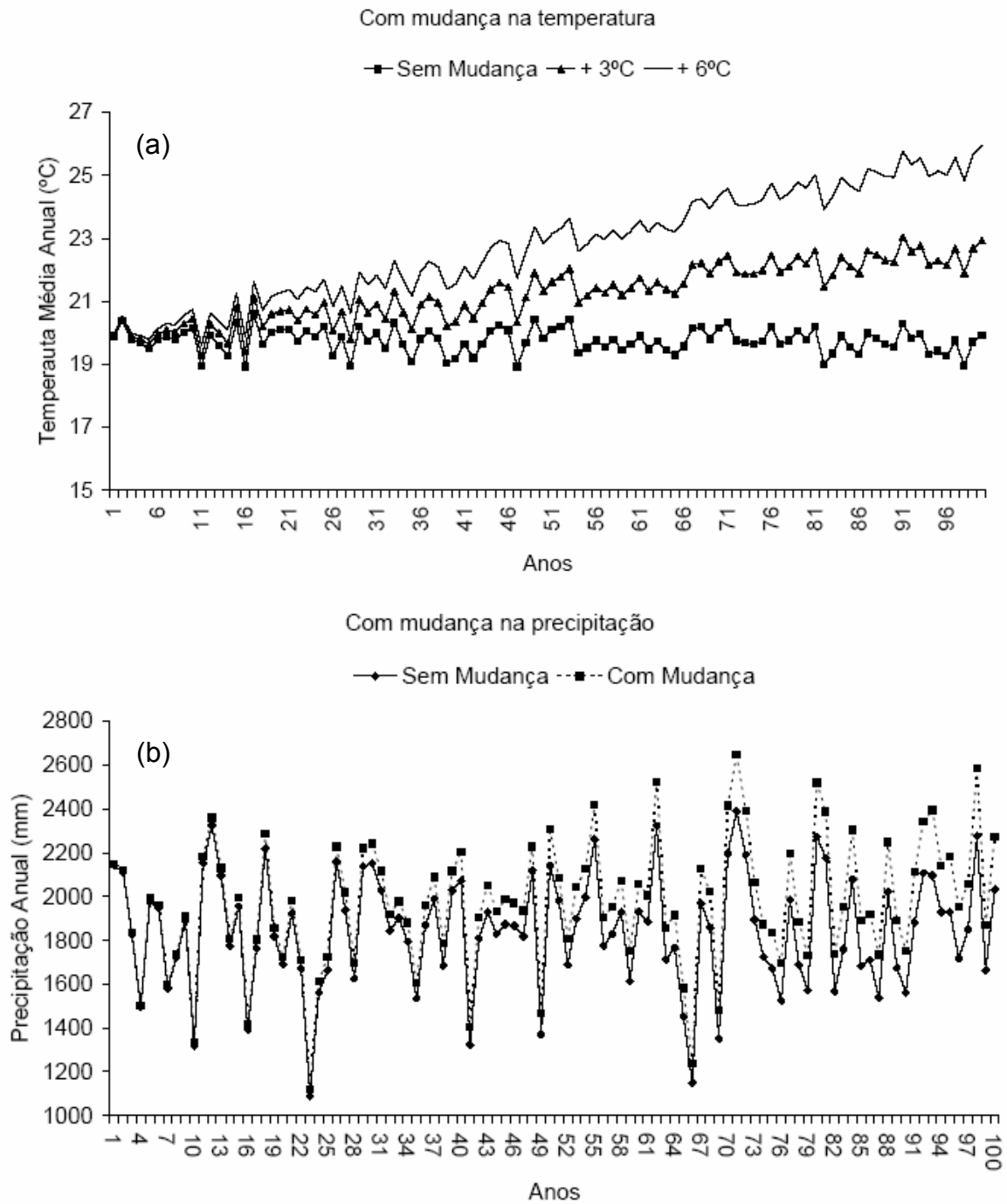


Figura 1 – Alguns cenários climáticos de temperatura média anual (a) e precipitação acumulada anual (b) para Santa Maria, RS usados no estudo.

