

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS**  
**INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS - IPH**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL**

**SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS  
SOBRE AS DEMANDAS DE ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO NA REGIÃO NOROESTE  
DO RIO GRANDE DO SUL**

TIRZAH MOREIRA DE MELO

Tese apresentada à Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora.

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Antônio S. Louzada  
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Olavo Correa Pedrollo

**Banca Examinadora:**

Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa	UFRGS
Dra. Mirta Teresinha Petry	UFSM
Dra. Nilza Maria dos Reis Castro	UFRGS

Porto Alegre  
Julho/2015

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter-me dado todas as oportunidades de realizar este Doutorado, sendo sempre minha inspiração e força!!!

À minha família, por ter sido o meu suporte e minha fortaleza, incentivando-me nos momentos de maior cansaço, dificuldades e preocupações. Minha mãe e meus irmãos, e depois também a doce Clarinha, que veio alegrar nossos dias!!!

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), pela oportunidade de realizar este Doutorado e também a todos os professores que tive ao longo deste caminho e que contribuíram na minha formação.

De forma especial ao meu orientador, Prof. José Antônio S. Louzada e ao meu co-orientador Prof. Olavo Correa Pedrollo, pelo grande auxílio ao longo destes quatro anos. Por terem tornado o caminho tão fácil, por acreditarem e confiarem em mim e no meu trabalho e, principalmente, por me ajudarem nas etapas mais difíceis.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudo, e também à FINEP, pelo financiamento da pesquisa através dos projetos MATASUL, CLIMASUL, INTEGRA e RHIMA.

Aos grandes amigos que fiz durante esta passagem pelo IPH e que me acompanharam, incentivaram, apoiaram e me alegraram. Especialmente àqueles com quem tive mais contato, Katiúcia Adam e Anelise Hüffner, que estiveram tão presentes e me mostrando que há outro mundo além da Tese!!! Por terem sido minhas amigas e companheiras, e continuarão sendo mesmo agora com a distância. Muito obrigada por todo o carinho, principalmente quando estive me preparando para o concurso.

Minha dedicação especial ao querido amigo e colega do IPH Marquis Henrique Campos de Oliveira, que me ajudou de uma forma indescritível durante a fase de campo e experimental, sem o qual não seria possível seguir em frente na pesquisa. Muito obrigada por tanto esforço e desprendimento e, principalmente, porque sempre o vi me ajudando com muita alegria, de coração.

Aos técnicos e amigos do Laboratório de Sedimentos do IPH, pelo apoio na fase experimental, por serem sempre tão queridos e carinhosos, e por me disponibilizarem o espaço necessário para realização dos experimentos e compartilharem do conhecimento deles na área.

Aos amigos de fora do IPH que também foram parte importante desta caminhada, tornando outros aspectos da minha vida repletos de amor, alegria e paz. Cada um foi e continuará sendo uma parte importante da minha história e vida.

Aos colegas professores da UFPel, que foram extremamente importantes nesta etapa final, substituindo-me carinhosamente nas aulas para que eu pudesse concluir a Tese. Sou muito grata por tudo e o esforço deles foi também o meu. Agradeço a Deus por ter-me permitido chegar a um grupo tão querido de trabalho, onde me sinto realizada e feliz.

Então, é porque esta trajetória valeu a pena!!!

Obrigada a todos!!!

## RESUMO

Esta tese foi desenvolvida para avaliar os impactos das mudanças climáticas ao longo deste século sobre as demandas futuras de água para irrigação da soja na região Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul sob uma abordagem estocástica e considerando diferentes projeções de modelos climáticos para o período de 2011-2100, comparando com o passado (1961-1990). As demandas de água para irrigação da soja (IWR) foram obtidas por simulação com o modelo SWAP. O aspecto estocástico desta avaliação foi conduzido pela incorporação da variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo ( $K_{sat}$ ) e dos parâmetros da curva de retenção de água no solo (CR).

Inicialmente, foi realizada uma análise estocástica destes atributos físico-hidráulicos na bacia do Arroio Donato (1,1 Km<sup>2</sup>), a qual serviu de área representativa dos solos e do uso do solo da região Noroeste. Foi empregada a técnica de simulação sequencial Gaussiana (SSG) para geração de 100 campos aleatórios de cada variável. Os resultados revelaram maiores incertezas para  $K_{sat}$  e o parâmetro  $\alpha$  da CR e permitiu identificar que a grande heterogeneidade espacial e temporal das variáveis analisadas pode estar associada a fatores tais como clima, manejo e cobertura do solo, erros de amostragem, adensamento da malha amostral e também ao grau de compactação do solo.

Em seguida foi feita uma investigação para detectar mudanças nos padrões de temperatura (T) e precipitação (P) na região Noroeste do RS (~65.000 Km<sup>2</sup>) pelo uso de diferentes modelos climáticos de circulação geral e regional (MCGs e MCRs, respectivamente). Sete distintas localizações na região foram consideradas, para as quais há dez diferentes projeções climáticas destes modelos. Adicionalmente, também foram investigadas a frequência e a intensidade de eventos de precipitação extrema utilizando-se de índices de eventos extremos. As projeções indicam um aumento na média anual de temperatura de quase 3°C até o final do século, bem como um aumento na precipitação anual. Também foi realizada uma análise sazonal de T e P, a qual demonstrou que os maiores aumentos de temperatura são projetados para o inverno e início da primavera e, portanto, não coincidem com os meses de verão da principal cultura da região (soja).

De posse das informações anteriores, o modelo SWAP foi utilizado para estimar as demandas de água para irrigação da soja (IWR), sem considerar perdas devido à eficiência de qualquer método de irrigação. Foram feitos também testes de hipóteses sobre as séries de IWR simuladas e os resultados suportam a premissa de que IWR a curto prazo (2025s) não

será estatisticamente diferente do período base (1961-1990). Por outro lado, as IWR em 2055s e 2085s rejeitam esta hipótese.

Por fim, avaliou-se a influência da distribuição espacial da condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) e dos parâmetros do modelo da curva de retenção de água no solo ( $\alpha$ ,  $n$  e  $\theta_{sat}$ ) sobre as demandas futuras de água para a irrigação da soja (IWR), segundo uma abordagem estocástica. Os valores simulados pelo método geoestatístico de simulação sequencial Gaussiana foram utilizados como dados de entrada no modelo SWAP. Como dados meteorológicos foram consideradas apenas as projeções do modelo climático regional ETA 20 e ETA 40 CTRL, bem como as projeções dadas pelo modelo climático global HADCM3 nas sete localizações na região. As estimativas obtidas pelo método estocástico foram então comparadas com as estimativas de IWR obtidas sem considerar a variabilidade espacial dos atributos físico-hidráulicos do solo. Os resultados indicaram grande variabilidade espacial dos valores de IWR. Além disso, observou-se que as menores incertezas de IWR foram obtidas a partir das projeções do modelo de melhor resolução espacial, o ETA 20, enquanto o modelo HADCM3 revelou as maiores diferenças entre os períodos futuros e o período atual (base). Os resultados também demonstraram que a maior incerteza é devido aos modelos climáticos, pois a abordagem estocástica praticamente não agregou incerteza aos valores de IWR simulados anteriormente. Por fim, as séries de IWR obtidas pela abordagem determinística e estocástica foram comparadas pelo teste de hipóteses de Kolmogorov-Smirnov, o qual comprovou que as séries só não diferem a curto prazo (2025s) e que, portanto, a variabilidade espacial do solo não pode ser negligenciada nas estimativas desta variável.

**Palavras-chave:** condutividade hidráulica saturada, parâmetros da curva de retenção de água no solo, simulação geoestatística, projeções climáticas.

## ABSTRACT

This Thesis has been developed to assess the impacts of climate change throughout this century on future water demands for soybean irrigation in the Northwest region of Rio Grande do Sul under a stochastic approach and considering different projections of climate models for the period 2011-2100, compared to the past (1961-1990). The water demands for irrigation (IWR) were obtained by simulation with the SWAP model. The stochastic aspect of this evaluation was conducted by incorporating the spatial variability of the saturated hydraulic conductivity ( $K_{sat}$ ) and the parameters of the soil water retention curve (CR).

Initially, a stochastic analysis of soil physical-hydraulic attributes ( $K_{sat}$  and CR parameters) in the Donato basin (1,1 Km<sup>2</sup>) was carried out. This basin served as a representative area of soils and land uses of the Northwest region. The Sequential Gaussian Simulation (SSG) technique was used to generate 100 random fields of each variable. The results revealed greater uncertainty for  $K_{sat}$  and for  $\alpha$  parameter of the CR and identified that the large spatial and temporal heterogeneity of the variables may be associated with factors such as climate, management and land cover, sampling error, spatial density of the sampling grid and also the degree of soil compaction.

After, an investigation was made to detect changes in temperature (T) and precipitation (P) patterns in the Northwest region of RS (~65.000 Km<sup>2</sup>) by using different global and regional circulation models (GCM and RCM, respectively). Seven distinct locations in the region were considered, for which there are ten different climate projections of these models. Additionally, it was also investigated the frequency and intensity of extreme rainfall events using extreme event indices. Projections indicate an increase in average annual temperature of almost 3 °C by the end of this century, as well as an increase in annual precipitation. It was also performed a seasonal analysis of T and P, which showed that the largest temperature increases are projected for the winter and early spring and, therefore, do not coincide with the summer months the main crop in the region (soy).

Making use of the above information, the SWAP model was applied to estimate the water demand for soybean irrigation (IWR), excluding losses due to the efficiency of any method of irrigation. A hypothesis test for the simulated IWR series and the results supports the premise that in short-term IWR (2025s) is not statistically different from base period (1961-1990). On the other hand, IWR in 2055s and 2085s reject this hypothesis.

Finally, the influence of the spatial distribution of the saturated hydraulic conductivity ( $K_{\text{sat}}$ ) and the parameters of the soil water retention curve ( $\alpha$ ,  $\theta_{\text{sat}}$  and  $n$ ) on IWR was evaluated, according to a stochastic approach. The simulated values from the geostatistical method of Sequential Gaussian Simulation (SGS) were used as input data in the SWAP model. Input data of meteorological information were provided by the projections of regional climate model ETA 20 and ETA 40 CTRL, as well as the projections given by global climate model HADCM3 for the seven locations in the region. Estimates obtained by the stochastic method were then compared with the IWR estimates obtained without considering the spatial variability of physical and hydraulic soil properties. The results indicated large spatial variability of IWR values. Furthermore, it was observed that the smallest uncertainties of IWR were obtained from the projections with better spatial resolution, the ETA 20 model, while the HADCM3 model revealed the highest differences between future periods and the current period (baseline). The results also showed that the greatest uncertainties are probably due to climate models, since the stochastic approach did not add uncertainties to the IWR values simulated previously. Finally, the series of IWR obtained by stochastic and deterministic approaches were compared by the hypothesis test of Kolmogorov-Smirnov, which proved that only the series in the short term (2025s) differ, and, therefore, the soil spatial variability may not be neglected when estimating this variable.

**Key-words:** saturated hydraulic conductivity, soil water retention curve parameters, geostatistical simulation, climate projections.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	vi
SUMÁRIO.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS.....	xiv
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
<b>1.1 Referências Bibliográficas.....</b>	<b>05</b>
<b>2. CONTEXTUALIZAÇÃO, JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS.....</b>	<b>09</b>
<b>2.1 Contextualização e Justificativas.....</b>	<b>09</b>
<b>2.2 Objetivos.....</b>	<b>13</b>
<b>2.3 Estrutura da Tese.....</b>	<b>13</b>
<b>2.4 Referências Bibliográficas.....</b>	<b>14</b>
<b>3. SIMULAÇÃO GEOESTATÍSTICA DAS PROPRIEDADES FÍSICO- HIDRÁULICAS DO SOLO NA BACIA DO ARROIO DONATO.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1 Introdução.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2 Metodologia.....</b>	<b>17</b>
3.2.1 <i>Área de Estudo.....</i>	17
3.2.2 <i>Amostragem de Solo - CR e <math>K_{sat}</math>.....</i>	19
3.2.3 <i>Simulação Estocástica de <math>K_{sat}</math> e dos parâmetros da CR.....</i>	22
<b>3.3 Resultados e Discussões.....</b>	<b>25</b>
3.3.1 <i>Distribuição e Variabilidade Espacial das Variáveis.....</i>	25
3.3.2 <i>Variogramas.....</i>	29
3.3.3 <i>Simulação Sequencial Gaussiana.....</i>	32
<b>3.4 Conclusões Parciais.....</b>	<b>37</b>
<b>3.5 Referências Bibliográficas.....</b>	<b>38</b>
<b>4. ANÁLISE SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO E DE TEMPERATURA E TENDÊNCIAS NOS ÍNDICES DE PRECIPITAÇÃO EXTREMA.....</b>	<b>42</b>
<b>4.1 Introdução.....</b>	<b>42</b>
<b>4.2 Metodologia.....</b>	<b>46</b>

4.2.1	<i>Área de Estudo</i> .....	46
4.2.2	<i>Dados Meteorológicos</i> .....	47
4.2.3	<i>Índices de Precipitação Extrema</i> .....	49
<b>4.3</b>	<b>Resultados e Discussões</b> .....	<b>50</b>
4.3.1	<i>Análise de Temperatura e de Precipitação Anuais</i> .....	50
4.3.2	<i>Análise Sazonal de Temperatura e de Precipitação</i> .....	52
4.3.3	<i>Índices de Precipitação Extrema</i> .....	58
<b>4.4</b>	<b>Conclusões Parciais</b> .....	<b>62</b>
<b>4.5</b>	<b>Referências Bibliográficas</b> .....	<b>63</b>
<b>5.</b>	<b>IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE AS DEMANDAS FUTURAS DE ÁGUA PARA A IRRIGAÇÃO DA SOJA</b> .....	<b>68</b>
<b>5.1</b>	<b>Introdução</b> .....	<b>68</b>
<b>5.2</b>	<b>Metodologia</b> .....	<b>72</b>
5.2.1	<i>Área de Estudo</i> .....	72
5.2.2	<i>Aplicação do Modelo SWAP</i> .....	73
<b>5.3</b>	<b>Resultados e Discussões</b> .....	<b>78</b>
5.3.1	<i>Dados Meteorológicos</i> .....	78
5.3.2	<i>Demandas Futuras de Água para Irrigação (IWR)</i> .....	79
5.3.3	<i>Teste de Hipóteses</i> .....	85
<b>5.4</b>	<b>Conclusões Parciais</b> .....	<b>88</b>
<b>5.5</b>	<b>Referências Bibliográficas</b> .....	<b>89</b>
<b>6.</b>	<b>AVALIAÇÃO ESTOCÁSTICA DAS DEMANDAS FUTURAS DE ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO NA REGIÃO NOROESTE DO RS</b> .....	<b>93</b>
<b>6.1</b>	<b>Introdução</b> .....	<b>93</b>
<b>6.2</b>	<b>Metodologia</b> .....	<b>96</b>
6.2.1	<i>Área de Estudo</i> .....	96
6.2.2	<i>Atributos Físico-Hidráulicos do Solo</i> .....	96
6.2.3	<i>Dados Meteorológicos</i> .....	98
6.2.4	<i>Cálculo das Demandas de Água para Irrigação pelo Modelo SWAP</i> .....	99
<b>6.3</b>	<b>Resultados e Discussões</b> .....	<b>101</b>
6.3.1	<i>Estimativas de IWR na região Noroeste do RS</i> .....	101
6.3.2	<i>Distribuição Espacial de IWR</i> .....	105
6.3.3	<i>Incertezas das estimativas de IWR</i> .....	108

6.4 Conclusões Parciais.....	117
6.5. Referências bibliográficas.....	118
<b>7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>121</b>
7.1. Conclusões.....	121
7.2. Recomendações.....	123
<b>ANEXOS.....</b>	<b>126</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Eventos de secas registrados no RS durante o período de 2003 a 2009.....	03
<b>Figura 2.1:</b> Mapas de anomalias da vegetação na região Sul do Brasil.....	10
<b>Figura 3.1:</b> Localização da Bacia do Arroio Donato.....	18
<b>Figura 3.2:</b> Distribuição dos solos na Bacia do Arroio Donato e entorno.....	19
<b>Figura 3.3:</b> Localização dos pontos de coleta de amostras de solo na bacia do Arroio Donato.....	20
<b>Figura 3.4:</b> Mapas de localização de $K_{sat}$ e dos parâmetros da curva de retenção de água no solo.....	26
<b>Figura 3.5:</b> Variogramas dos dados normalizados de $K_{sat}$ e dos parâmetros da CR.....	30
<b>Figura 3.6:</b> Mapas de algumas simulações realizadas (#84, #5, #57 e #29) pelo método de simulação sequencial Gaussiana.....	32
<b>Figura 3.7:</b> Comparação dos histogramas de frequência de dados observados e simulados.....	34
<b>Figura 3.8:</b> Comparação dos variogramas dos dados originais e de alguns campos aleatórios simulados para cada variável.....	35
<b>Figura 4.1:</b> Localização da área de estudo.....	46
<b>Figura 4.2:</b> Ciclos sazonais das anomalias de precipitação e de temperatura anuais.....	52
<b>Figura 4.3:</b> Ciclos sazonais de precipitação média mensal (mm) para as localizações 1 a 7 em (a) a (g), respectivamente.....	56
<b>Figura 4.4:</b> Variação entre modelos e tendências de aumento do índice R95p (mm) para os modelos ETA 20 e NRCCSM, localização 1.....	60
<b>Figura 5.1:</b> Produção de soja no Rio Grande do Sul por mesorregião no período de 1973 a 2007, em toneladas.....	72
<b>Figura 5.2:</b> Balanço hídrico na zona das raízes.....	74
<b>Figura 5.3:</b> Esquema metodológico da aplicação do modelo SWAP.....	75
<b>Figura 5.4:</b> Fator de estresse hídrico em função do potencial matricial do solo.....	77
<b>Figura 5.5:</b> Temperatura média (°C) e precipitação anual acumulada (mm) no período base e nos períodos futuros.....	79
<b>Figura 5.6:</b> Anomalias de precipitação e de temperatura em diferentes localizações e períodos futuros.....	80

<b>Figura 5.7:</b> Histogramas de frequências de IWR e suas anomalias com relação ao período base.....	83
<b>Figura 5.8:</b> Distribuições de probabilidades acumuladas de IWR.....	84
<b>Figura 6.1:</b> Localização da área de estudo e pontos com dados meteorológicos.....	96
<b>Figura 6.2:</b> Esquema ilustrativo da obtenção dos campos aleatórios resultantes de cada variável.....	98
<b>Figura 6.3:</b> Métodos utilizados no SWAP para derivar a evaporação e a transpiração reais.....	100
<b>Figura 6.4:</b> Esquema das simulações com o modelo SWAP.....	100
<b>Figura 6.5:</b> Demandas futuras de água para irrigação ao longo do século nas localizações 1 a 7, de (a) a (g).....	104
<b>Figura 6.6:</b> Mapas de distribuição espacial das demandas futuras de água para irrigação nos diferentes períodos futuros e segundo diferentes projeções climáticas.....	106
<b>Figura 6.7:</b> Exemplo de distribuição de probabilidades acumuladas das 1827 simulações para o modelo ETA 20, localização 1.....	109
<b>Figura 6.8:</b> Distribuição de probabilidades acumuladas de IWR nos períodos futuros e atual nas localizações 1 a 7, de (a) a (g), respectivamente.....	110
<b>Figura 6.9:</b> Comparação entre as distribuições de probabilidades acumuladas de IWR nos períodos futuros com (preto) e sem (azul) considerar a variabilidade espacial do solo.....	116

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1:</b> Reduções de safra para as culturas de milho e soja provocadas por estiagens no RS no período de 1985-2005.....	11
<b>Tabela 3.1:</b> Localização dos pontos de coleta de amostras de solo na bacia do Arroio Donato.....	21
<b>Tabela 3.2:</b> Sumário estatístico de $K_{sat}$ e dos parâmetros da curva de retenção.....	27
<b>Tabela 3.3:</b> Parâmetros dos ajustes dos modelos variográficos dos dados normalizados.....	30
<b>Tabela 3.4:</b> Estatísticas das simulações para cada variável.....	35
<b>Tabela 3.5:</b> Campos aleatórios resultantes do modelo estocástico.....	37
<b>Tabela 4.1:</b> Localização dos dados meteorológicos na região Noroeste do RS.....	48
<b>Tabela 4.2:</b> Modelos de circulação geral (MCGs) aplicados neste estudo.....	48
<b>Tabela 4.3:</b> Índices de precipitação extrema.....	49
<b>Tabela 4.4:</b> Temperatura média anual e anomalias para cada localização.....	50
<b>Tabela 4.5:</b> Precipitação média anual e anomalias para cada localização.....	50
<b>Tabela 4.6:</b> Temperatura média mensal projetada por diferentes modelos climáticos nas diferentes localizações.....	54
<b>Tabela 4.7:</b> Índices de precipitação média anual para todas as localizações e períodos, baseados na média dos MCGs e do MCR.....	59
<b>Tabela 5.1:</b> Variação na produção da safra de grãos no RS de 2012 (ano seco) em comparação com 2011.....	71
<b>Tabela 5.2:</b> Propriedades físico-hidráulicas utilizadas nas simulações com o modelo SWAP.....	78
<b>Tabela 5.3:</b> Temperatura média anual e precipitação acumulada projetadas por diferentes modelos climáticos.....	80
<b>Tabela 5.4:</b> Demandas futuras de água para irrigação (IWRs) e anomalias ( $\Delta_a$ ) de todas as simulações e períodos (cm).....	81
<b>Tabela 5.5:</b> Percentis das funções de frequências acumuladas das demandas de água para irrigação (IWR) e das anomalias (cm).....	84
<b>Tabela 5.6:</b> Teste de Kolmogorov-Smirnov para IWR futuras e IWR no período base.....	87
<b>Tabela 6.1:</b> Sumário estatístico das simulações de IWR em cada localização.....	101
<b>Tabela 6.2:</b> Percentis das estimativas de IWR para os períodos futuros com e sem a consideração da variabilidade espacial dos atributos físico-hidráulicos do solo.....	114

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

$\psi$	Potencial matricial do solo
$\Delta$	Inclinação da curva de pressão de vapor
$\gamma$	Constante psicrométrica
$\beta$	Fator de estresse hídrico em condições secas
$\lambda$	Parâmetro de forma da função de condutividade hidráulica de Mualem (1976)
$\theta(\psi)$	Umidade do solo associada a um determinado potencial matricial $\psi$
$\gamma(h)$	Semivariograma experimental
$\Delta_a$	Anomalia da variável de um período futuro com relação ao atual
$\psi_i$	Potenciais mátricos críticos de estresse hídrico
$\theta_{res}$	Umidade residual do solo
$\theta_{sat}$	Umidade de saturada do solo
2025s	Ano médio representando o período 2011-2040
2055s	Ano médio representando o período 2041-2070
2085s	Ano médio representando o período 2071-2100
A1B	Cenário climático pertencente à família de cenários A1
A2	Cenário climático A2, mais pessimista
AR4	4th Assessment Report – Quarto Relatório de Avaliação
AR5	5th Assessment Report – Quinto Relatório de Avaliação
AVG	Média da variável dada pelas projeções dos MCGs
AVR	Média da variável dada pelas projeções do MCR
B2	Cenário climático B2, mais otimista
ccdf	Distribuição de frequências acumulada condicional
CDD	Número máximo de dias secos consecutivos no ano (dias)
cdf	Distribuição de frequências acumuladas
Cfa	Clima mesotérmico brando superúmido sem seca
CR	Curva de retenção de água no solo
cT	Massa de ar continental tropical
CTRL	Membro controle de sensibilidade
CWD	Número máximo de dias úmidos consecutivos no ano (dias)
D	Estatística do teste de Kolmogorov-Smirnov

DM <sub>i</sub>	Dados meteorológicos do modelo climático i
D <sub>root</sub>	Espessura da camada das raízes
e <sub>a</sub>	Pressão de vapor real
E <sub>p</sub>	Evaporação potencial
E <sub>p0</sub>	Evaporação potencial do solo úmido exposto
e <sub>s</sub>	Pressão de vapor de saturação
ETA	Modelo climático de circulação regional ETA
ETA 20 CTRL	Modelo climático regional ETA com resolução horizontal de 20 km e membro controle
ETA 40 CTRL	Modelo climático regional ETA com resolução horizontal de 40 km e membro controle
ETA 40 HIGH	Modelo climático regional ETA com resolução horizontal de 40 km e membro alto
ETA 40 LOW	Modelo climático regional ETA com resolução horizontal de 40 km e membro baixo
ETA 40 MID	Modelo climático regional ETA com resolução horizontal de 40 km e membro médio
ET <sub>c</sub>	Evapotranspiração da cultura
ET <sub>ref</sub>	Evapotranspiração de referência
ET <sub>w0</sub>	Taxa de evapotranspiração para a cultura úmida
FARSUL	Federação da Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul
FEE	Fundação de Economia e Estatística
FEPAGRO	Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária
G	Fluxo de calor no solo
GSLIB	Geostatistical Software Library
h	Separação entre amostras
H	Saída do teste de hipótese
ha	Hectare
HIGH	Membro alto de sensibilidade
H <sub>0</sub>	Hipótese nula
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

IWR	Demanda de água para irrigação
$K(\psi)$	Condutividade hidráulica não saturada
$k_c$	Coefficiente da cultura
$K_{sat}$	Condutividade hidráulica saturada
LAI	Índice de área foliar
LHS	Amostragem do Hipercubo Latino
LOW	Membro baixo de sensibilidade
$\ell_{root}(z)$	Distribuição de densidade do comprimento das raízes
LVd	Latossolo Vermelho distrófico
LVdf	Latossolo Vermelho distroférrico
m	Parâmetro de forma da CR
MCG	Modelo climático de Circulação Global
MCR	Modelo climático de Circulação Regional
MID	Membro médio de sensibilidade
mP	Massa de ar marítima polar
mT	Massa de ar marítima tropical
n	Parâmetro de forma da CR
$N(h)$	Número de pares de amostras separadas pela distância h
NVef	Nitossolo Vermelho eutroférrico típico
P	Precipitação
p	Valor p do teste de hipóteses
P5	Percentil 5% de não excedência
P50	Percentil de 50% de não excedência (mediana)
P95	Percentil de 95% de não excedência
$P_i$	Taxa de precipitação interceptada diariamente
PIB	Produto Interno Bruto
ppm	Partes por milhão
PRCPTOT	Precipitação total anual de dias úmidos (mm)
Q1	Quantil de 25% de não excedência
Q3	Quantil de 75% de não excedência
R30	Contagem anual do número de dias em que a precipitação é maior que 30 mm (dias)

R95p	Precipitação anual total dos dias em que a precipitação diária é maior que o percentil 95% (mm)
R99p	Precipitação anual total dos dias em que a precipitação diária é maior que o percentil 99% (mm)
R <sub>n</sub>	Fluxo de radiação líquida na superfície da cultura
RS	Rio Grande do Sul
RX1 dia	Precipitação máxima em 1 dia (mm)
RX5 dia	Precipitação anual máxima de 5 dias consecutivos (mm)
RYbe	Neossolo Flúvico Tb eutrófico
S <sub>a</sub> ( $\psi$ )	Parcela de extração de água pelas raízes das plantas
S <sub>c</sub> (z)	Máxima extração de água pelas raízes da planta na profundidade z
SGeMS	Stanford Geostatistical Modeling Software
SSG	Simulação Sequencial Gaussiana
SWAP	Soil Water Atmosphere Plant model
T	Temperatura
t	Tempo
T <sub>a</sub>	Transpiração real da planta
T <sub>c</sub>	Transpiração potencial da planta
ton	Tonelada
u <sub>2</sub>	Velocidade do vento a 2 m de altura
W <sub>frac</sub>	Fração do dia em que a cultura está úmida
z	Profundidade do perfil do solo
Z(u)	Variável na localização u
$\alpha$	Parâmetro de forma da CR
$\kappa_{gr}$	Coefficiente de extinção para radiação solar

## 1. INTRODUÇÃO

O clima desempenha um papel fundamental sobre a agricultura e, portanto, esta é diretamente afetada pelas suas variações e mudanças. Se estas mudanças climáticas ocorrerem, todos os aspectos da agricultura deverão ser revistos, dentre eles a demanda de água, os sistemas de irrigação, o uso da terra, bem como as características sazonais nos sistemas de cultivo (Hwan et al., 2013). As influências de possíveis modificações no clima implicam não somente em efeitos diretos sobre a agricultura, mas também indicam que outros recursos hídricos poderão ser afetados, como a intensificação da demanda por águas subterrâneas.

As mudanças no clima são causadas principalmente pelo aumento das emissões de gases que contribuem para o efeito estufa, resultantes das atividades humanas como queima de combustíveis fósseis e desmatamento, bem como de eventos naturais como erupções vulcânicas (IPCC, 2007).

Possíveis efeitos do clima sobre a agricultura incluem: 1) efeito do aumento de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) sobre o ciclo respiratório da planta; 2) efeito das mudanças na temperatura e precipitação, e 3) efeito do aumento do nível do mar e consequente redução das áreas cultivadas devido ao aumento da salinidade dos solos (Bocchiola et al, 2013). Enquanto teores mais elevados de  $\text{CO}_2$  na atmosfera contribuem positivamente para o desenvolvimento da planta (dentro de uma faixa de 300 a 1000 ppm), o aumento da temperatura pode reduzir a produtividade, dependendo do estágio de desenvolvimento que a planta se encontre e também devido à redução do número de dias do ciclo da cultura. Se uma redução na precipitação não for compensada pela irrigação, as plantas tendem a diminuir a taxa de transpiração para manter sua reserva de água constante. Desta forma, se uma escassez hídrica prolongada ocorrer, a umidade do solo cairá abaixo do ponto de murcha e a planta sofrerá danos permanentes.

Atualmente, o nível de  $\text{CO}_2$  na atmosfera do planeta é de 390 ppm com uma projeção de alcançar 700 ppm em diferentes cenários futuros de mudanças climáticas (Jalota et al., 2013), enquanto que, nos últimos 100 anos, a temperatura média global se elevou em  $0,74 \pm 0,18$  °C (Trenberth e Jones, 2007). Modelos de projeções climáticas apresentados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2007) indicam que, sob um cenário mais pessimista, a temperatura da superfície da Terra poderá aumentar de 1,1 a 6,4 °C durante o

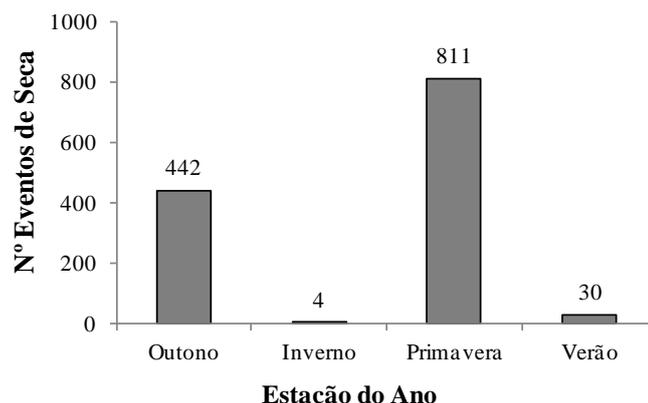
século XXI. Segundo Olesen e Bindi (2002), espera-se que efeitos positivos destas mudanças sejam encontrados somente em países nórdicos.

Alexander (2010), em seu livro “Aquecimento Global Alarme Falso”, afirma que os modelos do IPCC são muito sensíveis ao CO<sub>2</sub>, resultando em um aquecimento superestimado da superfície da Terra. Além disso, reconhece que o planeta está aquecendo, porém destaca que o CO<sub>2</sub> não é a principal causa, embora não aponte indícios sobre as possíveis causas. Afirma também que o planeta vivencia uma fase de resfriamento global, enfatizando que, a partir de 2002, os termômetros globais estariam registrando uma diminuição nas temperaturas, tendência que permaneceria para os próximos 30 anos.

Os estudos de Marengo et al. (2007) e de Hamada et al. (2008) indicam que a temperatura no Brasil aumentou aproximadamente 0,75°C até o fim do século passado em todas as estações do ano, porém de forma mais pronunciada no período de junho a agosto. Acredita-se que as mudanças climáticas tornem os países em desenvolvimento, como o Brasil, mais vulneráveis e que os maiores impactos possam ser sobre seus ecossistemas e agricultura (Nobre et al., 2005).

Como no Brasil o agronegócio é responsável por cerca de 30% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional, variações significativas nas condições ambientais poderão acarretar sérias consequências na produtividade de diversas culturas. Estima-se que as chuvas no Sudeste e no Sul do País deverão ficar entre 5% e 15% mais elevadas até o fim deste século (Marengo et al., 2009). No Estado do Rio Grande do Sul, uma análise do período de 1985 a 2005 revelou que já se acumularam perdas de 37,8 milhões de toneladas de grãos de soja e trigo devido a estiagens causadas pelos fenômenos climáticos El Niño e La Niña (Aguilar, 2005).

Um estudo mais recente apresentado por Nedel et al. (2010) e representativo do período de 2003-2009 indicou que 70% dos decretos por seca registrados no Estado neste período correspondem à metade Norte, sendo que as regiões do Alto Uruguai (490 eventos), Planalto Médio Rio-Grandense (248 eventos), Missões (148 eventos) e Depressão Central (116 eventos) foram as mais atingidas. Além disto, a maior ocorrência de eventos de seca é registrada durante os meses de primavera (Figura 1.1), fazendo com que a produção das lavouras neste período acabe sendo mais prejudicada porque a fase de desenvolvimento das culturas coincide com os meses de estiagem mais frequentes, ou seja, de novembro a março (Focchezatto e Grandó, 2009).



**Figura 1.1:** Eventos de secas registrados no RS durante o período de 2003 a 2009 (Nedel et al., 2010).

Atualmente, os estudos destinados a avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre a agricultura utilizam-se de modelos de circulação geral (MCG) e/ou regional (MCR) para a geração de dados diários de variáveis meteorológicas (precipitação, temperatura, radiação, etc.), sendo que estes últimos cobrem um área limitada do globo, porém com maior resolução (Jalota et al, 2013). Pesquisas deste tipo envolvem a coleta de dados e *downscaling*, simulações numéricas, análise dos resultados e interpretações dos impactos sobre a agricultura, fornecendo informações nos processos de gerenciamento dos sistemas agrícolas irrigados ou não.

Mesmo que o conhecimento sobre as causas do aquecimento global e suas inquestionáveis consequências sejam bem conhecidos, é extremamente complexo reconhecer as incertezas sobre as projeções futuras e aceitá-las como seguras em um processo de tomada de decisão. Primeiramente, é crucial que o modelo utilizado para simular o desenvolvimento da cultura possa estimar com precisão as variações históricas das demandas de água, antes de simular os impactos das mudanças climáticas (Daccachea et al., 2011).

Um modelo agro-hidrológico extensivamente testado (Van Lier et al., 2015; Van Dam et al., 2008; Eitzinger et al., 2004; Kite, 2000; Kaufman et al., 2014) e empregado em diferentes pesquisas na área de fluxo de água no solo e no desenvolvimento da planta é o modelo SWAP (*Soil-Water-Atmosphere-Plant*) (Van Dam, 2000). Consiste em um modelo unidimensional que simula o transporte vertical de água, contaminantes e calor através do perfil do solo ao mesmo tempo em que considera o desenvolvimento de vegetação na superfície.

A aplicação deste modelo requer o emprego de três conjuntos de informações básicas: caracterização do solo, parâmetros da(s) cultura(s) e dados meteorológicos, sendo que, cada um deles comporta grande incerteza sobre a realidade física, principalmente no que se refere à caracterização dos atributos físicos do solo e das variáveis climáticas.

Dentro deste contexto, um dos maiores desafios na modelagem do fluxo de água no solo é quantificar a variabilidade espacial das suas propriedades físicas e hidráulicas, pois estas são extremamente heterogêneas. Existem inúmeros trabalhos que simulam o efeito da variabilidade espacial do solo sobre o movimento de água na zona vadosa e/ou saturada (Santos et al., 2012; Paleologos e Sarris, 2011; Champo e Zamarrón, 2010; Coppola et al., 2009; Taskinen et al., 2008; Jang e Liu, 2004; Liu et al., 2002), porém, estudos focando no efeito sobre uma cultura em desenvolvimento ainda são raros (Hu et al., 2007).

Em segundo lugar, não há um consenso sobre quão perto os modelos climáticos estão de representar as incertezas associadas à geração de variáveis climáticas em cenários futuros. Tais incertezas inerentes aos modelos podem ser atribuídas a diferentes discretizações, parametrizações e modelos de ciclo do carbono (Nkomozepe e Chung, 2012).

Como o clima evolui no tempo, o processo estocástico é um item central na análise estatística do clima e nas tentativas de reproduzir tendências e comportamentos com base em séries históricas observadas. Atualmente, a forma de se avaliar as incertezas sobre as projeções futuras tem sido realizada por meio da utilização de múltiplos modelos e cenários de emissões. Todavia, é possível que as condições climáticas futuras (que ocorrerão na realidade) não sejam contempladas pelos cenários projetados, os quais, em geral, tentam reproduzir condições futuras mais pessimistas ou otimistas de altas, médias ou baixas concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub>.

Como mencionado anteriormente, a utilização de modelos agro-hidrológicos (como o SWAP) para simular os efeitos das mudanças climáticas futuras sobre a agricultura, requer uma análise criteriosa das variáveis que o alimentam, justificando o uso de abordagens estocásticas, tanto espaciais quanto temporais.

Considerando os aspectos das mudanças climáticas supramencionados e algumas de suas consequências mais significativas sobre a agricultura, nesta Tese foi realizada uma pesquisa sobre as influências das projeções do clima sobre as demandas futuras de água para a irrigação utilizando-se de uma abordagem estocástica espacial e de análise de incertezas temporal. A pesquisa foi aplicada na mesorregião Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (RS), em uma bacia localizada no município de Pejuçara, cujos solos, sistemas de cultivo,

usos do solo, clima e culturas foram considerados representativos da região Noroeste do RS. A unidade de estudo considerada na pesquisa foi a Bacia Hidrográfica do Arroio Donato (1,1 Km<sup>2</sup>), apresentada em capítulos subsequentes.

Esta pesquisa, sob o ponto de vista técnico-científico, é extremamente relevante, pois investigou os mecanismos de fluxo e armazenamento de água no solo e sua interação com o desenvolvimento das culturas. Além disso, sob o ponto de vista econômico, o Estado do Rio Grande do Sul contribui com grandes safras de importantes culturas no cenário nacional, como é o caso da soja. Finalmente, sob o ponto de vista social, destaca-se a importância do estudo para a comunidade agrícola e urbana, no sentido da conscientização pelo uso da água e sua escassez atual e, possivelmente, futura.

### **1.1 Referências Bibliográficas**

- AGUIAR, R. Estiagem: como conviver com este fenômeno? *Extensão Rural e Desenvolvimento Sustentável*, v. 1. n. 4, 2005.
- ALEXANDER, R.B. Aquecimento Global: Alarme Falso. Rio de Janeiro: Gryphus, 2010. 201p.
- BOCCHIOLA, D.; NANA, E.; SONCINI, A. Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po valley of Italy. *Agricultural Water Management*, v. 116, p. 50-61, 2013.
- CHAMPO, R.S. e ZAMARRÓN, G.S. H. Convergence analysis for Latin-hypercube lattice-sample selection strategies for 3D correlated random hydraulic-conductivity fields. *Geofísica Internacional*, v. 49, n. 3, p. 131-140, 2010.
- COPPOLA, A.; BASILE, A.; COMEGNA, A.; LAMADDALENA, N. Monte Carlo analysis of field water flow comparing uni- and bimodal effective hydraulic parameters for structured soil. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 104, p. 153-165, 2009.
- DACCACHEA, A.; WEATHERHEAD, E.K.; STALHAMB, M.A.; KNOX, J.W. Impacts of climate change on irrigated potato production in a humid climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 151, p. 1641-1653, 2011.
- EITZINGER, A.J.; TRNKA, B.M.; HÖSCH, C.J.; ŽALUD, Z.B.; DUBROVSKÝ, M. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. *Ecological Modelling*, v. 171, p. 223-246, 2004.

- FOCCHEZZATO, A. e GRANDO, M.Z. Efeitos da estiagem na economia do Rio Grande do Sul: uma abordagem multissetorial. Textos para Discussão FEE nº 62. Secretaria do Planejamento e Gestão Fundação de Economia e Estatística Siegfried Emanuel Heuser. Porto Alegre, 2009.
- HAMADA, E.; GONÇALVES R.R.V.; ORSINI, J.A.M.; GHINI, R. Cenários climáticos futuros para o Brasil. In: GHINI, R.; HAMADA, E. (eds). Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil. Brasília-DF: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2008. 331 p.
- HU, K.; WHITE, R.; CHEN, D.; LI, B.; LI, W. Stochastic simulation of water drainage at the field scale and its application to irrigation management. *Agricultural Water Management*, v. 89, p. 123-130, 2007.
- HWAN, Y.S.; YONG, C.J.; HYUN, L.S.; GYEONG, O.Y.; KOUN, Y.D. Climate change impacts on water storage requirements of an agricultural reservoir considering changes in land use and rice growing season in Korea. *Agricultural Water Management*, v. 117, p. 43-54, 2013.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: Synthesis Report. Core Writing Team, PACHAURI, R.K.; REISINGER, A. (eds). Geneva: IPCC, 104 p., 2007.
- JALOTA, S.K.; KAUR, H.; KAUR, S.; VASHISHT, B.B. Impact of climate change scenarios on yield, water and nitrogen-balance and use efficiency of rice-wheat cropping system. *Agricultural Water Management*, v. 116, p. 29-38, 2013.
- JANG, C.S. e LIU, C.W. Geostatistical analysis and conditional simulation for estimating the spatial variability of hydraulic conductivity in the Choushui River alluvial fan, Taiwan. *Hydrological Processes*, v. 18, p. 1333-1350, 2004.
- KAUFMAN, V.; PINHEIRO, A.; CASTRO, N.M.R. Simulating transport of nitrogen and phosphorus in a Cambisol after natural and simulated intense rainfall. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 160, p. 53-64, 2014.
- KITE, G. Using a basin-scale hydrological model to estimate crop transpiration and soil evaporation. *Journal of Hydrology*, v. 229, n. 1-2, p. 59-69, 2000.
- LIU, C.W.; JANGE, C.S.; CHEN, S.C. Three-dimensional spatial variability of hydraulic conductivity in the Choushui River alluvial fan, Taiwan. *Environmental Geology*, v. 43, p. 48-56, 2002.

- MARENGO, J.A.; ALVES, L.; VALVERDE, M.; ROCHA, R.; LABORBE, R. Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do sul para o Século XXI: projeções de clima futuro usando três modelos regionais. Relatório 5, Ministério do Meio Ambiente – MMA, Secretaria de Biodiversidade e Florestas – SBR, Diretoria de Conservação da Biodiversidade – CDBio Mudanças do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília, 2007.
- MARENGO, J.A.; SCHAEFFER, R.; PINTO, H.S.; ZEE, D.M.W. Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil. Rio de Janeiro: FBDS, 2009.
- NEDEL, A.; SAUSEN, T.; SAITO, S. Zoneamento dos desastres naturais ocorridos no estado do Rio Grande do Sul no período 2003-2009 – Parte I: Seca. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belém, PA. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Belém. PA: SBMET. p. 1-5, 2010.
- NKOMOZEPI, T. e CHUNG, S.O. Assessing the trends and uncertainty of maize net irrigation water requirement estimated from climate change projections for Zimbabwe. *Agricultural Water Management*, v. 111, p. 60-67, 2012.
- NOBRE, C.A.; ASSAD, E.D.; OYAMA, M.D. Mudança ambiental no Brasil: o impacto do aquecimento global nos ecossistemas da Amazônia e na agricultura. *Scientific American Brasil*, n. 12, p. 70-75, 2005.
- OLESEN, J.E. e BINDI, M. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy*, v. 16, p. 239-262, 2002.
- PALEOLOGOS, E.K. e SARRIS, T.S. Stochastic analysis of flux and head moments in a heterogeneous aquifer system. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 25, p. 747-759, 2011.
- SANTOS, K.S.; MONTENEGRO, A.A.A.; ALMEIDA, B.G.; MONTENEGRO, S.M.G.; ANDRADE, T.S.; FONTES, R.V.P. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 8, p. 828-835, 2012.
- TASKINEN, A.; SIRVIO, H.; BRUEN, M. Generation of two-dimensionally variable saturated hydraulic conductivity fields: Model theory, verification and computer program. *Computers & Geosciences*, v. 34, p. 876-890, 2008.
- TRENBERTH, K.E. e JONES, P.D. Observations: surface and atmospheric climate change. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M., CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.

- B. TIGNOR, M.; MILLER, H. L. (eds) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 237 p., 2007.
- VAN DAM, J.C. Field scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation and case studies. PhD thesis, Wageningen University, 167 p, 2000.
- VAN DAM, J.C; GROENENDIJK, P.; HENDRIKS, R.F.A; KROES, J.G. Advances of Modeling Water Flow in Variably Saturated Soils with SWAP. *Vadose Zone Journal*, v. 7, 640-653, 2008.
- VAN LIER, Q.J.; WENDROTH, O.; VAN DAM, J.C. Prediction of winter wheat yield with the SWAP model using pedotransfer functions: An evaluation of sensitivity, parameterization and prediction accuracy. *Agricultural Water Management*, v. 154, p. 29-42, 2015.

## 2. CONTEXTUALIZAÇÃO, JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

### 2.1 Contextualização e Justificativas

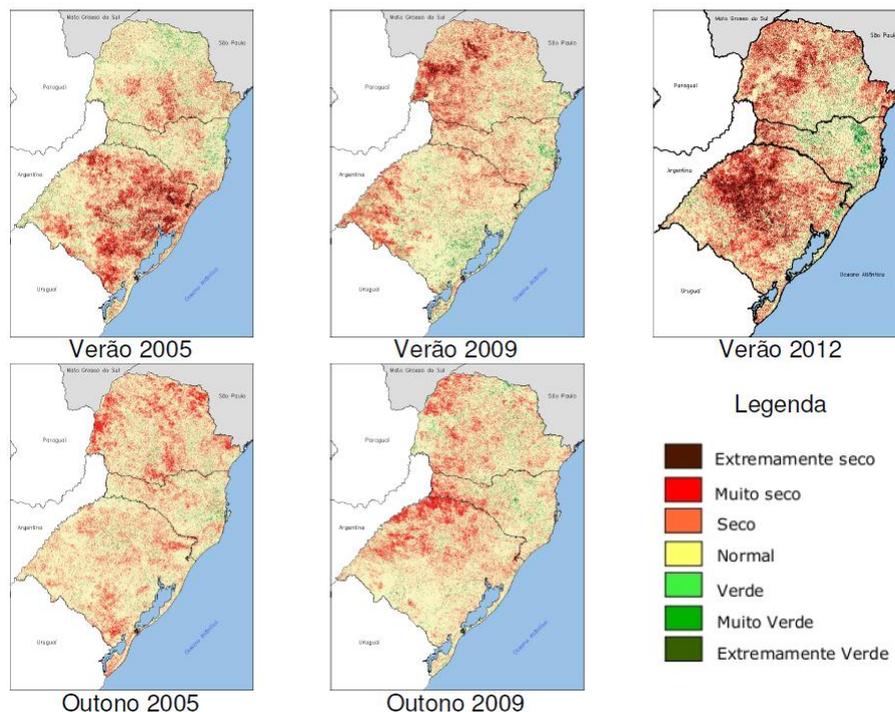
As principais mudanças climáticas previstas incluem aumento na temperatura média, elevação da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, alteração da distribuição espacial das chuvas, aumento da evapotranspiração durante o verão e maior ocorrência de eventos extremos como vendavais, granizo, etc.

É possível que, mesmo se todas as medidas para a redução das emissões e resgate de carbono forem tomadas, um aumento de 2°C na temperatura média da Terra até o fim do século XXI (em um cenário mais otimista) pareça inevitável (Marengo et al., 2009; Banco Mundial, 2010). Este fato demonstra que medidas de mitigação dos efeitos desta alteração na temperatura devem ser pensadas desde já por meio de pesquisas que avaliem estes impactos sobre a agricultura.

No trabalho realizado por Souza Junior et al. (2012), o qual utilizou imagens de satélite para caracterizar as estiagens na região Sul do Brasil no período de 2001 a 2012, foram identificadas três grandes estiagens no Rio Grande do Sul, mais expressivas que nos outros estados da região: verão e outono de 2005, verão e outono de 2009 e verão de 2012 (Figura 2.1). Nota-se que as regiões norte/noroeste do RS foram as mais atingidas, sendo que 56% do território foi afetado por alguma anomalia significativa na vegetação no verão de 2012.

Neste contexto, pode-se citar também o trabalho realizado por Albuquerque (2010), que realizou um estudo dos processos de gestão da seca no RS, analisando a metodologia utilizada pela Defesa Civil e comprovando que tal metodologia não é eficiente na identificação dos períodos secos e das regiões atingidas no Estado do RS.

A nota técnica nº 10 (06/06/2012) da Fepagro apresenta dados sobre a estiagem ocorrida de novembro de 2011 a maio de 2012 (e que prosseguiu até agosto de 2012) e sua influência sobre a produção agropecuária no Rio Grande do Sul. Os resultados indicam que em Cruz Alta (cidade vizinha à área de estudo deste trabalho) foi registrada a menor precipitação acumulada durante estes meses, de apenas 311 mm, quando a normal do período é de 865 mm. Na maioria das regiões, observou-se que os valores de chuvas medidos oscilaram de 45% a 70% da média normal.



**Figura 2.1:** Mapas de anomalias da vegetação na região Sul do Brasil (Adaptado de Souza Junior et al., 2012).

A agricultura é a base da economia do Estado, sendo a soja e o milho algumas das culturas (não irrigadas) mais importantes e que representam 70% da área cultivada e 61% da produção de grãos do RS, conforme IBGE (2012). Segundo dados da Emater/RS, as safras demilho e soja sofreram reduções de 47,3% e 50% em 2012 com relação à safra de 2010/2011. As regiões Norte e Noroeste foram as mais afetadas, sendo que na Regional Ijuí (próximo à cidade de Pejuçara) registrou-se uma redução de 57,3% de rendimento de grãos. Tais fatos demonstram que a ocorrência de eventos extremos no Estado do RS vem acompanhada de perdas significativas na produção agrícola, como apresentado na Tabela 2.1 para os períodos de 1985 a 2005.

Outro agravante na região Noroeste do RS e que justifica a realização de pesquisas é o fato de que o sistema de cultivo é essencialmente não irrigado, com a ocorrência de alguns pivôs centrais. Este sistema de irrigação não é mais expressivo nesta região devido a problemas de armazenamento de água, baixas vazões nos rios, problemas de topografia e/ou tamanho da área, bem como disponibilidade de energia. Desta forma, a menos que medidas para intensificar a irrigação na região sejam tomadas, as consequências continuarão sendo severas e resultarão em perdas consideráveis na produção agrícola devido às alterações das condições climáticas e ocorrência de eventos extremos.

**Tabela 2.1:** Reduções de safra para as culturas de milho e soja provocadas por estiagens no RS no período de 1985-2005.

<b>ANO AGRÍCOLA</b>	<b>REDUÇÃO DE SAFRA (t)</b>	<b>CONDIÇÃO CLIMÁTICA</b>
<b>1985/1986</b>	2.600.000	Ano Neutro
<b>1987/1988</b>	3.600.000	El Niño fraco
<b>1990/1991</b>	5.500.000	El Niño fraco
<b>1995/1996</b>	2.830.000	La Niña
<b>1996/1997</b>	2.135.000	Ano Neutro
<b>1998/1999</b>	2.804.000	La Niña
<b>1999/2000</b>	2.380.000	La Niña
<b>2001/2002</b>	2.500.000	Ano Neutro
<b>2003/2004</b>	4.530.000	Ano Neutro
<b>2004/2005</b>	8.970.000	El Niño fraco
<b>TOTAL</b>	<b>37.849.000</b>	

Fonte: Laboratório de Agrometeorologia da Fepagro (Aguiar, 2005).

Obviamente que os impactos são mais ou menos severos em função não somente das diferentes condições climáticas, porém também em função dos diferentes tipos e usos do solo. O desenvolvimento da planta depende fortemente da disponibilidade hídrica, que pode ser originária da precipitação, da irrigação ou mesmo da água armazenada no solo. Dentre estas três fontes, a última é essencial, pois garante o fornecimento de água para a planta quando não ocorrem as outras duas. No entanto, o fluxo e o armazenamento de água no solo estão diretamente associados às suas propriedades hidráulicas, a exemplo da condutividade hidráulica e da curva de retenção de água no solo.

Estas propriedades podem variar significativamente de um ponto para outro, mesmo quando separados por apenas alguns metros de distância. Dessa forma, é crucial que a variabilidade espacial das propriedades hidráulicas do solo seja contabilizada nos modelos agro-hidrológicos. Tais modelos permitem até mesmo que diferentes regimes de irrigação (se aplicável) e diferentes manejos de uso do solo sejam estabelecidos. Portanto, por estas práticas dependerem das propriedades do solo, justifica-se o emprego de uma abordagem estocástica que tenha em conta esta variabilidade, bem como as incertezas associadas.

No que diz respeito às variáveis meteorológicas (tais como a precipitação e a temperatura), as quais afetam mais fortemente a produtividade agrícola por apresentarem variabilidade tanto espacial quanto temporal, sabe-se que os modelos climáticos são muito imprecisos (Eyster, 2010). Como mencionado na Introdução, é possível que, mesmo utilizando-se diferentes modelos para avaliar as incertezas sobre estas previsões, as condições climáticas futuras reais (que virão a ser observadas) podem não ser contempladas pelas projeções de nenhum deles. Esta ambiguidade, impossível de ser eliminada devido à

complexidade da modelagem climática, justifica o emprego de uma análise de incertezas mais robusta.

Outra forte justificativa a esta pesquisa é que a incidência de doenças e pragas agrícolas é influenciada pela temperatura, umidade relativa do ar e molhamento foliar diário, sendo este último dependente da ocorrência e duração da precipitação. Se alterações nestas variáveis forem muito expressivas, é possível que doenças que antes não atingiam certas culturas, passem a provocar perdas significativas nas lavouras, e vice-versa. Caso os efeitos sejam negativos, ou seja, maior incidência de doenças, acredita-se que uma busca mais intensa por melhoramentos genéticos ocorrerá.

Por fim, alterações na temperatura e precipitação podem *a priori* ser tanto benéficas como prejudiciais, dependendo das condições climáticas em uma determinada localização do planeta. Como mencionado previamente, enquanto o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> até um limite de 1.000 ppm é benéfico para a planta, um aumento na temperatura não o é (Bocchiola et al., 2013). Adicionalmente, a influência da precipitação só pode ser melhor analisada e incorporada no balanço geral de impactos positivos e negativos quando abordada local ou regionalmente, a fim de saber se existe uma tendência para aumento ou redução no futuro.

Desta forma, considerando toda a contextualização apresentada até aqui e as justificativas mais importantes já elucidadas, neste trabalho busca-se confirmar a seguinte hipótese:

**HIPÓTESE:** Os efeitos das alterações climáticas previstas para cenários futuros sobre as demandas de água para irrigação poderão ser estimados e avaliados por modelagem agro-hidrológica, a qual deve incluir aspectos relacionados à variabilidade espacial das propriedades do solo.

Para comprovar esta hipótese deve-se mostrar que a inclusão da variabilidade espacial melhora os resultados que são obtidos sem considerá-la. Para tanto, escolheu-se o município de Pejuçara como representativo da Região Noroeste do RS em função das culturas cultivadas e dos tipos de solos ali localizados, tendo como área de estudo a Bacia Hidrográfica do Arroio Donato.

## 2.2 Objetivos

Com base nos dados de projeções climáticas futuras gerados por diferentes modelos climáticos (cenário A1B) para a região de estudo e na amostragem de solo realizada na área para caracterização espacial dos atributos hidráulicos do solo, o objetivo principal da Tese é determinar as demandas futuras de água para irrigação na região Noroeste do RS e compará-las com as demandas do período atual. No entanto, estas estimativas serão obtidas segundo duas abordagens diferentes, uma determinística e outra estocástica, para que em segundo lugar, se possa verificar em que magnitude a variabilidade espacial do solo altera as estimativas de demandas de água, permitindo assim que a hipótese da Tese seja confrontada com os resultados. Esta avaliação será feita por meio da utilização do modelo SWAP para determinar as demandas futuras de água para a irrigação.

As etapas principais de pesquisa consistem de:

- investigar a variabilidade espacial do solo através da realização de amostragens de solo para caracterização espacial e determinação da curva de retenção de água no solo e da condutividade hidráulica saturada, já que estas são as propriedades hidráulicas mais importantes para determinar o balanço hídrico na interface solo-planta-atmosfera. Esta investigação será feita pelo método estocástico de simulação sequencial Gaussiana;
- verificar a existência de alguma tendência de alteração das variáveis climáticas através da análise de séries históricas do clima atual (1961-1990) e futuro (2011-2100);
- avaliar as incertezas temporais sobre as projeções do clima futuro;
- simular com o modelo SWAP as demandas futuras de água para irrigação, incorporando no modelo a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo (condutividade hidráulica e curva de retenção) e temporal das variáveis meteorológicas como precipitação, umidade do ar, temperatura, radiação solar e velocidade do vento;

## 2.3 Estrutura da Tese

A estrutura da tese foi desenvolvida no formato de capítulos independentes, cada um contendo seu referencial teórico, metodologia, resultados/discussões, conclusões parciais e referências bibliográficas específicos. A sequência de capítulos e os assuntos abordados em cada um foram:

- Capítulo 1: Introdução;
- Capítulo 2: Contextualização, justificativa, objetivos e hipótese;

- Capítulo 3: Análise da variabilidade espacial dos atributos físico-hidráulicos do solo (condutividade hidráulica saturada e a curva de retenção de água no solo) por meio de simulação geoestatística;
- Capítulo 4: Análise das séries temporais dos dados meteorológicos fornecidas por cada modelo climático considerado;
- Capítulo 5: Aplicação do modelo SWAP para determinar as demandas futuras de água para irrigação na área de estudo, sem considerar a variabilidade espacial do solo.
- Capítulo 6: Aplicação do modelo SWAP para determinar as demandas futuras de água para irrigação na área de estudo considerando a variabilidade espacial do solo. Análise dos resultados e verificação da hipótese.
- Capítulo 7: Conclusões e considerações finais;

#### **2.4 Referências Bibliográficas**

- AGUIAR, R. Estiagem: como conviver com este fenômeno? *Extensão Rural e Desenvolvimento Sustentável*, v. 1. n. 4, 2005.
- ALBUQUERQUE, T.M.A. Estudo dos Processos de Gestão de Seca: Aplicação no Estado do Rio Grande do Sul. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2010. (Tese de Doutorado)
- BANCO MUNDIAL. Relatório sobre o desenvolvimento mundial de 2010: desenvolvimento e mudança climática. Banco Mundial. - São Paulo: Editora UNESP, 2010. 440 p.
- FEPAGRO. Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária. Nota Técnica nº 10 – A estiagem de 2011/2012 e sua influência na produção agropecuária do Rio Grande do Sul. CemetRS, 2012.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção Agrícola Municipal 2011. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.
- MARENGO, J.A.; SCHAEFFER, R.; PINTO, H.S.; ZEE, D.M.W. Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil. Rio de Janeiro: FBDS, 2009.
- SOUSA JUNIOR, M.A.; LACRUZ, M.S.P.; SAUSEN, T.M.; COSTA, L.F.F.; PEREIRO, R.S. Estiagem na região sul do Brasil – Caracterização por meio de imagens EVI-MODIS. In: Congresso Brasileiro sobre Desastres Naturais. Rio Claro/SP, 2012.
- YESTER, A. The use of multi-model ensembles of IPCC 4th Assessment Report climate simulations for projections of Bolivian precipitation and temperature. Department of Geological Sciences The University of Michigan, 2010 (PhD Thesis).

### 3. SIMULAÇÃO GEOESTATÍSTICA DAS PROPRIEDADES FÍSICO-HIDRÁULICAS DO SOLO NA BACIA DO ARROIO DONATO

**Resumo:** Os processos de fluxo e armazenamento de água no solo estão diretamente associados às suas propriedades hidráulicas, as quais podem variar significativamente no espaço. Por estas razões, este trabalho objetivou realizar uma análise estocástica da condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) e dos parâmetros da curva de retenção de água no solo (CR) na bacia do Arroio Donato, a qual se localiza na região agrícola mais importante do Estado do Rio Grande do Sul. Foi empregada a técnica de simulação sequencial Gaussiana para geração de 100 campos aleatórios de cada variável. Os resultados revelaram maiores incertezas para  $K_{sat}$  e o parâmetro  $\alpha$  da CR e permitiu identificar que a grande heterogeneidade espacial das variáveis analisadas pode estar associada a fatores tais como clima, manejo e cobertura do solo, erros de amostragem, adensamento da malha amostral e também ao grau de compactação do solo. A variabilidade temporal das propriedades analisadas também representou grande influência sobre os resultados obtidos.

**Palavras-chave:** Condutividade hidráulica saturada, Curva de Retenção, Simulação Geoestatística.

#### 3.1 Introdução

O desenvolvimento das plantas depende fortemente da disponibilidade de água, a qual pode ser originária da precipitação e da irrigação. A sua maior ou menor disponibilidade depende do seu armazenamento no solo, pois este, aliado ao fluxo de água, garante a disponibilidade de água para as plantas. No entanto, o fluxo e o armazenamento de água estão diretamente associados às propriedades hidráulicas do solo (Coppola et al., 2009; Hu et al., 2007).

Como o solo é um meio heterogêneo, tais propriedades podem variar significativamente de um ponto para outro, como é o caso da condutividade hidráulica e da curva de retenção de água no solo (Taskinen et al., 2008). Além disso, sabe-se que as variáveis hidráulicas são de difícil obtenção no campo, demandam tempo e equipamentos caros, mão de obra capacitada e, devido à sua variabilidade, exigem muitas amostragens e dificilmente podem ser extrapoladas. A indisponibilidade dessas informações condiciona o uso de modelos hidrológicos a diversas suposições e simplificações quando tais informações não estão disponíveis, comprometendo a qualidade dos resultados obtidos ou revelando

apenas uma possibilidade de representar um fenômeno por meio de um conjunto fixo de parâmetros e valores das variáveis associadas (abordagem determinística).

A falta de dados sobre as características pedológicas e hidráulicas do solo são resultantes da necessidade de amostragens mais detalhadas, o que demanda maior investimento e tempo para sua realização. Propriedades que possuem esta especificidade são a condutividade hidráulica e a curva de retenção de água no solo. Por serem cruciais na modelagem de fluxo de água no solo, estas propriedades, e em maior frequência a primeira, têm sido avaliadas por diversos autores através de diferentes abordagens estatísticas, geoestatísticas e estocásticas (Santos et al., 2012; Paleologos e Sarris, 2011; Champo e Zamarrón, 2010; Coppola et al., 2009; Taskinen et al., 2008; Hu et al., 2007; Jang e Liu, 2004; Liu et al., 2002). O entendimento destas variáveis é importante, sendo requerido em estudos sobre a eficiência de técnicas de irrigação, drenagem e produtividade agrícola.

As técnicas geoestatísticas têm sido frequentemente utilizadas, não somente para descrever padrões espaciais e realizar interpolações de uma variável ao longo do espaço, mas também para modelar as incertezas sobre o seu valor desconhecido. Uma das formas de quantificar tais incertezas é por meio da simulação geoestatística, a qual consiste em métodos estocásticos baseados na obtenção de várias imagens equiprováveis (campos aleatórios) para a distribuição espacial de um atributo ou variável (Goovaerts, 1997).

Dentre os métodos de simulação geoestatística mais utilizados, tem-se a simulação sequencial Gaussiana, a qual utiliza a média e o desvio padrão da krigagem para gerar a forma da distribuição das incertezas associadas à estimativa em um determinado ponto.

A simulação geoestatística tem sido a técnica mais promissora e a mais utilizada para a análise de incertezas. Métodos mais simples de estimativas, como a krigagem, baseiam-se em fórmulas com médias ponderadas, e conseqüentemente, resultam em estimativas que apresentarão níveis significativos de suavização (Yamamoto, 2008). Isto significa que a continuidade espacial da superfície krigada é maior do que a dos dados observados (Souza, 2007).

Inúmeros trabalhos utilizaram métodos geoestatísticos para avaliar a variabilidade espacial dos atributos físicos e hidráulicos do solo. Santos et al. (2012) encontraram alto coeficiente de variação para a condutividade hidráulica e moderado grau de dependência espacial (alcances de até 135 m) a partir dos variogramas para solos de um vale aluvial no semiárido do Estado de Pernambuco. Já Furtunato et al. (2013), analisaram a variabilidade espacial da condutividade hidráulica saturada e dos parâmetros da curva de retenção por meio

de krigagem ordinária em solos de Pernambuco. Paleologos e Sarris (2011) investigaram a influência da variabilidade espacial da condutividade hidráulica saturada sobre o comportamento do fluxo e o nível freático em um aquífero com um modelo tridimensional. Os autores utilizaram métodos de simulação geoestatística condicional e não condicional, além de que também aplicaram técnicas de *upscaling* da condutividade hidráulica para mudança de suporte, em função de que as simulações numéricas foram realizadas em um grid com blocos maiores que o suporte amostral.

Champo e Zamarrón (2010) compararam a técnica de simulação sequencial Gaussiana (*sequential gaussian simulation* - SGS) com a amostragem do hipercubo latino (*latin hypercube sampling* - LHS) e constataram que o número de simulações necessárias para a convergência de cada método era menor para o primeiro do que para o segundo. No entanto, existem algumas desvantagens do método LHS com relação à SSG, pois o primeiro calcula as estatísticas somente após gerar todas as realizações (campos aleatórios) e se estas não forem satisfatórias, é necessário que um novo conjunto de realizações seja simulado. Ou seja, não é possível acumular as realizações de uma maneira sequencial, como é feito na SSG.

Outro trabalho interessante foi o desenvolvido por Hu et al. (2007). Os autores utilizaram o modelo agro-hidrológico HYDRUS-1D (Šimůnek et al., 1998) para simular o movimento de água através do perfil do solo, porém aplicando-o sobre diferentes campos aleatórios gerados por SSG. Zanolin et al. (2007) realizaram trabalho semelhante, porém simulando também o cultivo de milho irrigado através da espacialização do modelo agrônomico STICS (Brisson et al., 1998). Os resultados demonstraram significativas diferenças de produtividade ao longo da área estudada.

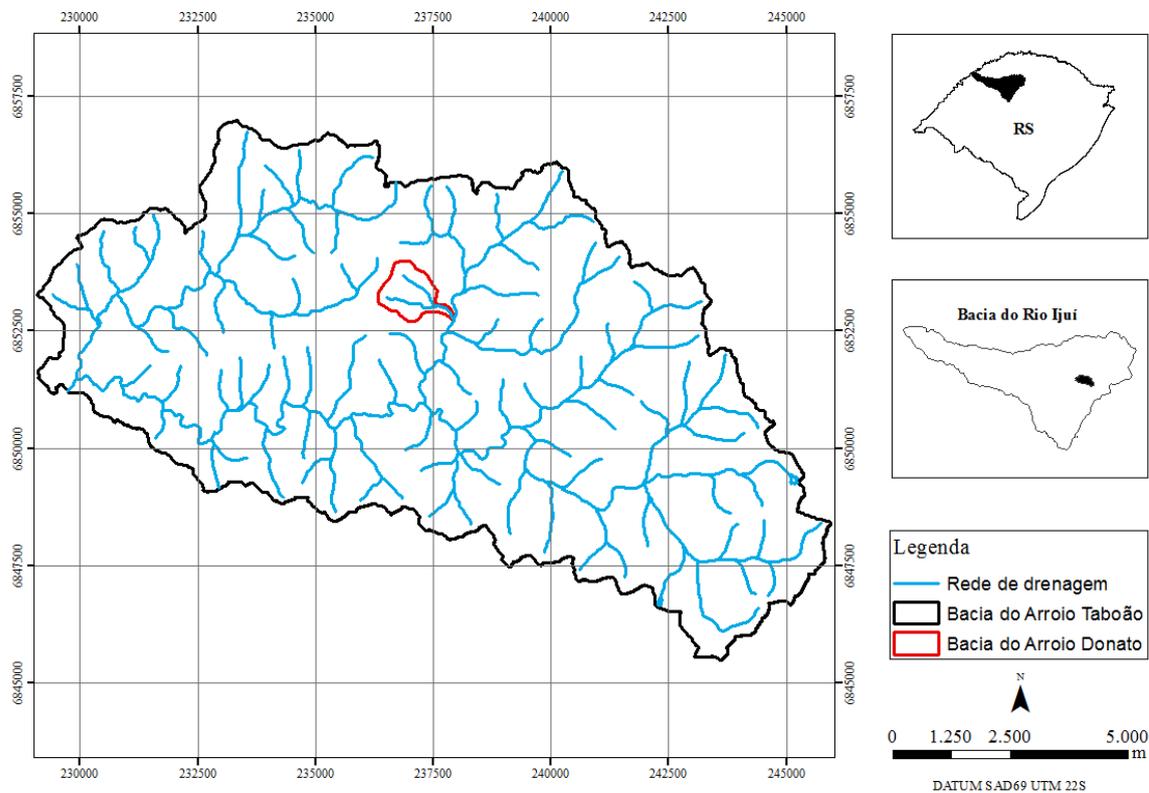
Este capítulo tem por objetivo realizar uma análise estocástica da condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) e dos parâmetros da curva de retenção de água no solo (CR) na bacia do Arroio Donato, RS. Os resultados poderão auxiliar o entendimento de como estas variáveis afetarão a simulação de outras variáveis importantes no gerenciamento e manejo do uso do solo desta bacia ou de outras áreas semelhantes a esta.

## **3.2 Metodologia**

### *3.2.1 Área de Estudo*

A área de estudo localiza-se no município de Pejuçara, região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (RS), com coordenadas geográficas de 28°25'32'' Sul e 53°40'52'' Oeste, e compreende a bacia do Arroio Donato, com área de 1,10 km<sup>2</sup>. Esta bacia faz parte de um

conjunto de sub-bacias do Rio Potiribu, o qual é contribuinte da margem esquerda do Rio Ijuí, este último sendo afluente da margem esquerda do Rio Uruguai (Figura 3.1).



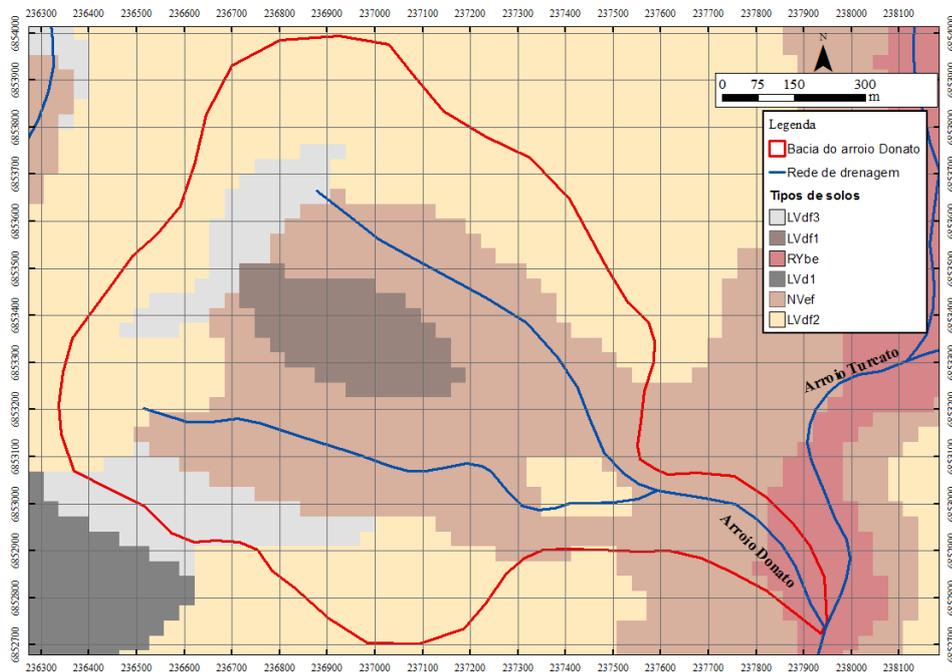
**Figura 3.1:** Localização da Bacia do Arroio Donato.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen é o *Cfa* (mesotérmico brando superúmido sem seca), com temperatura média anual de 20°C. O regime de temperaturas do Rio Grande do Sul é influenciado pelas massas de ar Marítima Tropical (mT), Marítima Polar (mP) e continental tropical (cT). O regime pluviométrico da região é regulado pelo anticiclone úmido e quente do Atlântico Sul (Castro e Chevallier, 1993), sendo que a precipitação média anual na região varia entre 1800 e 1900 mm (SEMC, 2002).

Os solos da bacia do Arroio Donato são, predominantemente, Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e Nitossolo Vermelho eutroférico (NVef) com alto teor de argila (>60%), caracterizando-se por serem bem drenados e profundos, podendo atingir mais de 8 m de profundidade (Castro et al., 2000). A Figura 3.2 apresenta a distribuição dos tipos de solos presentes na Bacia do Arroio Donato.

O uso do solo na área é essencialmente agrícola, com a prática do cultivo direto em toda a área da bacia, sendo as culturas de trigo (*Triticum spp.*), aveia (*Avena sativa*) e soja (*Glycine max*) as mais comuns. A sucessão de culturas (todas não irrigadas) ocorre com o

plântio de soja no verão, enquanto que, durante o inverno, diversifica-se entre os proprietários o cultivo de trigo e aveia.



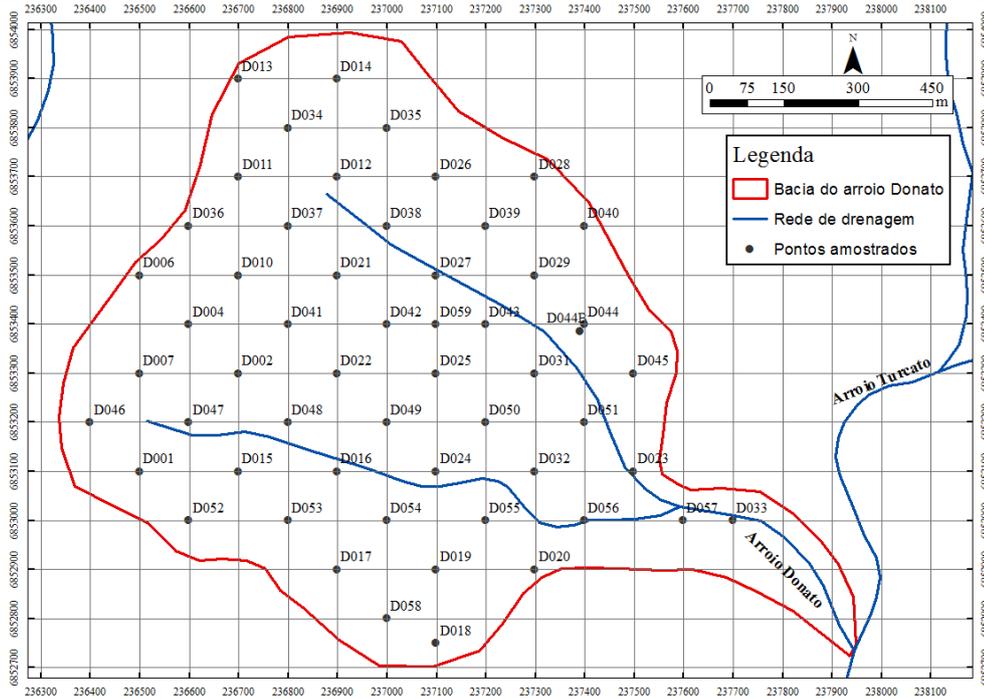
LVdf – Latossolo Vermelho distróférico; RYbe: Neossolo Flúvico Tb eutrófico; LVd: Latossolo Vermelho distrófico; NVec: Nitossolo Vermelho eutrófico típico

**Figura 3.2:** Distribuição dos solos na Bacia do Arroio Donato e entorno.

### 3.2.2 Amostragem de Solo - CR e $K_{sat}$

A fase de coleta de amostras foi concluída em três amostragens realizadas nos meses de agosto, outubro e novembro de 2012, sendo que na primeira, as culturas aveia e trigo estavam sendo cultivadas sobre a área da bacia; na segunda, o solo estava coberto apenas pela palha remanescente da colheita destas culturas e na terceira, a soja já estava sendo cultivada, com aproximadamente 40 cm de altura.

Foi estabelecida uma malha regular de 1300 x 1500 m abrangendo toda área da bacia. O solo foi amostrado nos pontos de cruzamento da malha, com espaçamentos regulares de 140 m e as amostras mais distantes em espaçamentos regulares de 200 m, perfazendo um total de 55 pontos (Figura 3.3). Estas amostras complementam o trabalho realizado por Medeiros (2004), a qual determinou as curvas de retenção em 23 dos 55 pontos deste trabalho (Tabela 3.1). Estas 23 curvas referem-se à profundidade de 30 cm e foram utilizadas neste trabalho e estão destacados na Tabela 3.1.



**Figura 3.3:** Localização dos pontos de coleta de amostras de solo na bacia do Arroio Donato.

Em cada um dos 23 pontos onde já havia dados da curva de retenção foi coletada apenas 1 amostra indeformada por ponto para a determinação da condutividade hidráulica saturada. As amostras foram extraídas com trado manual e extrator contendo cilindros de 51 cm<sup>3</sup> e 58,9 cm<sup>3</sup>. Nos demais pontos, foram coletadas duas amostras, uma para determinar a curva de retenção de água no solo e a outra para determinar a condutividade hidráulica saturada. Por limitações de tempo e laboratoriais, não foram coletadas repetições e a malha não pode ser mais densamente amostrada.

No caso da CR, os potenciais matriciais aplicados foram -10 kPa, -30 kPa, -50 kPa, -70 kPa, -100 kPa, -150 kPa, -200 kPa, -250 kPa, -300 kPa e -500 kPa. Os métodos utilizados foram o da câmara de Richards, para a determinação da CR, e o do permeâmetro de carga variável, para determinação de  $K_{sat}$ . Desta forma, as variáveis simuladas estocasticamente foram a condutividade hidráulica saturada do solo e os parâmetros da curva de retenção ( $n$ ,  $\alpha$ ,  $\theta_{sat}$  e  $\theta_{res}$ ) ajustados segundo o modelo de van Genuchten (1980), definido por:

$$\theta(\psi) = \theta_{res} + (\theta_{sat} - \theta_{res})(1 + |\alpha\psi|^n)^{-m} \quad (3.1)$$

**Tabela 3.1:** Localização dos pontos de coleta de amostras de solo na bacia do Arroio Donato.

Amostra	Ponto	Localização	
		Longitude	Latitude
1	D001	6853100	236500
2	D002	6853300	236700
3	D004	6853400	236600
4	D006	6853500	236500
5	D007	6853300	236500
6	D010	6853500	236700
7	D011	6853700	236700
8	D012	6853700	236900
9	D013	6853900	236700
10	D014	6853900	236900
11	D015	6853100	236700
12	D016	6853100	236900
13	D017	6852900	236900
14	D018	6852700	237100
15	D019	6852900	237100
16	D020	6852900	237300
17	D021	6853500	236900
18	D022	6853300	236900
19	D023	6853100	237500
20	D024	6853100	237100
21	D025	6853300	237100
22	D026	6853700	237100
23	D027	6853500	237100
24	D028	6853700	237300
25	D029	6853500	237300
26	D031	6853300	237300
27	D032	6853100	237300
28	D033	6853000	237700
29	D034	6853800	236800
30	D035	6853800	237000
31	D036	6853600	236600
32	D037	6853600	236800
33	D038	6853600	237000
34	D039	6853600	237200
35	D040	6853600	237400
36	D041	6853400	236800
37	D042	6853400	237000
38	D043	6853400	237200
39	D044	6853400	237400
40	D044B	6853386	237391
41	D045	6853300	237500
42	D046	6853200	236400
43	D047	6853200	236600
44	D048	6853200	236800
45	D049	6853200	237000
46	D050	6853200	237200
47	D051	6853200	237400
48	D052	6853000	236600
49	D053	6853000	236800
50	D054	6853000	237000
51	D055	6853000	237200
52	D056	6853000	237400
53	D057	6853000	237600
54	D058	6853800	237000
55	D059	6853400	237100

onde:  $\theta(\psi)$  ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) é a umidade volumétrica do solo associada a um determinado potencial matricial  $\psi$  ( $\text{cm}$ );  $\theta_{\text{sat}}$  ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e  $\theta_{\text{res}}$  ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) são as umidades de saturação e residual do solo, respectivamente;  $\alpha$  ( $\text{cm}^{-1}$ ),  $n$  (-) e  $m$  (-) são parâmetros de forma da curva de retenção, sendo que  $m = 1 - (1/n)$ . O aplicativo RETC (van Genuchten et al., 1991) foi utilizado no ajuste destes parâmetros.

### 3.2.3 Simulação Estocástica de $K_{\text{sat}}$ e dos parâmetros da CR

A análise da variabilidade espacial da condutividade hidráulica saturada e da curva de retenção de água no solo foi feita por meio de simulação geoestatística, mais especificamente, simulação sequencial Gaussiana (SSG).

A SSG requer a determinação de  $N$  sucessivas funções de distribuição acumulada condicional (ccdfs) em todos os nós do grid, condicionadas a um nível crescente de informações. Os algoritmos de simulação geoestatística partem do princípio de que um valor da variável será extraído aleatoriamente da distribuição de probabilidades acumuladas condicionadas em cada ponto da área e obtida a partir da média e da variância da krigagem nesse ponto (Goovaerts, 1997; Deutsch e Journel, 1998):

$$F(u; z | (n)) = \text{Prob}(Z(u) \leq z | (n)) \quad (3.2)$$

em que  $u$  é a localização da variável  $Z(u)$ ,  $z$  é um valor de corte da cdf e  $n$  são as informações condicionantes para construir a cdf dos valores simulados. Da mesma forma, diferentes mapas simulados (campos aleatórios) podem ser gerados conjuntamente a partir da amostragem aleatória das cdfs em todos os pontos do grid.

$$F(u'_1, u'_2, \dots, u'_N; z_1, \dots, z_N | (n)) = \text{Prob}(Z(u'_1) \leq z_1, \dots, Z(u'_N) \leq z_N | (n)) \quad (3.3)$$

em que  $N$  é o número de nós no grid e  $u'_i$  é a localização da variável onde não há dados observados.

Os *softwares* geoestatísticos utilizados foram o SGeMS (*Stanford Geostatistical Modeling Software*; Remy et al., 2009) e o GSLIB (*Geostatistical Software Library*; Deutsch e Journel, 1998), ambos de domínio público, para a realização de todas as análises estatísticas e geoestatísticas apresentadas no trabalho.

Inicialmente, foi feita uma análise exploratória dos dados amostrados de  $K_{sat}$  e dos parâmetros da curva de retenção. Na sequência, foram modelados os variogramas e determinadas as direções de maior e de menor continuidade espacial de cada variável. O conceito básico acerca dos variogramas é simples. São realizadas tentativas de quantificar a variabilidade de um fenômeno estacionário computando-se a variância da diferença entre os valores da variável entre as amostras separadas por uma distância  $h$ . Dessa forma, a natureza estrutural de um conjunto de dados é definida a partir da comparação de valores tomados simultaneamente em dois pontos, segundo uma determinada direção no espaço. A equação para a obtenção do variograma experimental é dada por (Goovaerts, 1997):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [z(u_{\alpha}) - z(u_{\alpha} + h)]^2 \quad (3.4)$$

onde  $N(h)$  é o número de pares de amostras separadas pela distância  $h$ ,  $z(u_{\alpha})$  e  $z(u_{\alpha} + h)$  são as amostras que compreendem os pares separados por  $h$ . Com base nos variogramas, foi gerado um modelo de blocos para toda a área e para cada variável através do método de simulação sequencial Gaussiana.

As etapas básicas para realização da simulação sequencial Gaussiana são (Goovaerts, 1997):

1. Normalização dos dados originais;

$$Y(u) = \Phi(Z(u)) \quad (3.5)$$

em que  $Z(u)$  é o atributo de interesse,  $Y(u)$  é o atributo normalizado e  $\Phi$  é a função de normalização.

2. Definir um caminho aleatório de visitação do grid somente uma vez;
3. Em cada nó  $u'$  do grid, determinar os parâmetros da distribuição gaussiana (média e variância) por meio de krigagem simples utilizando o variograma dos dados normalizados. No primeiro nó visitado, a krigagem é feita somente com os  $n$  dados amostrados, sendo que a estimativa em  $u'$  é tomada como a média da distribuição gaussiana e a variância da krigagem como a própria variância da distribuição gaussiana. Desta forma, cada nó do grid a ser visitado terá uma distribuição gaussiana a ele associado, condicionado ao número de dados

amostrados e previamente simulados considerados para realização da krigagem.

4. Extrair aleatoriamente um valor da distribuição gaussiana e adicioná-lo ao banco de dados;
5. Seguir para o próximo nó do grid e repetir os passos 3 e 4 agora considerando os dados amostrais, bem como o valor previamente simulado;
6. Visitar todos os  $N$  nós do grid até que todos sejam simulados.
7. Os valores simulados  $\{y^{(l)}(u_j'), j = 1, \dots, N\}$  estarão no espaço gaussiano e, portanto, deve-se retrotransformá-los para o espaço amostral original, aplicando a função de transformação inversa:

$$z^{(l)}(u_j') = \Phi^{-1}(y^{(l)}(u_j')) \quad j=1, \dots, N \quad (3.6)$$

8. Outras realizações para a mesma área podem ser geradas repetindo os passos 2 a 6 quantas vezes forem necessárias para representar a maior parte da variabilidade espacial do atributo analisado.

A validação da simulação geoestatística realizada para cada variável hidráulica foi realizada respeitando os seguintes critérios:

1. Todos os mapas gerados (campos aleatórios) pela simulação devem honrar os valores da variável nos  $n$  locais amostrados;

$$z^{(l)} = z(u_\alpha) \quad \forall u = u_\alpha \quad \alpha = 1, \dots, n \quad (3.7)$$

2. Os histogramas dos valores simulados devem ser muito semelhantes aos histogramas dos dados originais;

3. O modelo de variabilidade espacial (variograma) da variável deve ser igualmente reproduzido pelas diversas realizações.

Das simulações para cada variável resultaram 100 campos aleatórios que, quando combinados com o número de séries de dados meteorológicos, inviabilizariam o uso do modelo SWAP devido à grande demanda computacional. Desta forma, para cada variável, foram gerados dois campos aleatórios resultantes: um associado a um cenário mais

desfavorável (menos condutivo) para o fluxo de água e outro representando um cenário mais favorável (mais condutivo).

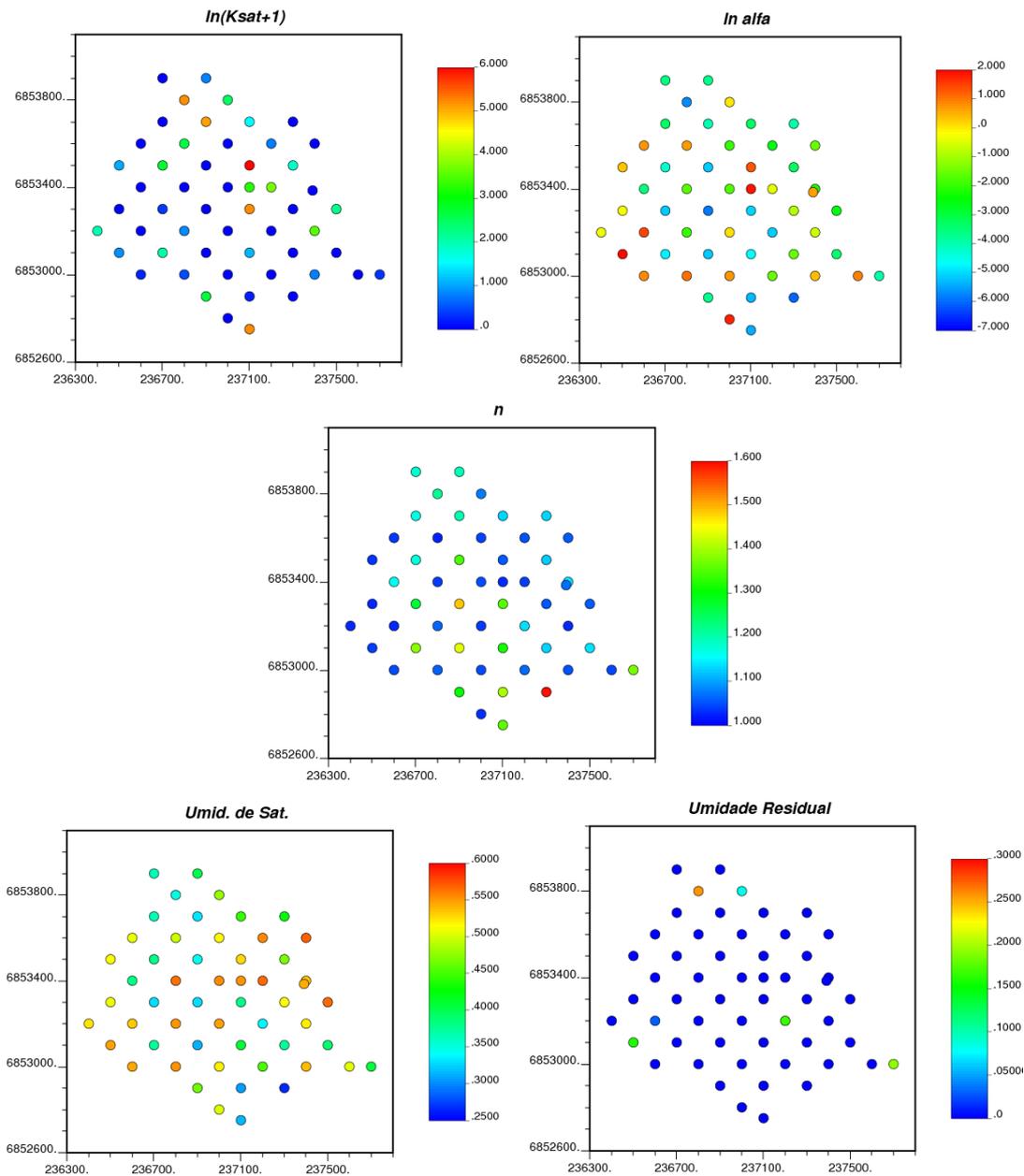
Estes campos foram gerados tomando-se a média de cada um dos 100 campos de cada variável e obtendo-se os percentis de 5% e 95% da distribuição acumulada destas médias (contendo os 100 valores da média). Os campos escolhidos correspondem àqueles cujas médias são iguais a estes percentis. Por exemplo, se o percentil e 5% de qualquer uma das quatro variáveis for “x”, então toma-se como campo resultante, o campo cuja a média mais se aproxima do valor “x”. O mesmo foi feito para cada uma das outras variáveis e também para o percentil de 95% de não excedência das médias.

### **3.3 Resultados e Discussões**

#### *3.3.1 Distribuição e Variabilidade Espacial das Variáveis*

Os mapas de localização de  $K_{sat}$  e dos parâmetros ajustados do modelo da curva de retenção de água no solo de van Genuchten (1980) permitem uma melhor visualização da distribuição espacial das variáveis analisadas (Figura 3.4). Para facilitar a simulação geoestatística na sequência, algumas variáveis foram pré-transformadas (Figura 3.4), como  $K_{sat}$  e o parâmetro  $\alpha$ . Os pontos azuis no mapa de  $K_{sat}$  representam os locais para os quais o valor da condutividade hidráulica saturada foi muito baixo e não detectável durante o ensaio no permeâmetro. Estes pontos representam as áreas mais críticas para manejo agrícola, uma vez que estão associadas à maior dificuldade de extração de água do solo. A área da bacia é predominantemente de baixa condutividade hidráulica, com poucas amostras dispersas de valores altos. Como mencionado por Santos et al. (2012), a classe textural do solo e as condições de cultivo agrícola também contribuem para a elevada heterogeneidade do solo.

Uma maior variabilidade foi observada para a umidade de saturação ao longo de toda a bacia, enquanto a umidade residual não varia muito em função de que o modelo RETC na maioria dos casos fixa-a igual a zero para poder seguir ajustando os demais parâmetros. Desta forma, devido à sua baixa variabilidade espacial, este último parâmetro não foi considerado na simulação geoestatística. A distribuição espacial dos valores de  $\theta_{sat}$  também pode estar relacionada com o tipo de solo localizado na área da bacia, todos Latossolos Vermelhos distroféricos (LVdf1, LVdf2 e LVdf3). Estes solos são caracterizados por serem porosos, porém suscetíveis à compactação. Isto explica por que os maiores valores de  $\theta_{sat}$  foram obtidos ao longo das nascentes, onde o solo está menos compactado.



**Figura 3.4:** Mapas de localização de  $K_{sat}$  e dos parâmetros da curva de retenção de água no solo.

Devido também ao fato de serem solos argilosos, é possível que este fato explique porque, em geral, nos pontos onde  $K_{sat}$  é menor,  $\theta_{sat}$  é maior. Isto porque as partículas de argila não facilitam a infiltração próximo à saturação, diminuindo a condutividade hidráulica e fazendo com que o solo perca água na forma de evaporação. Além disso, segundo Hu et al. (2008), o fluxo de água no solo é mais afetado pelo teor de argila quando o solo torna-se seco, o que aconteceu durante a primeira amostragem de solo. Todas as amostras de menores valores de  $\theta_{sat}$  localizadas na parte superior esquerda da bacia foram obtidas quando o solo

estava muito seco, durante a estiagem que se iniciou em novembro de 2011 e seguiu até agosto de 2012.

Também foram observadas regiões de altos e de baixos valores de  $\alpha$  ao longo da área. Este parâmetro influencia diretamente na pressão de entrada do ar e seu valor pode ser maior que esta pressão (Arraes, 2014). Sua influência sobre a CR é de translação, indicando que quanto menor o valor de  $\alpha$ , maior será a potencial mátrico associado a uma determinada umidade do solo. Assim, os maiores valores deste parâmetro na Figura 3.4 indicam zonas em que o solo, provavelmente, está menos compactado e coincidem também, em geral, com os maiores valores de  $K_{sat}$ . A influência da compactação do solo sobre este parâmetro também foi verificada por Moraes et al. (2012). Já os valores ajustados para o parâmetro  $n$  indicaram mediana variabilidade espacial, tendo em vista a pequena amplitude dos dados, entre 1,0 e 1,2. Este parâmetro controla a inclinação da CR e quanto maior o seu valor, mais inclinada ela será, e também é influenciado pelo nível de compactação do solo. Além disso, conforme demonstrado por Arraes (2014), o fluxo de água no solo é mais sensível a este parâmetro do que ao  $\alpha$  e, portanto, deve ser obtido com maior precisão, o que justifica ainda mais considerar a sua variabilidade espacial.

Estes mapas reforçam que a variabilidade espacial das variáveis na área da bacia é importante e não deve ser desconsiderada, uma vez que  $K_{sat}$  e a CR são propriedades hidráulicas que afetam o fluxo de água do solo. A Tabela 3.2 apresenta o sumário estatístico das 55 amostras de  $K_{sat}$  e dos parâmetros da CR, sem as transformações dos dados. Os valores de  $K_{sat}$  obtidos em laboratório e dos parâmetros da curva de retenção de água no solo estão apresentados no ANEXO 1.