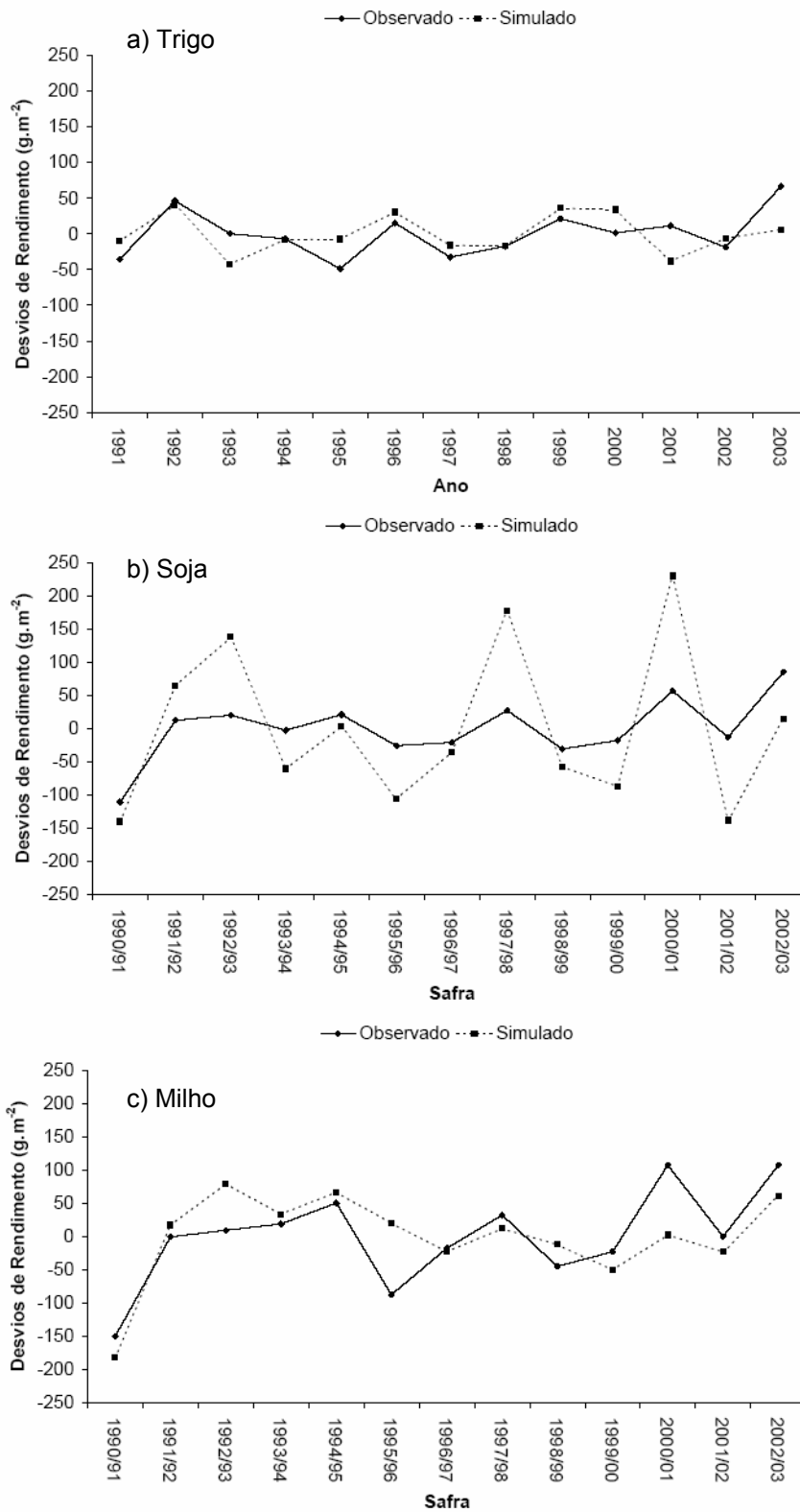


Figura 2 - Resíduos observados e simulados de rendimento de trigo, soja e milho, Santa Maria, RS, 1990 - 2003.