**Tabela 3.2:** Sumário estatístico de  $K_{sat}$  e dos parâmetros da curva de retenção.

Estatística	$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$n$ (-)	$\theta_{sat}$ ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	$\theta_{res}$ ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	$K_{sat}$ ( $\text{cm d}^{-1}$ )
Média	0,921	1,145	0,455	0,016	25,455
Mínimo	0,002	1,019	0,264	0,000	0,000
Máximo	6,849	1,590	0,567	0,255	437,414
Mediana	0,128	1,065	0,494	0,000	0,300
Quartil 1	0,017	1,040	0,373	0,000	0,000
Quartil 3	1,237	1,194	0,535	0,000	6,897
Variância	2,588	0,020	0,008	0,003	5530,436
Desvio padrão	1,594	0,141	0,089	0,052	74,367
Distância interquartil	1,219	0,154	0,162	0,000	6,897
Coef.de variação	1,732	0,123	0,195	3,241	2,922

As estatísticas dos dados mostram maior variância amostral para os parâmetros  $\alpha$  e  $K_{sat}$ , em função de presença de alguns valores muito altos em algumas regiões, o que pode ter sido devido à presença de raízes nas amostras, já que elas foram obtidas próximo à superfície. Este resultado está de acordo com o trabalho de Coppola et al. (2009), os quais também encontraram maiores coeficientes de variação para  $K_{sat}$  e  $\alpha$ . Além disto, os resultados destes autores indicam que os parâmetros da CR possuem grande impacto na predição das incertezas e não podem ser ignorados em simulações estocásticas de variáveis tais como fluxo de água subterrânea. A pequena variância da umidade de saturação não significa que espacialmente este parâmetro não tenha grande variabilidade, o que pode ser confirmado pelo seu mapa amostral. Neste caso, tem-se que, embora  $\theta_{sat}$  tenha pouca amplitude amostral, este parâmetro varia consideravelmente ao longo do espaço. Da mesma forma, o parâmetro  $n$  apresenta baixa variância amostral e uma distribuição espacial mais uniforme que os parâmetros anteriores.

Pode-se mencionar algumas razões para a variabilidade espacial destas variáveis. Primeiramente, as diferentes coberturas do solo durante as coletas das amostras, quando na primeira amostragem o solo estava com a cultura de inverno (aveia e trigo), na segunda o solo estava coberto pela palha remanescente da colheita e na terceira a cultura de verão (soja) já estava sendo cultivada. Além disso, entre um cultivo e outro também houve o trânsito de máquinas. O manejo do solo também influencia na sua heterogeneidade natural (Camargo et al., 2010), promovendo variações no acúmulo de material orgânico, no movimento de água no solo, na compactação e erosão hídrica (Novaes Filho et al., 2007). Isto está de acordo com o trabalho de Deb e Shukla (2012), os quais apontam que o valor de  $K_{sat}$  varia segundo o uso do solo na forma: áreas florestadas > plantio direto > plantio convencional. Estes autores também comentam que amostragens ao longo do tempo possuem o maior impacto sobre a variabilidade de  $K_{sat}$ , seguido pelo uso do solo. Este fato explica porque os valores de  $K_{sat}$  são tão diferentes, uma vez que as amostras foram coletadas ao longo de um ano.

Em segundo lugar, amostras a 30 cm, próximo à superfície do solo, são mais heterogêneas do que a profundidades maiores e isto aumenta a variabilidade encontrada para a maioria das variáveis analisadas, principalmente de  $K_{sat}$ . O mesmo foi confirmado por Hu et al. (2007), os quais verificaram que a influência da variabilidade de  $K_{sat}$  obtidas na superfície (0-20 cm) do solo sobre o fluxo de água é muito maior do que de  $K_{sat}$  amostrado em maiores profundidades e que, portanto, é mais apropriado considerar a variabilidade espacial de  $K_{sat}$  próximo à superfície.

É possível que a grande variabilidade de  $K_{sat}$  seja também devido ao tamanho das amostras indeformadas coletadas. Conforme estudo realizado por Bagarello e Provenzano (1996), para estimar a condutividade hidráulica em laboratório utilizando um permeâmetro de carga variável (método deste trabalho), estes verificaram que, em geral, maiores amostras produziram estimativas com menores valores e menor variabilidade que as amostras obtidas com cilindros menores (como foi o caso do presente estudo). Os autores explicam que o motivo para esta diferença é que nas amostras pequenas o fluxo preferencial aumenta significativamente.

Além disso, os menores valores de  $K_{sat}$  foram obtidos nas partes mais baixas do terreno (áreas côncavas), onde o solo estava mais compactado (conforme constatado durante as amostragens). Isto porque a compactação do solo destrói os macroporos, diminuindo a variabilidade da condutividade hidráulica. Segundo Souza et al. (2003), estas áreas sofrem menos com os efeitos da erosão quando comparadas com as áreas convexas ou lineares do relevo. Os autores ainda acrescentam que, em geral, a variabilidade espacial das propriedades do solo comporta-se segundo um arranjo definido por fatores tais como manejo, erosão e paisagem, e não apenas devido ao acaso (aleatoriedade do fenômeno).

### 3.3.2 Variogramas

Foram modelados os variogramas direcionais dos dados normalizados de cada variável em 8 direções de  $0^\circ$  a  $157,5^\circ$ , variando de  $22,5^\circ$  em  $22,5^\circ$ . A Tabela 3.3 apresenta os parâmetros dos variogramas nas direções de maior e de menor continuidade espacial de  $K_{sat}$  e dos parâmetros da CR. Para todos os variogramas, o melhor ajuste foi obtido pelo modelo esférico. A Figura 3.5 apresenta os variogramas dos dados normalizados apenas nas direções de maior continuidade de cada variável.

Os variogramas são essenciais na determinação dos raios do elipsoide de busca para realizar a krigagem na simulação. Dessa forma, os alcances dos variogramas nas direções de maior e de menor continuidade foram considerados tentativas iniciais para limitar as dimensões deste elipsoide, definindo assim, as distâncias até as quais as amostras seriam consideradas na estimativa da variável em um determinado ponto.

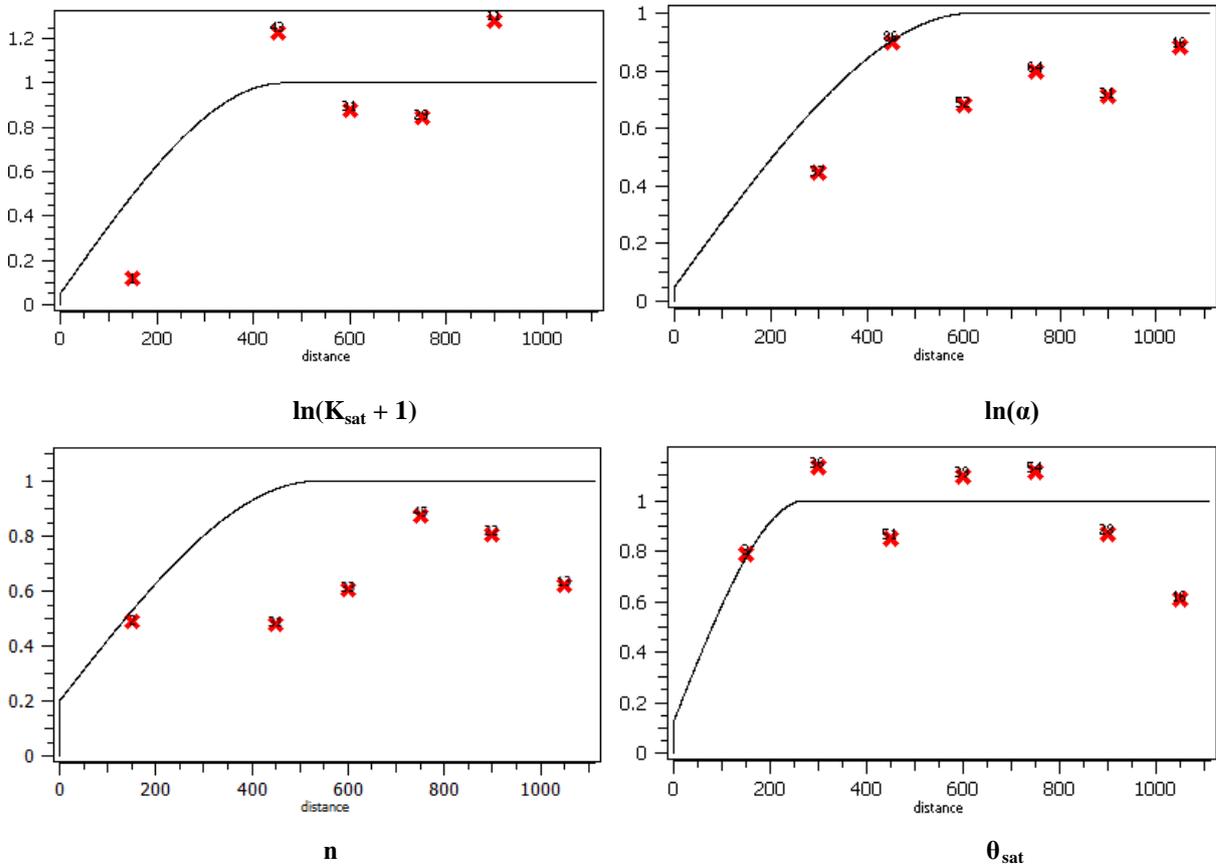
Os variogramas de  $\ln(\alpha)$  e de  $n$  revelaram os maiores alcances, enquanto o menor alcance foi obtido para o variograma de  $\theta_{sat}$ . Considera-se que o número de pares no variograma experimental é insuficiente para representar apropriadamente a variação espacial a longas distâncias (acima de 1000 m). Hu et al. (2008) também não encontraram boa

dependência espacial para  $\alpha$  e  $K_{sat}$  em seu estudo para solos íngremes, e pode ser também uma razão para a dificuldade do presente estudo, cuja área de estudo apresenta-se em relevo moderadamente ondulado, resultando em uma bacia hidrográfica de apenas 1 Km<sup>2</sup>. Da mesma forma, Paleologos e Sarris (2011) não obtiveram bons ajustes dos variogramas experimentais de  $K_{sat}$ .

**Tabela 3.3:** Parâmetros dos ajustes dos modelos variográficos dos dados normalizados.

Variável	Continuidade	Azimuth (°)	Efeito Pepita <sup>(1)</sup>	Sill <sup>(1)</sup>	Alcance (m)
$\ln(K_{sat} + 1)$	Maior	67,5	0,050	0,950	462
	Menor	157,5			158
N	Maior	157,5	0,200	0,800	518
	Menor	67,5			196
$\ln(\alpha)$	Maior	135	0,050	0,950	620
	Menor	45			158
$\theta_{sat}$	Maior	112,5	0,125	0,875	273
	Menor	22,5			220

<sup>(1)</sup> Neste caso a soma do efeito pepita e do patamar (*sill*) deve ser igual a 1 (variância total), devido à normalização dos dados.



**Figura 3.5:** Variogramas dos dados normalizados de  $K_{sat}$  e dos parâmetros da CR.

Em geral, os alcances de  $K_{sat}$  encontrados na literatura (Hu et al, 2008; Santos et al., 2012) são menores aos apresentados aqui devido à diferença no espaçamento amostral e provavelmente devido a algum efeito de escala, como discutido por Blöschl e Sivapalan (1995). Estes autores comentam que resoluções espaciais são mais pobres do que quando se trabalha em escalas temporais, sendo este um dos maiores obstáculos a lidar no campo das amostragens. No entanto, Deb e Shukla (2012) comentam que a condutividade hidráulica apresenta grande variabilidade espacial, porém pode resultar tanto em curtos como em longos alcances espaciais e temporais.

Os variogramas demonstram distintos comportamentos espaciais das variáveis, refletidos por diferentes alcances e efeitos pepita dos modelos ajustados. Além disto, os variogramas direcionais de todas as variáveis revelaram que existe anisotropia geométrica da variação horizontal na área de estudo. Convém salientar que o efeito pepita considerado no ajuste dos variogramas foi subjetivo, uma vez que não foram coletadas repetições de amostras em cada ponto para estimar de forma mais apropriada o valor deste parâmetro nos modelos variográficos. Este parâmetro também pode ser devido unicamente à erros de amostragens em um mesmo local.

A dificuldade em modelar variogramas que se ajustassem satisfatoriamente aos dados é devido à falta de informações menos espaçadas, que proporcionariam a inclusão de outros pontos no variograma com separações ( $h$ ) menores. Além disso, o fato de terem sido incluídas na análise 23 amostras obtidas em outro estudo ao invés de reamostrá-las nestes pontos, pode ter colaborado para esta dificuldade de representar a variabilidade espacial das variáveis. Porém, por questões de tempo e laboratoriais, optou-se por utilizar dados já existentes e adensar a malha amostral.

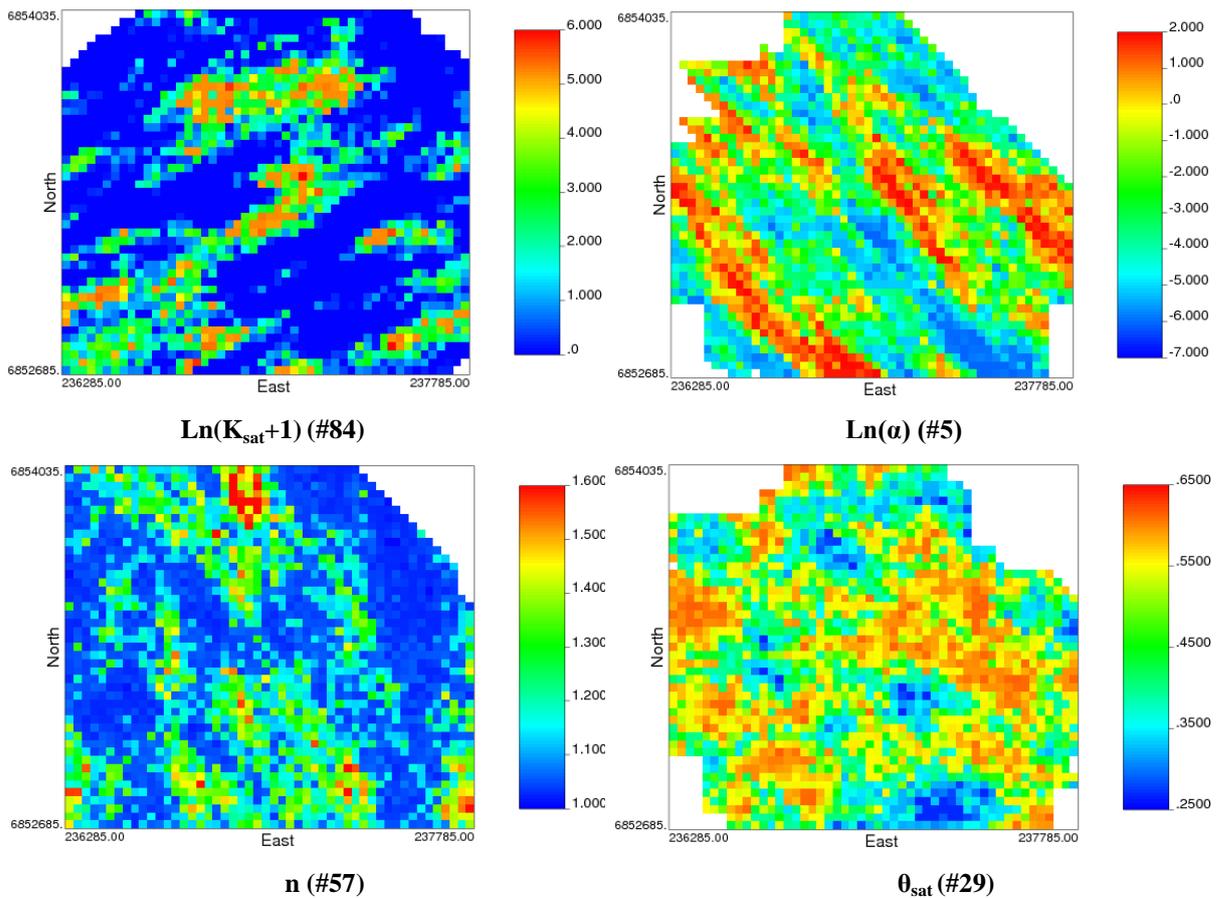
Como mencionado anteriormente, as diferentes coberturas do solo também podem ter influenciado nesse processo. Uma possibilidade seria realizar amostragens em toda a área durante a permanência de cada cobertura do solo e compará-las individualmente, porém, isto não foi possível na prática devido à quantidade de amostras coletadas e o tempo necessário para obtenção das curvas de retenção em laboratório. Acredita-se que esta nova configuração favoreceria a modelagem dos variogramas, uma vez que se estaria trabalhando com diferentes populações de dados individualmente e mais correlacionados no espaço.

Também, não foram realizadas repetições em cada ponto amostrado, o que poderia colaborar na escolha do valor mais representativo, desconsiderando-se amostras contendo erros de amostragem. Sobre este último aspecto, erros de amostragem são comuns neste tipo

de variáveis, uma vez que, por exemplo, as amostras coletadas nos cilindros podem se destacar dos mesmos e criar caminhos preferenciais de fluxo, mascarando o valor real da variável obtida em ensaios laboratoriais, como no caso da determinação de  $K_{sat}$  com permeâmetros. Esta pode ter sido a justificativa para os altos valores de  $K_{sat}$  obtidos.

### 3.3.3 Simulação Sequencial Gaussiana

A simulação geoestatística foi feita para um grid de 1500 m x 1300 m, considerando blocos de 30 m x 30 m. Considerou-se o tamanho de blocos não inferior a  $\frac{1}{4}$  do espaçamento amostral. Foram geradas 100 realizações (campos aleatórios) de valores simulados para cada variável na área de estudo. Os valores simulados foram então retrotransformados do espaço gaussiano para o espaço amostral original. Os mapas de algumas realizações das variáveis comprovam não haver o efeito suavizador da krigagem, mostrando a mudança brusca dos tores de um bloco para o outro (Figura 3.6).



**Figura 3.6:** Mapas de algumas simulações realizadas (#84, #5, #57 e #29) pelo método de simulação sequencial Gaussiana.

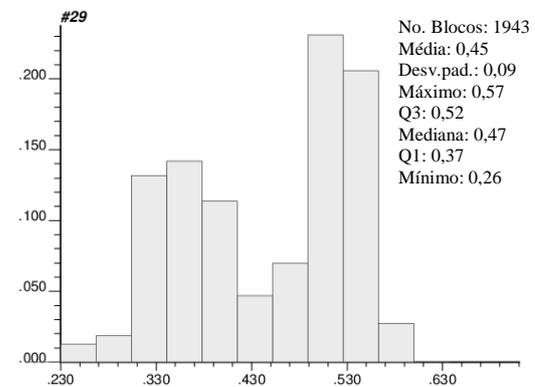
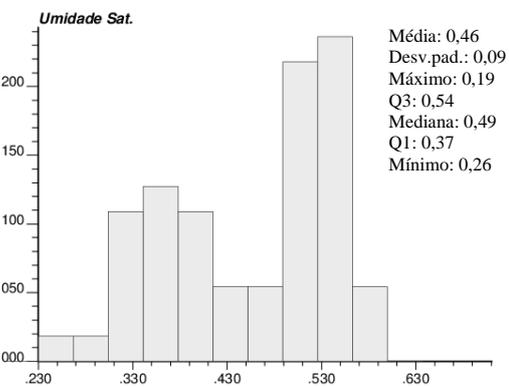
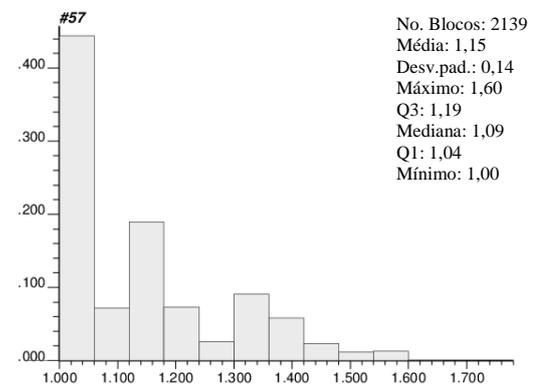
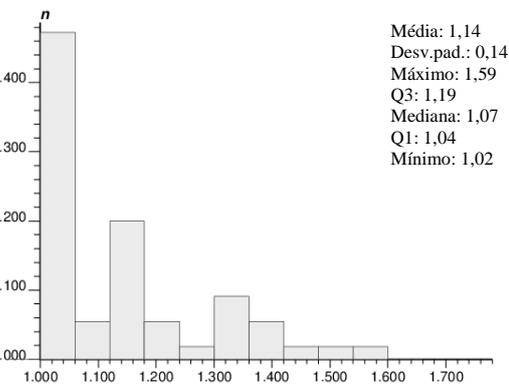
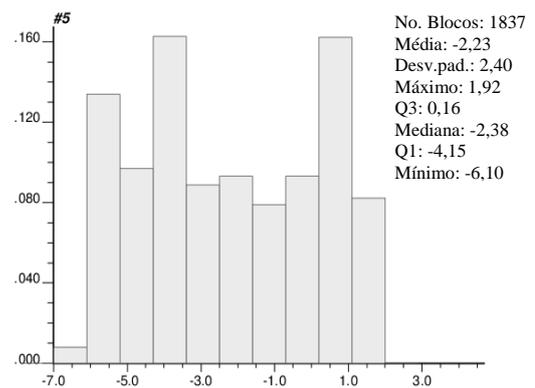
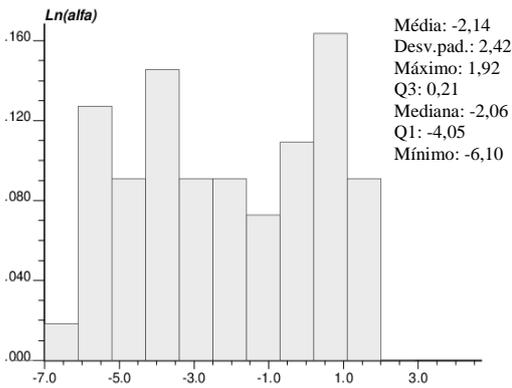
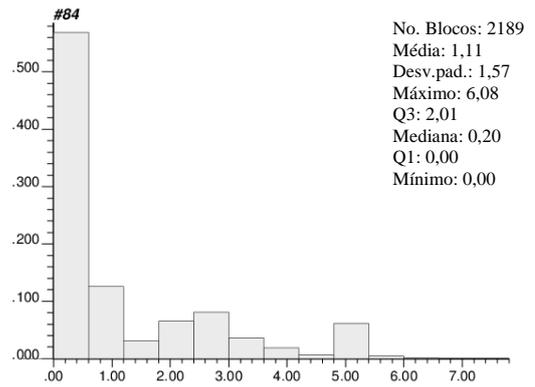
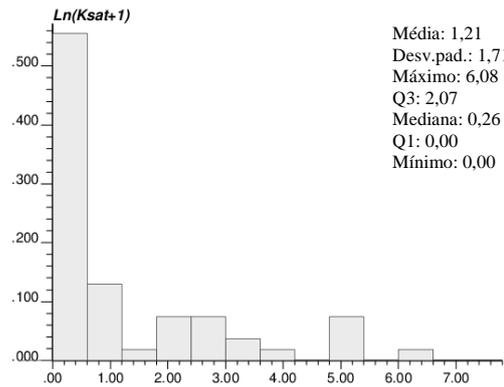
O número de blocos simulados para cada variável (Figura 3.7) foi diferente em função do aumento do elipsoide de busca para estimar o maior número de blocos possível. No entanto, optou-se por não simular em todo o grid para evitar que dados amostrados ou previamente simulados com pouca correlação espacial fossem incorporados nas estimativas. Esta escolha é razoável uma vez que toda a área da bacia foi contemplada pelos blocos simulados em cada campo aleatório gerado.

Como primeiro critério de validação das simulações realizadas, tem-se que os campos gerados estão de acordo com os valores amostrados e suas localizações (Figuras 3.4 e 3.6). Neste caso, nota-se que as zonas de altos e baixos valores foram bem representadas pela simulação. A Figura 3.7 apresenta os histogramas dos dados simulados já transformados para o espaço amostral original de alguns campos aleatórios simulados.

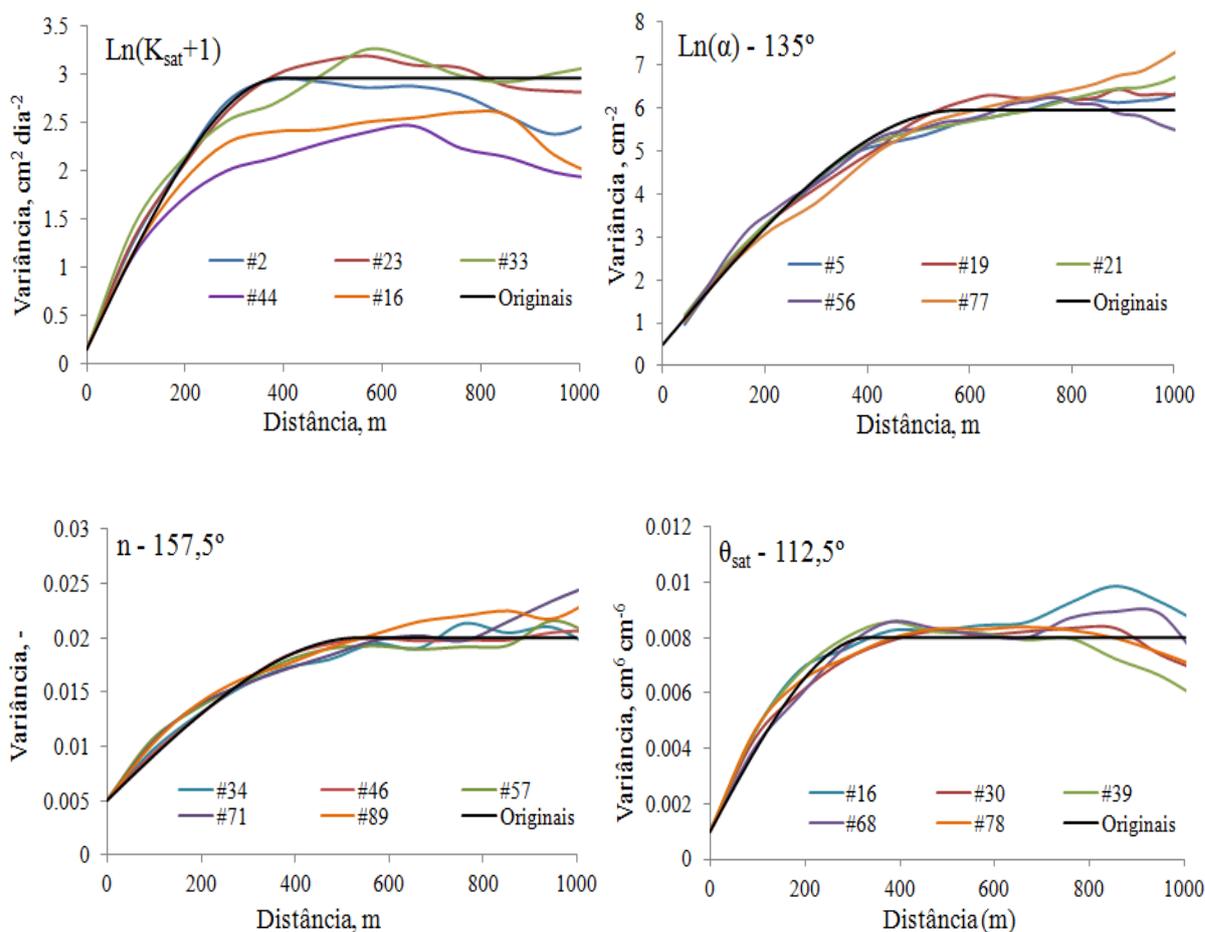
Resultados semelhantes para  $K_{sat}$  foram encontrados por Jang e Liu (2004), cujas simulações revelaram grande variabilidade espacial desta variável devido à ampla variação da média e da variância entre as simulações geradas. Obtiveram valores de média variando entre 7,7 m/d e 33,8 m/d, valor mínimo de 1,64 m/d e valor máximo das simulações de 167 m/d. No entanto, a simulação geoestatística, ao contrário da krigagem, não busca minimizar o erro das estimativas (local), mas tem como foco reproduzir as características dos histogramas e da continuidade espacial (modelo de variograma), além de honrar os dados amostrados (Goovaerts, 1999). Desta forma, um terceiro critério deve ser satisfeito, o qual consiste em verificar se os variogramas das simulações se assemelham aos variogramas dos dados originais não normalizados. Este critério implica que a continuidade espacial observada deve ser reproduzida pela simulação.

A boa representatividade da continuidade espacial pelas simulações realizadas quando comparadas com os variogramas dos dados originais podem ser conferidas na Figura 3.8. Foram escolhidas apenas algumas simulações de cada variável para facilitar a visualização dos variogramas.

Observa-se que as simulações reproduziram bem o comportamento da relação espacial média entre pares de amostras, embora, para o caso de  $K_{sat}$ , algumas simulações tenham subestimado a variância original dos dados, o que está de acordo com uma variância menor de todas as simulações (Tabela 3.4).



**Figura 3.7:** Comparação dos histogramas de frequência de dados observados e simulados. Q1 e Q3 correspondem aos quantis de 25 % e 75 % de não excedência, respectivamente.



**Figura 3.8:** Comparação dos variogramas dos dados originais e de alguns campos aleatórios simulados para cada variável.

**Tabela 3.4:** Estatísticas das simulações para cada variável\*.

Variável	Média			Variância		
	Mínimo	Máximo	Todas Simulações	Mínimo	Máximo	Todas Simulações
$K_{\text{sat}}$	10,935	33,677	22,931	1705,895	7418,207	3888,108
$n$	1,103	1,174	1,1382	0,013	0,023	0,018
$\alpha$	0,550	1,240	0,8248	1,130	2,530	2,105
$\theta_{\text{sat}}$	0,440	0,470	0,457	0,006	0,009	0,008

\* Estatísticas referentes aos dados sem qualquer transformação.

Como discutido por Yamamoto (2008), a simulação Gaussiana garante a reprodução dos histogramas e semivariogramas dos dados transformados (normalizados ou mesmo indicadores) quando comparados com os histogramas e semivariogramas dos dados originais,

porém, não necessariamente a transformação dos dados simulados para a escala original será reproduzida. Este autor demonstrou, com uso de um banco de dados exhaustivamente amostrado, que para dados com distribuição lognormal (como é o caso de  $K_{sat}$ ), esta diferença nos semivariogramas pode ser ainda mais acentuada. Goovaerts (1997) também comenta que os algoritmos de simulação reproduzem os modelos variográficos somente na média de todas as realizações (campos aleatórios) e que as maiores flutuações são esperadas quando utiliza-se a simulação sequencial, como a utilizada neste estudo.

Embora existam na literatura inúmeros trabalhos que aplicam métodos geoestatísticos para determinar a variabilidade espacial de  $K_{sat}$ , não é dada atenção ao fato de que, em geral, esta variável não admite uma média aritmética, como é a utilizada na krigagem para determinar os parâmetros da distribuição de probabilidades para a simulação geoestatística. Como discutido por Blöschl e Sivapalan (1995), a condutividade hidráulica média varia entre a média harmônica e a média aritmética, independentemente da correlação espacial e da função de distribuição dos dados. Por outro lado, quando  $K_{sat}$  segue uma distribuição lognormal, a melhor aproximação seria por meio da média geométrica. Esta pode ser uma possível razão para a subestimativa de  $K_{sat}$  na simulação, ainda que outros trabalhos tenham tido sucesso em modelar a variabilidade espacial desta propriedade hidráulica do solo, mesmo quando considerando a média aritmética desta variável.

Outra razão para esta discrepância na reprodução do semivariograma dos dados originais de  $K_{sat}$  pode ser devido à densidade de dados condicionando a simulação. Embora diferentes tentativas sobre o número de amostras e dados previamente simulados tenham sido realizadas, ainda assim, a simulação continuou fornecendo semivariogramas subestimados.

Como parâmetro final para mensurar as incertezas das variáveis aqui consideradas, foram escolhidos os campos aleatórios referentes a 5% e a 95% de probabilidade de não excedência das médias dos valores simulados, representando, desta forma, um cenário mais favorável e outro mais desfavorável ao fluxo de água no solo e, conseqüentemente, ao desenvolvimento da planta. Na Tabela 3.5 estão apresentados os campos cujas médias se referem a estes percentis para cada variável. As transformações realizadas para facilitar a simulação de  $K_{sat}$  e de  $\alpha$  foram removidas para determinar os percentis e assim obter os resultados finais deste trabalho.

**Tabela 3.5:** Campos aleatórios resultantes do modelo estocástico.

Variável	Percentil 5 % *	Simulação N°	Percentil 95 %	Simulação N°
$K_{sat}$ (cm d <sup>-1</sup> )	24,041	32	44,601	65
n (-)	1,118	61	1,162	21
$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	0,622	45	1,122	28
$\theta_{sat}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,446	40	0,470	47

\*Foram calculadas as médias de cada simulação (campo aleatório) e obtidos os percentis de todas as médias.

Portanto, os campos aleatórios apresentados na Tabela 3.5 representam as incertezas sobre o valor real de cada variável, demonstrando a importância da incorporação da variabilidade espacial em diversas aplicações ambientais. Dentre as variáveis analisadas,  $K_{sat}$  e  $\alpha$  apresentam as maiores incertezas, representadas pela amplitude entre os percentis. Isto significa que se toda a área de estudo pudesse ser amostrada com relação a estes parâmetros, seria possível, por exemplo, encontrar tanto uma situação de valores médios de  $K_{sat}$  de 24 quanto de 44 cm/d.

Estes valores representariam diferenças significativas nas estimativas de outras variáveis hidráulicas ou hidrológicas que dependessem dos parâmetros aqui analisados, tais como escoamento superficial, dimensionamento de drenos para drenagem agrícola, disponibilidade de água para irrigação, etc.

### 3.4 Conclusões Parciais

Conclui-se que as diferentes amostragens de solo na área da bacia demonstraram a grande variabilidade das suas propriedades hidráulicas, representadas pela condutividade hidráulica saturada e pelos parâmetros da curva de retenção de água no solo. Além disso, os tipos de solos presentes na bacia do arroio Donato são suscetíveis à compactação, o que influencia na heterogeneidade de  $K_{sat}$  e da curva de retenção de água no solo, demonstrado pela distribuição espacial destes em conformidade com as regiões onde o solo estava mais compactado durante as amostragens.

Os campos aleatórios gerados pelo método estocástico de simulação sequencial Gaussiana foram validados segundo os critérios relacionados à boa representatividade da continuidade espacial das amostras e da reprodutibilidade dos seus variogramas.

As múltiplas realizações (campos aleatórios) obtidas pela simulação sequencial Gaussiana, um método estocástico, permitiram uma avaliação da incerteza global das

variáveis analisadas, a qual mostrou-se ser significativa quando avaliada pela amplitude entre os percentis, principalmente para  $K_{sat}$  e para o parâmetro  $\alpha$ .

Este trabalho permitiu identificar fatores importantes que influenciaram na variabilidade das propriedades hidráulicas do solo, tais como a compactação do solo, amostragens em diferentes períodos do ano, possíveis erros de medição e diferentes coberturas do solo, sendo que uma contribuição adicional esperada refere-se à definição de melhores estratégias para amostragens futuras.

### 3.5 Referências Bibliográficas

- ARRAES, F. Modelagem bidimensional do movimento da água em condições de solo não saturado. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2014. 86p. (Tese de doutorado)
- BAGARELLO, V. e PROVENZANO, G. Factors affecting field and laboratory measurement of saturated hydraulic conductivity. *Transactions of the ASAE*, v. 39, p. 153-159, 1996.
- BLÖSCHL, G. e SIVAPALAN, M. Scale issues in hydrological modeling: a review. *Hydrol Process*, v.9, p. 251-290, 1995.
- BRISSON, N.; MARY, B.; RIPOCHE, D.; JEUFFROY, M.H.; RUGET, F.; NICOULLAUD, B.; GATE, P.; DEVIENNE-BARET, F.; ANTONIOLETTI, R.; DURR, C.; RICHARD, G.; BEAUDOIN, N.; RECOUS, S.; TAYOT, X.; PLENET, D.; CALLIER, P.; MACHET, J.M.; MEYNARD, J.M.; DELECOLLE, R. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, v. 18, p. 311-346, 1998.
- CAMARGO, L.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. Spatial variability of physical attributes of an alfisol under different hillslope curvatures. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 617-630, 2010
- CASTRO, N.M. e CHEVALLIER, P. Funcionamento hidrossedimentológico de uma Terra Roxa Estruturada. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Gramado, 1993. *Anais*, Porto Alegre: ABRH, v. 2, p. 456-465, 1993.
- CASTRO, N.M.; CHEVALLIER, P.; GOLDENFUM, J.A. Projeto Potiribu, atualização 1989-1998: dados básicos de fluviometria e pluviometria. Porto Alegre. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. UFRGS. (Recursos Hídricos Publicação, n. 35), 2000.

- CHAMPO, R.S. e ZAMARRÓN, G.S.H. Convergence analysis for Latin-hypercube lattice-sample selection strategies for 3D correlated random hydraulic-conductivity fields. *Geofísica Internacional*, v. 49, p. 131-140, 2010.
- COPPOLA, A.; BASILE, A.; COMEGNA, A.; LAMADDALENA, N. Monte Carlo analysis of field water flow comparing uni- and bimodal effective hydraulic parameters for structured soil. *J. Contam. Hydrol.*, v. 104, p. 153-165, 2009.
- DEB, S. e SHUKLA, M. Variability of hydraulic conductivity due to multiple factors. *American Journal of Environmental Science*, v. 8, p. 489-502, 2012.
- DEUTSCH, C.V. e JOURNEL, A.G. GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide. 2ª Edição. Oxford University Press, 1998. 369p.
- FURTUNATO, O.M.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; ANTONINO, A.C.D.; OLIVEIRA, L.M.M.; SOUZA, E.S.; MOURA, A.E.S.S. Variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos de solos em uma bacia experimental no Estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, p. 135-147, 2013.
- GOOVAERTS, P. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Applied Geostatistics Series. Oxford: Oxford University Press, 1997. 483p.
- GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, v. 89, p. 1-45, 1999.
- HU, K.; WHITE, R.; CHEN, D.; LI, B.; LI, W. Stochastic simulation of water drainage at the field scale and its application to irrigation management. *Agricultural Water Management*, v. 89, p. 123-130, 2007.
- HU, W.; SHAO, M.; WANG, Q.; FAN, J.; REICHARDT, K. Spatial variability of soil hydraulic properties on a steep slope in the loess plateau of China. *Scientia Agricola*, v. 65, p. 268-276, 2008.
- JANG, C.S. e LIU, C.W. Geostatistical analysis and conditional simulation for estimating the spatial variability of hydraulic conductivity in the Choushui River alluvial fan, Taiwan. *Hydrol. Process.*, v. 18, p. 1333-1350, 2004.
- LIU, C.W.; JANG, C.S.; CHEN, S.C. Three-dimensional spatial variability of hydraulic conductivity in the Choushui River alluvial fan, Taiwan. *Environ. Geol.*, v. 43, p. 48-56, 2002.
- MEDEIROS, J.D.F. Variabilidade espacial do conteúdo de água no solo na Bacia do Arroio Donato-RS. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004. 141p. (Tese de doutorado)

- MORAES, M.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.; SILVA, V.; CARLESSO, R.; LUZ, F. Curva de retenção de água de um Latossolo sob estados de compactação. XIX Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 2012.
- NOVAES FILHO, J.; COUTO, E.; OLIVEIRA, V.; JOHNSON, M.; LEHMANN, J.; RIHA, S. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo usada na identificação de classes pedológicas de microbacias na Amazônia meridional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, p. 91-100, 2007.
- PALEOLOGOS, E.K. e SARRIS, T.S. Stochastic analysis of flux and head moments in a heterogeneous aquifer system. *Stochastic Environ. Res. Risk Assess.*, v. 25, p. 747-759, 2011.
- REMY, N.; BOUCHER, A.; WU, J. Applied Geostatistics with SGeMS: A User's Guide, Cambridge University Press, 2009. 284p.
- SANTOS, K.S.; MONTENEGRO, A.A.A.; ALMEIDA, B.G.; MONTENEGRO, S.M.G.; ANDRADE, T. S.; FONTES, R.V.P. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, v. 16, p. 828-835, 2012.
- SEMC. SECRETARIA DE ENERGIA, MINAS E COMUNICAÇÃO. Rio Grande do Sul: Atlas Eólico. Porto Alegre: SEMC, 2002.
- ŠIMŮNEK, J.; HUANG, K.; VAN GENUCHTEN, M.T. The HYDRUS code for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. Version 6.0. Research Report No. 144. U.S Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California, 1998. 164p.
- SOUZA, C.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M.; PEREIRA, G. Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um latossolo em Jaboticabal (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, p. 1067-1074, 2003.
- SOUZA, A.L. Estudo do efeito da suavização da krigagem ordinária em diferentes distribuições estatísticas. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2007. 101p. (Dissertação de mestrado)
- TASKINEN, A.; SIRVIO, H.; BRUEN, M. Generation of two-dimensionally variable saturated hydraulic conductivity fields: Model theory, verification and computer program. *Comput. Geosci.*, v. 34, p. 876-890, 2008.
- VAN GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 44, p. 892-898, 1980.

- VAN GENUCHTEN, M.T.; LEIJ, F.J.; YATES, S.R. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. Riverside, CA, 1991. 93p.
- YAMAMOTO, J.K. Estimation or simulation? That is the question. *Comput. Geosci.*, v. 12, p. 573-591, 2008.
- ZANOLIN, A.; FOUQUET, C.; GRANIER, J.; RUELLE, P.; NICOUILLAUD, B. Geostatistical simulation of the spatial variability of an irrigated maize farm plot. *C. R. Geosci.*, v. 339, p. 430-440, 2007.

## 4. ANÁLISE SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO E DE TEMPERATURA E TENDÊNCIAS NOS ÍNDICES DE PRECIPITAÇÃO EXTREMA

**Resumo:** Provavelmente o maior desafio ambiental deste século será a adaptação a um clima em mudança e o desenvolvimento de estratégias que minimizem seus efeitos. O estudo apresentado neste capítulo objetivou conduzir uma investigação para detectar mudanças nos padrões de temperatura e de precipitação na Região Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul com o uso de diferentes modelos climáticos de circulação geral e regional (MCGs e MCRs, respectivamente). Sete distintas localizações na região foram consideradas, para as quais há dez diferentes projeções climáticas destes modelos. Adicionalmente, foram investigadas a frequência e a intensidade de eventos de precipitação extrema, utilizando-se índices de eventos extremos. As projeções para a região Noroeste indicam um aumento na média anual de temperatura de quase 3°C até o final do século, bem como um aumento na precipitação anual de até 380 mm. A análise sazonal demonstrou que os maiores aumentos de temperatura são projetados para o inverno e o início da primavera e, portanto, não coincidem com os meses de verão da principal cultura da região (soja). Além disso, espera-se grandes volumes de precipitação durante estes meses. Em geral, tendências de aumento nos índices extremos de precipitação foram detectadas somente para as projeções do modelo regional, em todas as localizações. Também pode-se concluir que é possível que a distribuição espacial dos impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura não seja uniforme na região.

**Palavras-chave:** Mudanças climáticas, Modelos Climáticos, Índices de Precipitação Extrema, Agricultura

### 4.1 Introdução

As maiores mudanças climáticas previstas para este século incluem aumento na temperatura média, elevação da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, mudanças na distribuição espacial da precipitação, aumento das taxas de evapotranspiração durante o verão, bem como maiores ocorrências de eventos extremos tais como tempestades, granizo e chuvas intensas (Yoo et al., 2012).

Já há um consenso de que, mesmo se todas as medidas para reduzir as emissões de carbono forem tomadas, um aumento de 2°C na temperatura média da superfície da Terra até o final do século XXI (em um cenário mais otimista) parece inevitável (Yoo et al., 2012; World Bank, 2009).

Como consequência, a temperatura média global registrada na superfície durante a última década mostrou os maiores aumentos, provavelmente ao longo do último milênio, sendo mais expressivos nas maiores latitudes ao norte do globo. Por outro lado, é mais difícil caracterizar as mudanças nos regimes de precipitação, por serem fortemente influenciados por fenômenos climáticos regionais, tais como El Niño e La Niña na América do Sul. Sobre este fato, o El Niño de 1998 foi uma das ocorrências mais severas do último século (Barry e Chorley, 2009).

As variáveis meteorológicas exibem tanto uma variabilidade espacial quanto temporal e, aliado a este fato, sabe-se que os modelos climáticos ainda são muitos imprecisos. É possível que, mesmo utilizando-se diferentes modelos para quantificar as incertezas das projeções climáticas, o clima no futuro possa não ser contemplado por nenhum deles.

Estas projeções são geradas por modelos de circulação geral ou regional (MCGs e MCRs, respectivamente) como resultado de futuros cenários de forçantes climáticas causadas pela emissão de gases do efeito estufa e aerossóis (Marengo e Soares, 2003). Tais modelos compreendem sistemas de equações diferenciais parciais baseadas em leis físicas de movimento de fluidos e substâncias químicas (Nkomozepe e Chung, 2012), variando de simples aproximações pontuais de balanço de energia a modelos tridimensionais de circulação geral, os quais tentam modelar todas as complexidades do sistema climático da Terra (Barry e Chorley, 2009). Uma vez que é extremamente difícil simular o clima de forma adequada, modelos climáticos geralmente apresentam algumas simplificações, representadas por diferentes parametrizações.

O uso de diferentes conjuntos de parâmetros resulta em diferentes saídas ou membros de um modelo, representando o quão sensíveis os modelos são a estes parâmetros. Portanto, é usual considerar o membro “control” (controle) associado a outras perturbações tais como um membro “high”. O termo “high” (alto) refere-se a uma grande perturbação nas saídas do modelo climático, associada a um certo conjunto de parâmetros, enquanto o membro “low” (baixo) indica que o modelo não é tão sensível.

Pode-se citar diversos trabalhos sobre mudanças climáticas que utilizaram tais modelos em pesquisas globais (Alexander et al., 2006; Kiktev et al., 2003); alguns em nível continental, para a América do Sul (Marengo et al., 2010; Vincent et al., 2005; Nogués-Paegle e Mo, 1997); e para o Brasil e/ou algumas de suas regiões (Brito et al., 2014; Souza et al., 2014; Valverde e Marengo, 2014; Dereczynski et al., 2013; Machado e Rocha, 2011; Marengo e Valverde, 2007; Grimm, 2003; Grimm et al., 1998).

Há um consenso na maioria dos estudos sobre mudanças climáticas realizados para a América do Sul, de que haverá um aumento (diminuição) na frequência de noites quentes (frias) e uma maior frequência de dias com chuvas intensas (Dereczynski et al., 2013).

O estudo realizado para o Brasil e apresentado por Hamada et al. (2008) incluiu seis MCGs e considerou apenas o cenário climático mais pessimista (A2) e o mais otimista (B2). Cenários climáticos são representações do clima futuro baseadas em suposições sobre mudanças na composição da atmosfera, como consequência das atividades humanas. As projeções futuras sobre o clima para o país foram comparadas em termos de anomalias com relação ao cenário base representado pelo período de 1961-1990. As tendências indicam um aumento de temperatura de até 4°C em 2080, enquanto que as maiores diferenças serão prováveis de ocorrer de Junho a Outubro, ou seja, os invernos se tornarão mais quentes comparados com os verões. Por outro lado, para as mudanças na precipitação média no Brasil, haverá uma diminuição nos acumulados mensais comparados com o período base, mas apenas poucas diferenças entre os períodos futuros projetados a curto (2025s), médio (2055s) e longo prazo (2085s).

Os resultados destes autores revelam que é provável que a região Sul do Brasil sofra com os maiores aumentos de temperatura, especialmente durante os meses de primavera, enquanto que a projeção para 2080 é de 5,5°C acima da média do período de comparação (segundo o cenário A2). Além disso, estima-se que as maiores precipitações ocorrerão durante os meses de verão (40% do total) e outono (29%). As anomalias de precipitação observadas na região Sul do Brasil apontam para um decréscimo em todas as estações do ano.

Cabe salientar que as projeções feitas para o Brasil por Hamada et al. (2008) foram obtidas para a média de seis MCGs e que resultados contraditórios sobre a precipitação (aumento ao invés de diminuição) foram obtidos por outros autores. Por exemplo, Bates et al. (2008) estimam um aumento na precipitação anual para toda a região Sul do Brasil, enquanto que Marengo et al. (2007) não encontraram alterações significativas, ou apenas um pequeno aumento até o final do século. Estes resultados servem para demonstrar que, entre outros aspectos, as incertezas sobre os modelos permanecem grandes e difíceis de serem avaliadas, justificando mais pesquisas, especialmente em escala regional, com o uso de MCRs.

Sabe-se que 80% das áreas cultivadas no mundo são não irrigadas (Bates et al., 2008). Portanto, a produtividade agrícola torna-se um dos setores mais vulneráveis às mudanças climáticas em países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil. Neste contexto, o Brasil é responsável por 27% da produção mundial de soja (Justino et al., 2013), sendo o Estado do

Rio Grande do Sul (RS) o terceiro maior produtor no país. Adicionalmente, as regiões norte e noroeste são as maiores produtoras de soja neste Estado, tornando-se evidente que o maior desafio enfrentado pela agricultura ao longo deste século será lidar com as possíveis mudanças climáticas.

Os principais efeitos agrônômicos das mudanças climáticas estão relacionados com o ciclo respiratório da planta, com os efeitos das mudanças de temperatura e de precipitação, bem como o aumento do nível do mar com consequente redução de áreas cultivadas devido ao aumento de salinidade do solo (Bocchiola et al., 2013). Outras consequências esperadas para este século é que elevadas temperaturas causarão um atraso nos subperíodos de sementeira e de florescimento das culturas, como evidenciado por alguns autores para várias culturas em cenários futuros (Bocchiola et al., 2013; Hwan et al., 2013; Jalota et al., 2013).

De forma geral, com relação à precipitação, espera-se que a estação chuvosa se tornará mais úmida, enquanto a estação seca ficará ainda mais seca. Em locais onde há um aumento no déficit hídrico para a agricultura em meses secos, a irrigação demandará quantidades ainda maiores de água, intensificando os conflitos pelo seu uso (Harmsen et al., 2009). Sabe-se que períodos contínuos sem precipitação por mais do que dez dias durante a estação das chuvas afetam negativamente a produtividade agrícola (Justino et al., 2013).

É possível que o cultivo de soja no Sul do Brasil torne-se progressivamente mais difícil. A ocorrência de eventos de precipitação intensa e de fortes ventos pode limitar o uso de máquinas em algumas áreas agrícolas (Marengo et al., 2009), além de que tempestades de granizo podem destruir lavouras quase que instantaneamente. É, portanto, extremamente importante determinar a frequência e a intensidade de eventos extremos, especialmente de precipitação, bem como quais são seus locais preferenciais de ocorrência.

Como mencionado anteriormente por Marengo et al. (2010), o desenvolvimento de cenários de mudanças climáticas em escala regional pode revelar pronunciada variabilidade, a qual pode sugerir uma distribuição espacial dos impactos. Em seus estudos, estes autores indicam que um aumento de aproximadamente 3°C a 4°C é esperado para a região Sul do Brasil, e que a maioria dos modelos climáticos apresentados no Quarto Relatório Especial (AR4) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) concordam sobre um aumento de precipitação devido a um clima mais quente nesta região do país.

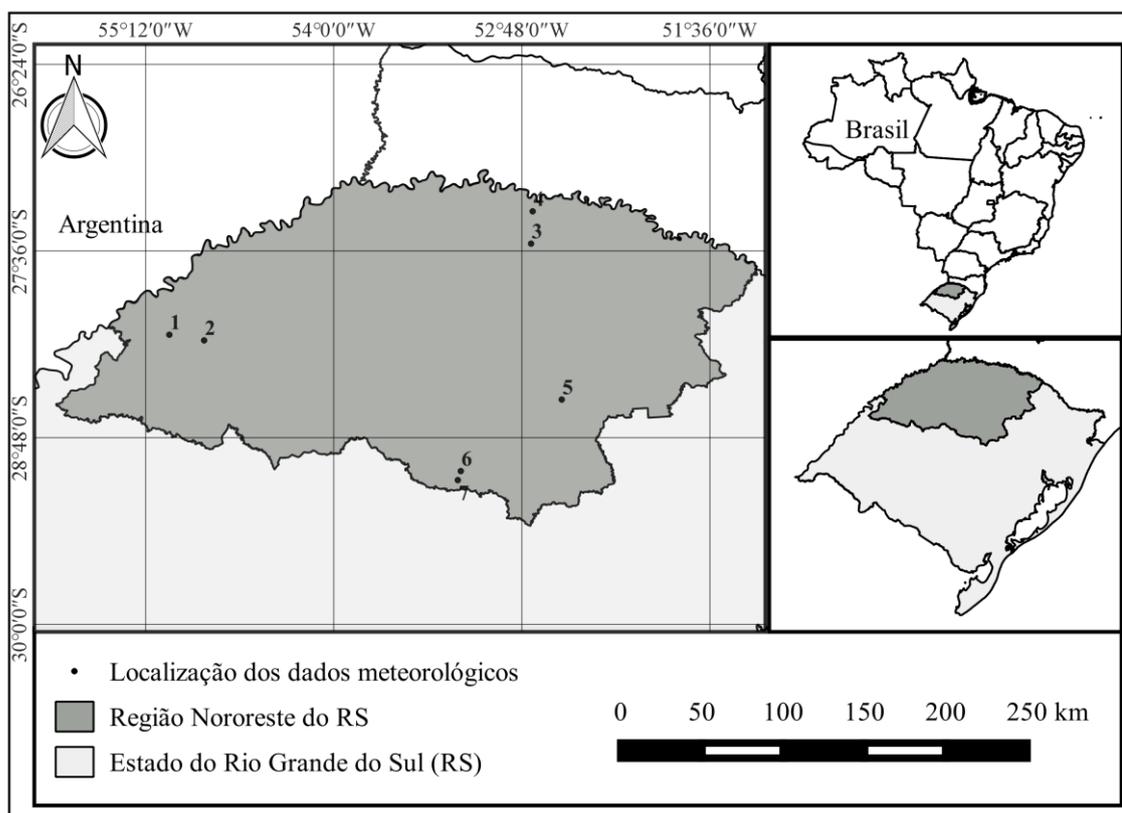
Portanto, considerando a importância agrônômica do Estado do Rio Grande do Sul na economia brasileira e a falta de estudos sobre mudanças climáticas especificamente para a região mais produtiva deste Estado (Noroeste), este capítulo objetivou investigar mudanças de

temperatura e de precipitação na região Noroeste do RS, com o uso de diferentes projeções de MCGs e MCRs.

## 4.2 Metodologia

### 4.2.1 Área de Estudo

A área de estudo compreende a região Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 4.1). A sua localização geográfica a coloca sob a influência de sistemas atmosféricos tais como massas polares e sistemas convectivos de mesoescala, os quais podem causar desastres naturais e severos eventos extremos. Além disso, os fenômenos climáticos El Niño e La Niña também determinam a ocorrência de inundações e estiagens no Sul do Brasil (Nedel et al., 2010).



**Figura 4.1:** Localização da área de estudo.

Um estudo recente apresentado por Nedel et al. (2010), representativo do período de 2003-2009, demonstrou que 70% dos eventos de seca registrados no Rio Grande do Sul correspondem à metade norte do Estado. Também verificaram que uma maior frequência de eventos de seca é registrada durante os meses de verão, de tal forma que a produtividade

agrícola neste período diminui, porque o período de cultivo coincide com os meses mais quentes, de novembro a março (Fochezzato e Grando, 2009).

O uso da terra é essencialmente agrícola e, na maioria dos casos, as culturas não são irrigadas. Além disso, essa região é a maior produtora de soja do Estado, contribuindo fortemente para o seu desenvolvimento econômico. Essas razões justificam a escolha dessa região para análise da vulnerabilidade desta área sob um clima em mudança.

#### *4.2.2 Dados Meteorológicos*

As séries temporais das variáveis meteorológicas foram obtidas de modelos climáticos globais e regionais para um cenário futuro A1B utilizados no Projeto de Pesquisa “Efeitos de Mudanças Climáticas no Regime Hidrológico de Bacias Hidrográficas e na Energia Assegurada de Aproveitamentos Hidrelétricos”, do qual o IPH/UFRGS fez parte.

O objetivo principal desse projeto foi quantificar as possíveis alterações de energias asseguradas das usinas hidrelétricas do Sistema Interligado Nacional de grandes bacias hidrográficas do Brasil, considerando projeções de mudanças climáticas de modelos atmosféricos integradas com modelos hidrológicos distribuídos de grande escala para geração de vazões afluentes.

Para atingir o objetivo do projeto, várias demandas hídricas foram calculadas, a saber: abastecimento de áreas urbanas e rurais, industrial e irrigação; e assim foram determinadas quais seriam as vazões remanescentes nos rios, futuramente, para a utilização pelo setor energético. Portanto, a tese proposta se insere no contexto de determinar as demandas futuras para irrigação, porém não para uma usina especificamente como no projeto, mas para a área de estudo já apresentada e considerando os dados meteorológicos cujas previsões foram feitas para diversas usinas localizadas no entorno.

Os pontos apresentados na Figura 4.1 indicam as sete localizações para as quais há projeções climáticas de variáveis meteorológicas na região. Essas projeções incluem precipitação e temperatura para o período base ou de comparação (1961-1990), curto prazo (2011-2040), médio prazo (2041-2070) e longo prazo (2071-2100). Períodos futuros serão representados neste trabalho pelo ano central em cada um (2025s, 2055s e 2085s). As informações de cada localização estão apresentadas na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1:** Localização dos dados meteorológicos na região Noroeste do RS.

Localização	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
1	-28,14	55,05	123
2	-28,18	54,83	138
3	-27,55	52,74	590
4	-27,35	52,73	275
5	-28,56	52,55	470
6	-29,02	53,19	323
7	-29,07	53,21	283

Dez diferentes projeções para o cenário de emissão A1B foram consideradas em cada localização: cinco MCGs e cinco projeções derivadas do modelo climático regional ETA. O cenário A1B pertence à família de cenários A1, a qual sugere um mundo no futuro com rápido crescimento econômico, um pico na população global no meio do século e declínio até o final do século, e uma rápida introdução de novas e mais eficientes tecnologias. O cenário A1B refere-se a um balanço entre o uso intensivo de combustíveis fósseis e outras fontes de energia não fósseis (Parry et al., 2007).

A descrição dos modelos climáticos globais utilizados está apresentada na Tabela 4.2. Já o modelo ETA é descendente do modelo HIBU (Hydrometeorological Institute and Belgrade University), previamente desenvolvido por Mesinger e Janjic (1974). Trata-se de um modelo climático regional que acopla o MCG HadCM3 como condição de contorno lateral para simulações de mesoescala. Descrição mais detalhada sobre este modelo pode ser encontrada em Black (1994). O acoplamento deste modelo considera um conjunto de membros (CTRL, LOW, MID e HIGH), os quais representam a sensibilidade climática. As resoluções horizontais do modelo ETA utilizadas neste estudo foram 20 e 40 km, fornecendo então cinco projeções: ETA 20 CTRL, ETA 40 CTRL, ETA 40 LOW, ETA 40 MID e ETA 40 HIGH.

**Tabela 4.2:** Modelos de circulação geral (MCGs) aplicados neste estudo.

Modelo	Abreviação*	Grupo de modelagem
CCSM3, 2005	NCCCSM	National Center for Atmospheric Research, United States
ECHAM5/MPI-OM, 2005	MPEH5	Max Planck Institute for Meteorology, Germany
GFDL-CM2.1, 2005	GFCM21	U.S Dept. of Commerce/NOAAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, United States
MRI-CGCM2.3.2, 2003	MRCGCM	National Center for Atmospheric Research, United States
UKMO-HadCM3, 1997	HADCM3	Hadley Centre for Climate Prediction and Research/Met Office, United Kingdom

Fonte: Black (1994). \* Abbreviation adopt in this study.

Portanto, para cada uma das setes localizações apresentadas na Tabela 4.1, existem dez conjuntos de dados meteorológicos derivados destes modelos climáticos. Adicionalmente, apenas o membro controle (CTRL) foi considerado para o caso dos MCGs.

#### 4.2.3 Índices de Precipitação Extrema

Os dados meteorológicos diários referem-se à temperatura (T, °C) e de precipitação (P, mm). Como a agricultura na região Noroeste é movida primariamente pelo cultivo de soja, torna-se necessário determinar se as mudanças de precipitação e de temperatura podem ocorrer durante os meses nos quais a soja é cultivada. Portanto, primeiramente, foi realizada uma análise mensal de T e P para investigar este aspecto sazonal.

Em um segundo momento, foram analisadas as ocorrências de eventos de precipitação extrema pelo uso de índices de clima extremo (Tabela 4.3). Esta análise não pode ser realizada para a temperatura, uma vez que somente dados de temperatura média estavam disponíveis para a área estudo, e seriam necessários dados de T máxima e mínima.

Na Tabela 4.3, um dia úmido ocorre quando a precipitação diária é maior ou igual a 1 mm, enquanto que um dia seco é quando esta taxa é menor que 1 mm. Estes mesmos índices (ou alguns deles) foram recentemente aplicados por outros autores, tais como Valverde e Marengo (2014) e Dereczynski et al. (2013). Estes índices serão de grande importância, uma vez que auxiliam na detecção da ocorrência de eventos extremos relacionados com a precipitação. Também há o interesse em analisar a distribuição espacial destes eventos extremos, considerando as sete diferentes localizações na região Noroeste.

**Tabela 4.3:** Índices de precipitação extrema.

Índice	Descrição (unidade)
PRCPTOT	Precipitação total anual de dias úmidos (mm)
RX1 dia	Precipitação máxima em 1 dia (mm)
RX5 dia	Precipitação anual máxima de 5 dias consecutivos (mm)
R30	Contagem anual do número de dias em que a precipitação é maior que 30 mm (dias)
R95p	Precipitação anual total dos dias em que a precipitação diária é maior que o percentil 95% (mm)
R99p	Precipitação anual total dos dias em que a precipitação diária é maior que o percentil 99% (mm)
CDD	Número máximo de dias secos consecutivos no ano (dias)
CWD	Número máximo de dias úmidos consecutivos no ano (dias)

Com o intuito de detectar tendências nos índices anuais, o teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) foi realizado. Este é um teste não paramétrico para avaliar se há

uma tendência de subida ou de descida monotônica sobre a variável de interesse ao longo do tempo. Portanto, pode ser visto como um teste não paramétrico para inclinação zero da regressão linear dos dados ordenados no tempo *versus* o tempo (Gilbert, 1987). O teste foi conduzido ao nível de significância de 5%.

### 4.3 Resultados e Discussões

#### 4.3.1 Análise de Temperatura e de Precipitação Anuais

Uma breve análise dos dados meteorológicos anuais é apresentada nas Tabelas 4.4 e 4.5. A Tabela 4.4 fornece as médias e as anomalias da temperatura anual para todas as localizações na área de estudo. A anomalia refere-se à diferença entre a variável em um período futuro e o seu valor no período base ou de comparação. Está claro que as projeções indicam que a temperatura irá aumentar em todas as localizações quando comparadas com o período de base (1961-1990). As maiores anomalias são previstas para o final do século, enquanto uma diminuição na temperatura é esperada apenas na localização 6.

**Tabela 4.4:** Temperatura média anual e anomalias para cada localização\*.

Variável	Período	Localização						
		1	2	3	4	5	6	7
Temperatura Média (°C)	Base	19,73	19,74	17,65	18,73	18,51	20,01	18,51
	2025s	20,86	20,91	18,82	18,93	18,80	19,67	19,65
	2055s	21,83	21,92	19,81	19,93	19,79	20,67	20,64
	2085s	22,57	22,69	20,59	20,69	20,63	21,52	21,47
Anomalia de Temperatura (°C)	2025s	1,13	1,17	1,17	0,20	0,29	-0,34	1,14
	2055s	2,10	2,18	2,16	1,20	1,28	0,66	2,13
	2085s	2,84	2,95	2,94	1,96	2,12	1,51	2,96

\* Os valores correspondem à média das dez projeções (cinco MCGs e cinco projeções do MCR).

**Tabela 4.5:** Precipitação média anual e anomalias para cada localização\*.

Variável	Período	Localização						
		1	2	3	4	5	6	7
Precipitação Anual Média (mm)	Base	1728,23	1690,93	1785,34	1848,29	1651,65	1775,15	1595,05
	2025s	1790,24	1816,71	1925,87	1998,27	1812,27	1770,04	1743,03
	2055s	1873,20	1911,07	2061,18	2137,57	1938,98	1875,70	1846,75
	2085s	1951,71	2013,06	2153,65	2228,96	2002,79	1943,48	1917,72
Anomalia de Precipitação Anual (mm)	2025s	62,01	125,78	140,53	149,98	160,62	-5,11	147,98
	2055s	144,97	220,14	275,84	289,28	287,33	100,55	251,70
	2085s	223,48	322,13	368,31	380,67	351,14	168,33	322,67

\* Os valores correspondem à média das dez projeções (cinco MCGs e cinco projeções do MCR).

Uma vez que algumas localizações são próximas às outras, foram encontradas projeções similares, provavelmente porque elas pertencem a células vizinhas do modelo climático. De qualquer forma, elas foram mantidas neste estudo porque diferentes projeções de precipitação foram obtidas pelos modelos, mesmo nestas localizações próximas.

As menores anomalias de temperatura foram encontradas para as localizações 4, 5 e 6, situadas mais ao norte, no centro e na porção sul da região, respectivamente. Analisando o período 2085s, pode-se observar temperaturas médias esperadas entre 20,6°C e 22,7°C, as quais sugerem uma distribuição espacial das mudanças de temperatura e que haverá um aumento de quase 3°C (na média) com relação ao período de comparação até o final do século. Resultados similares foram encontrados por Marengo et al. (2010) para toda a região Sul do Brasil para o cenário A2. Estes autores demonstraram que pode-se esperar por um aquecimento de aproximadamente 3°C – 4°C, projetado por um MCR.

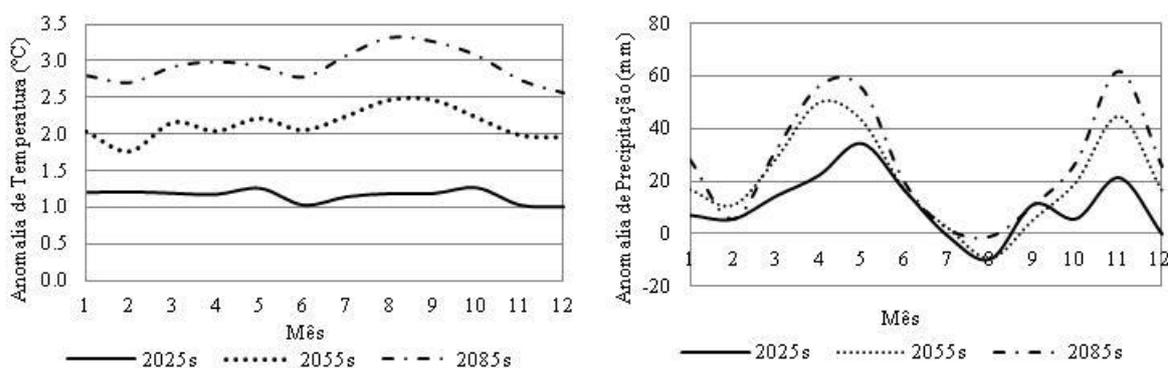
Analisando as informações apresentadas na Tabela 4.5, pode-se verificar, da mesma forma como para a temperatura, que é esperado um aumento na precipitação anual, sendo mais expressivo para as localizações 2, 3, 4 e 5. Novamente, somente na localização 6 os modelos projetam redução de precipitação a curto prazo (2025s). De fato, as menores anomalias foram encontradas para esta localização, sugerindo que provavelmente ela não será afetada pelas mudanças climáticas, ou que somente poucas perturbações no clima (não significativas) poderão ocorrer. Os piores cenários são projetados para as mesmas localizações mencionadas anteriormente, situadas em latitudes mais altas. Aumentos de precipitação para o Sul do Brasil também foram apresentados no estudo de Marengo et al. (2010). Se este aumento estiver relacionado com o aumento do número de dias secos, enquanto o número de dias úmidos se mantiver inalterado no futuro, então é possível que as chuvas se tornarão mais intensas e concentradas, ou seja, eventos mais extremos (ver Item 4.3.3).

Com base nos dados apresentados nestas tabelas, pode-se concluir, *a priori*, que se esperaria impactos positivos sobre a agricultura destes cenários futuros. No entanto, estes valores se referem a médias anuais de temperatura e de precipitação para os modelos climáticos considerados e eles não revelam nada sobre os ciclos sazonais de tais variáveis. É possível que maiores valores acumulados de precipitação estejam concentrados em meses que não são interessantes sob o ponto de vista agrônomo na região de estudo. Portanto, para adequadamente identificar mudanças climáticas que possam ter impactos sobre a agricultura, é crucial entender como estas mudanças estão distribuídas ao longo do ano. Cabe salientar

que, neste capítulo, não se tem o interesse de avaliar os impactos sobre a agricultura efetivamente, mas apenas detectar se eles são prováveis de ocorrer. Quão intensos ou frequentes eles serão está fora do escopo do estudo neste momento. Desta forma, as análises apresentadas até agora são uma tentativa de identificar mudanças climáticas, baseadas apenas nas projeções de temperatura e de precipitação.

#### 4.3.2 Análise Sazonal de Temperatura e de Precipitação

Uma análise inicial das projeções de temperatura e de precipitação foi conduzida tomando-se a média dos valores mensais destas variáveis dadas por todos os modelos em todas as localizações, e então calculando-se as anomalias comparadas com o período base (1961-1990) (Figura 4.2). As anomalias se referem às diferenças entre cada período futuro de 30 anos e o período base, também representado por uma série de 30 anos de dados.



**Figura 4.2:** Ciclos sazonais das anomalias de precipitação e de temperatura anuais.

Pode ser observado que os maiores aumentos de temperatura são esperados para o inverno e o início da primavera, de junho a outubro. Adicionalmente, a variabilidade sazonal é similar para todos os períodos futuros. As anomalias médias anuais de temperatura para 2025s, 2055s e 2085s são 1,2°C, 2,1°C e 2,9°C, respectivamente. Os meses de maiores anomalias são maio e outubro (2025s) e agosto e setembro (2055s e 2085s). Estes meses não coincidem com os meses de verão das principais culturas na região, como é o caso do cultivo de soja, praticado de novembro a março. De fato, estes são os meses com as menores anomalias obtidas. No entanto, as anomalias projetadas em novembro e março variam de 1,0°C a 2,9°C, o que não podem ser negligenciado, especialmente para o final do século.

As menores anomalias médias fornecidas para a precipitação são esperadas durante os meses de inverno. Para agosto, espera-se uma redução de precipitação de 10 mm para os

períodos de 2025s e 2055s, porém nenhuma mudança para 2085s. Para os outros meses do ano, as anomalias são positivas, ou seja, aumento de precipitação. Este aumento poderá se mostrar mais significativo de abril a maio e de outubro a dezembro. Estes resultados estão coerentes com os apresentados por Marengo et al. (2010), os quais também encontraram aumento de precipitação para os meses do outono e uma redução durante o inverno no final do século.

Os maiores aumentos de precipitação coincidem com os meses das culturas de inverno na região (trigo e aveia, semeados em maio) e com o período de semeadura das culturas de verão (soja, semeada em novembro). Assim, pode-se concluir que é esperado que os impactos sejam positivos com relação à precipitação. Além disso, este aumento de precipitação durante os meses das culturas de verão também coincide com o menor aumento de temperatura durante este período, o que poderá ser mostrar favorável devido a menores taxas de evapotranspiração.

No entanto, maiores precipitações acumuladas não necessariamente indicam impactos positivos, pois esta precipitação concentrada em pequenos períodos de tempo pode estar associada a maior ocorrência de eventos extremos, tais como chuvas intensas e inundações. Se este for o caso, então é possível que o período de semeadura das culturas de verão (mais importantes economicamente) seja mais fortemente afetado pelas mudanças climáticas (discutido no próximo item).

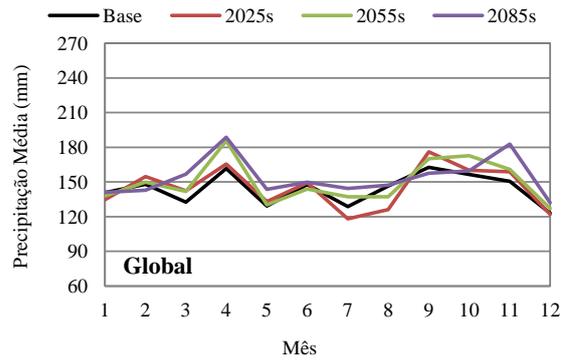
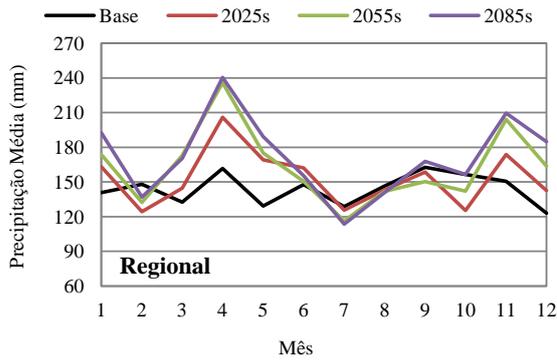
Com o intuito de avaliar as diferenças dadas por cada modelo climático em cada localização, apresenta-se na Tabela 4.6 os resultados das projeções mensais de temperatura, divididos em: média para os MCGs (AVG) e média para as projeções do modelo ETA (AVR). Ou seja, cada valor nesta tabela é a média das cinco projeções do MCR ou das cinco projeções dos MCGs. No caso da precipitação, preferiu-se a representação por gráficos (Figura 4.3 (a)-(g)), uma vez que as amplitudes das diferenças são maiores e mais perceptíveis do que para a temperatura.

Os resultados apresentados na referida tabela mostram que, na maioria dos casos, as maiores temperaturas são projetadas, em média, pelo modelo regional ETA com suas diferentes projeções. Somente para o mês de abril (em todas as localizações), temperaturas mais elevadas foram fornecidas pelas projeções dos modelos globais. Além disso, as maiores temperaturas são esperadas nas localizações 1, 2, 6 e 7, a leste e no centro da região. Dezembro, janeiro e fevereiro serão os meses mais quentes, enquanto junho e julho serão os mais frios, havendo aí uma diferença de mais de 10 graus entre as médias destes meses.

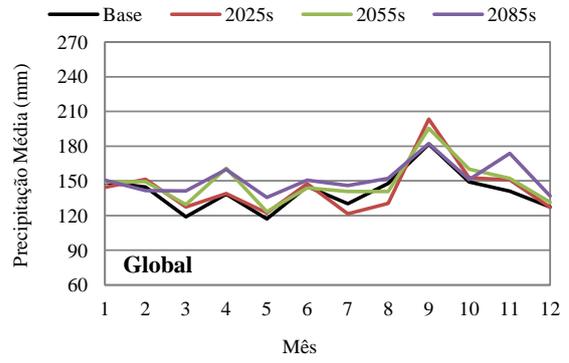
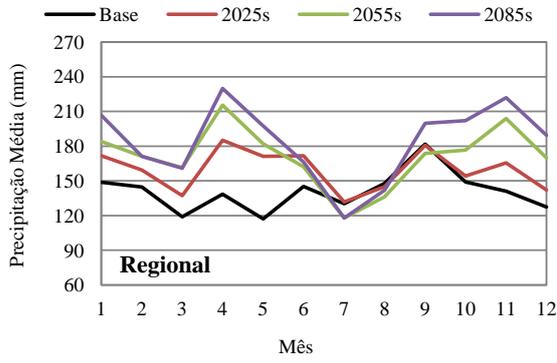
**Tabela 4.6:** Temperatura média mensal projetada por diferentes modelos climáticos nas diferentes localizações.

Mês	Período	Localização 1		Localização 2		Localização 3		Localização 4		Localização 5		Localização 6		Localização 7	
		AVG	AVR												
Jan	Base		24,9		24,9		22,1		22,2		22,1		23,3		23,3
	2025s	26,1	26,1	26,0	26,3	23,1	23,4	23,1	23,6	23,1	23,4	24,4	24,7	24,4	24,6
	2055s	27,1	26,7	27,0	27,0	24,1	24,2	24,1	24,4	24,0	24,2	25,3	25,4	25,3	25,3
	2085s	27,8	27,4	27,6	27,8	24,7	25,0	24,7	25,1	24,7	25,2	25,9	26,5	26,0	26,4
Fev	Base		24,4		24,4		22,0		22,2		22,0		23,0		23,0
	2025s	26,2	26,3	25,3	25,8	22,9	23,4	22,9	23,6	22,8	23,4	23,8	24,4	23,9	24,4
	2055s	25,3	25,6	26,1	26,6	23,6	24,1	23,6	24,3	23,6	24,2	24,6	25,2	24,6	25,2
	2085s	26,2	26,2	27,0	27,6	24,5	25,1	24,5	25,3	24,5	25,4	25,5	26,5	25,5	26,3
Mar	Base		22,6		22,6		20,5		20,7		20,5		21,4		21,4
	2025s	23,7	23,8	23,7	24,0	21,6	21,8	21,6	22,0	21,5	21,9	22,4	22,8	22,5	22,8
	2055s	24,7	24,7	24,6	25,0	22,5	22,8	22,5	23,0	22,5	22,9	23,4	23,8	23,4	23,8
	2085s	25,7	25,2	25,6	25,4	23,4	23,4	23,4	23,6	23,4	23,5	24,3	24,5	24,3	24,4
Abr	Base		19,4		19,4		17,5		17,7		17,6		18,5		18,5
	2025s	20,7	20,4	20,6	20,5	18,8	18,7	18,8	18,9	18,8	18,7	19,7	19,6	19,7	19,6
	2055s	21,6	21,1	21,6	21,3	19,8	19,5	19,8	19,7	19,7	19,5	20,6	20,5	20,7	20,4
	2085s	22,6	21,9	22,6	22,1	20,8	20,3	20,8	20,5	20,7	20,6	21,6	21,5	21,6	21,4
Mai	Base		16,5		16,5		15,2		15,4		15,2		16,0		16,0
	2025s	17,8	17,6	17,8	17,7	16,5	16,5	16,5	16,7	16,5	16,5	17,3	17,3	17,3	17,2
	2055s	18,7	18,7	18,6	18,8	17,3	17,6	17,3	17,7	17,2	17,6	18,1	18,4	18,1	18,3
	2085s	19,5	19,1	19,5	19,3	18,2	18,1	18,2	18,3	18,1	18,3	18,9	19,1	18,9	18,9
Jun	Base		14,2		14,2		12,9		13,2		12,9		13,5		13,5
	2025s	15,2	15,2	15,2	15,3	14,0	14,0	14,0	14,2	13,9	14,0	14,5	14,6	14,5	14,5
	2055s	16,3	16,1	16,2	16,3	15,0	15,1	15,0	15,3	14,8	15,1	15,4	15,7	15,5	15,6
	2085s	17,1	16,6	17,1	16,9	15,8	15,7	15,8	16,0	15,7	15,8	16,3	16,4	16,3	16,3
Jul	Base		14,6		14,6		13,3		13,6		13,3		13,6		13,6
	2025s	15,7	15,8	15,6	15,9	14,3	14,6	14,3	14,9	14,3	14,7	14,6	15,0	14,6	14,9
	2055s	16,7	16,9	16,6	17,1	15,3	15,8	15,3	16,1	15,2	15,9	15,5	16,2	15,6	16,1
	2085s	17,6	17,6	17,5	17,9	16,2	16,5	16,2	16,8	16,1	16,8	16,4	17,1	16,4	17,0
Ago	Base		16,2		16,2		13,9		14,2		13,9		14,7		14,7
	2025s	17,4	17,4	17,3	17,5	15,0	15,2	15,0	15,6	15,0	15,2	15,8	16,0	15,8	16,0
	2055s	18,6	18,7	18,6	18,9	16,4	16,4	16,4	16,8	16,2	16,5	17,0	17,4	17,0	17,3
	2085s	19,4	19,4	19,4	19,8	17,2	17,2	17,2	17,5	17,0	17,5	17,8	18,5	17,8	18,3
Set	Base		17,4		17,4		15,7		15,8		15,7		16,3		16,3
	2025s	18,4	18,7	18,4	18,9	16,6	17,2	16,6	17,3	16,6	17,1	17,2	17,8	17,2	17,7
	2055s	19,6	20,0	19,6	20,3	17,9	18,5	17,9	18,6	17,8	18,5	18,4	19,2	18,4	19,1
	2085s	20,5	20,6	20,4	20,9	18,7	19,1	18,7	19,3	18,6	19,4	19,2	20,0	19,2	19,9
Out	Base		19,9		19,9		17,6		17,9		17,6		18,4		18,4
	2025s	21,2	21,2	21,1	21,3	18,8	19,0	18,8	19,3	18,7	19,0	19,6	19,8	19,6	19,8
	2055s	22,1	22,2	22,0	22,4	19,7	20,1	19,7	20,4	19,6	20,0	20,4	20,8	20,4	20,8
	2085s	23,0	22,9	22,9	23,1	20,5	20,7	20,5	21,1	20,4	21,0	21,3	21,8	21,3	21,7
Nov	Base		22,5		22,5		19,6		19,8		19,6		20,8		20,8
	2025s	23,6	23,5	23,5	23,6	20,6	20,7	20,6	20,9	20,5	20,7	21,7	21,9	21,7	21,9
	2055s	24,7	24,2	24,7	24,4	21,7	21,5	21,7	21,7	21,6	21,5	22,9	22,7	22,9	22,6
	2085s	25,5	24,9	25,4	25,1	22,5	22,2	22,5	22,4	22,4	22,4	23,6	23,6	23,6	23,5
Dez	Base		24,2		24,3		21,4		21,5		21,4		22,6		22,6
	2025s	25,2	25,2	25,1	25,3	22,3	22,5	22,3	22,7	22,3	22,6	23,5	23,8	23,5	23,7
	2055s	26,3	26,0	26,2	26,2	23,3	23,4	23,3	23,6	23,3	23,5	24,5	24,7	24,5	24,6
	2085s	26,9	26,5	26,8	26,8	23,9	24,1	23,9	24,2	23,8	24,2	25,0	25,5	25,1	25,3

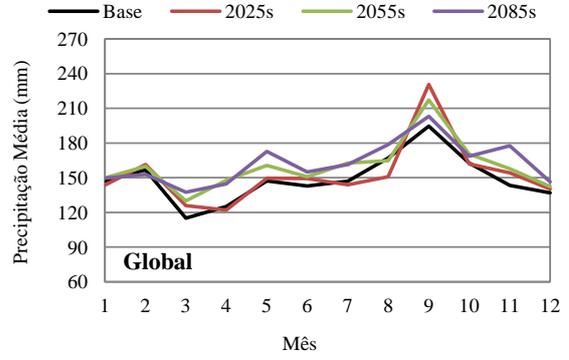
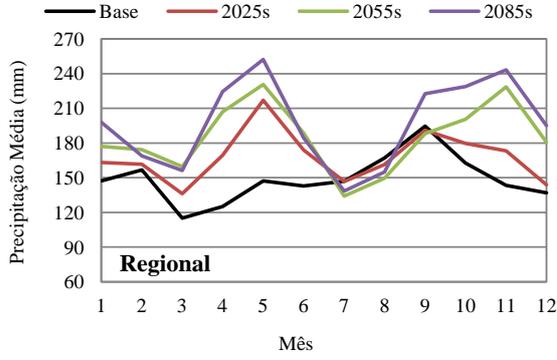
\*AVG: média da temperatura média mensal de todas as projeções globais; \*AVR: : média da temperatura média mensal de todas as projeções do modelo regional.



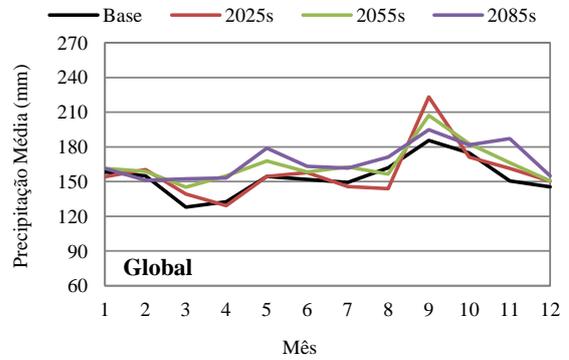
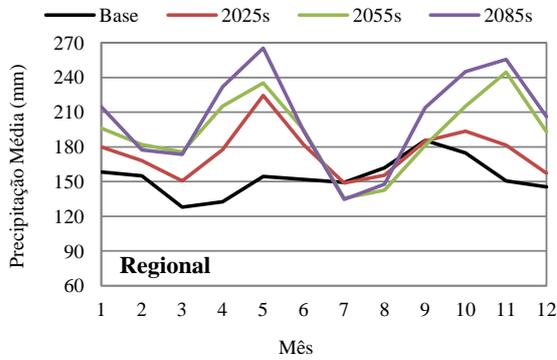
(a)



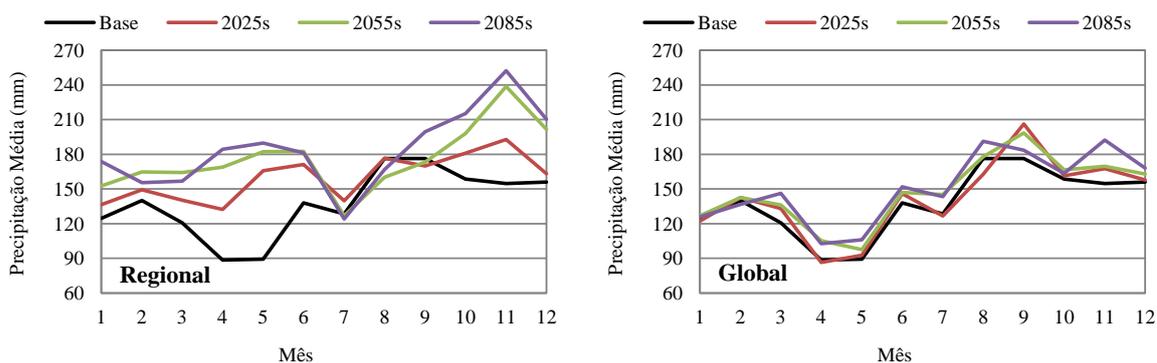
(b)



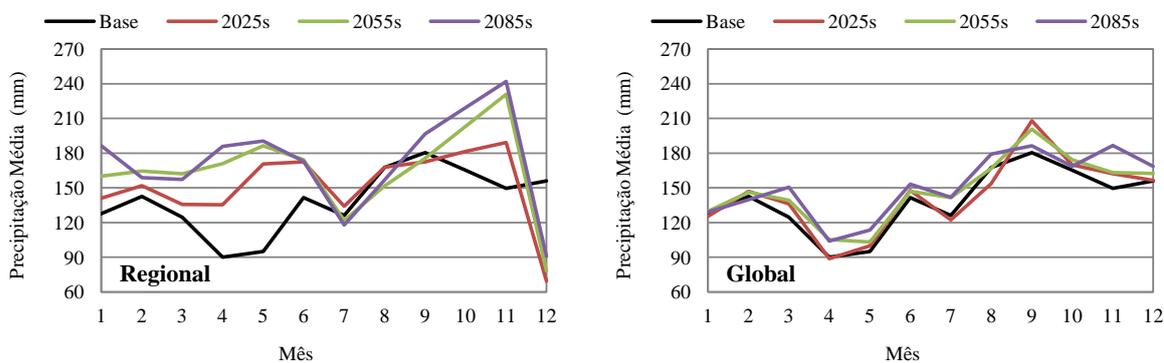
(c)



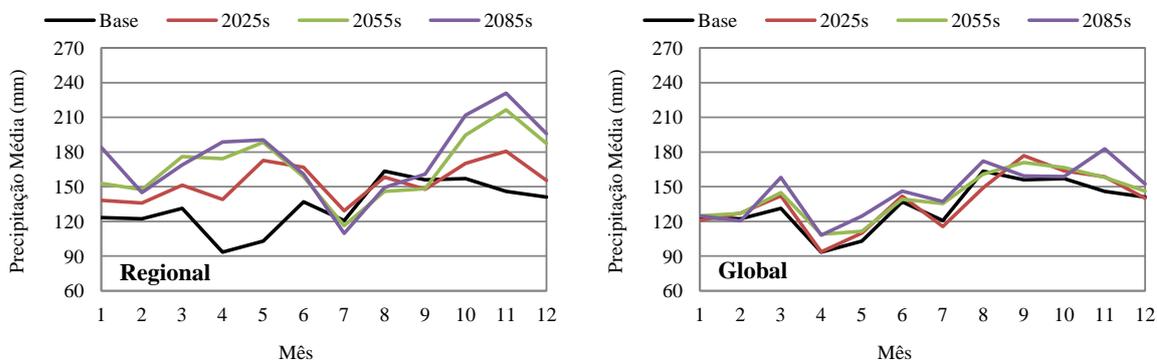
(d)



(e)



(f)



(g)

**Figura 4.3:** Ciclos sazonais de precipitação média mensal (mm) para as localizações 1 a 7 em (a) a (g), respectivamente. Linhas em preto representam o ciclo anual no período base (1961-1990) e as linhas coloridas são os ciclos projetados nos períodos futuros. Os gráficos à esquerda correspondem à média das projeções fornecidas pelas projeções do modelo ETA e os gráficos à direita à média dos MCGs.

Todas as projeções indicam aumento de temperatura em todas as localizações, sendo que é possível que os invernos se tornem mais quentes em comparação com os verões. As anomalias para o período de 2025s apresentem menores flutuações do que para os períodos

subsequentes e espera-se que as maiores diferenças serão sentidas entre 2025s e 2055s do que entre 2055s e 2085s.

O estudo realizado por Solomon et al. (2007) revelou resultados semelhantes sobre a análise das temperaturas médias e mínimas na região Sul do Brasil durante o período de 1960-2002, e que estão de acordo com as tendências contidas nas projeções utilizadas neste estudo. Os autores apontam para um aquecimento na região Sul do país com tendências positivas nas temperaturas máximas e mínimas. Acrescentam também que o aquecimento será mais intenso no inverno do que no verão, provavelmente devido ao maior número de dias mais quentes no inverno.

Com relação à precipitação, os modelos globais concordam mais entre si nas diferentes localizações (menor variabilidade), porém fornecem projeções em alguns casos contrárias às do modelo ETA. Além disso, fornecem menor variação sazonal com relação ao período base. Sobre este fato, observa-se que para o trimestre de dezembro, janeiro e fevereiro, os modelos globais indicam que haverá pouca ou nenhuma alteração com relação ao período atual, ou seja, não se prevê alteração durante a maior parte do período da cultura de verão (de novembro a março). Associado a isto, tem-se que haverá menores aumentos de temperatura para estes meses e que os impactos são prováveis de serem menores.

Embora as médias da variação anual da precipitação apresentadas na Figura 4.2 sejam, na maioria dos casos, positivas, na verdade somente os meses de março, maio e novembro tiveram anomalias estritamente positivas para todos os períodos futuros em todas as localizações. Os meses de julho, agosto e setembro apresentaram as maiores reduções, sendo que quase todas as anomalias foram negativas em agosto, fornecidas tanto pelos modelos globais quanto pelas projeções do modelo ETA.

Além destes meses, anomalias negativas projetadas pelo modelo regional foram obtidas somente para os meses de fevereiro e de dezembro nas localizações 1 e 6, respectivamente, em todos os períodos futuros. As projeções para agosto fornecem as maiores reduções, chegando a anomalias de até 20 mm.

Comparando-se as anomalias entre os tipos de modelos, observa-se que todas as anomalias calculadas para o modelo regional são muito maiores que as fornecidas pelos modelos globais. Ou seja, o modelo regional projeta uma situação que é mais favorável, de aumento nos regimes de precipitação. Este aumento, em geral, é maior quanto mais se afasta do período atual para todos os meses, com exceção dos meses de fevereiro, julho e setembro, quando se observa os maiores aumentos no meio do século (2055s). As maiores anomalias

positivas foram obtidas para os meses de maio e novembro, que são os meses quando se inicia o cultivo de inverno e o de verão, respectivamente.

De forma geral, pode-se dizer que os modelos concordam entre si que durante os meses do cultivo de verão (mais importante que o de inverno) haverá um aumento de precipitação, e que é possível que a agricultura não seja afetada em função desta variável. Com relação às anomalias, tem-se que as projeções de anomalias positivas possuem maior magnitude que as anomalias negativas.

#### *4.3.3 Índices de Precipitação Extrema*

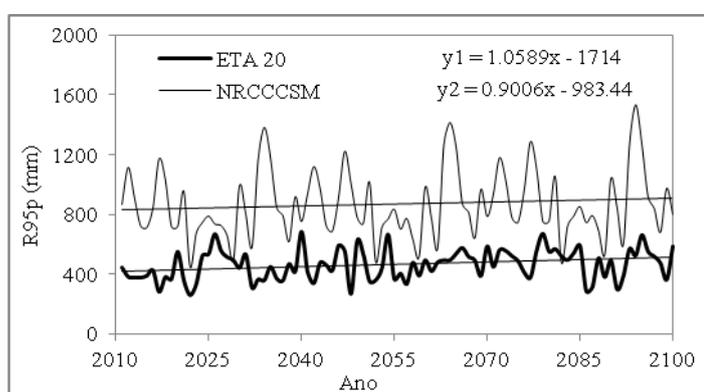
Para facilitar a visualização dos resultados, são apresentados a seguir apenas os valores médios dos índices selecionados para as projeções de precipitação dadas pelos modelos globais e regionais (AVG e AVR, respectivamente), separados por localização (Tabela 4.7). Porém o teste de Mann-Kendal foi realizado para cada uma das séries anuais dos índices considerados em cada localização e para cada modelo.

O primeiro índice R95p refere-se ao total precipitado nos dias em que a precipitação é maior que o percentil de 95%. Desta forma, se houver tendência de aumento para este índice, isto pode indicar que o aumento da precipitação discutido no item anterior é, em parte, devido à ocorrência de chuvas mais intensas (mais concentradas no tempo). Em todas as localizações, este índice, na média, foi maior para os modelos globais do que para os regionais e é maior quanto mais se afasta do período atual (Tabela 4.7). Porém, o teste de hipóteses revela tendências de aumento em todas as localizações apenas para o modelo ETA 20, e nenhuma tendência para os modelos HADCM3 e NRCCSM, em nenhuma localização. Verificou-se que as localizações 6 e 7 não apresentaram tendências em praticamente nenhum dos modelos. Este fato pode indicar uma distribuição espacial dos impactos, sugerindo que o clima próximo a estas localizações seja diferente do resto da região e venha a ser menos afetado por um clima em mudança. Foram encontradas evidências estatísticas de tendência para quase todos os modelos regionais, enquanto para os globais apenas o modelo GFCM21 registrou tendência em todas as localizações, exceto a 7.

**Tabela 4.7:** Índices de precipitação média anual para todas as localizações e períodos, baseados na média dos MCGs e do MCR.