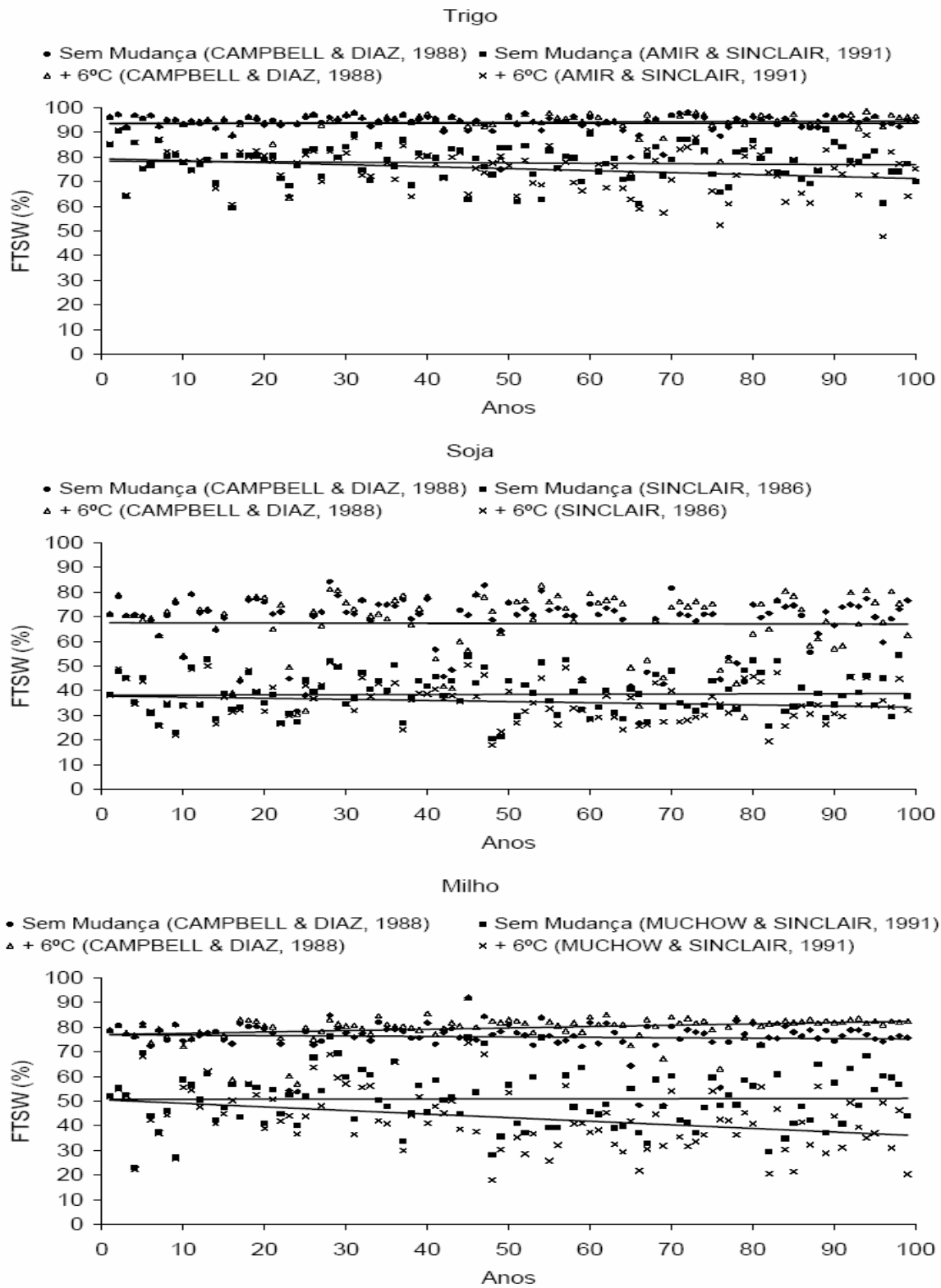


Figura 3 – Fração percentual de água transpirável no solo (FTSW) para as culturas de trigo, soja e milho em cenário sem mudança climática e com aumento de 6°C na temperatura média do ar, Santa Maria, RS.