Localização	Período	Modelo															
		AVR								AVG							
		R95p (mm)	R99p (mm)	PRCPTOT (mm)	R30 (mm)	RX1 (dia)	RX5 (dia)	CDD (dia)	CWD (dia)	R95p (mm)	R99p (mm)	PRCPTOT (mm)	R30 (mm)	RX1 (dia)	RX5 (dia)	CDD (dia)	CWD (dia)
1	Base	786	269	1717	16	87	149	18	8	772	263	1717	16	86	144	17	8
	2025s	749	258	1829	17	89	161	24	8	790	273	1730	16	89	150	17	8
	2055s	791	272	1945	19	94	172	25	8	817	285	1781	16	93	158	17	8
	2085s	822	279	2047	21	96	175	25	8	847	299	1836	17	99	165	17	8
2	Base	811	271	1683	17	84	152	20	7	794	264	1683	17	82	152	20	7
	2025s	788	264	1912	20	91	171	19	7	818	277	1710	18	86	159	19	7
	2055s	825	270	2048	22	93	181	20	7	847	286	1765	18	89	165	19	7
	2085s	868	282	2201	25	96	186	20	7	877	296	1815	19	92	170	19	7
3	Base	866	305	1781	18	98	172	20	7	854	297	1781	18	94	169	21	7
	2025s	816	272	2015	22	97	188	20	7	889	313	1830	19	101	179	21	7
	2055s	874	288	2213	25	101	202	23	7	925	324	1904	20	104	186	21	7
	2085s	908	298	2365	27	103	205	22	7	950	334	1944	20	108	192	21	7
4	Base	791	271	1838	16	86	155	17	9	782	265	1838	16	84	155	16	10
	2025s	786	263	2097	19	91	179	16	9	814	280	1881	16	90	165	16	10
	2055s	847	279	2300	23	96	191	18	10	849	292	1958	18	94	172	16	10
	2085s	885	288	2452	25	96	196	17	10	874	302	2001	18	97	178	16	10
5	Base	750	250	1639	15	78	145	19	8	736	242	1639	15	73	147	19	8
	2025s	743	245	1907	19	84	167	17	8	769	257	1693	16	78	156	20	8
	2055s	791	261	2097	22	89	178	19	8	800	268	1757	17	81	162	19	8
	2085s	820	265	2197	24	89	182	18	8	828	278	1799	18	85	169	20	8
6	Base	775	262	1661	16	84	152	20	7	763	255	1661	16	84	150	20	7
	2025s	750	253	1820	19	88	171	27	7	798	270	1712	17	89	160	21	7
	2055s	791	264	1974	21	93	179	27	7	825	279	1770	18	92	166	20	7
	2085s	829	274	2072	22	95	188	28	7	856	293	1816	19	99	174	20	7
7	Base	745	261	1588	14	86	148	19	7	735	251	1588	14	83	148	19	7
	2025s	749	262	1842	17	92	166	17	8	766	267	1633	15	88	157	19	7
	2055s	799	276	1998	20	98	180	18	8	792	274	1685	16	90	162	19	7
	2085s	833	283	2092	21	97	185	18	8	826	291	1739	16	97	171	19	7

Embora as médias dos modelos globais tenham sido maiores, este resultado não está em desacordo com o teste de hipótese que aponta mais tendências de aumento para os modelos regionais. Este fato pode ser melhor compreendido por meio da Figura 4.4. Nela estão representadas as tendências que foram testadas para um modelo regional ETA 20 e um modelo global (NRCCSM). Nota-se que, embora o modelo global tenha média maior para o índice R95p, sua linha de tendência é menos inclinada que a do modelo regional. Desta forma, a diferença nas médias representa apenas a variabilidade entre modelos, enquanto o teste de Mann-Kendall identifica tendências ao longo do tempo.



**Figura 4.4:** Variação entre modelos e tendências de aumento do índice R95p (mm) para os modelos ETA 20 e NRCCSM, localização 1. ( $y_1$  e  $y_2$  são as linhas de tendência para os modelos ETA 20 e NRCCSM, respectivamente).

Todas as localizações apresentaram tendências de aumento para pelo menos 5 dos 10 modelos climáticos, com exceção da localização 7, onde apenas as projeções dadas pelo ETA 20 e o ETA 40 HIGH revelaram tendência no nível de significância considerado. Os gráficos também mostram a grande variabilidade interanual deste índice.

A análise do índice R99p segue a mesma lógica do anterior, porém considera a soma dos dias com precipitações ainda mais intensas, acima do percentil 99%. No entanto, poucas projeções indicaram tendência para este índice, sendo que em nenhuma localização isto aconteceu para mais de 3 modelos. Os índices R95p e R99p também indicam quanto da chuva total precipitada em um ano ocorrerá em eventos mais intensos ou extremos. Por exemplo, para o modelo ETA 40 CTRL, o total precipitado previsto para 2050 na localização 1 é de 2596 mm. Deste total, espera-se que 532 mm (20%, aproximadamente) precipitem em dias com chuvas acima do percentil 95% e que 213 mm (8%, aproximadamente) ocorram em dias com precipitação acima do percentil 99%, ou seja, em dias de eventos extremos de chuva.

Para a agricultura, estes podem ser os piores eventos de chuva, pois as plantações podem ser rapidamente destruídas. Para os modelos que registraram tendências positivas, pode ser devido tanto à ocorrência de chuvas mais fortes, como à ocorrência mais frequente destes eventos de chuva mais extremos. Para responder esta dúvida, a tendência do número de dias necessário para gerar um determinado montante de precipitação deveria ter sido analisada, porém não foi calculada neste trabalho.

Para o índice PRCPTOT, que corresponde ao total precipitado dos dias úmidos ( $P \geq 1\text{mm}$ ), os maiores valores foram projetados pelo modelo regional ETA e seus membros. Com exceção das localizações 1 e 6, todas as demais projetam este índice até 600 mm mais do que o período base para o fim do século (2085s), segundo as projeções do modelo regional ETA. Já os modelos globais, em média, sugerem aumentos de precipitação de no máximo 160 mm em toda a região no mesmo período. Além disso, o teste de Mann-Kendall para este índice detecta tendências de aumento somente para o modelo ETA e rejeita esta hipótese para todos os modelos globais considerados.

Resultados semelhantes foram obtidos para o índice R30 (dias), o qual contabiliza o número de dias no ano com precipitações acima de 30 mm. Este índice também auxilia na detecção de eventos extremos, uma vez que pode ser associado com os dois primeiros índices apresentados anteriormente. Tomando como exemplo o ETA 20 nos anos de 2022 e 2033 (não apresentado), quando os percentis de 95th foram próximos à 30 mm, tem-se que, no primeiro caso apenas 5 dias (R30, em 2022) foram responsáveis por uma chuva de 260 mm (R95p, em 2022); e no segundo caso, 7 dias (R30, em 2033) foram responsáveis por uma chuva de 360 mm (R95p, em 2033). Embora esta análise não tenha sido feita para todas as projeções e localizações, ela seria muito útil para entender quantos dias são necessários para gerar uma certa quantidade de chuva.

Para os modelos globais, nota-se na Tabela 4.7 que o índice R30 praticamente não se altera com relação ao período de 1961-1990, sendo no máximo 3 dias a mais em 2085s. Já os índices calculados para as projeções regionais revelam até 9 dias com precipitação acima de 30 mm no final do século. Destes, somente o ETA 40 HIGH mostrou tendência nas localizações 6 e 7, nenhuma na localização 5 e, nas demais localizações, variou entre as demais projeções, com no máximo três tendências detectadas em cada ponto.

Para todos os demais índices não foram detectadas tendências nem para o modelo ETA, tampouco para os modelos globais. Comparando os índices RX1 e RX5 percebe-se que o máximo precipitado em um dia é proporcionalmente muito mais extremo do que o total

precipitado em cinco dias úmidos consecutivos. Embora não haja tendência de aumento, estes valores em média são preocupantes, pois representam dias com chuvas muito intensas na região.

Por fim, os índices CDD e CWD variaram entre 16 e 21 dias e entre 7 e 10 dias, respectivamente, na região. Não há evidência estatística de tendência para estes índices. As localizações 1 e 4 são as que apresentaram menor número de dias secos consecutivos e maior número de dias úmidos consecutivos. É importante ressaltar que eventos de seca podem estar relacionados à ocorrência de ondas de calor, não detectáveis pelas projeções utilizadas. Assim como Olesen et al. (2011) detectaram a correlação entre estes dois fenômenos no leste e oeste da Europa, é possível que esta seja a razão para as severas estiagens já ocorridas no Rio Grande do Sul. Desta forma, as projeções utilizadas neste estudo não contemplam este problema, o qual poderia ser melhor analisado pela análise de séries históricas na região.

#### **4.4 Conclusões Parciais**

Este estudo objetivou detectar evidências de mudanças climáticas na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Esta região é a terceira maior produtora de soja do estado, contribuindo significativamente para a produção nacional. Dez projeções de modelos climáticos globais e regionais foram consideradas em sete diferentes localizações na região. A análise foi conduzida para o período de 2011-2100 e comparada com o período de base (1960-1990).

Em sua grande maioria, as projeções, tanto regionais quanto globais, concordaram sobre um aumento de temperatura e precipitação em todas as sete localizações. As projeções indicam um aumento de até 3°C até o final do século, um pouco menor do que foi encontrado por outros autores, sendo que se espera que as localizações 6 e 7 sofram com as maiores temperaturas médias. Com relação à precipitação, somente a localização 6 apresenta redução. Pode-se concluir que é possível que o clima nestas localizações (mais no centro do Estado) seja diferente do resto da região e que a distribuição espacial dos impactos destas mudanças sobre a agricultura na região não será uniforme.

A análise sazonal de temperatura e de precipitação projetadas mostra que os meses de cultivo de verão serão os menos afetados pelo aumento destas variáveis. Porém, isto não significa que as alterações sentidas não serão significativas. Com relação a este fato, pode-se observar grande variabilidade entre as projeções do modelo ETA e seus membros e dos modelos globais. Isto pode ser confirmado pela análise de tendência das séries de

precipitação, a qual mostrou que a maioria das tendências de aumento dos índices considerados foi das projeções regionais. Desta forma, os resultados aqui apresentados são úteis para demonstrar a influência do *downscaling* sobre as conclusões dos resultados. Uma vez que os MCRs são construídos para áreas menores com uma resolução espacial melhor, suas projeções podem ser vistas como mais próximas da realidade do que as projeções de MCGs. Além disto, as médias de precipitação projetadas pelos modelos globais foram maiores do que para o modelo ETA, porém não foram detectadas tendências de aumento para a maioria dos índices calculados a partir das projeções globais.

As diferenças nos resultados encontrados entre este estudo e os demais mencionados anteriormente, se devem provavelmente aos diferentes cenários de emissão de gases do efeito estufa considerados. Logo, estas conclusões servem para projeções que partem de um cenário (A1B) não tão pessimista como o cenário A2, utilizado, por exemplo, no trabalho realizado por Hamada et al. (2008), os quais encontraram aumentos de temperatura de até 5,5°C para o final do século.

Como não há outras pesquisas com modelos regionais para a região, este estudo veio agregar informações sobre as tendências do clima futuro para a região Noroeste e, indiretamente, para os estudos existentes atualmente para o Sul do Brasil. Também serviu para mostrar, mesmo que indiretamente, que para um mesmo modelo também há grande variabilidade, o que aumenta a incerteza sobre as conclusões adotadas e expõe a dificuldade de entender as proporções em que as mudanças climáticas poderão se manifestar em um determinado local.

#### **4.5 Referências Bibliográficas**

- ALEXANDER, L.V.; ZHANG, X.; PETERSON, T.C.; CAESAR, J.; BLEASON, B.; KLEIN TANK, A.M.G.; HAYLOCK, M.; COLLINS, D.; TREWIN, B.; RAHIMZADEH, F.; TAGIPOUR, A.; RUPA KUMAR, K.; REVADEKAR, J.; GRIFFITHS, G.; VINCENT, L.; STEPHENSON, D.B.; BURN, J.; AGUILAR, E.; BRUNET, M.; TAYLOR, M.; NEW, M.; ZHAI, P.; RUSTICUCCI, M.; VAZQUEZ-AGUIRRE, J.L. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, v. 111, p. 1-22, 2006.
- BARRY, R.G e CHORLEY, R.J. Atmosphere, Weather and Climate, ninth ed. New York: Routledge, 2009.

- BATES, B.C.; KUNDZEWICZ, Z.W.; WU, S.; PALUTIKOF, J.P. (Eds) Climate Change and Water Technical Paper of the Intergovernmental Panel on climate Change. IPCC Secretariat, Geneva, 2008.
- BLACK, T.L. The new NMC mesoscale Eta Model: Description and forecast examples. *Weather Forecasting*, v. 9, p. 265-278, 1994.
- BOCCHIOLA, D.; NANA, E.; SONCINI, A. Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po valley of Italy. *Agricultural Water Management*, v. 116, p. 50-61, 2013.
- BRITO, A.L.; VEIGA, J.A.P.; YOSHIDA, M.C. Extreme Rainfall Events over the Amazon Basin Produce Significant Quantities of Rain Relative to the Rainfall Climatology. *Atmospheric and Climate Sciences*, v. 4, p. 179-191, 2014.
- DERECZYNSKI, C.; SILVA, W.L.; MARENGO, J.A. Detection and Projections of Climate Change in Rio de Janeiro, Brazil. *American Journal of Climate Change*, v. 2, p. 25-33, 2013.
- FOCHEZZATO, A. e GRANDO, M.Z. Efeitos da estiagem na economia do Rio Grande do Sul: uma abordagem multissetorial. Textos para Discussão FEE nº 62. Secretaria do Planejamento e Gestão Fundação de Economia e Estatística Siegfried Emanuel Heuser, Porto Alegre, 2009.
- GRIMM, A.M.; FERRAZ, S.E.T.; GOMES, J. Precipitation Anomalies in Southern Brazil Associated with El Niño and La Niña Events. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 11, p. 2863-2880, 1998.
- GRIMM, A.M. The El Niño Impact on the Summer Monsoon in Brazil: Regional Processes versus Remote Influences. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 16, p. 263-280, 2003.
- HAMADA, E.; GONÇALVES, R.R.V.; ORSINI, J.A.M.; GHINI, R. Future climate scenarios for Brazil. In: GHINI, R. e HAMADA, E. (Eds) Mudanças Climáticas: Impactos sobre doenças de plantas no Brasil. EMBRAPA Informação Tecnológica, Brasília-DF, 2008.
- HARMSSEN, E.W.; NILLER, N.L.; SCHLEGEL, N.J.; GONZALEZ, J.E. Seasonal climate change impacts on evapotranspiration, precipitation deficit and crop yield in Puerto Rico. *Agricultural Water Management*, v. 96, p. 1085-1095, 2009.
- HWAN, Y.S.; YONG, C.J.; HYUN, L.S.; GYEONG, O.Y.; KOUN, Y.D. Climate change impacts on water storage requirements of an agricultural reservoir considering changes in

- land use and rice growing season in Korea. *Agricultural Water Management*, v. 117, p. 43-54, 2013.
- JALOTA, S.K.; KAUR, H.; KAUR, S.; VASHISHT, B.B. Impact of climate change scenarios on yield, water and nitrogen-balance and use efficiency of rice-wheat cropping system. *Agricultural Water Management*, v. 116, p. 29-38, 2013.
- JUSTINO, F.; OLIVEIRA, E.C.; RODRIGUES, R.A.; GONÇALVES, P.H.L.; SOUZA, P.J.O.P.; STORDAL, F.; MARENGO, J.A.; SILVA, T.G.; DELGADO, R.C.; LINDEMANN, D.S.; COSTA, L.C. Mean and Interannual Variability of Maize and Soybean in Brazil under Global Warming Conditions. *American Journal of Climate Change*, v. 2, p. 237-253, 2013.
- KENDALL, M.G. Rank Correlation Methods. 4th Edition, London: Charles Griffin, 1975.
- KIKTEV, D.; SEXTON, D.M.H.; ALEXANDER, L.; FOLLAND, C.K. Comparison of Modeled and Observed Trends in Indices of Daily Climate Extremes. *Journal of Climate*, v. 16, p. 3560-3571, 2003.
- MACHADO, R.D. e ROCHA, R.P. Previsões climáticas sazonais sobre o Brasil: Avaliação do REGCM3 aninhado no modelo global CPTEC/COLA. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 26, p. 121-136, 2011.
- MANN, H.B. Non-Parametric Test against Trend. *Econometrica*, v. 13, p. 245-259, 1945.
- MARENGO, J.A. e SOARES, W. Clima e Recursos Hídricos 9. ABRH/FBMC-ANA, Porto Alegre, 2003.
- MARENGO, J.A. e VALVERDE, M.C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. *Revista Multiciência*, v. 8, p. 5-27, 2007.
- MARENGO, J.A. e CAMARGO, C. Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960-2002. *International Journal of Climatology*, v. 11, p. 1-2, 2007.
- MARENGO, J.A.; ALVES, L.; VALVERDE, M.; ROCHA, R.; LABORBE, R. Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: projeções de clima futuro usando três modelos regionais. Relatório 5, Ministério do Meio Ambiente – MMA, Brasília, 2007.
- MARENGO, J.A.; SCHAEFFER, R.; PINTO, H.S.; ZEE, D.M.W. Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil. FBDS, Rio de Janeiro, 2009.
- MARENGO, J.A.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R.P.; ALVES, L.M.; CUADRA, S.V.; VALVERDE, M.C.; TORRES, R.R.; SANTOS, D.C.; FERRAZ, S.E.T. Future changes

- of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. *Climate Dynamics*, v. 35, p. 1073-1097, 2010.
- MESINGER, F. e JANJIC, Z.I. Noise due to time-dependent boundary conditions in limited area models. The GARP Programme on Numerical Experimentation, Rep. No. 4, WMO, Geneva, 1974.
- NEDEL, A.; SAUSEN, T.; SAITO, S. Zoneamento dos desastres naturais ocorridos no estado do Rio Grande do Sul no período 2003-2009 – Parte I: Seca. Proceedings XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belém, 1-5, 2010.
- NKOMOZEPI, T. e CHUNG, S.O. Assessing the trends and uncertainty of maize net irrigation water requirement estimated from climate change projections for Zimbabwe. *Agricultural Water Management*, v. 111, p. 60-67, 2012.
- NOGUÉS-PAEGLE, J. e MO, K. Alternating Wet and Dry conditions over South America during Summer. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 125, p. 279-291, 1997.
- OLESEN, J.E.; TRNKA, M.; KERSEBAUM, K.C.; SKJELVÅG, A.O.; SEGUIN, B.; PELTONEN-SAINIO, P.; ROSSI, F.; KOZYRA, J.; MICALE, F. Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy*, v. 34, p. 96-112, 2011.
- SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.B.; TIGNOR, M.; MILLER, H.K. (Eds) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- SOUZA, E.B.; MORAES, B.C.; FERREIRA, D.B.S; MEIRA-FILHO, L.G. Dynamical Downscaling for Railroad Areas in Eastern Amazon and Southeastern Brazil: Current Climate and Near-Future Projections. *Atmospheric and Climate Sciences*, v. 4, p. 155-163, 2014.
- VALVERDE, M.C. e MARENGO, J.A. Extreme Rainfall Indices in the Hydrographic Basins of Brazil. *Open Journal of Modern Hydrology*, v. 4, p. 10-26, 2014.
- VINCENT, L.A.; PETERSON, R.C.; BARROS, V.R.; MARINO, M.B.; RUSTICUCCI, M.; CARRASCO, G.; RAMIREZ, E.; AMBRIZZI, T.; BERLATO, M.A.; GRIMM, A.M.; MARENGO, J.A.; MOLION, L.; MONCUNILL, D.F.; REBELLO, E.; ANUNCIACÃO, Y.M.T.; QUINTANA, J.; SANTOS, J.L.; BAEZ, J.; CORONEL, G.; GARCIA, J.; TREBEJO, I.; BIDEGAIN, M.; HAYLOCK, M.R.; KAROLY, D. Observed Trends in

Indices of Daily Temperature Extremes in South America 1960-2000. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 18, p. 5011-5023, 2005.

YOO, S.H.; CHOI, J.Y.; NAM, W.H.; HONG, E. Analysis of design water requirement of paddy rice using frequency analysis affected by climate change in South Korea. *Agricultural Water Management*, v. 112, p. 33-42, 2012.

WORLD BANK World Development Report 2010: Development and Climate Change. World Bank, Washington, DC, 2009.

## 5. IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE AS DEMANDAS FUTURAS DE ÁGUA PARA A IRRIGAÇÃO DA SOJA

**Resumo:** Maiores temperaturas e uma maior variabilidade na precipitação causarão, em geral, maiores demandas de água para a irrigação. A cultura não irrigada mais importante do Estado do Rio Grande do Sul é a soja, sendo que a mesorregião Noroeste é a que mais contribui para as colheitas anuais desta cultura. Este capítulo objetivou avaliar se os impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura nesta região serão positivos ou negativos e em que intensidade eles poderão ocorrer. Para tanto, foram considerados os mesmos dados de projeções climáticas futuras gerados pelos modelos climáticos considerados no capítulo anterior, bem como amostragens de solo para caracterização físico-hidráulica das propriedades do solo na área de estudo. O modelo unidimensional SWAP foi utilizado para estimar as demandas de água para irrigação (IWR), sem considerar perdas devido à eficiência de qualquer método de irrigação. Foram feitos também testes de hipótese sobre as séries de IWR simuladas e os resultados suportam a premissa de que IWR a curto prazo (2025s) não será estatisticamente diferente do período base (1961-1990). Por outro lado, IWR em 2055s e 2085s rejeitam esta hipótese. Estes resultados são devido a menores anomalias de P e T em 2025s, enquanto que maiores anomalias são esperadas do meio para o final do século.

**Palavras-chave:** demandas futuras de água, modelo SWAP, impactos das mudanças climáticas, análise de incertezas.

### 5.1 Introdução

As alterações no clima e o aquecimento global podem ser atribuídos principalmente às atividades humanas. A concentração atual de CO<sub>2</sub> na atmosfera (390 ppm) é maior do que foi durante os últimos 800 mil anos antes da Revolução Industrial, quando variou de 170 a 280 ppm (World Bank, 2009). Isso resultou em um aumento na temperatura média global de 0,74 ± 0,18°C ao longo dos últimos 100 anos (Trenberth e Jones, 2007).

Tais mudanças climáticas são causadas principalmente pelo aumento das emissões de gases que contribuem para o efeito estufa, como resultado das atividades humanas, tais como a queima de combustíveis fósseis e os desmatamentos, bem como eventos naturais como erupções vulcânicas (IPCC, 2007). Quando mudanças climáticas ocorrem, todos os aspectos da agricultura devem ser revistos, incluindo as demandas de água, os sistemas de irrigação e o uso da terra, bem como as características sazonais dos sistemas de cultivo (Hwan et al., 2013).

Maiores temperaturas e maior variabilidade temporal da precipitação podem causar maiores demandas de água para a irrigação. Isto é provável de ocorrer mesmo se o total precipitado durante o período de semeadura permanecer o mesmo (Bates et al., 2008) e é principalmente devido a maiores taxas de evapotranspiração, o que poder ser também o caso de aumento de radiação solar.

Um estudo recente (Hamada et al., 2008) indica que a temperatura no Brasil aumentou aproximadamente 0,75°C até o final do século passado em todas as estações, porém de forma mais expressiva no período de junho a agosto.

Para melhor compreender a severidade das consequências, uma análise detalhada e cuidadosa sobre a região de interesse, suas práticas agrícolas, culturas e usos da terra são de grande importância. A análise de séries históricas de variáveis meteorológicas permite detectar padrões de clima local ou regional e suas tendências ao longo do tempo e do espaço.

Durante as últimas décadas, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) vem concentrado as pesquisas mais importantes conduzidas pelo uso de diversos modelos climáticos desenvolvidos ao redor do mundo. Como discutido no capítulo anterior, as projeções climáticas são geradas por modelos de circulação geral (MCGs) ou regional (MCRs) como resultado de cenários de forçantes climáticas causadas pela emissão de gases do efeito estufa e aerossóis. Tais modelos compreendem complexos sistemas de equações diferenciais e apresentam resoluções espaciais que variam de 250 a 600 km de comprimento e de 10 a 20 camadas verticais na atmosfera (Barry e Chorley, 2009).

Os resultados das simulações de diferentes modelos apontam para o fato de que os efeitos das mudanças climáticas sobre a agricultura também são função dos cenários climáticos, dos períodos futuros (para os quais as incertezas aumentam quanto mais afasta-se do período atual), do clima local atual e dos sistemas e práticas de manejo agrícola (Islam et al., 2012)

Muitos autores simularam reduções nos períodos de cultivo de diversas culturas ao longo deste século devido ao aumento de temperatura (Bocchiola et al., 2013; Hwan et al., 2013; Jalota et al., 2013), principalmente como resultado da soma térmica dos períodos de desenvolvimento da cultura. Enquanto Yoo et al. (2012) demonstraram que as demandas de água para irrigação no futuro serão menores do que 3% na Coreia do Sul com relação ao presente, um aumento de 26-32% foi estimado para a Califórnia por Mehta et al. (2013), devido a um clima mais quente e mais seco nesta região, especialmente no final do século.

Como pode ser visto, estes resultados são função do aumento de temperatura e diferentes regimes de precipitação em cada localidade.

Segundo Ayoade (2001) apud Marengo et al. (2009), algumas alterações/limitações no comportamento vegetal, considerando-se apenas o aumento de temperatura, são:

- Todos os processos de crescimento da planta são afetados pela temperatura do ar e do solo, pois cada planta possui um limite térmico mínimo, ótimo e máximo em cada estágio de desenvolvimento;
- As temperaturas letais mais altas para a maioria das plantas situam-se entre 50°C e 60°C, sendo que a partir de 40°C a fotossíntese é interrompida;
- O resfriamento prolongado das plantas, com temperaturas acima do ponto de congelamento do tecido, retarda o crescimento vegetal e pode matar plantas adaptadas somente a temperaturas elevadas;
- O calor excessivo pode destruir o protoplasma vegetal, pois ele possui um efeito ressecante sobre as plantas e as rápidas taxas de transpiração podem levar ao murchamento.

Diversos autores buscaram investigar mais detalhadamente os impactos do aumento da temperatura sobre a agricultura brasileira que já haviam sido previstos e abordados no quarto relatório emitido pelo IPCC (2007) (Assad et al., 2006, 2007; Nobre et al., 2008). Além destes autores, outros buscaram investigar o deslocamento das principais culturas que serão resultantes destas mudanças no futuro (Zullo Jr et al., 2008a, 2008b; Assad et al, 2007). Merece destaque também o trabalho realizado por Assad e Pinto (2008), o qual apresenta as perdas e ganhos previstos futuramente devido à migração de culturas no país, decorrentes do aumento de temperatura. Segundo o cenário considerado (A2), apenas a cana-de-açúcar poderá expandir-se a curto prazo (2020) e também a mandioca, a médio e longo prazo (2050 e 2070), enquanto as demais principais culturas brasileiras sofrerão grandes reduções nas áreas cultiváveis, ou seja, provavelmente migrarão para regiões onde as condições climáticas serão mais favoráveis.

Especificamente no Estado do Rio Grande do Sul, já foram acumuladas perdas nas safras de soja devido a longos períodos de estiagem durante os meses de verão, pois o desenvolvimento da cultura coincide com os períodos mais frequentes das secas, ou seja, de novembro a março (ver Tabela 2.1).

As culturas não irrigadas mais importantes do Estado do Rio Grande do Sul (RS) são a soja e o milho, sendo que a mesorregião Noroeste do Estado é a que mais contribuiu para as

colheitas anuais destas culturas. As áreas plantadas de milho e soja na região Noroeste são 610.442 ha e 2.747.600 ha, respectivamente (FEE, 2014). Um sério agravante para esta região, e que justifica as pesquisas, é que os sistemas de cultivo são essencialmente não irrigados. Apenas para exemplificar, na Tabela 5.1 são apresentadas as quedas de safras de algumas culturas em 2012 comparadas com o ano anterior. Neste período ocorreu uma das maiores estiagens já registradas no RS.

**Tabela 5.1:** Variação na produção da safra de grãos no RS de 2012 (ano seco) em comparação com 2011.

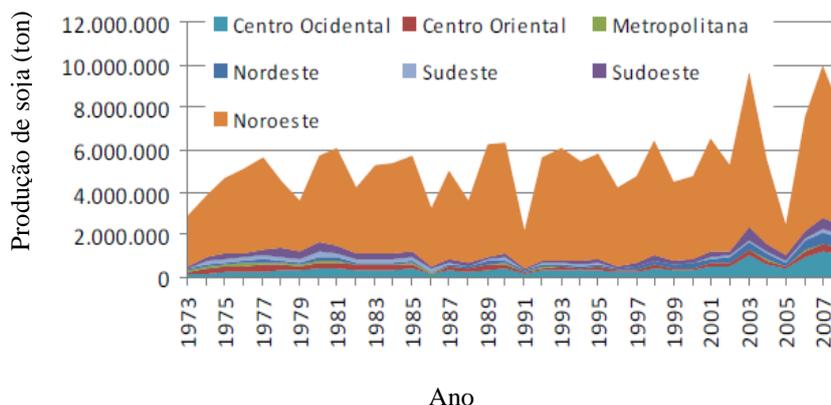
Cultura	Safra 2011 (ton)	Safra 2012 (ton)	Varição (%)
Amendoim (1ª safra)	6.500	4.931	-24,14
Arroz	8.942.000	7.728.059	-13,58
Aveia	233.200	238.384	<b>2,22</b>
Centeio	2.392	2.328	-2,68
Cevada	98.819	121.972	<b>23,43</b>
Feijão (1ª safra)	94.900	60.961	-35,76
Feijão (2ª safra)	29.000	24.911	-14,10
Girassol	10.700	5.143	-51,93
Milho (1ª safra)	5.776.300	3.156.869	-45,35
Soja	11.621.300	5.929.078	-48,98
Sorgo	44.700	34.623	-22,54
Trigo	2.741.716	2.295.700	-16,27
Triticale	11.125	13.152	<b>18,22</b>
<b>Total</b>	<b>29.612.652</b>	<b>19.616.111</b>	<b>-33,76</b>

Fonte: Extraído de FARSUL (2012).

Para demonstrar a importância da região Noroeste para o setor agrícola no RS, está apresentada na Figura 5.1 a produção de soja (em toneladas) para todas as regiões do Estado durante o período de 1973 a 2007. Em grande destaque aparece a região Noroeste como maior produtora desta cultura. Também é muito evidente a quebra de produção no ano de 2005, quando estiagens severas ocorreram em todo o RS. Já em 1991, a grande perda de safra foi devido a reincidência da doença da podridão parda da haste (*Phialophora gregata*), constatada pela primeira vez no RS na safra de 1988/1989, quando se perdeu quase 100% das plantas de soja cultivadas (EMBRAPA, 2015).

Desta forma, não há dúvidas de que a ocorrência de eventos extremos ou mesmo alterações climáticas menos severas a curto, médio ou longo prazo já estão influenciando e seguirão determinando o desenvolvimento econômico do Estado do Rio Grande do Sul em função da importância que as culturas aqui produzidas representam em nível estadual e

nacional. Além disso, mudanças climáticas representam um problema exógeno e de ocorrência aleatória, de tal forma que as pesquisas na área permitirão criar esforços para minimizar os impactos que se espera que venham a ocorrer no futuro, principalmente devido à elevação na temperatura, bem como a perturbações nos regimes de precipitação.



**Figura 5.1:** Produção de soja no Rio Grande do Sul por mesorregião no período de 1973 a 2007, em toneladas (Extraído de Trennephol e Paiva, 2011)

Considerando os aspectos mencionados anteriormente, este capítulo visa estimar as demandas futuras de água para irrigação (IWR), nas mesmas sete localizações (no Noroeste do RS, ver Figura 4.1), e considerando as mesmas projeções de dados meteorológicos já apresentadas (cenário climático A1B). Uma vez que esta é uma variável relevante para avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura, foi realizada também uma análise de incertezas para investigar quão diferentes os resultados são e como estas diferenças são prováveis de contribuir para o processo de tomada de decisão no futuro.

Como não será considerada a variabilidade espacial do solo neste capítulo, a análise de incertezas se limitou a avaliar a influência das incertezas das projeções climáticas apenas, para que no capítulo seguinte, estas possam ser comparadas com as incertezas geradas pelo método estocástico abordado no Capítulo 6.

## 5.2 Metodologia

### 5.2.1 Área de Estudo

A área de estudo neste caso passa a ser composta tanto pela região Noroeste do RS em termos de projeções climáticas (Capítulo 4) quanto pela bacia do arroio Donato, onde foram realizadas as coletas de amostras de solo para caracterização dos atributos físico-hidráulicos,

tais como a condutividade hidráulica saturada e os parâmetros da curva de retenção de água no solo (Capítulo 3).

Como as simulações com o modelo SWAP necessitam de informações sobre estas propriedades do solo, o modelo só pode ser aplicado na bacia do arroio Donato. No entanto, esta área da bacia foi considerada representativa dos solos da região Noroeste e, portanto, a área de estudo continua sendo a região Noroeste como um todo (Figura 4.1), e não apenas a bacia. Considerou-se que as culturas, os tipos de solo e seus usos na bacia do arroio Donato são representativos da região Noroeste do RS.

Algumas informações adicionais com relação à área da bacia do arroio Donato são: a média das máximas temperaturas é aproximadamente 22°C e a mínima oscila entre -3 e 18°C. A precipitação média anual é de 1826 mm (estimada no período de 1990-2001), sendo outubro o mês mais úmido (216 mm) e agosto o mais seco (84 mm). A umidade relativa do ar está por volta de 74% (INMET, 2014). De 1991 a 2012, a produtividade de soja na região aumentou oito vezes e esta é a tendência para o futuro (FEE, 2014).

### 5.2.2 Aplicação do Modelo SWAP

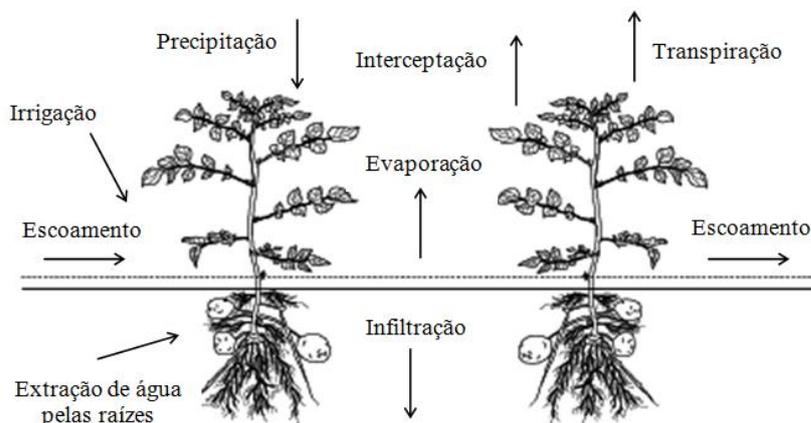
Para as simulações das demandas futuras de água para irrigação escolheu-se o modelo SWAP, por ser um modelo já consolidado e de domínio público. Este modelo unidimensional integra o balanço de água no solo com o crescimento da planta e pode simular também o transporte de solutos e de calor na escala de campo, baseado em conceitos de técnicas atuais de modelagem e simulação (Vam Dam, 2000). Para tanto, requer dados de entrada para o solo (curva de retenção de água no solo e funções hidráulicas), sobre a cultura (tais como o calendário agrícola, alguns parâmetros de crescimento da cultura e irrigação) e sobre o clima (temperaturas máxima e mínima, precipitação, radiação solar, pressão de vapor do ar e velocidade do vento na superfície) (Yano et al., 2007).

O modelo SWAP utiliza a equação de Richards (1931) na forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] - S_a(\psi) \quad (5.1)$$

onde:  $\theta$  ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) é a umidade volumétrica do solo associada a um determinado potencial matricial  $\psi$  (cm);  $K(\psi)$  é a condutividade hidráulica do solo ( $\text{cm dia}^{-1}$ ),  $t$  é o tempo (dia),  $z$  é a profundidade no perfil do solo (cm) e  $S_a(\psi)$  é o termo referente à extração de água pelas

raízes das plantas ( $\text{dia}^{-1}$ ). Ao resolver esta equação, o SWAP está realizando um balanço hídrico na zona das raízes, como mostra a Figura 5.2.



**Figura 5.2:** Balanço hídrico na zona das raízes (Adaptado: Kroes et al., 2008).

A discretização numérica da equação de Richards é feita com o emprego de um esquema implícito de diferenças finitas, de tal forma que possibilita a simulação simultânea das zonas saturada e não saturada. O modelo SWAP resolve a Equação 5.1 utilizando relações conhecidas entre  $\theta$ ,  $\psi$  e  $K$ , de acordo com a combinação dos modelos de Van Genuchten (1980) e Mualem (1976).

Os cultivos agrícolas na bacia do arroio Donato são não irrigados. Desta forma, ao se calcular as demandas futuras de água para irrigação será assumido que todo o requerimento de água da planta (soja) será suprido, e, portanto:

$$IWR = T_c - T_a \quad (5.2)$$

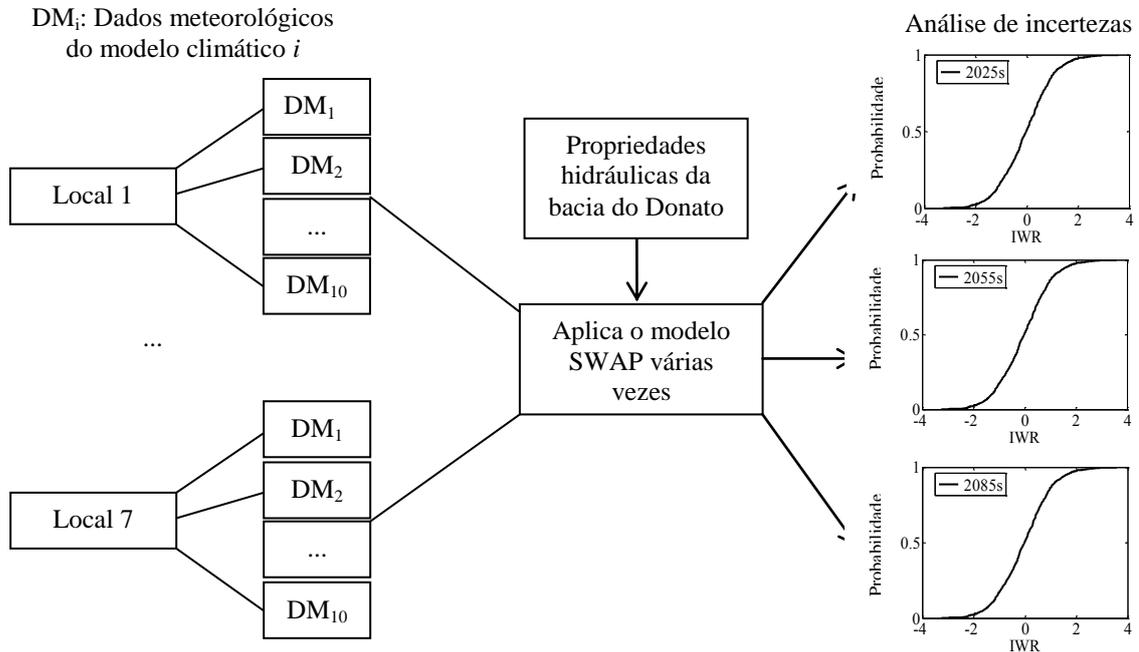
onde:  $IWR$  é a demanda de água para irrigação (cm) ou déficit hídrico da planta,  $T_c$  é a transpiração potencial (cm) quando a planta não tem limitação hídrica e  $T_a$  é a transpiração real (cm). Portanto, qualquer valor menor que  $T_c$  significa que a planta sofrerá um déficit hídrico e precisará ser irrigada. Embora haja outros cultivos na bacia do arroio Donato, esta avaliação será feita apenas para a soja, uma vez que esta é a principal cultura da região.

Como mencionado anteriormente, o milho é outra cultura importante, porém em 2012 a produção de soja na região atingiu 3.585.710 toneladas, comparadas com apenas 1.731.219 toneladas para o milho. Além disso, a área cultivada (ha) de soja é quase cinco vezes maior que a do milho na região Noroeste (FEE, 2014).

Realizou-se uma simulação diferente para cada uma das dez projeções climáticas em cada uma das sete localizações, totalizando 70 simulações (Figura 5.3). Inicialmente, o modelo SWAP calcula a evapotranspiração para uma cultura de referência hipotética baseada na equação de Penman-Monteith, assumindo a altura da planta de 0,12 m, resistência fixa da superfície de  $70 \text{ s m}^{-1}$  e albedo de 0,23, como:

$$ET_{\text{ref}} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (5.3)$$

onde  $ET_{\text{ref}}$  é a taxa de evapotranspiração de referência ( $\text{mm d}^{-1}$ ),  $\Delta$  é a inclinação da curva de pressão de vapor ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $G$  é o fluxo de calor no solo ( $\text{J m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ),  $R_n$  é o fluxo de radiação líquida na superfície da cultura ( $\text{J m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ),  $e_s$  é a pressão de vapor de saturação (kPa),  $e_a$  é pressão de vapor real (kPa),  $\gamma$  é a constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $u_2$  é a velocidade do vento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ) e  $T$  é a temperatura média diária do ar a 2 m de altura ( $^\circ\text{C}$ ).



**Figura 5.3:** Esquema metodológico da aplicação do modelo SWAP.

A partir da  $ET_{\text{ref}}$  calculada na etapa anterior, o modelo calcula a evapotranspiração para a soja ( $ET_c$ ) pelo uso do coeficiente da cultura ( $k_c$ ):

$$ET_c = k_c \cdot ET_{ref} \quad (5.4)$$

Em condições muito secas, a taxa de evaporação declina muito mais rápido do que a transpiração, e, por esta razão, o SWAP considera o cálculo destas taxas separadamente. Isto acontece porque a água presente no solo evapora com maior facilidade do que a água que é transpirada pela planta. Nesta etapa, portanto, utilizando-se o índice de área foliar (LAI), o modelo separa o cálculo da transpiração potencial ( $T_c$ ) da cultura e a evaporação potencial do solo ( $E_p$ ). A evaporação potencial é então calculada por:

$$E_p = E_{p0} (1 - W_{frac}) e^{-\kappa_{gr} LAI} \quad (5.5)$$

$$W_{frac} = \frac{P_i}{ET_{w0}} \quad (5.6)$$

onde  $W_{frac}$  (-) é a fração do dia em que a cultura está úmida,  $P_i$  ( $\text{cm d}^{-1}$ ) é a taxa de precipitação interceptada diariamente,  $ET_{w0}$  ( $\text{cm d}^{-1}$ ) é a taxa de evapotranspiração potencial para a cultura úmida,  $E_{p0}$  ( $\text{cm d}^{-1}$ ) é a taxa de evaporação de um solo úmido exposto e  $\kappa_{gr}$  (-) é o coeficiente de extinção para a radiação solar. Da equação 5.5, o SWAP calcula  $T_c$  pela diferença:

$$T_c = ET_c (1 - W_{frac}) - E_p \quad (5.7)$$

onde  $ET_c$  ( $\text{cm d}^{-1}$ ) é a taxa de evapotranspiração total em períodos com cultura seca.

A transpiração real ( $T_a$ ) é então calculada considerando-se somente o estresse hídrico devido a condições secas. Isto é porque os potenciais matriciais críticos informados no modelo SWAP forçam condições em que a cultura não sofrerá uma redução na transpiração potencial devido a condições úmidas, prevenindo que isto seja incorporado no cálculo de IWR. Quando integrada ao longo de toda a profundidade das raízes, a taxa máxima de extração de água pelas raízes da planta (portanto, potencial) é dada por (Kroes et al., 2008):

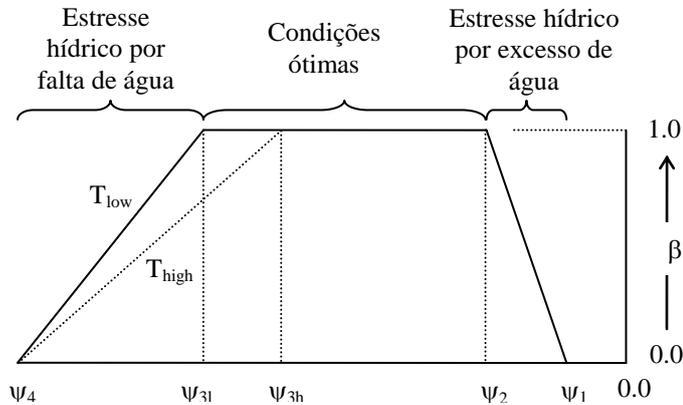
$$S_c(z) = \frac{\int_0^z \ell_{root}(z) dz}{\int_{-D_{root}}^0 \ell_{root}(z) dz} T_c \quad (5.8)$$

onde  $S_c(z)$  é a taxa potencial de extração de água pelas raízes a uma certa profundidade ( $d^{-1}$ ),  $D_{root}$  é a espessura da camada das raízes (cm),  $z$  é a profundidade das raízes (cm),  $T_c$  é a transpiração potencial (cm) e  $\ell_{root}(z)$  é a distribuição de densidade do comprimento das raízes.

Dessa forma, o estresse hídrico devido a condições secas irá reduzir o valor de  $S_c(z)$  para seu valor real  $S_a(z)$  por:

$$S_a(z) = \beta \cdot S_c(z) \quad (5.9)$$

onde  $\beta$  é o fator de estresse hídrico em condições secas (Figura 5.4).



**Figura 5.4:** Fator de estresse hídrico em função do potencial matricial do solo.

Integrando  $S_a(z)$  ao longo da zona das raízes, então a transpiração real da cultura é dada por:

$$T_a = \int_{D_{root}}^0 S_a(z) dz \quad (5.10)$$

Os parâmetros necessários para utilização destas equações estão apresentados no ANEXO 2, referentes aos dados da soja.

O modelo SWAP também requer dados de entrada de algumas propriedades físico-hidráulicas do solo, tais como a condutividade hidráulica saturada e os parâmetros da curva de retenção de água no solo. Estas propriedades foram avaliadas estocasticamente no Capítulo 3, porém aqui serão utilizados apenas valores médios. Como alguns valores ajustados de  $\alpha$  foram muito grandes comparados a outros, preferiu-se tomar a mediana de cada um dos parâmetros

da curva de retenção ao invés da média, uma vez que seriam afetados pelos valores extremos. No caso de  $K_{sat}$ , foi considerada a média dos valores obtidos em laboratório. Os parâmetros finais utilizados na simulação estão apresentados na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2:** Propriedades físico-hidráulicas utilizadas nas simulações com o modelo SWAP.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Condutividade hidráulica saturada, $K_{sat}$ (cm/d)	25,4549
Parâmetro $\alpha$ ( $cm^{-1}$ )	0,1276
Umidade residual, $\theta_{res}$ ( $cm^3 cm^{-3}$ )	0,0000
Umidade de saturação, $\theta_{sat}$ ( $cm^3 cm^{-3}$ )	0,4940
Parâmetro $n$ (-)	1,0652

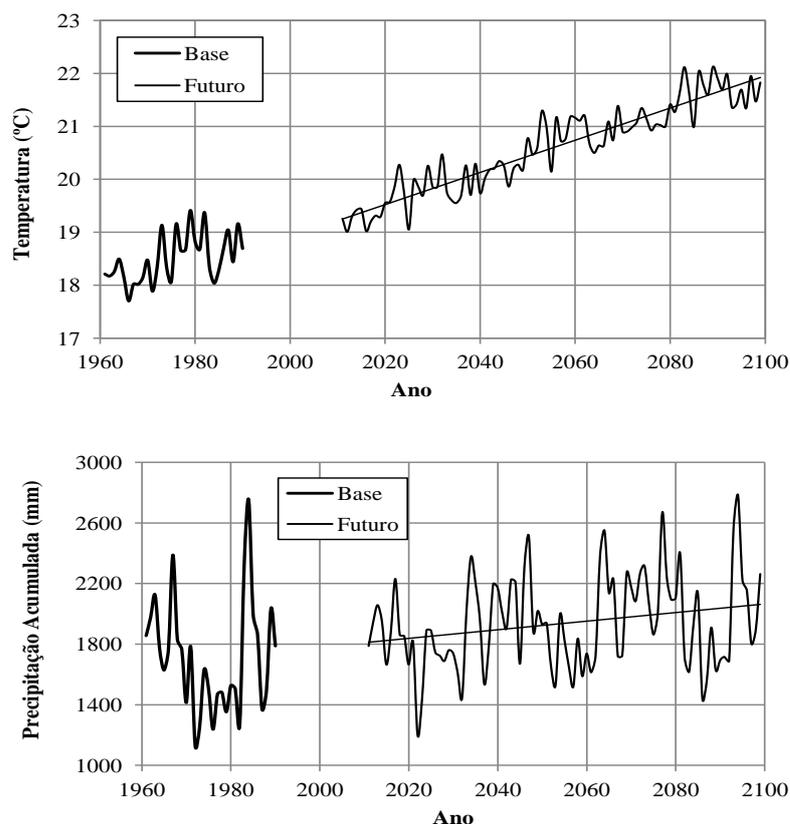
Com relação aos dados meteorológicos, o modelo SWAP necessita de dados de entrada de precipitação, pressão de vapor do ar, temperaturas máximas e mínimas, velocidade do vento e radiação solar. Estas variáveis são utilizadas para calcular a evapotranspiração de referência ( $ET_{ref}$ ). Desta forma, além dos dados de P e T analisados no capítulo anterior, também foram utilizadas as outras variáveis recém mencionadas que compõem os conjuntos de dados meteorológicos em cada uma das sete localizações.

## **5.3 Resultados e Discussões**

### *5.3.1 Dados Meteorológicos*

Um breve resumo do comportamento das projeções futuras de temperatura média anual ( $^{\circ}C$ ) e precipitação anual acumulada (mm) é apresentado nos gráficos da Figura 5.5, sendo que as curvas referem-se à média de todos os modelos climáticos e localizações e a reta representa a linha de tendência da regressão linear ajustada. Também estão representados nestes gráficos os períodos de comparação de 1961-1990. Este período revela que a temperatura já aumentou aproximadamente  $1,71^{\circ}C$ , enquanto que as projeções para 2025s indicam um clima ainda mais quente, com um aumento de  $3,12^{\circ}C$  até o final do século.

De forma resumida também são apresentados na Tabela 5.3 os valores médios de P e T das sete localizações, discriminados por modelo climático. As projeções sugerem um aumento de precipitação, porém menos pronunciado do que para a temperatura. Todos os modelos indicam um aumento gradual de temperatura, enquanto as projeções do modelo ETA 20 e ETA 40 fornecem os aumentos mais acentuados de precipitação quando comparados com o período base.



**Figura 5.5:** Temperatura média (°C) e precipitação anual acumulada (mm) no período base e nos períodos futuros. As curvas referem-se às médias aritméticas das 70 séries de dados meteorológicos.

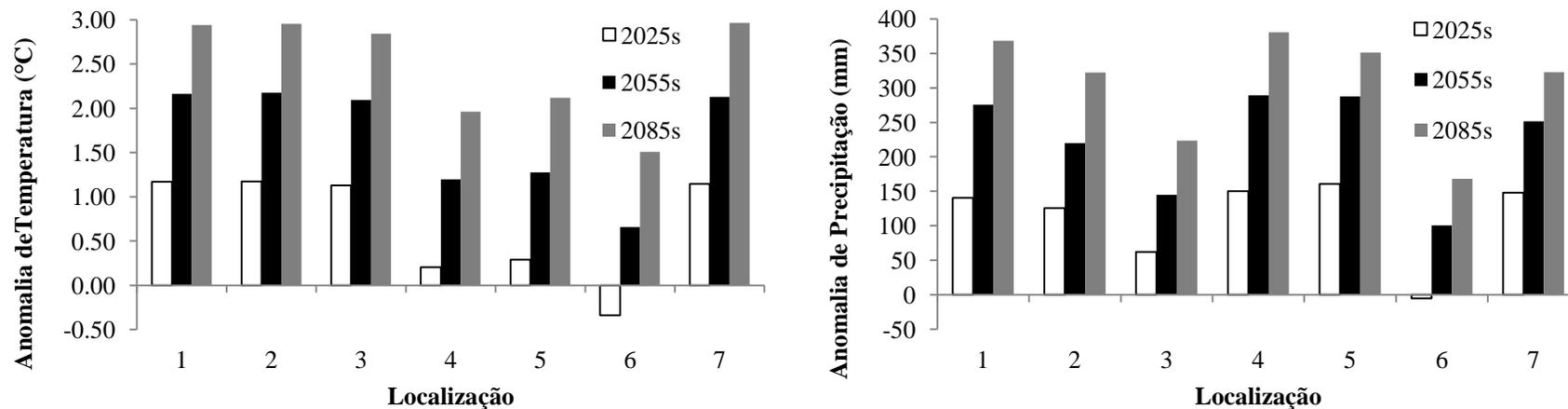
Na Figura 5.6 são apresentadas, na forma de barras, as anomalias de precipitação e de temperatura, também tomando-se as médias de todos os modelos e discriminando-se por localização. Observa-se que, embora as anomalias de temperatura em algumas localizações sejam similares, o mesmo padrão não é observado para as anomalias de precipitação, onde a variabilidade é muito maior. As maiores anomalias são previstas para o final do século, e uma redução de T e de P a curto prazo (2025s) é esperada apenas na localização 6.

### 5.3.2 Demandas Futuras de Água para Irrigação (IWR)

Na Tabela 5.4 são apresentados os valores de IWR médios acumulados no ano, para todas as simulações obtidas com o modelo SWAP, nos períodos base, 2025s, 2055s e 2085s, em cada localização e para cada modelo climático. Ou seja, os valores referem-se à soma de IWR no período inicial do cultivo de um ano qualquer e de IWR acumulado no período final do desenvolvimento da cultura do ano anterior.

**Tabela 5.3:** Temperatura média anual e precipitação acumulada projetadas por diferentes modelos climáticos.

Variável	Período	Modelo climático									
		ETA 20	ETA 40 CTRL	ETA 40 HIGH	ETA 40 LOW	ETA 40 MID	GFCM21	HADCM3	MPEH5	MRCGCM	NRCCCSM
Temperatura (°C)	Base	18.98									
	2025s	19,9	19,7	20,0	19,3	20,0	19,6	19,8	19,4	19,2	19,7
	2055s	20,9	20,6	21,1	20,2	21,0	21,1	20,8	20,3	20,0	20,5
	2085s	21,2	21,3	22,5	20,6	22,1	21,7	22,2	21,6	20,3	21,0
Precipitação Acumulada (mm)	Base	1724,9									
	2025s	1953,7	1904,8	1840,3	1923,0	1995,5	1685,8	1701,4	1720,5	1785,5	1855,8
	2055s	2083,9	2086,2	1989,5	2089,8	2187,4	1429,2	1865,4	1851,2	1987,7	1921,8
	2085s	2266,5	2206,9	2151,5	2339,5	2065,1	1426,0	1834,2	1936,7	2093,1	1982,4



**Figura 5.6:** Anomalias de precipitação e de temperatura em diferentes localizações e períodos futuros.

**Tabela 5.4 (continua):** Demandas futuras de água para irrigação (IWRs) e anomalias ( $\Delta_a$ ) de todas as simulações e períodos (cm).

Modelo	Base	IWR (2025s)	IWR (2055s)	IWR (2085s)	$\Delta_a^*$ (2025s)	$\Delta_a$ (2055s)	$\Delta_a$ (2085s)
ETA 20	4,11	4,91	3,32	1,32	0,80 (19)	-0,79 (-19)	-2,79 (-68)
ETA 40 CTRL	5,13	5,11	3,20	2,14	-0,02 (0)	-1,93 (-38)	-2,99 (-58)
ETA 40 HIGH	4,83	4,15	3,79	5,14	-0,68 (-14)	-1,04 (-22)	0,31 (6)
ETA 40 LOW	5,22	3,12	2,39	2,52	-2,10 (-40)	-2,83 (-54)	-2,70 (-52)
ETA 40 MID	5,61	8,36	8,41	10,50	2,75 (49)	2,80 (50)	4,89 (87)
GFCM21	5,13	5,64	10,34	8,91	0,51(10)	5,21 (102)	3,78 (74)
HADCM3	5,13	7,63	7,77	7,57	2,50 (49)	2,64 (51)	2,44 (48)
MPEH5	5,13	6,49	7,90	11,67	1,36 (27)	2,77 (54)	6,54 (127)
MRCGCM	5,13	5,43	5,30	6,13	0,30 (6)	0,17 (3)	1,00 (19)
NRCCCSM	5,13	4,19	4,13	5,33	-0,94 (-18)	-1,00 (-19)	0,20 (4)
Localização 2							
ETA 20	5,28	5,05	3,48	2,01	-0,23 (4)	-1,80 (-34)	-3,27 (-62)
ETA 40 CTRL	6,10	6,56	4,29	3,69	0,46 (8)	-1,81 (-30)	-2,41 (-40)
ETA 40 HIGH	5,98	5,38	4,72	6,11	-0,60 (-10)	-1,26 (-21)	0,13 (2)
ETA 40 LOW	6,22	4,20	3,57	2,86	-2,02 (-32)	-2,65 (-43)	-3,36 (-54)
ETA 40 MID	5,83	2,25	3,00	4,76	-3,58 (-61)	-2,83 (-49)	-1,07 (-18)
GFCM21	6,10	6,90	11,10	9,72	0,80 (13)	5,00 (82)	3,62 (59)
HADCM3	6,10	8,42	9,06	8,71	2,32 (38)	2,96 (49)	2,61 (43)
MPEH5	6,10	7,18	8,34	11,93	1,08 (18)	2,24 (37)	5,83 (96)
MRCGCM	6,10	6,33	5,91	6,54	0,23(4)	-0,19 (-3)	0,44 (7)
NRCCCSM	6,10	5,08	5,06	6,17	-1,02 (-17)	-1,04 (-17)	0,07 (1)
Localização 3							
ETA 20	7,41	8,47	6,51	3,91	1,06 (14)	-0,90 (-12)	-3,50 (-47)
ETA 40 CTRL	9,62	10,11	6,62	6,24	0,49 (5)	-3,00 (-31)	-3,38 (-35)
ETA 40 HIGH	9,17	8,36	8,25	8,33	-0,81 (-9)	-0,92 (-10)	-0,84 (-9)
ETA 40 LOW	8,04	6,75	5,39	3,44	-1,29 (-16)	-2,65 (-33)	-4,60 (-57)
ETA 40 MID	8,74	3,93	4,59	7,12	-4,81 (-55)	-4,15 (-47)	-1,62 (-19)
GFCM21	9,62	10,96	15,71	14,64	1,34 (14)	6,09 (63)	5,02 (52)
HADCM3	9,62	12,99	14,32	13,82	3,37 (35)	4,70 (49)	4,20 (44)
MPEH5	9,62	10,61	10,94	14,75	0,99 (10)	1,32 (14)	5,13 (53)
MRCGCM	9,62	10,13	9,42	10,54	0,51 (5)	-0,20 (-2)	0,92 (10)
NRCCCSM	9,62	7,33	7,25	9,59	-2,29 (-24)	-2,37 (-25)	-0,03 (0)
Localização 4							
ETA 20	4,21	4,18	3,00	2,94	-0,03 (-1)	-1,21 (-29)	-1,27 (-30)
ETA 40 CTRL	7,07	7,01	4,36	4,02	-0,06 (-1)	-2,71 (-38)	-3,05 (-43)
ETA 40 HIGH	6,75	5,90	6,17	6,13	-0,85 (-13)	-0,58 (-9)	-0,62 (-9)
ETA 40 LOW	5,44	4,46	3,33	2,09	-0,98 (-18)	-2,11 (-39)	-3,35 (-62)
ETA 40 MID	6,38	2,18	3,04	5,04	-4,20 (-66)	-3,34 (-52)	-1,34 (-21)
GFCM21	7,07	8,41	12,92	12,18	1,34 (19)	5,85 (83)	5,11 (72)
HADCM3	7,07	10,15	11,51	10,93	3,08 (44)	4,44 (63)	3,86 (55)
MPEH5	7,07	8,13	8,37	12,07	1,06 (15)	1,30 (18)	5,00 (71)
MRCGCM	7,07	7,64	7,06	8,10	0,57 (8)	-0,01 (0)	1,03 (15)
NRCCCSM	7,07	4,89	4,84	6,91	-2,18 (-31)	-2,23 (-32)	-0,16 (-2)
Localização 5							
ETA 20	7,63	7,27	6,27	4,35	-0,36 (-5)	-1,36 (-18)	-3,28 (-43)
ETA 40 CTRL	9,17	9,40	5,44	5,47	0,23 (3)	-3,73 (-41)	-3,70 (-40)
ETA 40 HIGH	8,66	7,40	7,06	7,21	-1,26 (-15)	-1,60 (-18)	-1,45 (-17)
ETA 40 LOW	8,09	6,43	3,88	2,96	-1,66 (-21)	-4,21 (-52)	-5,13 (-63)
ETA 40 MID	8,46	3,59	3,81	6,28	-4,87 (-58)	-4,65 (-55)	-2,18 (-26)
GFCM21	9,17	10,08	14,83	13,37	0,91 (10)	5,66 (62)	4,20 (46)
HADCM3	9,17	11,70	13,17	12,64	2,53 (28)	4,00 (44)	3,47 (38)
MPEH5	9,17	10,19	10,62	14,36	1,02 (11)	1,45 (16)	5,19 (57)
MRCGCM	9,17	9,55	8,50	10,02	0,38 (4)	-0,67 (-7)	0,85 (9)
NRCCCSM	9,17	6,78	6,70	8,74	-2,39 (-26)	-2,47 (-27)	-0,43 (-5)
Localização 6							
ETA 20	6,35	6,43	5,68	5,17	0,08 (1)	-0,67 (-11)	-1,18 (-19)
ETA 40 CTRL	7,35	13,36	9,97	10,19	6,01 (82)	2,62 (36)	2,84 (39)
ETA 40 HIGH	6,89	12,93	12,13	12,91	6,04 (88)	5,24 (76)	6,02 (87)
ETA 40 LOW	7,17	11,25	8,99	8,07	4,08 (57)	1,82 (25)	0,90 (13)
ETA 40 MID	6,87	3,16	3,15	5,88	-3,71 (-54)	-3,72 (-54)	-0,99 (-14)
GFCM21	7,35	8,23	11,93	10,07	0,88 (12)	4,58 (62)	2,72 (37)
HADCM3	7,35	9,35	10,85	9,70	2,00 (27)	3,50 (48)	2,35 (32)
MPEH5	7,35	8,35	9,52	13,11	1,00 (14)	2,17 (30)	5,76 (78)
MRCGCM	7,35	7,85	6,99	8,39	0,50 (7)	-0,36 (-5)	1,04 (14)
NRCCCSM	7,35	5,53	5,55	6,88	-1,82 (-25)	-1,80 (-24)	-0,47 (-6)

**Tabela 5.4 (continuação):** Demandas futuras de água para irrigação (IWRs) e anomalias ( $\Delta_a$ ) de todas as simulações e períodos (cm).

Modelo	Base	IWR (2025s)	IWR (2055s)	IWR (2085s)	Localização 7		
					$\Delta_a^*$ (2025s)	$\Delta_a$ (2055s)	$\Delta_a$ (2085s)
ETA 20	7,48	6,76	5,45	4,35	-0,72 (-10)	-2,03 (-27)	-3,13 (-42)
ETA 40 CTRL	7,93	8,48	4,99	4,57	0,55 (7)	-2,94 (-37)	-3,36 (-42)
ETA 40 HIGH	7,95	6,90	6,25	7,52	-1,05 (-13)	-1,7 (-21)	-0,43 (-5)
ETA 40 LOW	8,41	6,18	3,83	2,54	-2,23 (-27)	-4,58 (-54)	-5,87 (-70)
ETA 40 MID	7,75	3,25	3,33	5,89	-4,5 (-58)	-4,42 (-57)	-1,86 (-24)
GFCM21	7,93	8,82	12,95	11,11	0,89 (11)	5,02 (63)	3,18 (40)
HADCM3	7,93	10,22	11,45	10,66	2,29 (29)	3,52 (44)	2,73 (34)
MPEH5	7,93	9,14	10,74	14,86	1,21 (15)	2,81 (35)	6,93 (87)
MRCGCM	7,93	8,55	7,52	9,18	0,62 (8)	-0,41 (-5)	1,25 (16)
NRCCSM	7,93	6,08	5,99	7,46	-1,85 (-23)	-1,94 (-24)	-0,47 (-6)

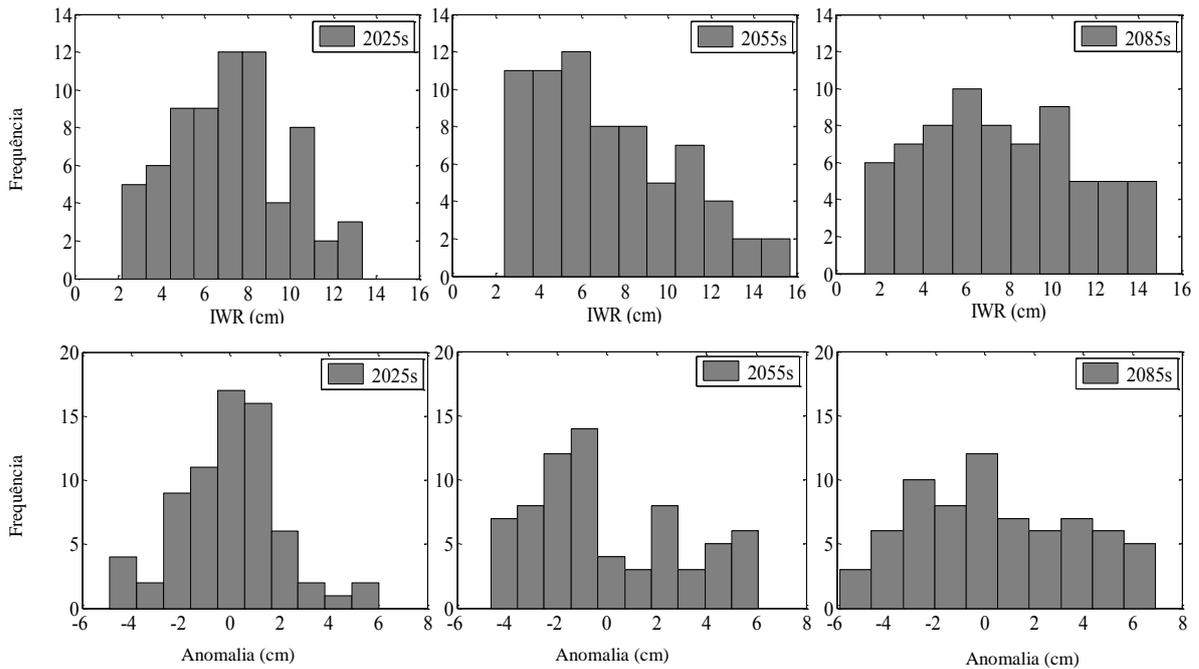
\*  $\Delta_a$ : anomalias de demandas de água para irrigação (cm); termos entre parênteses indicam o percentual de variação com relação ao período base

As anomalias de IWR também estão apresentadas Tabela 5.4, sendo os valores apresentados entre parênteses referentes às porcentagens destas anomalias com relação ao período base. Como os MCGs foram gerados a partir de dados meteorológicos diários do ETA 40 CTRL, os valores de IWR neste caso, devem ser comparados com o período base do modelo ETA 40 CTRL.

Como pode ser visto, aumentos de IWRs são esperados para o final do século (2085s), com os maiores valores sendo fornecidos pelos MCGs. Nota-se também as diferenças entre as localizações, as quais demonstram um grau de incerteza de IWR previsto para a região. Na maioria dos casos, as projeções do modelo ETA indicam uma redução de IWR, enquanto que os MCGs sugerem o oposto, exceto pelos modelos MRCGCM e NRCCSM em algumas localizações.

Pode ser inferido que os modelos não concordam entre si a curto prazo, pois alguns sugerem diminuição de IWR, enquanto outros sugerem aumentos. Em 2055s, observa-se que, na maioria das localizações, prevalecem estimativas de redução, provavelmente devido a maiores precipitações acumuladas, sendo este o período em que os modelos mais concordam. Comportamento similar pode ser observado para o final do século (2085s).

Os histogramas apresentados na Figura 5.7 correspondem aos 70 valores de IWR calculados para a área de estudo. Está claro que a influência das mudanças climáticas sobre as demandas de água para irrigação serão menos severas a curto prazo devido a menor dispersão em torno da média do período base (7,22 cm). Nos períodos subsequentes, maiores frequências de IWR simuladas acima desta média foram obtidas. No entanto, os valores mais frequentes estão abaixo de 7,22 cm, confirmando a possibilidade de que esta área seja favorecida com menores demandas de água para irrigação no futuro.



**Figura 5.7:** Histogramas de frequências de IWR e suas anomalias com relação ao período base.

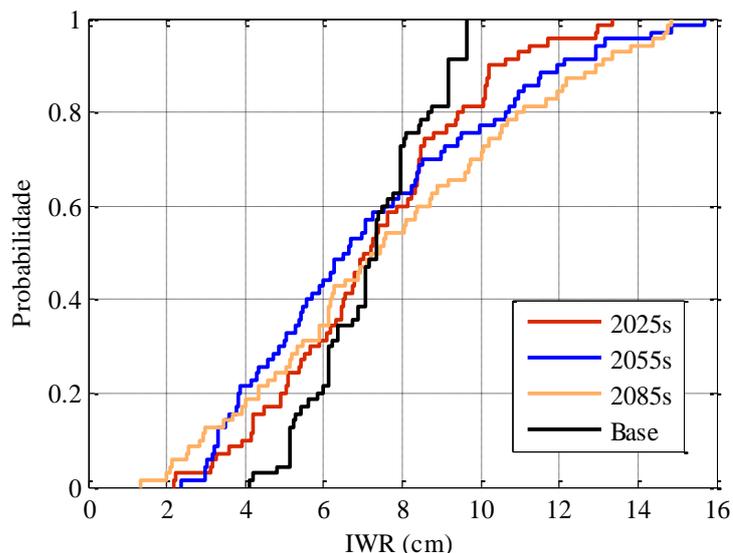
Da mesma forma, a análise dos histogramas das anomalias de IWR também confirma que, a curto prazo, a maioria das simulações cai na faixa em torno de zero, indicando pouca ou nenhuma diferença com relação ao período base. Durante o período 2055s, anomalias negativas são mais frequentes, variando de -4 a -1 cm. Além disso, menores frequências de anomalias nulas ou positivas foram obtidas.

Estes histogramas também podem ser usados para analisar as incertezas de IWR em termos de suas anomalias. Como esperado, as incertezas no período 2085s são maiores e são indicadas por um histograma mais disperso. Os resultados estão em acordo com as projeções de um pico de crescimento populacional no meio do século e a intensificação dos impactos negativos no planeta, tais como aqueles devido ao aumento de temperatura e variação nos regimes de precipitação.

Para quantificar as incertezas das simulações realizadas, foram construídas as distribuições de frequências acumuladas (cdfs) de IWR (Figura 5.8). Para auxiliar na interpretação destes histogramas, são apresentados na Tabela 5.5 os respectivos percentis para cada cdf.

Observa-se, da Tabela 5.5, o grau de incerteza das simulações. As incertezas refletem quão diferentes os valores de IWR são, como resultado do uso de diferentes dados meteorológicos no modelo SWAP. Esta avaliação foi conduzida para IWR e suas anomalias

separadamente. Se tomarmos os valores entre os percentis de 5 e de 95% de não excedência, então 90% das simulações de IWR estão na faixa de 3,16-11,70; 3,04-13,17 e 2,14-14,36 cm, resultando em incertezas de 8,14; 10,13 e 12,22 cm para 2025s, 2055s e 2085s, respectivamente. Estes valores são significativamente grandes, demonstrando o erro que pode ser cometido quando se define quais dados serão utilizados pelo modelo.



**Figura 5.8:** Distribuições de probabilidades acumuladas de IWR.

**Tabela 5.5:** Percentis das funções de frequências acumuladas das demandas de água para irrigação (IWR) e das anomalias (cm).

Percentil	IWR (2025s)	IWR (2055s)	IWR (2085s)	$\Delta_a$ (2025s)	$\Delta_a$ (2055s)	$\Delta_a$ (2085s)
5	3,16	3,04	2,14	-4,20	-4,21	-3,70
25	5,38	4,36	4,76	-1,05	-2,23	-2,41
50	7,10	6,57	7,34	0,34	-0,85	0,10
75	8,82	9,52	10,50	1,06	2,64	3,18
90	10,42	12,03	13,01	2,52	4,85	5,12
95	11,70	13,17	14,36	3,37	5,24	5,83

Portanto, é essencial que decisões sobre o manejo e o planejamento agrícola que forem baseadas em projeções climáticas considerem o maior número de modelos climáticos possível. Por exemplo, de acordo com as projeções empregadas neste estudo, pode-se afirmar que, em 90% das simulações, a média anual de IWR não será maior do que 10,42; 12,03 e 13,01 cm para os três períodos futuros, respectivamente. No entanto, muitas outras previsões não foram incluídas nesta análise, as quais poderiam agregar mais informações sobre as

incertezas dos modelos climáticos, ou ainda, o futuro não coincidirá com nenhuma destas projeções. Somente para a análise da mediana (percentil 50%) é que os períodos futuros não são diferentes do período atual.

Cabe enfatizar que as incertezas derivadas dos parâmetros dos modelos, entre muitas outras fontes, não foram consideradas nestes estudo. Adicionalmente, estes resultados representam simulações unidimensionais. Quando a área de cultivo for considerada, os volumes de água demandados poderão refletir de forma mais efetiva os impactos sobre os recursos hídricos.

Com relação à influência da temperatura e da precipitação sobre as estimativas de IWR, pode-se deduzir que a precipitação esteja mais fortemente associada com o déficit hídrico. Isto porque todos as projeções sugerem aumento de temperatura, enquanto que para a precipitação os modelos diferenciam-se mais entre si, alguns sugerindo aumento, outros diminuição. Essas diferenças mostraram-se relacionadas com as estimativas de IWR, principalmente quando se analisa os modelos globais separados das projeções do modelo ETA. Além disso, a elevação de temperatura representa maior dominância sobre o encurtamento do ciclo da cultura do que sobre o aumento no requerimento hídrico (Saadi et al., 2015).

Também é importante destacar que as plantas com metabolismo C3 e C4 reagem de formas distintas a diferentes variações de CO<sub>2</sub>, e consequente alteração de temperatura (Bocchiola et al., 2013; Liu et al., 2010). Espécies do tipo metabólico C3 (trigo, arroz, soja, etc.) reagem positivamente (com aumento de produtividade) em altas concentrações de CO<sub>2</sub>, enquanto as do tipo C4 (milho, sorgo, cana-de-açúcar, etc.) são fotossinteticamente mais eficientes, porém menos sensíveis a variações de CO<sub>2</sub> (Bocchiola et al., 2013). Liu et al. (2010) comparam os efeitos das mudanças climáticas sobre culturas do tipo C3 e C4 e verificaram que a primeira (trigo) é favorecida enquanto a segunda (milho) sofreu perdas significativas na produtividade devido a temperaturas mais elevadas.

O efeito do enriquecimento de CO<sub>2</sub> na atmosfera e seus impactos sobre a produtividade da soja não foi avaliado neste trabalho, pois as simulações de IWR foram realizados utilizando-se do módulo simplificado da cultura no modelo SWAP.

### *5.3.3 Teste de Hipóteses*

Embora os dados apresentados na Tabela 5.4 representem anomalias das demandas futuras de água para irrigação, eles não revelam se cada período futuro é estatisticamente

diferente do período base, uma vez que se referem a médias de períodos de 30 anos. Dessa forma, o teste de hipóteses de Kolmogorov-Smirnov para duas amostras foi realizado para verificar se as distribuições de probabilidades de IWR no futuro são estatisticamente diferentes do período base em cada localização. Neste caso, a hipótese nula  $H_0$  testa se as cdfs comparadas são iguais. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.6 para o nível de significância de 5%.

Pode-se observar que a grande maioria dos modelos concordam que não há significativas diferenças de IWR entre o período 2025s e o período base, exceto pelo modelo ETA 40 MID, o qual rejeita a hipótese nula ( $H=1$ ) em todas as localizações. No período 2055s, as previsões geradas pelos outros modelos também indicam que IWR neste período é diferente do período base. O mesmo é constatado para o final do século (2085s), juntamente com outras rejeições da hipótese nula.

Em geral, pode-se dizer que não há evidência estatística suficiente, na maioria dos casos, para admitir que as cdfs de IWR diferem do período atual no nível de significância considerado. Este fato também é refletido pelo grande valor-p, indicando que não é seguro rejeitar a hipótese nula sem assumir um grande erro. Maiores tendências de rejeição de  $H_0$  foram observadas para as simulações obtidas do modelo ETA.

Dos resultados apresentados na Tabela 5.6 pode-se inferir que a rejeição da hipótese nula ocorre somente quando as diferenças entre as cdfs são muito grandes. Isto é devido ao fato do teste ser muito conservativo, uma vez que anomalias de 20 a 40% (na média) não foram consideradas estatisticamente diferentes na maioria dos casos.

Por exemplo, analisando o modelo ETA 40 MID na localização 1, rejeita-se a hipótese nula, enquanto que o teste não a rejeita para o ETA 40 LOW, o qual também demonstra grandes anomalias (-40, -54 e -52% para 2025s, 2055s e 2085s, respectivamente). Deve-se salientar que os dados apresentados na Tabela 5.4 referem-se a médias anuais para períodos de 30 anos, mas não revelam nada sobre o comportamento das distribuições.

A estatística do teste (D) representa a máxima distância entre as distribuições testadas e, quando comparada entre períodos futuros, indica qual deles é mais diferente do período base. Fica evidente, a partir dos resultados da Tabela 5.6, que os maiores valores de D foram obtidos para as simulações para o final do século (2085s), exatamente quando se espera maiores incertezas sobre as projeções climáticas e quando os modelos climáticos diferem mais expressivamente.

**Tabela 5.6:** Teste de Kolmogorov-Smirnov para IWR futuras e IWR no período base.

	ETA 20	ETA 40 CTRL	ETA 40 HIGH	ETA 40 LOW	ETA 40 MID	GFCM21	HADCM3	MPEH5	MRCGCM	NRCCCSM
Localização 1										
H <sup>a</sup> (2025s)	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
p <sup>b</sup>	0,9360	0,9360	0,3420	0,1088	0,0017	0,9360	0,1088	0,5372	0,9970	0,5372
D <sup>c</sup>	0,1333	0,1333	0,2333	0,3000	0,4667	0,1333	0,3000	0,2000	0,1000	0,2000
H (2055s)	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
P	0,2003	0,2003	0,5372	0,0550	0,0006	0,0113	0,0550	0,1088	0,9970	0,3420
D	0,2667	0,2667	0,2000	0,3333	0,5000	0,4000	0,3333	0,3000	0,1000	0,2333
H (2085s)	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0
P	0,0010	0,0022	0,8383	0,0627	0,0008	0,0325	0,2468	0,0026	0,7240	0,9950
D	0,4897	0,4621	0,1552	0,3299	0,4977	0,3598	0,2563	0,4575	0,1736	0,1046
Localização 2										
H <sup>a</sup> (2025s)	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
p <sup>b</sup>	0,3420	0,9360	0,5372	0,0259	0,0046	0,7600	0,2003	0,7600	0,9970	0,9360
D <sup>c</sup>	0,2333	0,1333	0,2000	0,3667	0,4333	0,1667	0,2667	0,1667	0,1000	0,1333
H (2055s)	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0
P	0,0113	0,3420	0,2003	0,0259	0,0259	0,0113	0,1088	0,2003	0,9970	0,7600
D	0,4000	0,2333	0,2667	0,3667	0,3667	0,4000	0,3000	0,2667	0,1000	0,1667
H (2085s)	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0
P	0,0001	0,0134	0,9670	0,0293	0,2657	0,2706	0,4474	0,0076	0,9977	0,9973
D	0,5598	0,3966	0,1241	0,3644	0,2517	0,2506	0,2161	0,4184	0,0989	0,1000
Localização 3										
H <sup>a</sup> (2025s)	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
p <sup>b</sup>	0,7600	0,9360	0,5372	0,3420	0,0017	0,3420	0,0550	0,3420	0,9360	0,1088
D <sup>c</sup>	0,1667	0,1333	0,2000	0,2333	0,4667	0,2333	0,3333	0,2333	0,1333	0,3000
H (2055s)	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
P	0,3420	0,0550	0,3420	0,2003	0,0259	0,0046	0,0113	0,2003	1,0000	0,1088
D	0,2333	0,3333	0,2333	0,2667	0,3667	0,4333	0,4000	0,2667	0,0667	0,3000
H (2085s)	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0
P	0,0027	0,0142	0,8045	0,0008	0,4206	0,0189	0,0444	0,0194	0,6858	0,9999
D	0,4563	0,3943	0,1609	0,4943	0,2207	0,3828	0,3460	0,3816	0,1793	0,0828
Localização 4										
H <sup>a</sup> (2025s)	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
p <sup>b</sup>	0,2003	0,7600	0,3420	0,3420	0,0001	0,3420	0,1088	0,5372	0,7600	0,1088
D <sup>c</sup>	0,2667	0,1667	0,2333	0,2333	0,5667	0,2333	0,3000	0,2000	0,1667	0,3000
H (2055s)	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
P	0,1088	0,1088	0,5372	0,2003	0,0113	0,0046	0,0259	0,5372	1,0000	0,1088
D	0,3000	0,3000	0,2000	0,2667	0,4000	0,4333	0,3667	0,2000	0,0667	0,3000
H (2085s)	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0
P	0,1356	0,0061	0,9030	0,0142	0,5856	0,0206	0,0422	0,0200	0,3698	0,9934
D	0,2908	0,4264	0,1425	0,3943	0,1943	0,3793	0,3483	0,3805	0,2299	0,1069
Localização 5										
H <sup>a</sup> (2025s)	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
p <sup>b</sup>	0,5372	0,9360	0,2003	0,2003	0,0006	0,9360	0,5372	0,9360	0,9970	0,2003
D <sup>c</sup>	0,2000	0,1333	0,2667	0,2667	0,5000	0,1333	0,2000	0,1333	0,1000	0,2667
H (2055s)	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0
P	0,3420	0,0259	0,3420	0,0017	0,0046	0,0046	0,0259	0,7600	0,9360	0,1088
D	0,2333	0,3667	0,2333	0,4667	0,4333	0,4333	0,3667	0,1667	0,1333	0,3000
H (2085s)	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0
P	0,0009	0,0317	0,7975	0,0020	0,0813	0,0852	0,1603	0,0444	0,8869	0,9810
D	0,4920	0,3609	0,1621	0,4655	0,3172	0,3149	0,2816	0,3460	0,1460	0,1172
Localização 6										
H <sup>a</sup> (2025s)	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
p <sup>b</sup>	0,9360	0,0046	0,0006	0,0259	0,0017	0,9360	0,2003	0,7600	0,9360	0,2003
D <sup>c</sup>	0,1333	0,4333	0,5000	0,3667	0,4667	0,1333	0,2667	0,1667	0,1333	0,2667
H (2055s)	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0
P	0,3420	0,0113	0,0002	0,0550	0,0017	0,0259	0,0550	0,3420	0,9970	0,3420
D	0,2333	0,4000	0,5333	0,3333	0,4667	0,3667	0,3333	0,2333	0,1000	0,2333
H (2085s)	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0
P	0,0010	0,0007	0,0001	0,1141	0,2468	0,1704	0,3947	0,0054	0,9030	0,9977
D	0,4897	0,5000	0,5598	0,3000	0,2563	0,2782	0,2253	0,4310	0,1425	0,0989
Localização 7										
H <sup>a</sup> (2025s)	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
p <sup>b</sup>	0,7600	0,9360	0,5372	0,0550	0,0017	0,7600	0,5372	0,7600	0,9970	0,5372
D <sup>c</sup>	0,1667	0,1333	0,2000	0,3333	0,4667	0,1667	0,2000	0,1667	0,1000	0,2000
H (2055s)	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
P	0,2003	0,1088	0,5372	0,0046	0,0006	0,1088	0,2003	0,3420	0,9970	0,5372
D	0,2667	0,3000	0,2000	0,4333	0,5000	0,3000	0,2667	0,2333	0,1000	0,2000
H (2085s)	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
P	0,0174	0,0658	0,9977	0,0002	0,2514	0,4822	0,5780	0,0155	0,8574	0,9790
D	0,3862	0,3276	0,0989	0,5322	0,2552	0,2103	0,1954	0,3908	0,1517	0,1184

<sup>a</sup> H é a saída do teste (H<sub>0</sub> = as duas amostras pertencem à mesma distribuição; H=1, rejeita H<sub>0</sub>; H=0, não há evidência estatística para rejeitar H<sub>0</sub>); p é o valor-p e D é a estatística do teste.

A análise individual do teste de hipóteses serviu para revelar as diferenças geradas por cada modelo e cada localização, mas não permite inferências generalizadas para a região de estudo. Portanto, o mesmo teste foi realizado para as distribuições das 70 simulações de IWR, apresentadas na Figura 5.8. O teste revelou que não há evidência estatística suficiente para assumir que o período 2025s se difere do período base. No entanto, o teste rejeita  $H_0$  para os outros dois períodos futuros, com valores-p de 0,1065; 0,005 e 0,00073 e D de 0,2; 0,2857 e 0,3286 para 2025s, 2055s e 2085s, respectivamente.

Estes resultados podem ser devido ao fato de que, a curto prazo, tanto as anomalias de temperatura como de precipitação não são tão grandes, quando comparadas com as anomalias previstas para o meio do século em diante.

#### **5.4 Conclusões Parciais**

Neste capítulo foram determinadas as demandas futuras de água para irrigação na região agrícola mais importante do Estado do Rio Grande do Sul para a cultura da soja, visando analisar como as mudanças climáticas podem afetar a agricultura. O uso de diferentes projeções de dados meteorológicos fornecidos pelos MCGs e o modelo regional ETA permitiram identificar o grau de incerteza associado às projeções das demandas de água no futuro.

De forma geral, pode-se concluir que, se as previsões geradas pelos MCGs se confirmarem, então é mais provável que a região Noroeste seja afetada negativamente, uma vez que as simulações com o modelo SWAP utilizando estas projeções indicaram um aumento nas demandas de água para o cultivo da soja. Por outro lado, as projeções do modelo ETA são mais precisas para a escala de aplicação deste estudo e sugerem significativas reduções nas demandas de água para agricultura devido ao aumento de precipitação até o final deste século.

Deve-se observar que estas projeções não são capazes de, satisfatoriamente, reproduzir a ocorrência de eventos extremos, tais como granizo, tempestades, geadas, os quais são os maiores responsáveis por perdas de safras. No entanto, é possível que as mudanças nas condições climáticas na região tornem estes eventos mais frequentes e, portanto, estudos tais como este servem para apoiar formas de adaptação mesmo a curto prazo, uma vez que incorporam a utilização de índices estatísticos para detectar a ocorrência destes eventos, ainda que com grandes incertezas associadas.

Embora não se possa concluir com certeza se os impactos serão positivos ou negativos quando analisadas as projeções individualmente, os resultados do teste de hipótese para todas as simulações sustentam a premissa de que as demandas de água para irrigação a curto prazo (2011-2041) não serão estatisticamente diferentes do que foi no passado (1961-1990), mas o oposto é esperado para o meio do século em diante. Estes resultados podem apoiar estudos para definir tamanhos de reservatórios, por exemplo, com base em projeções climáticas.

Neste capítulo pode-se concluir que as projeções dos MCGs sugerem que maiores reservatórios serão necessários no futuro, se for economicamente viável atender 100% da demanda da soja. Por outro lado, as projeções regionais indicam que reservatórios menores seriam necessários, uma vez que projetam aumento de precipitação.

Foi demonstrado que as incertezas são grandes, embora muitas fontes não tenham sido consideradas. Convém salientar que neste estudo assumiu-se que os padrões de cultivo não serão afetados pelas mudanças climáticas, bem como não foram considerados cenários de expansão agrícola ou de irrigação. Além disto, uma análise mais detalhada das variáveis meteorológicas poderia indicar quais as variáveis climáticas influenciam mais os resultados.

Todavia, ao contrário de outros setores, a agricultura possui a característica de adaptar-se rapidamente face a eventos climáticos atípicos. Esta possibilidade não foi incluída aqui, mas sabe-se que os efeitos das mudanças climáticas simulados neste trabalho podem ser reduzidos por suposições tais como melhoramentos genéticos, uso de técnicas de gerenciamento de fertilização mais avançadas, e pela simples escolha de outras culturas mais adaptadas ao novo clima.

## **5.5 Referências Bibliográficas**

- ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO JR, J. Mudanças climáticas e seu impacto na cultura de soja no Brasil. In: Congresso Brasileiro de Soja, 2006, Londrina. IV Congresso Brasileiro de Soja ANAIS. Londrina: EMBRAPA Soja, v. 1, p. 70-74, 2006.
- ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO JR, J.; MARIN, F.R. Mudanças climáticas e agricultura: Uma abordagem agroclimatológica. *Ciência & Ambiente*, v. 34, p. 169-182, 2007.
- ASSAD, E. e PINTO, H.S. Aquecimento Global e Cenários Futuros da Agricultura Brasileira. São Paulo: Embrapa Agropecuária CEPAGRI/UNICAMP, 2008.
- AYOADE, J.O. Introdução à climatologia para os trópicos. 6ª edição. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.

- BARRY, R.G e CHORLEY, R.J. Atmosphere, Weather and Climate, ninth ed. New York: Routledge, 2009.
- BATES, B.C.; KUNDZEWICZ, Z.W.; WU, S.; PALUTIKOF, J.P. (Eds) Climate Change and Water Technical Paper of the Intergovernmental Panel on climate Change. IPCC Secretariat, Geneva, 2008.
- BLACK, T.L. The new NMC mesoscale Eta Model: Description and forecast examples. *Weather Forecasting*, v.9, p. 265-278, 1994.
- BOCCHIOLA, D.; NANA, E.; SONCINI, A. Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po valley of Italy. *Agricultural Water Management*, v. 116, p. 50-61, 2013.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Soja, Sistema de Produção, No. 1. Tecnologias de Produção de Soja – Região Central do Brasil 2004. Disponível em: < <http://www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/doenca.htm>>. Acessado em: 08 de agosto de 2015.
- FARSUL. Federação da Agricultura do Rio Grande do Sul. Relatório Econômico 2012 e perspectivas para 2013. Acessoria Econômica, 2012. 66 p.
- FEE. Fundação de Economia e Estatística – RS. Acessado em 12 de janeiro de 2014. Disponível em: <<http://dados.fee.tche.br/>>
- HAMADA, E.; GONÇALVES, R.R.V.; ORSINI, J.A.M.; GHINI, R. Future climate scenarios for Brazil. In: GHINI, R. e HAMADA, E. (Eds) Mudanças Climáticas: Impactos sobre doenças de plantas no Brasil. EMBRAPA Informação Tecnológica, Brasília-DF, 2008.
- HWAN, Y.S.; YONG, C.J.; HYUN, L.S.; GYEONG, O.Y.; KOUN, Y.D. Climate change impacts on water storage requirements of an agricultural reservoir considering changes in land use and rice growing season in Korea. *Agricultural Water Management*, v. 117, p. 43-54, 2013.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Acessado em 23 de agosto de 2014. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: Synthesis Report. Core Writing Team, PACHAURI, R. K.; REISINGER, A. (eds). Geneva: IPCC, 104 p., 2007.
- ISLAM, A.; AHUJA, L.R.; GARCIA, L.A.; MA, L.; SASEENDRAN, A.S.; TROUT, T.J. Modeling the impacts of climate change on irrigated corn production in the Central Great Plains. *Agricultural Water Management*, v. 110, p. 94-108, 2012.

- JALOTA, S.K.; KAUR, H.; KAUR, S.; VASHISHT, B.B. Impact of climate change scenarios on yield, water and nitrogen-balance and use efficiency of rice-wheat cropping system. *Agricultural Water Management*, v. 116, p. 29-38, 2013.
- KROES, J.G.; VAN DAM, J.C.; GROENENDIJK, P.; HENDRIKS, R.F.A.; JACOBS, C.M.J. SWAP 3.2. Theory description and user manual. Wageningen, Alterra, Alterra Report 1649(02) – SWAP32 Theory description and user manual.doc., 262 p., 2008.
- LIU, S.; MO, X.; LIN, Z.; XU, Y.; FI, J.; WEN, G.; RICHEY, F. Crop yield responses to climate change in the Huang-Huai-hai Plain of China. *Agricultural Water Management*, v. 97, p. 11195-1209, 2010.
- MARENGO, J.A.; SCHAEFFER, R.; PINTO, H.S.; ZEE, D.M.W. Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil. FBDS, Rio de Janeiro, 2009.
- MEHTA, V.K.; HADEN, V.R.; JOYCE, B.A.; PURKEY, D.R.; JACKSON, L.E. Irrigation demand and supply, given projections of climate and land-use change, in Yolo County, California. *Agricultural Water Management*, v. 117, p. 70-82, 2013.
- MUALEM, Y.A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour Res*, v. 12, p. 513-522, 1976.
- NOBRE, C.A.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. Cenários de Mudança Climática para a América do Sul para o Final do Século 21. In: Parcerias Estratégicas. Mudança do Clima no Brasil: Vulnerabilidade, Impactos e Adaptação. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, CGEE, n. 27, p. 19-42, 2008.
- RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, v. 1, n. 5, p. 318–333, 1931.
- SAADI, S.; TODOROVIC, M.; TANASIJEVIC, L.; PEREIRA, L.S. Climate change and Mediterranean agriculture: Impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield. *Agricultural Water Management*, v. 147, p. 103-115, 2015.
- TRENBERTH, K.E. e JONES, P.D. Observations: surface and atmospheric climate change. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M., CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B. TIGNOR, M.; MILLER, H.L. (eds) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 237 p., 2007.
- TRENNEPHOL, D. e PAIVA, C.A.N.A importância da sojicultura para o desenvolvimento da região noroeste do Rio Grande do Sul. *Ensaio FEE*, v. 31, número especial, p. 741-778, 2011.

- VAN DAM, J.C. Field scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation and case studies. PhD thesis, Wageningen University, 167 p, 2000.
- VAN GENUCHTEN, M.T.A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.44, p.892-898, 1980.
- WORLD BANK World Development Report 2010: Development and Climate Change. World Bank, Washington, DC, 2009.
- YANO, T.; AYDIN, M.; HARAGUCHI, T. Impact of Climate Change on Irrigation Demand and Crop Growth in a Mediterranean Environment of Turkey. *Sensors*, v. 7, p. 2297-2315, 2007.
- YOO, S.H.; CHOI, J.Y.; NAM, W.H.; HONG, E. Analysis of design water requirement of paddy rice using frequency analysis affected by climate change in South Korea. *Agricultural Water Management*, v. 112, p. 33-42, 2012.
- ZULLO JR, J.; ASSAD, E.D.; PINTO, H.S. Alterações devem deslocar culturas agrícolas. *Scientific American Brasil*, v. 6, p. 72-77, 2008a.
- ZULLO JR, J.; PINTO, H.S.; ASSAD, E.D.; EVANGELISTA, S.R.M. Potential Economic Impacts of Global Warming on Two Brazilian Commodities, According to IPCC Prognostics. *Terrae*, v. 3, p. 28, 2008b.