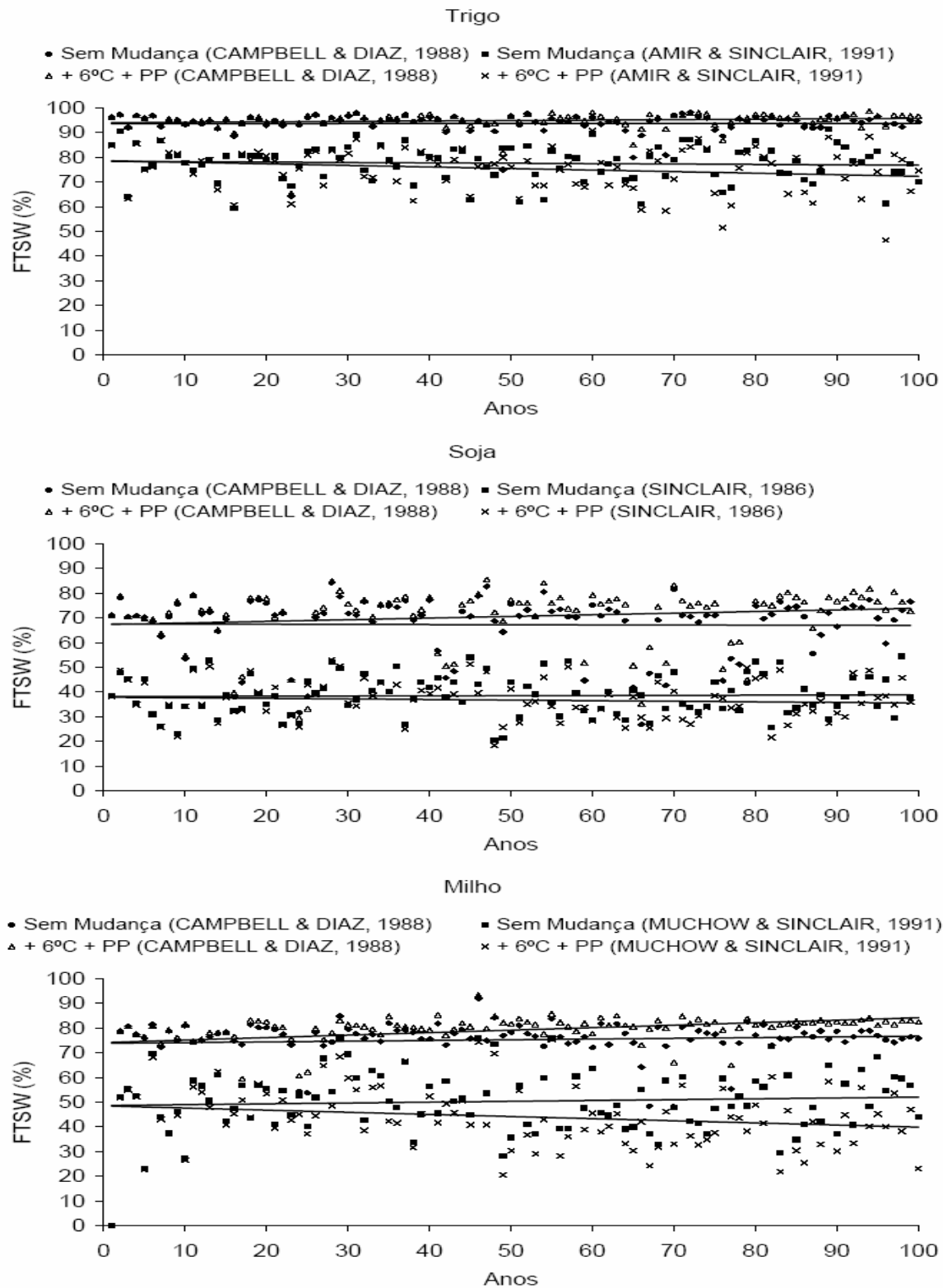


Figura 4 - Fração de água transpirável no solo (FTSW) para as culturas do trigo, soja e milho em cenário sem mudança climática e com aumento de 6°C na temperatura média do ar e na precipitação pluviométrica (PP), Santa Maria, RS.