## 6. AVALIAÇÃO ESTOCÁSTICA DAS DEMANDAS FUTURAS DE ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO NA REGIÃO NOROESTE DO RS

**Resumo:** Este capítulo avaliou a influência da distribuição espacial da condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) e dos parâmetros do modelo da curva de retenção de água no solo ( $\alpha$ ,  $n$  e  $\theta_{sat}$ ) de van Genuchten (1980) sobre as demandas futuras de água para a irrigação (IWR) na região Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, segundo uma abordagem estocástica. Os valores simulados pelo método geoestatístico de simulação sequencial Gaussiana (SSG), apresentados no Capítulo 3, foram utilizados como dados de entrada no modelo SWAP para determinação de IWR no período de 2011-2100. Como dados meteorológicos para o modelo SWAP foram consideradas as projeções do modelo climático regional ETA 20 e ETA 40 CTRL, bem como as projeções dadas pelo modelo climático global HADCM3 para sete diferentes localizações na região. As estimativas obtidas pelo método estocástico foram então comparadas com as estimativas de IWR obtidas sem considerar a variabilidade espacial dos atributos físico-hidráulicos do solo (Capítulo 5). Os resultados indicaram grande variabilidade espacial dos valores de IWR. Além disso, observou-se que as menores incertezas de IWR foram obtidas a partir das projeções do modelo de melhor resolução espacial, o ETA 20, enquanto o modelo HADCM3 revelou as maiores diferenças entre os períodos futuros e o período atual (base). Os resultados também demonstraram, por meio do teste de hipóteses realizado, que as séries de IWR estimadas incorporando a variabilidade espacial do solo são estatisticamente diferentes das séries obtidas pela abordagem determinística (Capítulo 5), e que, portanto, não pode ser negligenciada para estimar IWR.

**Palavras-chave:** avaliação estocástica, demandas futuras de água para irrigação, modelo SWAP, análise de incertezas.

### 6.1 Introdução

Em recente estudo apresentado por Stern (2014), estimou-se que a atual concentração de  $CO_2$  na atmosfera é de 430 ppm, comparada com 280 ppm antes da Revolução Industrial. As mudanças climáticas resultantes destas alterações na composição da atmosfera têm grande potencial de prejudicar irreversivelmente os sistemas naturais, dos quais a agricultura depende diretamente.

Modelos climáticos de circulação geral ou regional (MCGs ou MCRs) são as ferramentas mais avançadas para simular a resposta do sistema climático global devido ao aumento das concentrações dos gases do efeito estufa na atmosfera e a diferentes cenários climáticos futuros (Lee e Huang, 2014).

Utilizando-se de resoluções espaciais horizontais da ordem de 100 a 200 km, os MCGs não são capazes de capturar características locais, tais como a topografia, bacias hidrográficas ou encostas e incorporá-las às simulações de forma eficiente. No entanto, esta limitação é resolvida pelo uso dos MCRs, os quais reduzem a escala para algumas dezenas de quilômetros sobre a área de interesse, onde o estudo dos impactos é avaliado (Chou et al, 2014). O uso de diferentes modelos como estes permite avaliar e mitigar o problema das incertezas, determinando melhores estratégias e ações que necessitem de informações sobre o clima.

O setor de uso da água que será mais influenciado pelas mudanças climáticas é a irrigação (Döll, 2002). Esta se faz necessária quando a precipitação não compensa adequadamente o aumento de evapotranspiração devido, por exemplo, ao aumento de temperatura. Como consequência, pode haver um decréscimo de produtividade ou a cultura exigir maior demanda de irrigação para manter o crescimento ótimo (Yano et al., 2007). Uma vez que o fornecimento de água para irrigação é determinante sobre o desenvolvimento econômico de uma região e também sobre a gestão dos seus recursos hídricos, torna-se indispensável avaliar como o clima futuro poderá influenciar nestas demandas e que impactos poderão surgir.

Existe diversos modelos para a determinação da demanda hídrica para irrigação, tais como: o modelo de Irrigação Global (Döll, 2002; Döll e Seibert, 2002), o modelo CROPWAT (Smith, 1992), o modelo SWAP (van Dam et al., 1997), o modelo AQUACROP (Steduto et al., 2009) e as Funções Estocásticas de Produção Planta-Água (Kloss et al., 2012). Dentre estes, pode-se citar o trabalho realizado por Yano et al. (2007), os quais avaliaram o impacto das mudanças climáticas para o final do século XXI sobre as demandas de água para irrigação e crescimento do consórcio trigo-aveia, utilizando-se do modelo SWAP e também de três MCGs e um modelo climático regional.

As demandas futuras de água para irrigação (IWR) estão sujeitas a grandes incertezas devido à antecipação do clima e a mudanças na variabilidade da precipitação (Wada et al., 2013). No entanto, não deveria ser estimada unicamente com base nas incertezas advindas do clima, quando se sabe que a variabilidade espacial dos atributos físico-hidráulicos do solo também desempenha grande influência sobre o balanço hídrico na interface solo-planta-

atmosfera (Dec e Dörner, 2014; Deb e Shukla, 2012; Hu et al., 2008; Gupta et al., 2006; Iqbal et al., 2005; Mohawesh et al., 2005; Reichardt et al., 2001), principalmente sobre o armazenamento de água no solo.

Considerar a heterogeneidade do solo permanece sendo ainda um desafio para o gerenciamento das práticas agrícolas, tais como a irrigação. Uma vez que a determinação da lâmina de água de irrigação depende da umidade do solo antes da aplicação, da retenção e da capacidade de armazenamento, da densidade do solo, dentre outros fatores, é óbvio que a variabilidade espacial destas propriedades é de relevância extrema para área a ser irrigada (Reichardt et al., 2001).

Como mencionado em capítulos anteriores, a condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) é uma das propriedades do solo mais importantes para as interações solo-planta-atmosfera, além de ser importante na estimativa de vários outros parâmetros necessários para a modelagem do fluxo na zona não saturada (Deb e Shukla, 2012). Descrição detalhada de múltiplos fatores que podem influenciar a variabilidade espacial é apresentada por estes últimos autores.

Um pouco menos explorada na literatura é a curva de retenção de água no solo (CR), que, porém, também é outra importante propriedade sobre o fluxo de água e crucial na determinação das demandas de água para irrigação. Desta forma, é imperioso que as estimativas de IWR possam incorporar, pelo menos, a variabilidade espacial dos principais atributos do solo, tais como CR e  $K_{sat}$ .

No capítulo anterior foram determinadas as demandas de água para irrigação, considerando uma abordagem determinística dos atributos do solo e diferentes projeções de MCGs e do modelo ETA. Apenas com as 70 simulações realizadas, já foi possível identificar a dimensão das incertezas devido somente ao uso de diferentes modelos climáticos nas 7 localizações consideradas da Região Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.

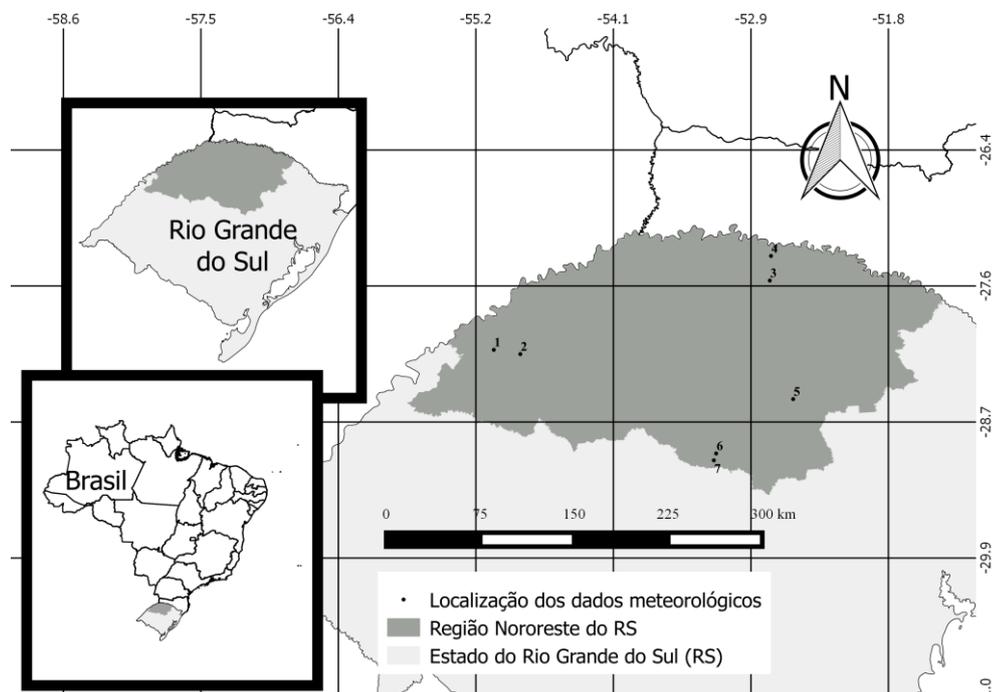
O objetivo do presente capítulo, agora, é incorporar também a variabilidade espacial de CR e  $K_{sat}$ , previamente discutida no Capítulo 3, e reavaliar as incertezas sobre as estimativas de IWR quando considerada uma abordagem estocástica. Pretende-se responder às seguintes questões: (1) a variabilidade espacial de  $K_{sat}$  e dos parâmetros da CR melhoram as estimativas de IWR, quando comparadas com a abordagem puramente determinística? (2) Se sim, em qual magnitude?

## 6.2 Metodologia

### 6.2.1 Área de Estudo

A área de estudo compreende a região Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 6.1), também denominada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) como Mesorregião Geográfica Noroeste Rio-Grandense. É composta por 216 municípios e possui área territorial de 65.052 Km<sup>2</sup>. O uso do solo é essencialmente agrícola com a prática do cultivo direto.

A maior parte do planalto basáltico concentra-se nesta região, com relevo predominantemente ondulado e solos profundos. A grande faixa central é composta por terras de campo limpo, entremeadas por capões de mata ciliar ao longo dos córregos formadores dos rios Jacuí (ao sul) e Uruguai (ao norte). Apresenta grande representatividade de pequenas unidades de produção familiar entremeadas a latifúndios (Trennepohl, 2010). Maiores detalhes da região podem ser encontrados em Melo et al. (2014, 2015), como apresentados nos capítulos anteriores.



**Figura 6.1:** Localização da área de estudo e pontos com dados meteorológicos.

### 6.2.2 Atributos Físico-Hidráulicos do Solo

Como descrito anteriormente, foram realizadas três amostragens de solo na bacia do Arroio Donato durante os meses de agosto, outubro e novembro de 2012, sendo que em cada

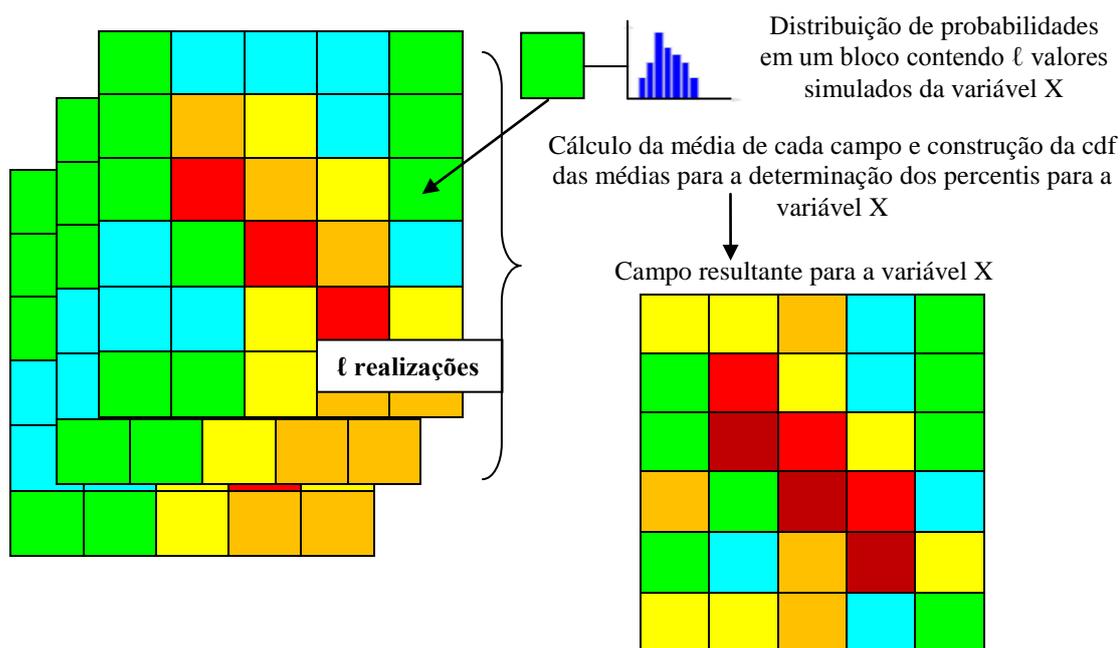
uma delas a cobertura do solo era diferente. Fato este que contribuiu para a variabilidade espacial de  $K_{sat}$  e dos parâmetros da curva de retenção de água no solo (CR), como discutido previamente.

Das duas amostras indeformadas coletadas em cada um dos 55 pontos dispersos em uma malha regular de aproximadamente 140 x 140 m, uma foi utilizada para determinar a curva de retenção de água no solo e a outra para determinar a condutividade hidráulica saturada. A partir dos pontos da curva de retenção obtidos em laboratório, foram ajustadas as curvas teóricas, segundo o modelo de van Genuchten (1980) e determinados os parâmetros  $n$  (-),  $\alpha$  ( $\text{cm}^{-1}$ ),  $\theta_{sat}$  ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e  $\theta_{res}$  ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Na determinação de  $K_{sat}$  foi utilizado um permeâmetro de carga variável.

A análise da variabilidade espacial de  $K_{sat}$  e dos parâmetros da CR foi feita pelo método geoestatístico de simulação sequencial Gaussiana (SSG). Das simulações geoestatísticas realizadas para cada variável resultaram 100 campos aleatórios (ver Tabela 3.2, Capítulo 3 para sumário estatístico) que, quando combinados com o número de projeções de dados meteorológicos, inviabilizariam o uso do modelo SWAP devido à grande demanda computacional.

Desta forma, para cada variável foram gerados os campos aleatórios resultantes (Figura 6.2), dos quais foi utilizado aqui apenas o campo associado ao percentil de 5% para as simulações com o modelo SWAP, representando o campo menos “condutivo”, ou seja, com menores valores de  $K_{sat}$  e, portanto, uma situação menos favorável para o desenvolvimento da planta. Esta escolha foi também função de limitações de tempo, quando o ideal seria realizar um comparativo entre os resultados obtidos por cada um dos campos resultantes obtidos no Capítulo 3.

Como o número e a localização de blocos simulados para cada variável foi diferente, foram mantidos no campo de 5% apenas os blocos em que havia valores simulados para todas as variáveis. Desta forma, os campos aleatórios resultantes de  $K_{sat}$  e dos parâmetros da CR possuem 1827 blocos no grid final. Todavia, a redução do número de blocos manteve os valores das estatísticas básicas próximos àquelas dos dados amostrados para todas as variáveis.



**Figura 6.2:** Esquema ilustrativo da obtenção dos campos aleatórios resultantes de cada variável.

### 6.2.3 Dados Meteorológicos

Em função da demanda computacional do número de simulações necessárias para todas as combinações de modelos climáticos e blocos a serem simulados, optou-se por reduzir o número de modelos para três. Desta forma, os dados meteorológicos utilizados nas simulações com o modelo SWAP foram apenas o ETA 20 CTRL, o ETA 40 CTRL e o HADCM3. Esta escolha contempla o modelo climático regional com duas resoluções espaciais diferentes e também um modelo climático global, o mesmo utilizado como condição de contorno para derivar as projeções do modelo ETA. Além disso, todas as três projeções são referentes ao membro controle (CTRL), inclusive para o HADCM3. Maiores descrições dos modelos e dos dados foram apresentados nos capítulos anteriores.

Da mesma forma como nas simulações do capítulo anterior, os dados meteorológicos de precipitação (mm), temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), radiação solar ( $\text{MJ}/\text{m}^2.\text{dia}$ ), pressão de vapor do ar (kPa) e velocidade do vento (m/s) estão disponíveis para o período de 1961-1990 (período atual ou de comparação) e para o período futuro de 2011-2100, divididos em curto prazo (2011-2040), médio prazo (2041-2070) e longo prazo (2071-2100) e representados pelo ano central de cada um como 2025s, 2055s e 2085s, respectivamente, em cada uma das sete localizações.

#### 6.2.4 Cálculo das Demandas de Água para Irrigação pelo Modelo SWAP

Os impactos das projeções futuras de dados meteorológicos sobre as demandas futuras de água para irrigação foram simulados pelo modelo SWAP, agora, considerando a variabilidade espacial de  $K_{sat}$  e dos parâmetros da CR.

O procedimento para cálculo das estimativas de IWR segue os mesmos passos metodológicos descritos no Capítulo 3 e, simplificada, expresso pela equação 6.1 e representado esquematicamente na Figura 6.3.

$$IWR = T_c - T_a \quad (6.1)$$

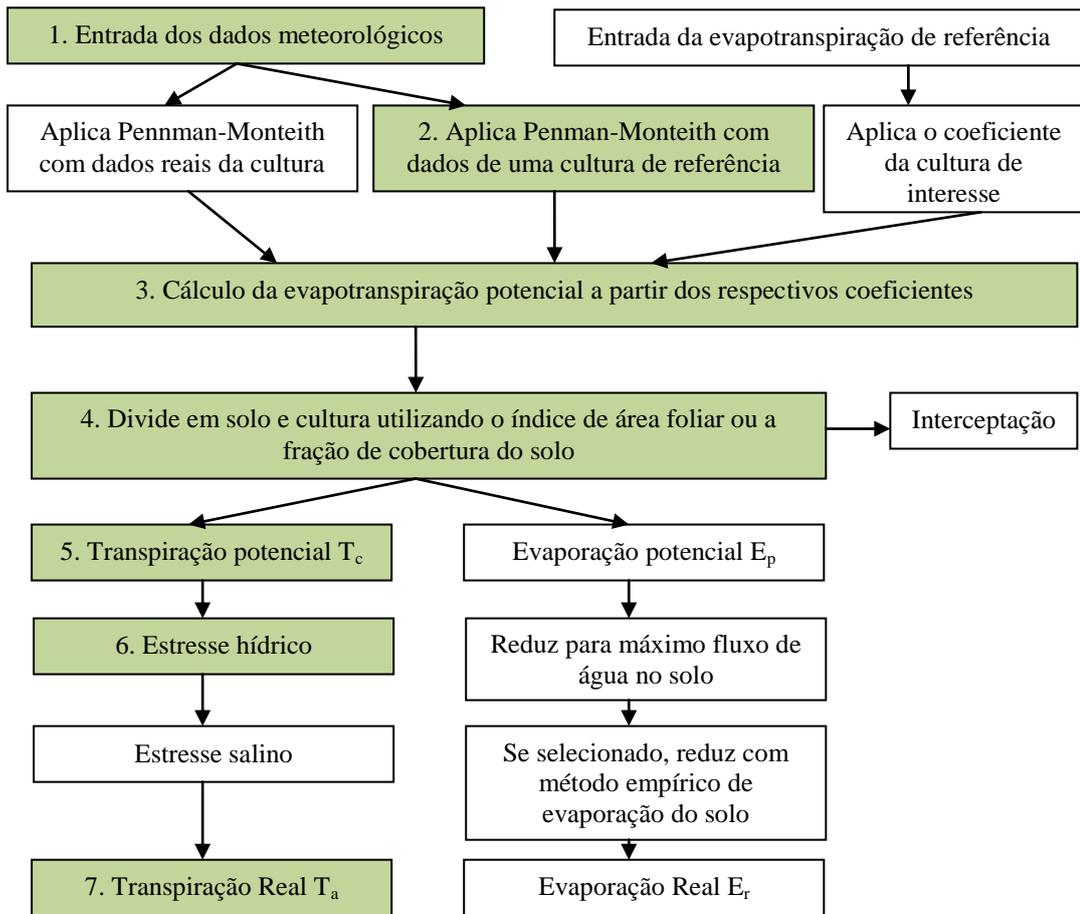
onde: IWR é a demanda para irrigação (mm),  $T_c$  é a transpiração potencial (mm) quando a planta não possui nenhuma limitação hídrica e  $T_a$  é a transpiração real (mm). Dessa forma, qualquer valor de transpiração real menor que a potencial significa que a planta sofrerá um déficit hídrico e necessitará ser irrigada.

Para considerar a variabilidade espacial do solo por meio dos campos aleatórios de  $K_{sat}$ ,  $n$ ,  $\alpha$  e  $\theta_{sat}$  com o modelo SWAP, foi realizada uma simulação para cada uma das três projeções climáticas (ETA 20 CTRL, ETA 40 CTRL e HADCM3 CTRL), em cada célula do grid para o período de 2011-2100. Ou seja, o número final de simulações com o modelo SWAP foi de:

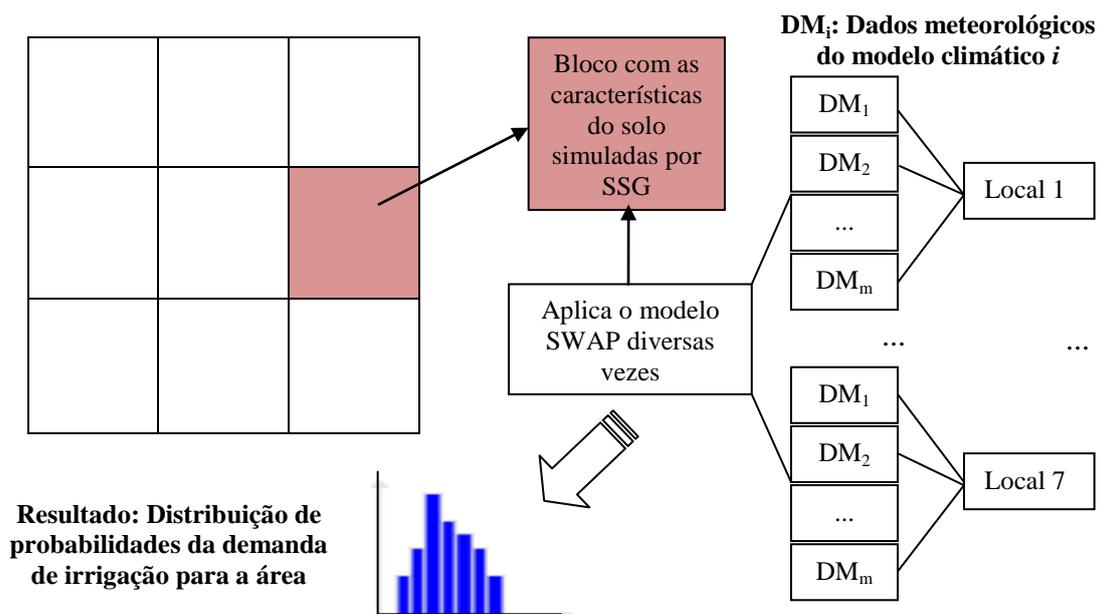
$$\begin{aligned} \text{No. de simulações} &= \text{N}^\circ \text{ de blocos na área} \times \text{N}^\circ \text{ de localizações} \times \text{N}^\circ \text{ de modelos climáticos} = \\ &= 1827 \times 7 \times 3 = 38.367 \text{ simulações de 90 anos} \end{aligned}$$

Na Figura 6.4 está apresentado um esquema ilustrativo das simulações que foram realizadas, para todas as combinações de dados disponíveis e que serviram para avaliar as incertezas de IWR. Não foram realizadas novamente as simulações para o período atual, pois já haviam sido obtidas no capítulo anterior, e como se referem ao período passado, não faria sentido avaliar as incertezas sobre dados já observados. Estas continuaram sendo as demandas do período atual que serviram de comparação com as demandas futuras obtidas na análise estocástica.

Os demais parâmetros necessários para utilização do modelo SWAP estão apresentados no ANEXO 2 e foram os mesmos utilizados no capítulo anterior.



**Figura 6.3:** Métodos utilizados no SWAP para derivar a evaporação e a transpiração reais (Adaptado: Kroes et al., 2008).



**Figura 6.4:** Esquema das simulações com o modelo SWAP.

## **6.3 Resultados e Discussões**

### *6.3.1 Estimativas de IWR na região Noroeste do RS*

Na Tabela 6.1 é apresentado um sumário estatístico de todas as simulações das demandas futuras de água para irrigação para o cultivo de soja (déficit hídrico da planta). Em geral, os valores mínimos de IWR dados pelos três modelos são zero em todos os períodos futuros e localizações, exceto em 2025s para o modelos ETA 20 e do modelo HADCM3 (todas as localizações), bem como alguns casos do modelo ETA 40 (localizações 5 e 6). No entanto, este último modelo forneceu valores diferentes de zero em 2025s em todas as localizações, ou seja, maiores necessidades hídricas a curto prazo.

Os máximos valores de IWR foram obtidos pelo modelo HADCM3, e este resultado está de acordo com as suas projeções de precipitação anual, as quais indicam menores precipitações acumuladas no futuro em comparação com o modelo ETA (Capítulo 4). Também pode-se observar diferenças significativas nas médias de IWR de cada modelo, período e localização.

Tais diferenças demonstram que as incertezas sobre IWR se devem não somente à variabilidade espacial dos atributos físico-hidráulicos do solo, mas também à variabilidade espacial das projeções climáticas na região Noroeste do RS. Observa-se que as localizações 1 e 2 (mais à oeste) apresentam valores muito semelhantes de IWR médios, enquanto as localizações 3 e 4 (mais ao norte), mesmo que próximas, forneceram valores de IWR diferentes entre si, principalmente dados pelo modelo ETA 40 CTRL. A localização 5, mais ao centro da região, gerou as menores demandas médias para todos os modelos, e diferentes das localizações 6 e 7 (mais ao sul), as quais forneceram resultados similares entre si.

Analisando-se as estimativas de IWR nos diferentes períodos futuros, constatou-se que o modelo ETA 20 CTRL indica demandas decrescentes ao longo do século, porém sem diferenças significativas entre elas. Desta forma, este modelo sugere que as demandas médias de água no futuro serão uniformes ao longo do século em todas as localizações. Comportamento distinto foi obtido pelo modelo ETA 40 CTRL, indicando que as maiores demandas de água serão necessárias no meio do século e com diferenças significativas para os períodos de 2025s e 2085s nas localizações 1, 2, 3 e 7, enquanto que nas localizações 4, 5 e 6 ocorre o oposto. Já o modelo HADCM3 revela estimativas crescentes de IWR ao longo do século em todas as localizações, além de maiores quando comparadas com aquelas fornecidas pelos outros dois modelos.

**Tabela 6.1:** Sumário estatístico das simulações de IWR em cada localização.

Estatística *	ETA 20 CTRL			ETA 40 CTRL			HADCM3		
	2025s	2055s	2085s	2025s	2055s	2085s	2025s	2055s	2085s
<b>Localização 1</b>									
Mín	4,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,95	0,00	0,00
Máx	40,95	40,84	40,72	20,24	36,51	21,51	48,56	50,72	54,42
Média	23,62	22,48	21,13	9,19	19,08	9,54	29,98	31,76	33,40
Desv. Pad.	14,35	15,31	16,43	8,79	14,42	9,63	15,57	15,96	17,87
P5	6,94	4,76	2,47	0,31	2,87	0,02	11,46	12,81	11,85
P50	15,52	13,61	11,64	2,55	10,31	2,05	21,86	23,90	24,81
P95	40,29	40,20	40,13	19,76	35,85	21,06	47,93	50,07	53,75
<b>Localização 2</b>									
Mín	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,02	0,00	0,00
Máx	36,58	37,20	37,36	19,83	25,74	21,17	43,71	45,12	47,93
Média	19,76	19,35	18,61	8,93	12,26	9,31	24,43	25,36	26,27
Desv. Pad.	13,76	14,76	15,57	8,67	10,97	9,54	14,84	15,11	16,38
P5	4,22	2,61	1,28	0,14	0,72	0,01	6,96	7,52	6,71
P50	11,42	10,36	9,26	2,50	4,80	1,88	16,68	17,89	18,36
P95	35,91	36,56	36,76	19,36	25,23	20,71	42,97	44,41	47,21
<b>Localização 3</b>									
Mín	1,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,33	0,00	0,00
Máx	35,71	36,06	36,17	18,98	24,90	20,38	42,99	43,99	46,96
Média	18,94	18,31	17,34	8,31	11,50	8,78	24,13	24,68	26,02
Desv. Pad.	13,69	14,59	15,56	8,46	10,87	9,27	15,61	16,05	17,52
P5	3,76	2,30	0,62	0,07	0,37	0,00	6,25	6,28	5,76
P50	10,12	8,87	7,54	1,61	3,65	1,16	15,02	15,48	16,13
P95	35,04	35,40	35,53	18,55	24,40	19,93	42,30	43,33	46,24
<b>Localização 4</b>									
Mín	3,13	0,00	0,00	4,33	0,00	0,00	6,77	0,00	0,00
Máx	39,39	39,32	39,84	40,87	39,43	41,67	46,22	48,42	51,80
Média	22,21	21,53	20,98	23,63	21,29	22,56	27,96	29,86	31,32
Desv. Pad.	14,14	14,71	15,75	14,23	15,09	15,99	15,17	15,52	17,24
P5	5,88	4,82	2,78	7,41	4,16	4,11	10,31	11,73	10,91
P50	14,03	12,42	11,98	15,26	12,44	13,57	19,53	21,59	22,39
P95	38,72	38,68	39,23	40,22	38,79	41,05	45,51	47,76	51,09
<b>Localização 5</b>									
Mín	2,74	0,00	0,00	9,48	0,50	0,00	5,26	0,00	0,00
Máx	37,32	37,55	36,93	43,50	38,81	44,27	42,25	44,67	47,88
Média	20,79	20,40	19,04	27,94	23,57	27,04	24,91	26,88	27,97
Desv. Pad.	13,63	14,18	14,92	12,94	12,80	14,54	14,40	14,84	16,74
P5	5,18	4,30	2,02	12,92	8,60	9,99	8,25	9,56	8,23
P50	12,98	11,84	10,42	20,64	16,53	19,23	17,28	19,35	19,69
P95	36,71	36,95	36,39	42,96	38,38	43,78	41,63	44,04	47,19
<b>Localização 6</b>									
Mín	3,11	0,00	0,00	4,71	0,00	0,00	6,06	0,00	0,00
Máx	36,14	36,53	37,31	41,45	36,49	42,36	42,08	44,27	47,64
Média	20,32	19,76	19,76	24,16	19,58	23,12	25,17	26,88	28,16
Desv. Pad.	13,01	13,83	14,62	14,27	13,99	16,14	13,97	14,43	16,28
P5	5,61	4,17	2,85	7,91	3,83	4,43	9,22	10,27	9,21
P50	12,52	11,24	11,44	16,01	11,27	14,27	17,25	18,92	19,43
P95	35,58	35,94	36,75	40,78	35,89	41,75	41,45	43,65	46,95
<b>Localização 7</b>									
Mín	1,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,37	1,06	0,00
Máx	37,78	37,73	37,56	18,41	34,28	19,79	46,21	48,34	52,02
Média	19,85	19,12	18,01	7,96	17,23	8,53	27,62	29,46	30,99
Desv. Pad.	14,81	15,43	16,24	8,26	14,08	8,99	15,60	15,92	17,93
P5	3,24	1,89	0,60	0,03	1,74	0,00	8,97	10,28	9,21
P50	11,14	9,84	7,59	1,28	8,43	1,17	20,03	22,11	22,92
P95	37,14	37,10	36,96	17,98	33,68	19,36	45,59	47,76	51,41

\* Todas as estatísticas possuem unidades em cm.

Mín: mínimo; Máx: máximo; Média: média; Desv.Pad.: desvio-padrão; P5, P50 e P95: percentis de 5%, 50% e 95%, respectivamente.

Uma análise simplista da incerteza e da dispersão das estimativas de IWR sobre um valor mais provável é dada pelo desvio-padrão dos dados. Esta estatística é muito semelhante em todos os casos, sendo um pouco menor para o modelo ETA 40 CTRL nas localizações 1, 2, 3 e 7 nos períodos 2025s e 2085s, quando foram obtidas as menores médias de IWR.

O percentil P50 representa a tendência central em que 50% dos valores estimados de IWR estão abaixo dele e 50% acima. Desta forma, é uma estatística útil para identificar a tendência central dos dados. Observa-se, com esta estatística, que as distribuições de IWR não são simétricas, uma vez que P50 é muito menor que a média, e isto pode conduzir a interpretações inadequadas sobre o valor médio das estimativas, que neste caso, é mais indicado ser avaliado por meio do P50. Portanto, tem-se que as tendências centrais de IWR não são menores do que: 7,54 cm e maiores do que 15,52 cm para o modelo ETA 20 CTRL; 1,16 cm e maiores do que 20,64 cm para o modelo ETA 40 CTRL e; 15,02 cm e maiores do que 24,81 cm para o modelo HADCM3. Logo, a maior incerteza sobre a tendência central de IWR é dada pelo modelo ETA 40 CTRL, com uma amplitude de 19,48 cm sobre o valor de P50.

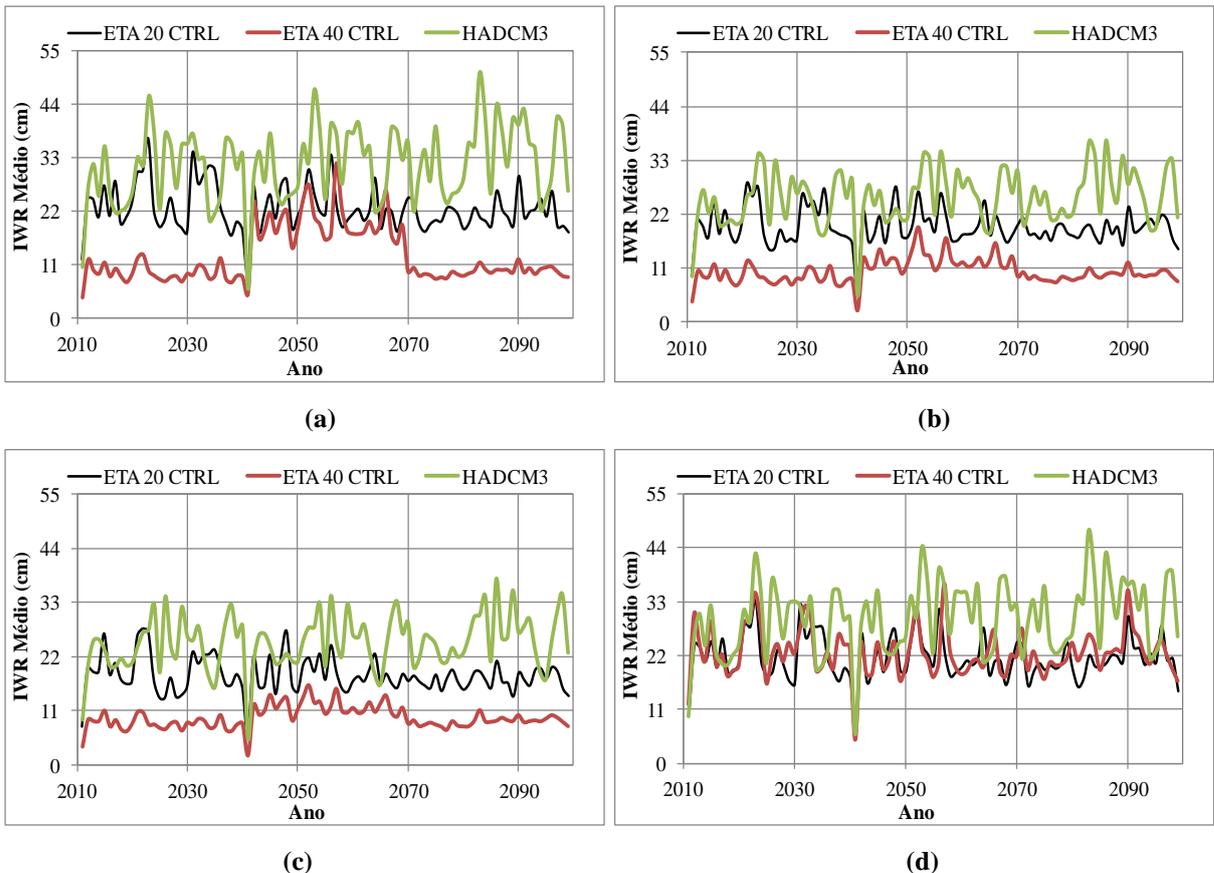
A diferença entre os percentis P5 e P95 também é uma boa representação das incertezas sobre IWR, provenientes da variabilidade espacial do solo e também dos dados climáticos. Quanto maior esta diferença (90% das simulações estarão contidas neste intervalo), maior a dificuldade em determinar o valor real da variável, indicando que os fatores que contribuem para a sua heterogeneidade estão propagando estas incertezas pelo modelo SWAP.

Em geral, todas as localizações forneceram amplitudes maiores que 30 cm (cálculo não apresentado na Tabela 6.1), sendo as menores fornecidas pelo modelo ETA 40 CTRL. Desta forma, dada a grande incerteza sobre o valor de IWR, estes resultados sugerem que não seria adequado considerar uma avaliação determinística desta variável para a região, uma vez que as demandas diferem em até 30 cm entre si. Isto pode implicar em demandas hídricas significativas para irrigação, quando multiplicada pela área cultivada; e que escolher entre uma demanda da ordem de, por exemplo, 6,54 cm ou outra de 40,29 cm (ETA 20 CTRL, 2025s) resultaria em montantes de água para irrigação muito diferentes e com possíveis desperdícios de recursos naturais e/ou econômicos.

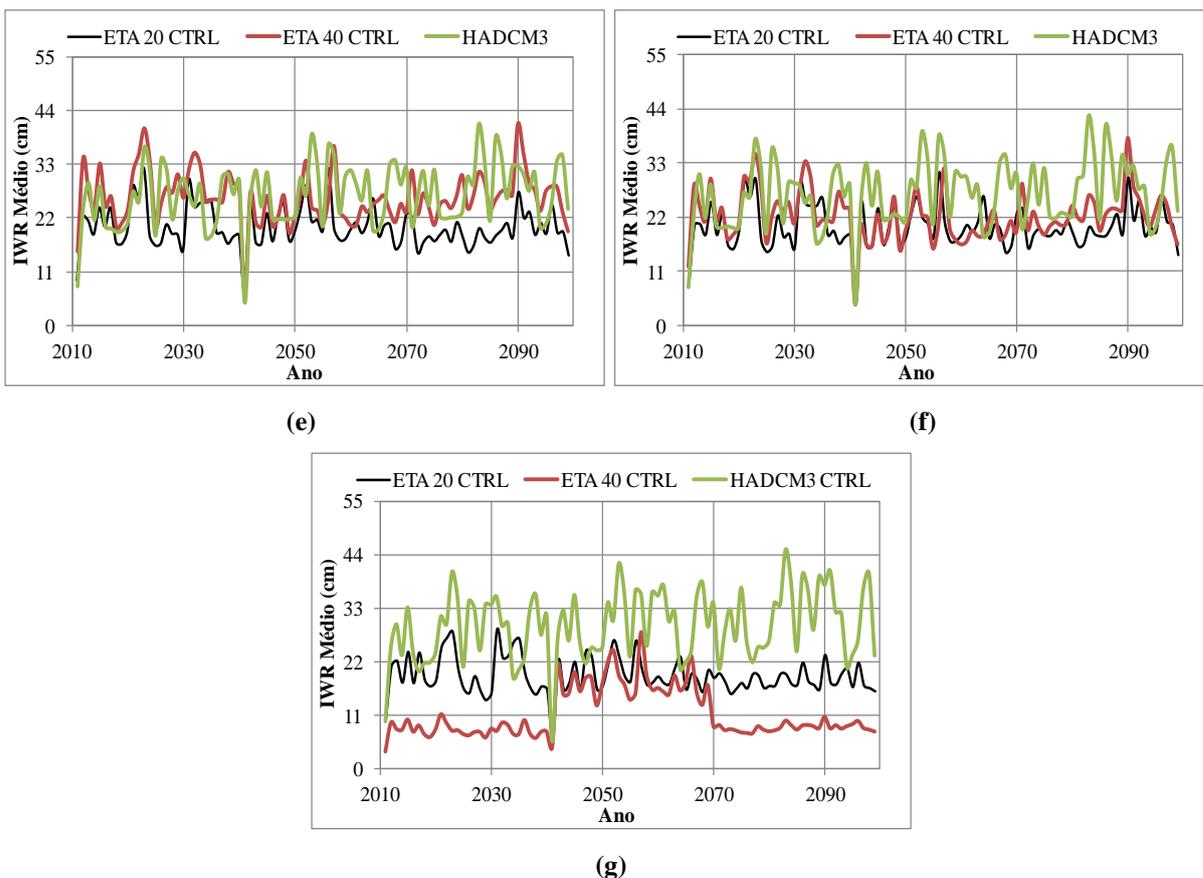
Se este parâmetro fosse utilizado no processo de tomada de decisões, diria-se que: segundo a avaliação estocástica que considerou as projeções destes três modelos e a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo para a área de estudo, as demandas futuras

de água para irrigação da soja não serão menores do que 5,30 cm ou maiores do que 38 cm em 90% dos casos analisados (considerando a média de P5 e P95 em todas as localizações e períodos futuros). Estes valores representam as situações mais extremas e cabe lembrar que foi considerado o cenário (campo aleatório) mais desfavorável para a distribuição espacial da condutividade hidráulica ( $K_{sat}$ ). Este cenário, aliado a algumas projeções de aumento de precipitação, indica que grande parte do total precipitado poderá ser perdido por escoamento superficial devido aos baixos valores de  $K_{sat}$ .

Na Figura 6.5 estão representadas as estimativas médias de IWR obtidas pelo modelo SWAP ao longo do século para cada localização e diferentes modelos climáticos. Os valores nas curvas indicam a demanda hídrica média da soja acumulada em cada ano. Nota-se claramente a diferenças das estimativas fornecidas pelo modelo ETA 40 CTRL nas localizações 1, 2, 3 e 7, como discutido anteriormente, enquanto que, nas demais localizações, os modelos fornecem estimativas mais similares entre si. No entanto, fica evidente pelos gráficos, que o modelo HADCM3 gera as maiores estimativas em todas as localizações.



**Figura 6.5 (continua):** Demandas futuras de água para irrigação ao longo do século nas localizações 1 a 7, de (a) a (g).

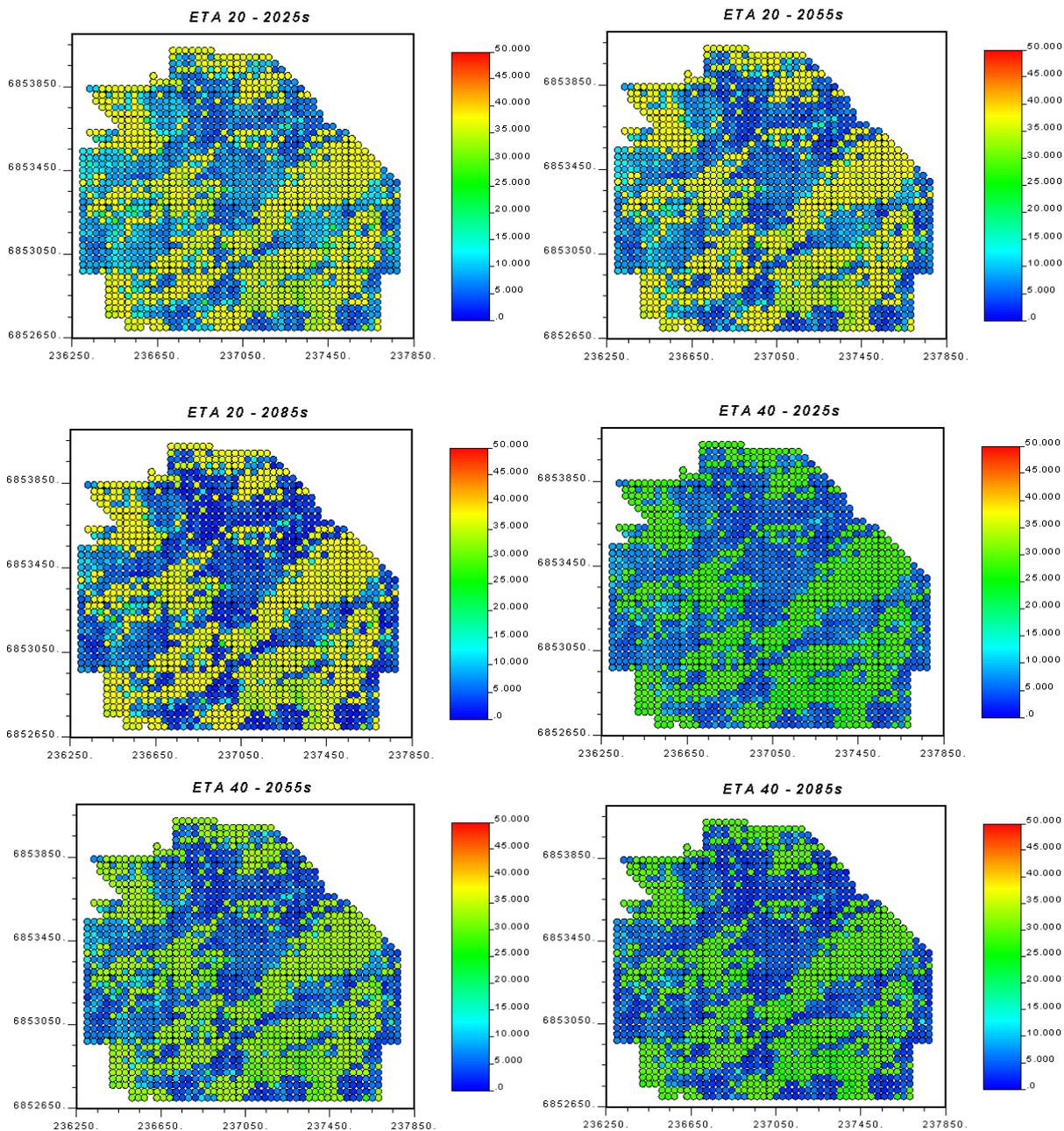


**Figura 6.5 (continuação):** Demandas futuras de água para irrigação ao longo do século nas localizações 1 a 7, de (a) a (g).