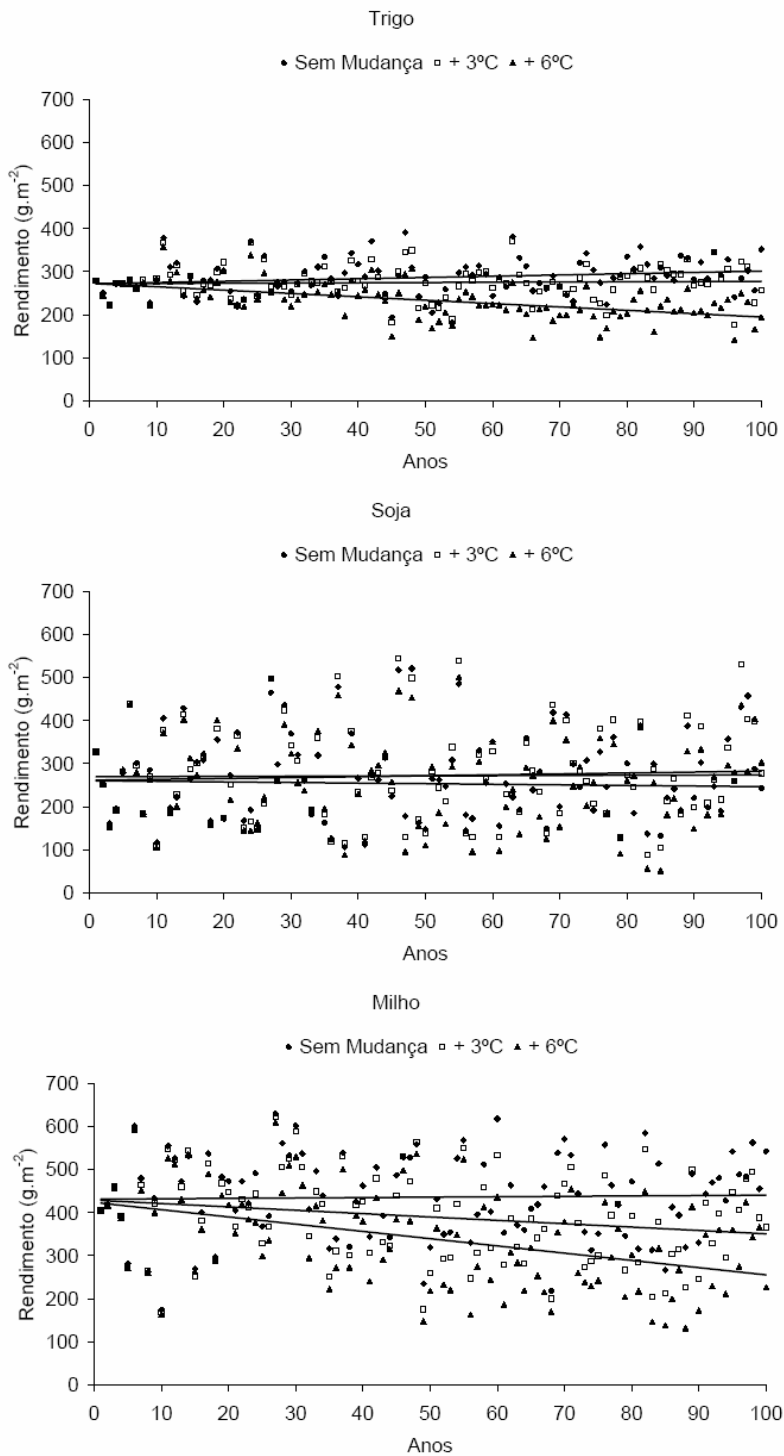


Figura 5 - Rendimento de grãos das culturas de trigo, soja e milho simulado em cenários sem mudança climática e com aumento de 3 e 6°C na temperatura média do ar, Santa Maria, RS.

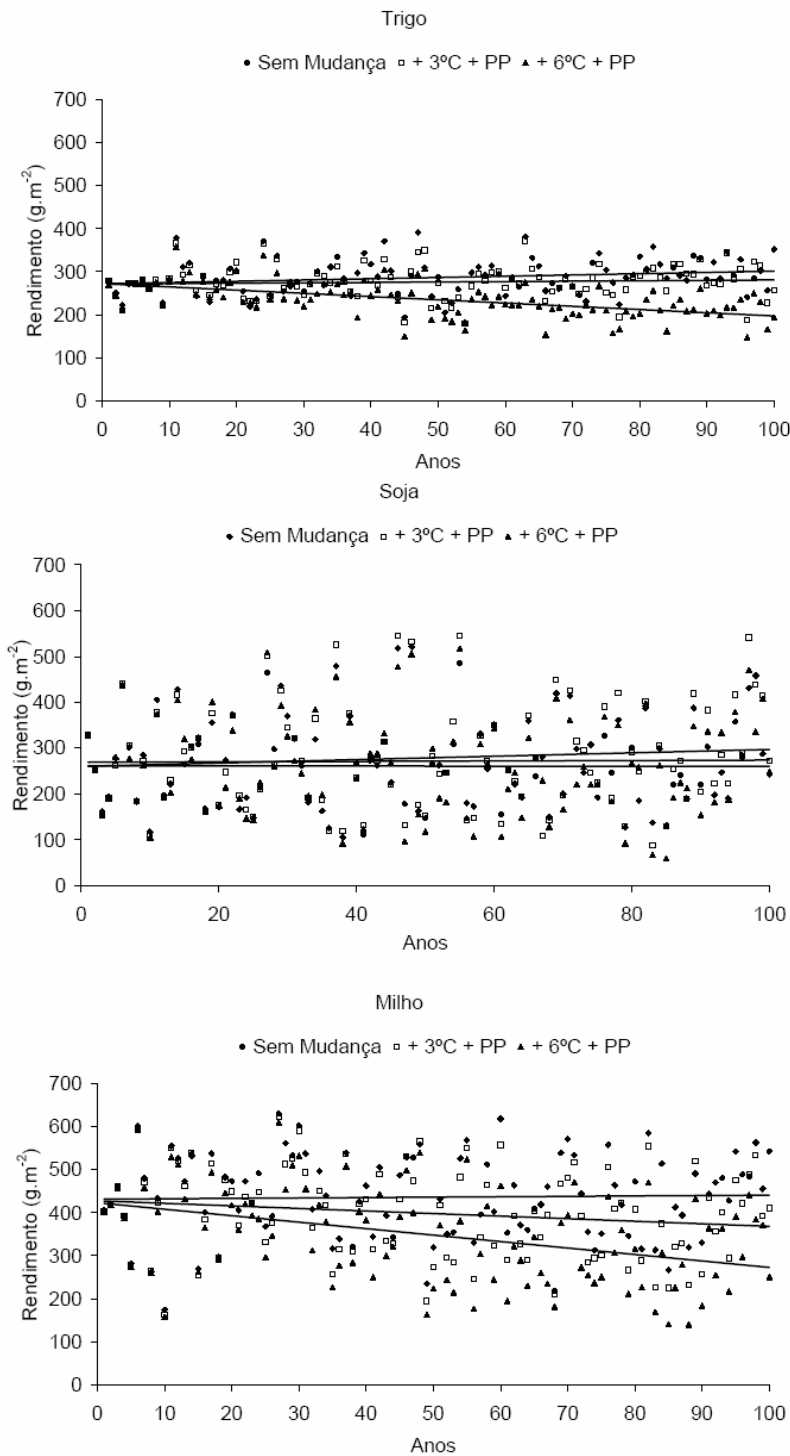


Figura 6 – Rendimento de grãos simulado para as culturas de trigo, soja e milho em cenários sem mudança climática e com aumento de 3 e 6°C na temperatura média do ar e com aumento na precipitação pluviométrica (PP), Santa Maria, RS.

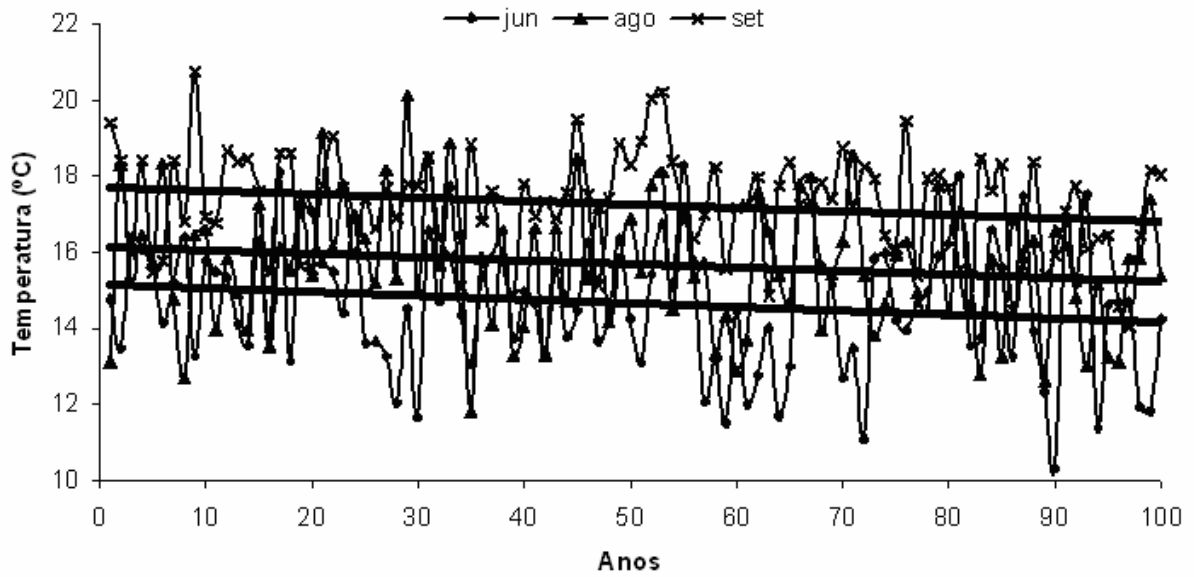


Figura 7 - Temperatura média dos meses de junho, agosto e setembro para a série sintética de dados gerados pelo LARS-WG, para um período de 100 anos, Santa Maria, RS.

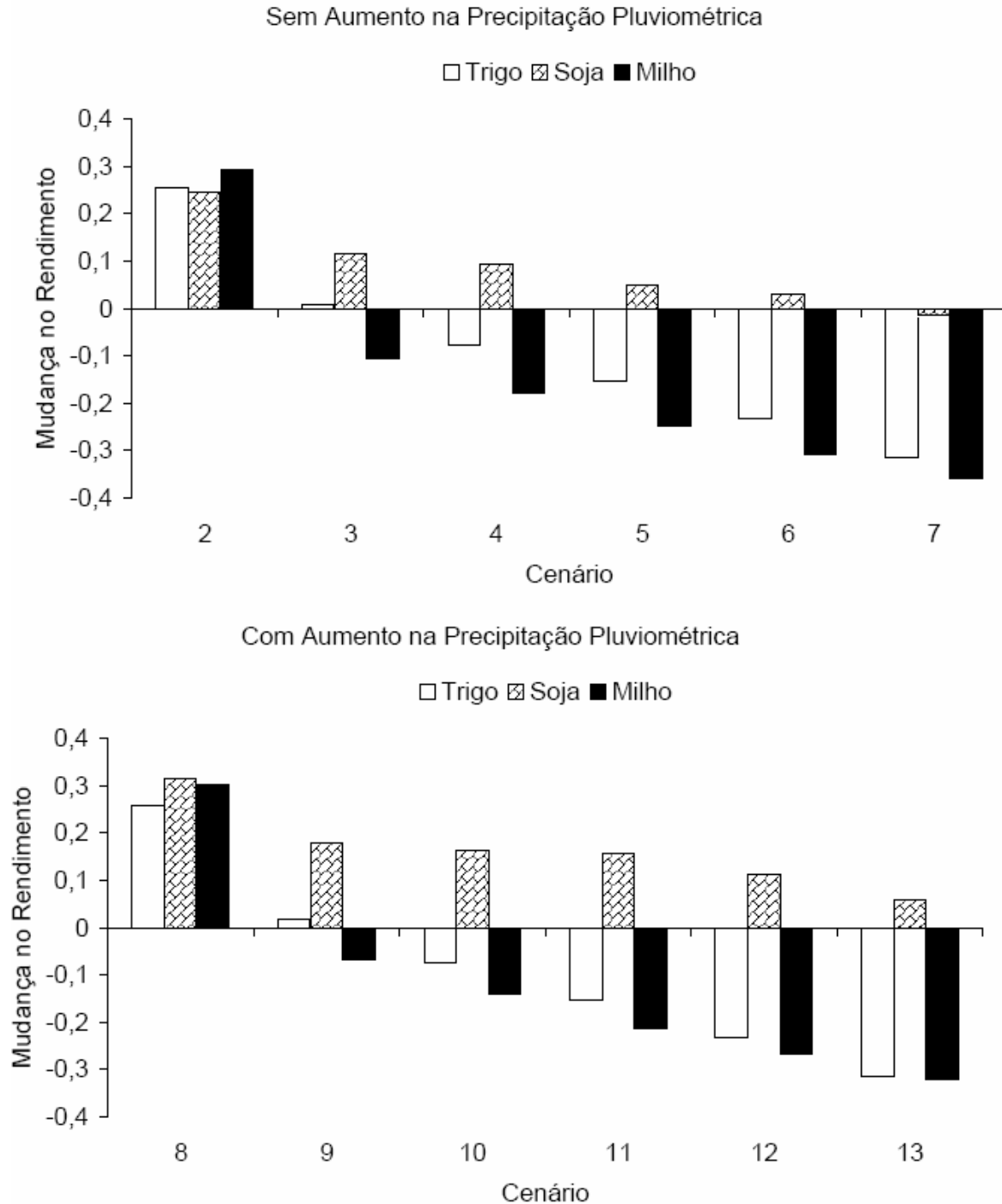


Figura 8 - Mudança relativa no rendimento de grãos simulado das culturas de trigo, soja e milho em relação ao cenário sem mudança climática em diferentes cenários climáticos com aumento de CO₂ para Santa Maria, RS. As barras representam a média dos últimos 10 anos de cada cenário. Para descrição dos cenários, consultar Tabela 3.

CONCLUSÕES GERAIS

O fenômeno El Niño Oscilação Sul influencia o rendimento das culturas na região de Santa Maria, RS. Anos neutros são os anos de maior risco para o rendimento de grãos de trigo, soja e milho.

Em Santa Maria, anos de La Niña são mais favoráveis ao rendimento de grãos de trigo, anos de El Niño são mais favoráveis ao rendimento de grãos de soja e anos de EL Niño e La Niña são mais favoráveis ao rendimento de grãos de milho.

Anos de maior déficit hídrico no solo, normalmente estão associados a anos neutros, enquanto que a maior disponibilidade hídrica no solo está associada a eventos de El Niño. Para os eventos de La Niña a tendência de déficit hídrico não é bem definida.

A mudança climática projetada para os próximos 100 anos em Santa Maria, RS, influenciará o rendimento das culturas de trigo, soja e milho e o balanço de água no solo.

Aumento de CO₂ associados a aumentos de temperatura de até 6°C influenciam a diminuição do conteúdo de água no solo.

O aumento na temperatura do ar pode anular os efeitos benéficos do aumento de CO₂ para as culturas de trigo, soja e milho.