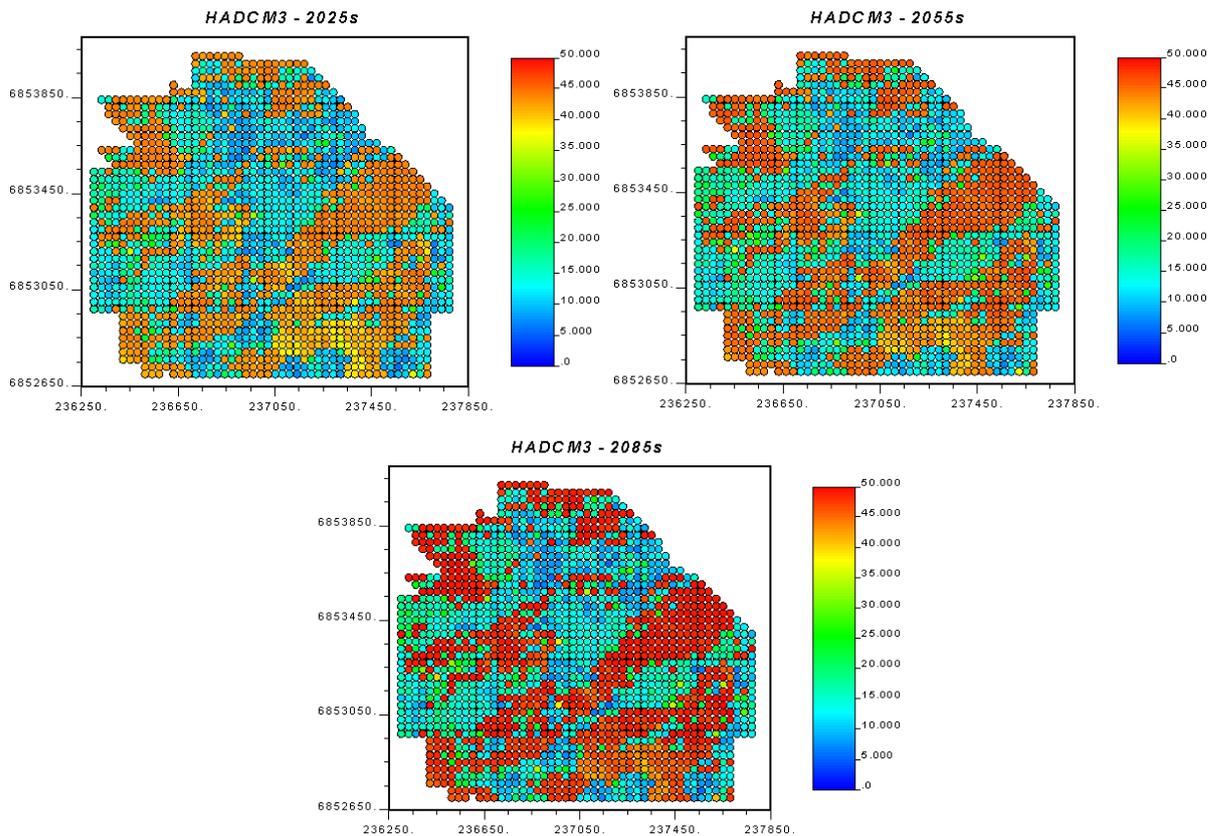
### 6.3.2 Distribuição Espacial de IWR

A distribuição espacial das demandas de água para irrigação da soja no futuro está apresentada nos mapas da Figura 6.6. Optou-se por definir a mesma escala na legenda dos mapas para facilitar a comparação entre os valores dados por cada modelo. Cada mapa apresenta a distribuição espacial da média de IWR de todas as localizações, porém separados por modelo climático e período futuro.

As áreas mais claras nos mapas são referentes aos locais onde a condutividade hidráulica saturada era menor, próximo a zero, e também coincidem com algumas das zonas onde o solo estava mais compactado durante as coletas das amostras de solo. Portanto, os baixos valores de  $K_{sat}$  nestas áreas definiram as zonas onde as estimativas de IWR são maiores, devido à dificuldade de extrair água do solo pelas raízes das plantas. Estes valores aumentam na ordem  $ETA\ 20\ CTRL < ETA\ 40\ CTRL < HADCM3$ .



**Figura 6.6 (continua):** Mapas de distribuição espacial das demandas futuras de água para irrigação nos diferentes períodos futuros e segundo diferentes projeções climáticas. Cada mapa representa as médias de IWR para todas as localizações.



**Figura 6.6 (continuação):** Mapas de distribuição espacial das demandas futuras de água para irrigação nos diferentes períodos futuros e segundo diferentes projeções climáticas. Cada mapa representa as médias de IWR para todas as localizações.

Estes mapas permitem uma visualização mais detalhada sobre os resultados apresentados na Tabela 6.1. Por exemplo, para o modelo ETA 20 CTRL, nota-se que as estimativas em 2025s são maiores nas zonas escuras do que nos outros períodos. Já para o modelo ETA 40 CTRL há uma maior distribuição de valores mais elevados de IWR no meio do século (2055s), e para o modelo HADCM3 isto ocorre no final do século (2085s).

Estes mapas demonstram como a necessidade hídrica da soja varia ao longo do espaço, e que esta distribuição é muito heterogênea, criando áreas onde o déficit hídrico é quase nulo e outras onde a demanda será muito grande. Estas altas demandas foram estimadas inclusive nas regiões próximas às nascentes do Arroio Donato.

Embora esta seja uma bacia de pequena extensão, estes resultados servem para demonstrar que a análise da variabilidade espacial dos atributos do solo pode conduzir a planos de manejo e uso dos recursos hídricos de forma mais eficiente em grandes bacias, por

meio da definição das áreas mais críticas ao cultivo de uma determinada cultura, principalmente às mais sensíveis ao déficit ou ao excesso de água no solo.

No caso desta bacia, é possível identificar uma grande área que se estende do centro para o norte e também uma área menor a oeste em que o déficit hídrico será muito pequeno quando comparado com as demais áreas. Cabe lembrar que o uso da bacia do arroio Donato serve para fazer inferências para toda a região Noroeste, a qual continua sendo a área de estudo deste trabalho. Portanto, embora os resultados sejam apresentados para esta bacia, na verdade, ela representa um cenário para o cultivo de soja em toda a região.

Como discutido no Capítulo 3, a distribuição espacial apresentada na Figura 6.6 é resultado do cronograma de amostragens realizadas na área da bacia, sendo que se toda a bacia tivesse sido amostrada em um único período de tempo, possivelmente esta heterogeneidade espacial teria uma configuração diferente e outro padrão de necessidades hídricas se estabeleceria.

Além disso, as zonas de IWR mais elevadas nos mapas correspondem a alguns dos locais onde se assumiu que  $K_{sat}$  teria um valor muito pequeno, adotado como 0,002 cm/d, pois não ocorreu percolação na coluna de solo durante o período de obtenção desta propriedade em laboratório pelo método do permeâmetro de carga variável. Como a simulação geoestatística foi realizada para dados do logaritmo de  $K_{sat}$ , nestes pontos os valores não poderiam ser zero e esta suposição foi realizada sobre o seu valor. Esta é a razão dos valores de IWR nestas regiões serem praticamente iguais, sendo que as pequenas variações são resultado exclusivamente da variabilidade dos parâmetros da curva de retenção de água no solo. Dentre estes parâmetros, é possível que a umidade de saturação ( $\theta_{sat}$ ) tenha uma influência maior sobre as estimativas de IWR, uma vez que a distribuição espacial desta se assemelha mais aos mapas simulados, como o que foi apresentado na Figura 3.6 do Capítulo 3.

Para evitar esta perda de informação espacial, uma possibilidade teria sido gerar aleatoriamente valores muito pequenos de  $K_{sat}$  segundo uma distribuição lognormal, ao invés de assumi-los todos iguais. Ou então reamostrar nestes pontos. Esta suposição de  $K_{sat}=0,002$  cm/d fez surgir duas populações de dados com alta frequência de ocorrência, como abordado nas discussões do item a seguir.

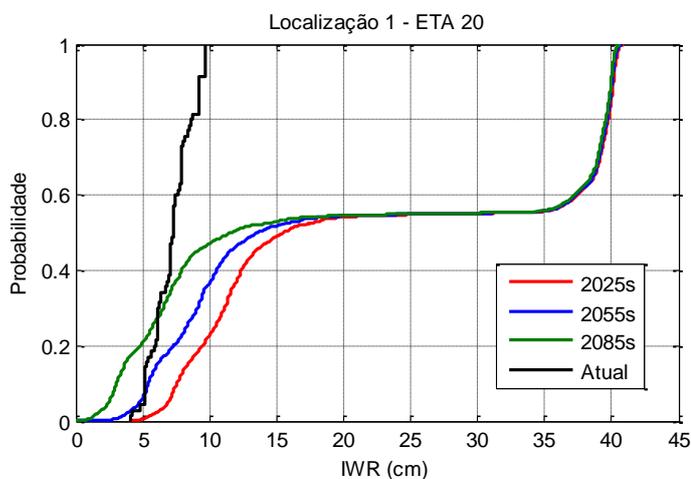
### *6.3.3 Incertezas das estimativas de IWR*

A análise das incertezas realizada no capítulo anterior incorporou unicamente a variabilidade entre modelos climáticos e também, em parte, a distribuição espacial das

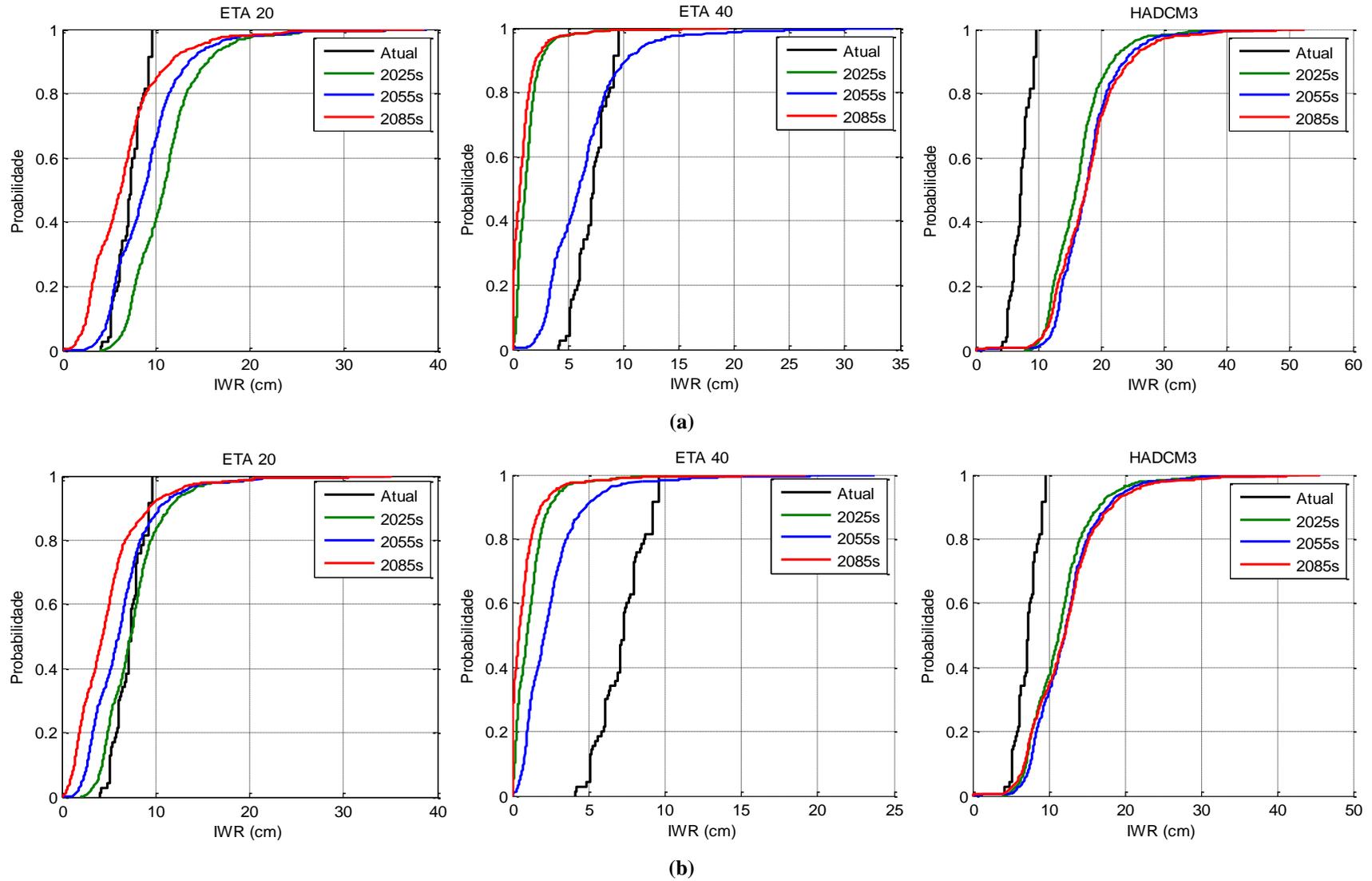
projeções dadas por eles na região Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Neste capítulo, foram agregadas as incertezas relacionadas à variabilidade espacial de alguns atributos físico-hidráulicos do solo, com o intuito de comparar as estimativas de IWR obtidas agora com as obtidas anteriormente e verificar se a heterogeneidade do solo representa níveis de incertezas significativos sobre o déficit hídrico das plantas.

Mantiveram-se as mesmas estimativas de IWR para o período atual (1961-1990) utilizadas no Capítulo 5 para comparar com as demandas fornecidas para os períodos futuros, apresentadas neste capítulo.

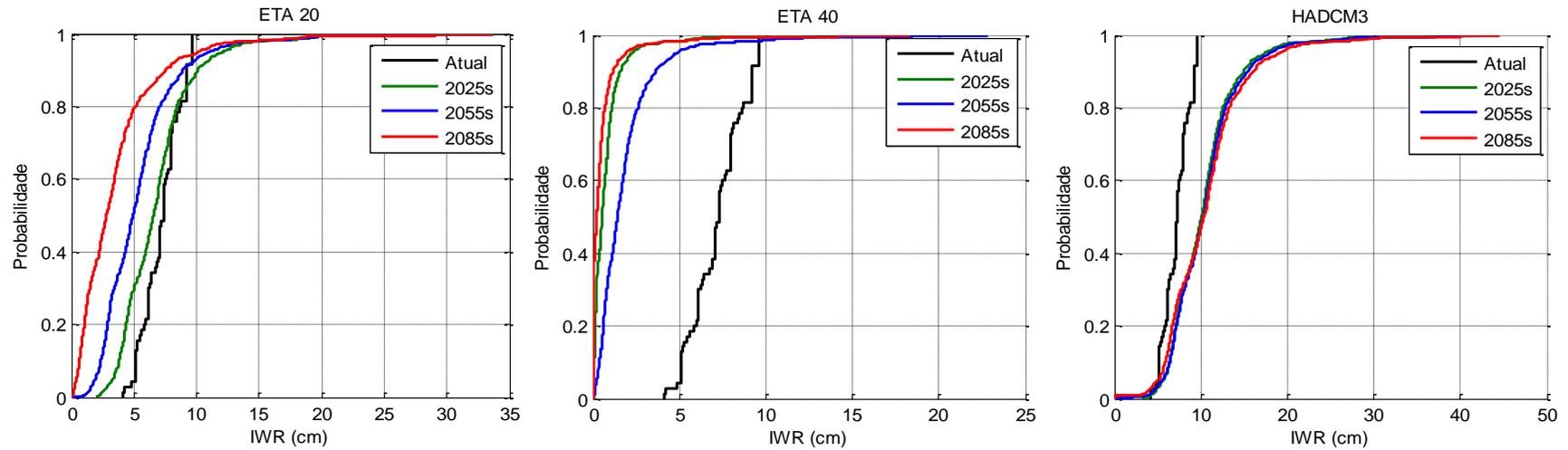
Como mencionado anteriormente, a suposição sobre o valor de  $K_{sat}$  como sendo 0,002 cm/d foi necessária, também porque o modelo SWAP não admite valores nulos para esta variável, obtidos da simulação geostatística. Isto resultou em uma frequência muito alta de dados de mesmo valor para IWR, gerando duas populações de dados distintos com altas frequências, como pode ser verificado nas distribuições de frequências acumuladas (cdfs) da Figura 6.7. Como exemplo, tomou-se as estimativas de IWR dadas pelo uso dos dados meteorológicos do modelo ETA 20 na localização 1. Nota-se a alta frequência de valores próximos de 40 cm, resultante desta aproximação sobre o valor de  $K_{sat}$ . Para evitar este inconveniente na comparação das estimativas futuras de IWR com o período atual, foram removidas as estimativas referentes a esta outra população de dados ( $K_{sat}=0,002$  cm/d), resultando nos gráficos apresentados na Figura 6.8. De qualquer forma, os valores estimados quando  $K_{sat}$  é 0,002 cm/d estão dentro da faixa de valores estimados pelo restante dos valores de  $K_{sat}$ .



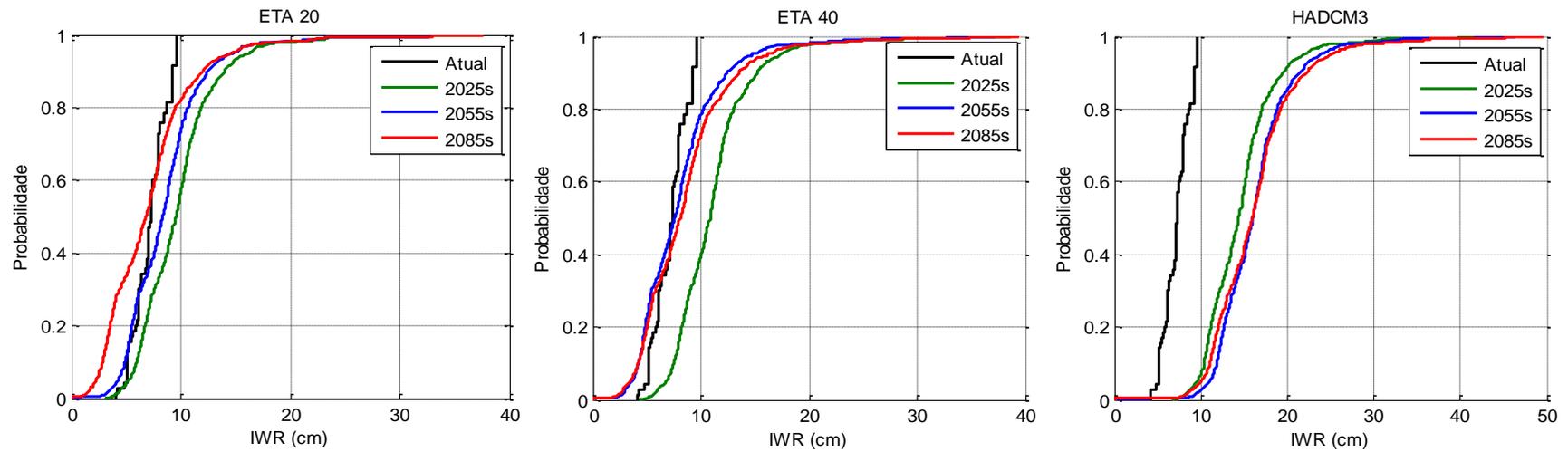
**Figura 6.7:** Exemplo de distribuição de probabilidades acumuladas de IWR das 1827 simulações para o modelo ETA 20, localização 1.



**Figura 6.8 (continua):** Distribuição de probabilidades acumuladas de IWR nos períodos futuros e atual nas localizações 1 a 7, de (a) a (g), respectivamente.

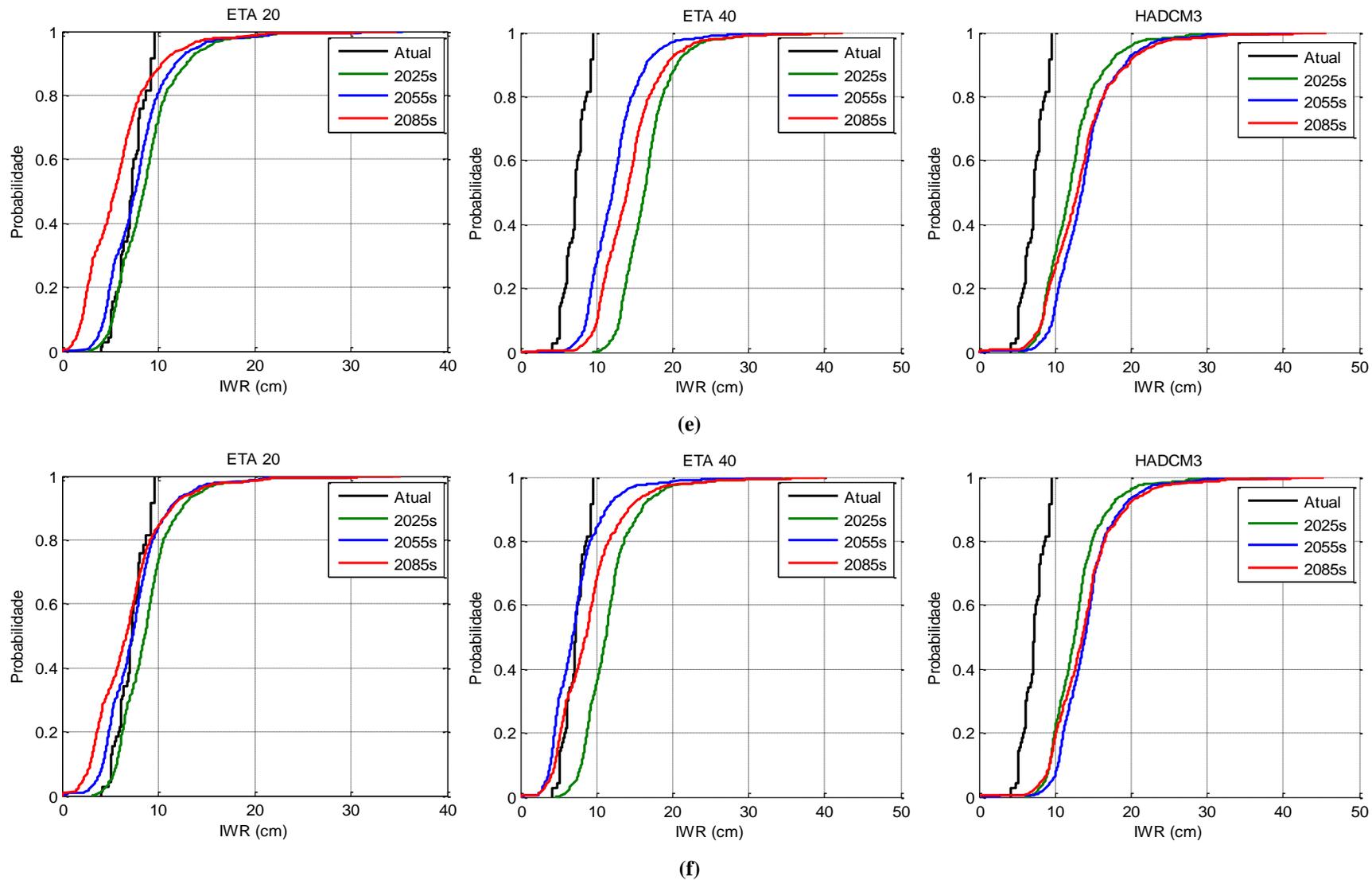


(c)

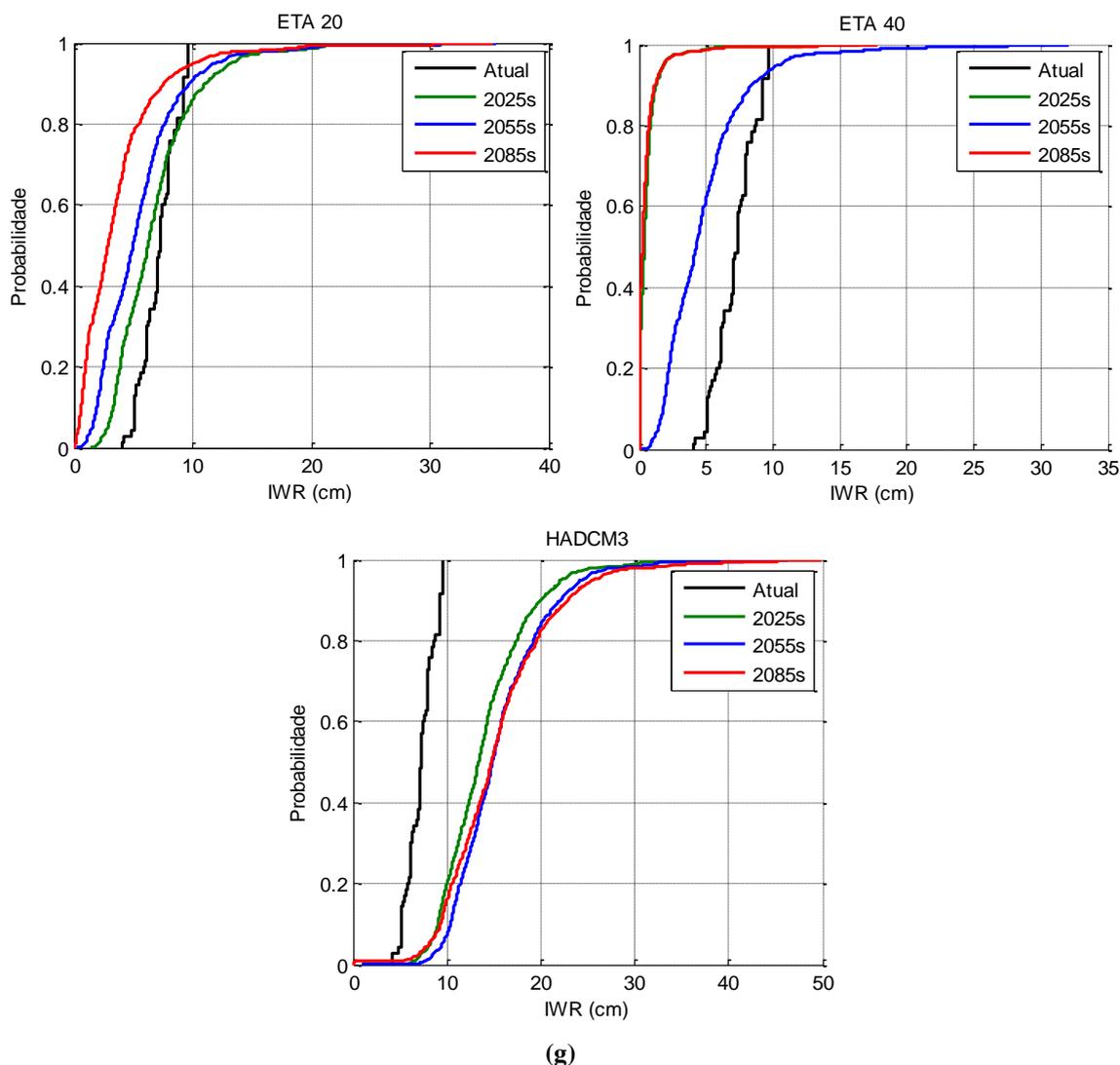


(d)

**Figura 6.8 (continua):** Distribuição de probabilidades acumuladas de IWR nos períodos futuros e atual nas localizações 1 a 7, de (a) a (g), respectivamente.



**Figura 6.8 (continua):** Distribuição de probabilidades acumuladas de IWR nos períodos futuros e atual nas localizações 1 a 7, de (a) a (g), respectivamente.



**Figura 6.8 (continuação):** Distribuição de probabilidades acumuladas de IWR nos períodos futuros e atual nas localizações 1 a 7, de (a) a (g), respectivamente.

A primeira observação sobre os gráficos na Figura 6.8 é que está evidente que o modelo ETA 20 indica que as demandas de água para irrigação no futuro não serão muito diferentes daquelas necessitadas no passado. São, portanto, estimativas mais conservadoras sobre o futuro. Ou seja, menores incertezas são esperadas para os modelos cuja resolução espacial é mais precisa, pois são capazes de incorporar informações locais do clima com maior detalhe.

Porém, é possível identificar diferenças entre os períodos futuros mais marcantes nas localizações 1 e 3 para este modelo. As cdfs para o ETA 20 também demonstram que nas localizações 2, 3 e 7 se estimam valores de IWR menores que o período atual, enquanto nas demais localizações IWR é muito semelhante ou superior. Observa-se as diferenças entre

estes gráficos e o gráfico da Figura 5.8 do Capítulo 5. Naquele, os padrões de excedência das distribuições de probabilidades se diferenciavam apenas nos seus extremos, enquanto que, na média, os períodos futuros eram semelhantes ao atual. Nestes, as cdfs são diferentes do período atual para quase que qualquer frequência, principalmente as cdfs do período 2085s.

Aumentando o tamanho da resolução espacial horizontal do modelo ETA de 20 Km para 40 Km, obtém-se cdfs nos períodos futuros muito diferentes do período atual, com reduções nos valores de IWR nas localizações 1, 2, 3 e 7 e aumentos nas demais. Já o modelo HADCM3 indica que as estimativas de IWR serão muito maiores que no período atual, porém pouco diferentes entre os períodos futuros.

Para auxiliar na interpretação das incertezas destas simulações comparadas aos resultados obtidos no capítulo anterior, na Tabela 6.2 estão apresentados os percentis comparativos das estimativas de IWR com e sem a incorporação da variabilidade espacial de  $K_{sat}$  e dos parâmetros da curva de retenção de água no solo. Estes percentis foram obtidos para as médias das 21 (3 modelos e 7 localizações) séries de IWR para cada período futuro.

**Tabela 6.2:** Percentis das estimativas de IWR para os períodos futuros com e sem a consideração da variabilidade espacial dos atributos físico-hidráulicos do solo.

Percentil (%)	Sem			Com*		
	IWR (2025s)	IWR (2055s)	IWR (2085s)	IWR (2025s)	IWR (2055s)	IWR (2085s)
5	3,16	3,04	2,14	5,61	5,01	4,03
25	5,38	4,36	4,76	7,01	6,67	5,57
50	7,10	6,57	7,34	9,03	8,93	7,87
75	8,82	9,52	10,50	10,62	10,73	9,72
90	10,42	12,03	13,01	13,02	13,45	12,59
95	11,70	13,17	14,36	14,80	15,52	14,85

\* Considerando todas as simulações de todos os modelos e localizações.

Comparando-se a amplitude entre os percentis 5% e 95% observa-se que não há diferenças significativas entre a dispersão das estimativas de IWR com e sem a incorporação da variabilidade espacial do solo. Estas amplitudes foram 8,54 cm e 9,19 cm (2025s), 10,13 cm e 10,51 cm (2055s) e 12,22 cm e 10,82 cm (2085s) para os casos sem e com a simulação geoestatística, respectivamente. Ou seja, a variabilidade espacial do solo aumentou a incerteza de IWR apenas a curto prazo (2025s), enquanto que no meio do século ela se manteve praticamente igual e no final do século diminuiu. Uma causa para este resultado é que as incertezas devido aos modelos climáticos são maiores quanto mais as projeções se afastam do período atual, e que nestes casos as incertezas dos modelos climáticos são maiores que as

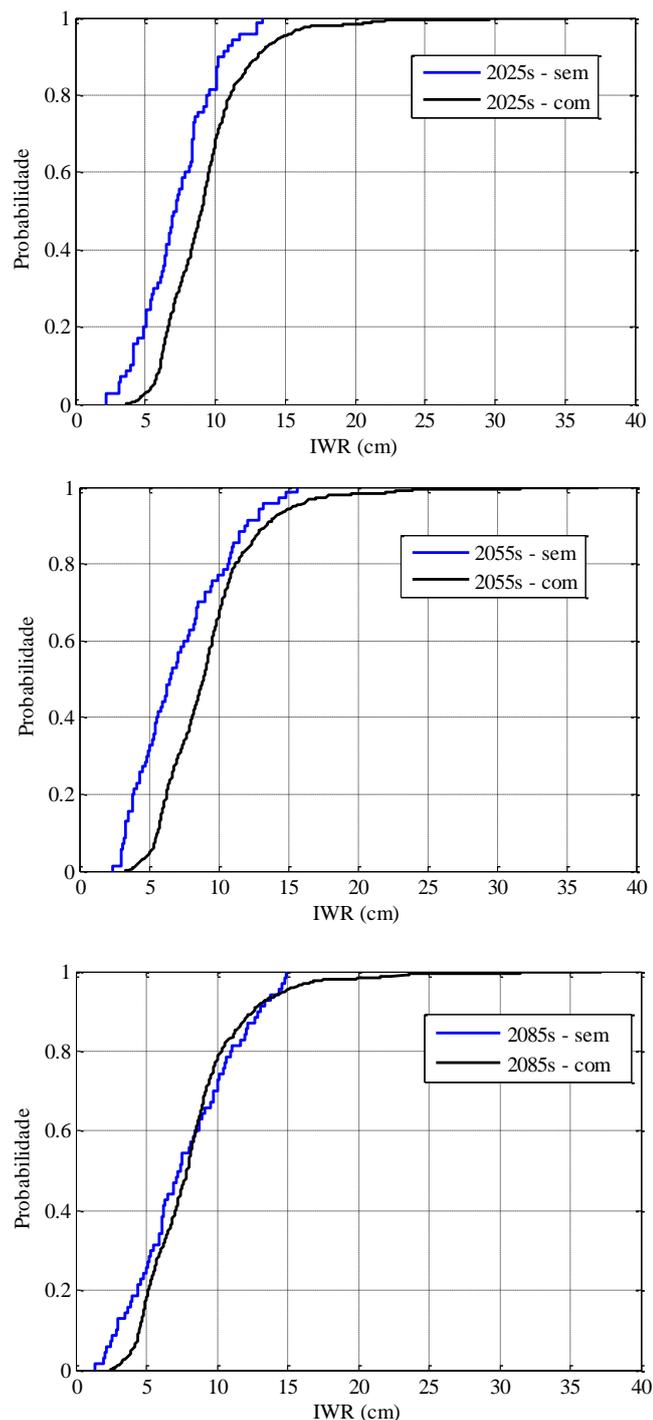
incertezas devido à variabilidade espacial do solo. Ao contrário, quando consideradas as projeções a curto prazo (2025s) a variabilidade do solo agregou incertezas sobre as estimativas de IWR, possivelmente porque neste período as incertezas do modelo ETA 20 são menores do que as dos outros modelos.

No entanto, estes resultados não são suficientes para afirmar que estas diferenças não são estatisticamente significativas. De fato, somente um teste de hipóteses pode confirmar esta suposição. Portanto, foi realizado o teste de Kolmogorov-Smirnov para duas amostras para comparar as distribuições de probabilidades obtidas com e sem a consideração da variabilidade espacial do solo. Assim, as distribuições de IWR deste capítulo e do anterior de cada período futuro foram testadas para o nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ). Logo, a hipótese nula ( $H_0$ ) supõe que as distribuições de IWR para um determinado período futuro originam-se da mesma distribuição contínua, ou seja, pode-se assumir que são iguais estatisticamente.

O teste de hipóteses rejeitou a hipótese nula para os períodos de 2025s e de 2055s, com valores p de  $4,2 \times 10^{-6}$  e  $3,9 \times 10^{-6}$ . Este parâmetro refere-se ao menor valor de significância do teste para o qual se pode rejeitar a hipótese nula, ou seja, o erro que se comete ao rejeitar  $H_0$ . Como para ambos os casos este valor foi muito pequeno, então é seguro considerar que as distribuições de IWR nestes períodos são estatisticamente diferentes mesmo para valores de  $\alpha$  iguais a estes valores p. Ao contrário, o teste não rejeita esta hipótese para o período de 2085s, indicando que o erro que se cometeria ao rejeitá-la (valor p) seria de 0,14 (14%), e, portanto, não é seguro. Este resultado pode ser devido ao fato de que no final do século as maiores incertezas são devido aos modelos climáticos, enquanto que até o meio do século a variabilidade espacial do solo influenciou nas estimativas de IWR significativamente.

Analisando-se a estatística do teste (D), a qual indica a maior distância entre as distribuições, os valores foram 0,31 para os dois primeiros períodos e 0,14 para 2085s. Isto confirma porque o teste rejeita a hipótese nula em 2025s e 2055s e a aceita em 2085s. Da mesma forma, estes resultados podem ser confirmados pelas distribuições acumuladas das séries testadas apresentadas na Figura 6.9

Desta forma, pode-se concluir que a simulação geoestatística, que permitiu avaliar a variabilidade espacial de  $K_{sat}$  e dos parâmetros da curva de retenção de água no solo, contribuiu significativamente para obtenção de resultados mais confiáveis sobre as estimativas de IWR, sendo que estas são válidas caso todas as hipóteses e simplificações assumidas neste trabalho, se confirmarem no futuro.



**Figura 6.9:** Comparação entre as distribuições de probabilidades acumuladas de IWR nos períodos futuros com (preto) e sem (azul) considerar a variabilidade espacial do solo.

Cabe salientar que neste capítulo não foram estimados os valores de IWR para o período atual considerando a variabilidade espacial do solo, e que, portanto, não se pode fazer uma comparação direta de IWR nos períodos futuros com os 70 valores obtidos no Capítulo 5 para o período de 1961-1990, pois a magnitude dos dados são diferentes em função das

propriedades do solo terem sido incorporadas agora. Por esta razão, os gráficos apresentados na Figura 6.8 são apenas uma demonstração da influência dos parâmetros físico-hidráulicos do solo sobre as demandas de água para irrigação, de tal forma que o teste de hipóteses para testar as distribuições foi feito somente comparando as distribuições de IWR no futuro. Assim, não é possível comparar as distribuições futuras deste capítulo com as séries do período atual, pois elas foram avaliadas segundo abordagens diferentes.

Portanto, permanecem válidas as conclusões obtidas com relação ao aumento ou diminuição de IWR em função do uso de diferentes modelos e localização obtidas no capítulo anterior, enquanto que o presente capítulo revela a magnitude dos dados de forma mais robusta.

#### **6.4 Conclusões Parciais**

Os resultados indicam grandes diferenças nas demandas hídricas no futuro quando comparadas com o período atual, e é possível que estas mudanças tenham algum impacto sobre a resiliência agrícola, no que diz respeito à rápida adaptação às novas condições climáticas, principalmente devido à maior ocorrência de eventos extremos e consequentes perdas de produtividade.

Também pode-se concluir que os impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura não serão uniformes na região Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, mesmo quando analisados estocasticamente, devido às diferenças entre as estimativas de IWR obtidas em cada localização.

Foi possível verificar que, a longo prazo (2085s), as incertezas inerentes aos modelos climáticos são maiores do que as incertezas associadas à variabilidade espacial do solo, uma vez que para este período obteve-se uma redução na amplitude entre os percentis 5 e 95% para a avaliação estocástica. As incertezas de IWR devido aos modelos climáticos são consequências da antecipação das mudanças climáticas, ou seja, aumento de temperatura e precipitação na região.

É importantíssimo lembrar que os impactos do aumento de precipitação podem ser compensados pelo aumento de temperatura, devido a maiores taxas de evapotranspiração. Ou seja, mesmo chovendo mais, é possível que a temperatura ainda desempenhe uma compensação sobre os impactos resultantes de ocorrer maiores precipitação. Como o modelo SWAP realiza o balanço hídrico na superfície e no perfil do solo, estes efeitos de compensação já foram incorporados nas simulações (estocásticas ou não) e os resultados

demonstram tanto casos de diminuição quanto de aumento nas demandas futuras de água para irrigação, dependendo do modelo climático considerado.

Sobre este último aspecto, as incertezas referentes aos modelos climáticos ainda são muito grandes e, poderiam ser melhor modeladas caso tivessem sido utilizados outros modelos, tais como as outras 7 projeções utilizadas no Capítulo 5.

A principal conclusão com relação a este capítulo, e que atende tanto aos objetivos da tese quanto confirmam a sua hipótese, é que a incorporação da variabilidade espacial por meio da simulação geoestatística revelou-se significativamente importante nas estimativas de IWR. Isto porque a abordagem estocástica estima valores de IWR estatisticamente diferentes das estimativas não estocásticas, ou seja, os valores de IWR nos períodos futuros obtidos considerando a variabilidade espacial do solo são estatisticamente diferentes dos valores obtidos sem considerá-la, nos períodos de 2205s e 2055s.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se considerar uma abordagem multi-modelos e multi-forçantes climáticas para avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura, já que se observou que as estatísticas por conjunto são muito mais semelhantes aos dados observados quando comparadas com simulações por modelos individuais (Wada et al., 2013), sendo esta última abordagem realizada neste trabalho.

Por fim, cabe agora responder as perguntas apresentadas na Introdução deste capítulo. Considerando que as estimativas de IWR obtidas com a incorporação da variabilidade espacial são estatisticamente diferentes daquelas obtidas sem esta abordagem, então pode-se afirmar que a variabilidade espacial do solo não somente influencia nas estimativas de IWR, mas também revela informações que antes não podiam ser detectadas e, portanto, melhoram os resultados. A magnitude deste aprimoramento sobre as estimativas de IWR pode ser avaliada, por exemplo, nas diferenças dos valores médios de IWR em cada período obtidas neste capítulo e no anterior, o que pode ser comprovado pelo teste de hipótese, cujos valores-p sugerem erros pequenos ao se assumir que estas diferenças existem.

## **6.5. Referências bibliográficas**

CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change*, v. 3, p. 512-525, 2014.

- DEB, S.K. E SHUKLA, M.K. Variability of hydraulic conductivity due to multiple factors. *American Journal of Environmental Science*, v. 8, n. 5, p. 489-502, 2012.
- DEC, D. e DÖRNER, J. Spatial variability of the hydraulic properties of a drip irrigated andisol under blueberries. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 14, n. 3, p. 589-601, 2014.
- DÖLL, P. Impact of Climate Change and Variability on Irrigation Requirements: a Global Perspective. *Climatic Change*, v. 54, p. 269-293, 2002.
- DÖLL, P. e SEIBERT, S. Global modeling of irrigation water requirements. *Water Resour. Res.*, v. 38, p. 8-1 – 8-10, 2002.
- GUPTA, N.; RUDRA, R.P.; PARKIN, G. Analysis of spatial variability of hydraulic conductivity at field scale. *Canadian Biosystems Engineering*, v. 48, p. 1.55-1.62, 2006.
- HU, W.; SHAO, M.; WANG, Q.; FAN, J.; REICHARDT, K. Spatial variability of soil hydraulic properties on a steep slope in the loess plateau of China. *Scientia Agricola*, v. 65, p. 268-276, 2008.
- IQBAL, J.; THOMASSON, J.A.; JENKINS, J.N.; OWENS, P.R.; WHISLER, F.D. Spatial Variability Analysis of Soil Physical Properties of Alluvial Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.69, n.4, p. 1338-1350, 2005.
- KLOSS, S.; PUSHPALATHA, R.; KAMOYO, K.J.; SCHÜTZE, N. Evaluation of crop models for simulating and optimizing deficit irrigation systems in arid and semi-arid countries under climate variability. *Water Resour. Manag.*, v. 26, p. 997-1014, 2012.
- KROES, J.G.; VAN DAM, J.C.; GROENENDIJK, P.; HENDRIKS, R.F.A.; JACOBS, C.M.J. SWAP 3.2. Theory description and user manual. Wageningen, Alterra, Alterra Report 1649(02) – SWAP32 Theory description and user manual.doc., 262 p., 2008.
- LEE, J.L. E HUANG, W.C. Impact of climate Change on the Irrigation Water Requirement in Northern Taiwan. *Water*, v. 6, p. 3339-3361, 2014.
- MOHAWESH, O.; FUKUMURA, K.; ISHIDA, T.; YOSHINO, K. Assessment of Spatial Variability in Soil and Canopy Properties in a Cassava Field. *Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources*, v. 18, n. 2, p. 156-166, 2005.
- MELO, T.M.; LOUZADA, J.A.S.; PEDROLLO, O.C. Impacts of climate change on soybean irrigation water requirements in Northwest Region of Rio Grande do Sul, Brazil. *Irrigation and Drainage Systems Engineering*, v. 3, n.3, (no prelo), 2014.

- MELO, T.M.; LOUZADA, J.A.S.; PEDROLLO, O.C. Trends in Extreme Indices and Seasonal Analysis of Precipitation and Temperature in the Northwest Region of Rio Grande do Sul, Brazil. *American Journal of Climate Change*, v. 4, p. 187-202, 2015.
- REICHARDT, K.; SILVA, J.C.A.; BASSOI, L.H.; TIMM, L.C.; OLIVEIRA, J.C.M.; BACCHI, O.S.; PILOTTO, J.E. Soil Spatial Variability and the Estimation of the Irrigation Water Depth. *Scientia Agricola*, v. 58, n. 3, p. 549-553, 2001.
- SMITH, M. CROPWAT: A Computer Program for Irrigation Planning and Management. Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 1992.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop—the FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*, v. 101, p. 426-437, 2009.
- STERN, N. Economics of Climate Change: A Review, 2014. Disponível em: [www.hm-treasury.gov.uk/independent-review-economic-climate-change/sterm-review-report.fm](http://www.hm-treasury.gov.uk/independent-review-economic-climate-change/sterm-review-report.fm)
- TRENNEPHOL, D. e PAIVA, C.A.N. A importância da sojicultura para o desenvolvimento da região noroeste do Rio Grande do Sul. *Ensaio FEE*, v. 31, número especial, p. 741-778, 2011.
- VAN DAM, J. C. Field scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation and case studies. PhD thesis, Wageningen University, 167 p, 2000.
- VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.44, p.892-898, 1980.
- YANO, T.; AYDIN, M.; HARAGUCHI, T. Impact of Climate Change on Irrigation Demand and Crop Growth in a Mediterranean Environment of Turkey. *Sensors*, v. 7, p. 2297-2315, 2007.
- WADA, Y.; WISSER, D.; EISNER, S.; FLÖRKE, M.; GERTEN, D.; HADDELAND, I.; HANASAKI, N.; MASAKI, Y.; PORTMANN, F.T.; STACKE, T.; TESSLER, Z.; SCHEWE, J. Multimodel projections and uncertainties of irrigation water demand under climate change. *Geophysical Research Letters*, v. 40, p. 4626-4632, 2013.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 7.1 Conclusões

Pode-se concluir que a variabilidade espacial, e principalmente a variabilidade temporal, dos atributos físico-hidráulicos do solo contribuíram para a grande heterogeneidade das simulações das demandas futuras de água para irrigação na área da bacia do arroio Donato. Além disso, a distribuição espacial das projeções climáticas também demonstrou as diferenças das estimativas de IWR na região Noroeste, mesmo entre localizações próximas. Isto significa que apareceram zonas mais críticas para a agricultura, tanto na bacia do arroio Donato como nas setes localizações, demonstrando que o clima nas localizações mais ao centro do Estado parecem ser um pouco diferente das outras localizações. Estas constatações sugerem o ocorrência de lugares onde os impactos serão sentidos mais negativamente, enquanto que em outras zonas, eles se manifestem mais atenuados.

De fato, a variabilidade espacial identificada na bacia do arroio Donato foi devido, principalmente, às coletas amostradas ao longo do tempo, as quais incorporaram a influência de fatores tais como o calendário agrícola e o manejo do solo, além de outros fatores decorrentes das estratégias de amostragens praticadas durante o estudo. Portanto, a heterogeneidade encontrada na área de estudo representa muito mais a influência temporal, do que propriamente a variabilidade espacial do fenômeno em si, já que as amostras não foram obtidas simultaneamente.

O uso de uma abordagem estocástica permitiu determinar a dispersão dos dados de IWR simulados com base na variabilidade espacial e temporal da condutividade hidráulica do solo e dos parâmetros da curva de retenção de água no solo. Os resultados revelaram grandes diferenças entre os valores extremos simulados (percentis), o que indica quão difícil é a modelagem de IWR, a qual depende fortemente destes atributos do solo. Portanto, a análise estocástica mostrou-se de suma importância para enfatizar a influência da heterogeneidade do solo sobre o manejo agrícola e mesmo sobre o uso dos recursos hídricos.

Com relação aos objetivos da tese, o principal consistia em estimar as demandas futuras de água para irrigação na região Noroeste e então compará-las com as demandas obtidas no período atual. O que pode ser concluído sobre este aspecto é que ao se analisar as estimativas de IWR dadas por todos os modelos, então os impactos podem ser tanto positivos como negativos, uma vez que as projeções dos MCGs e do MCR não concordam entre si, nem mesmo quando se considerou a variabilidade espacial do solo. No entanto, a análise de

incertezas realizada indica que as incertezas sobre IWR, quando consideram-se as projeções do modelo ETA, são muito menores e, portanto, mais confiáveis. Assim, baseado nos resultados obtidos com o uso das projeções deste modelo climático regional, pode-se concluir que as previsões indicam aumento de temperatura e de precipitação em todas as localizações.

Como resposta a estas alterações no clima, verificou-se, por meio do uso de alguns índices estatísticos de precipitação extrema, que é possível que este aumento de precipitação se manifeste sob a forma de chuvas mais intensas associadas a eventos extremos, e que, portanto, é mais provável que os impactos sejam negativos para a agricultura no que se refere a estes aspectos. Por outro lado, os valores de IWR simulados estocasticamente pelas projeções regionais sugerem que, em várias localizações, as demandas de água para irrigação serão menores no futuro do que foram no passado e também menores quando comparados com as estimativas previstas pelo modelo global HADCM3. Isto é porque o modelo ETA projeta maiores precipitações no futuro do que o modelo HADCM3. No entanto, esta comparação de IWR gerada estocasticamente no futuro com o período atual não pode ser conclusiva uma vez que o período atual não foi gerado pela abordagem estocástica. Portanto, a menos que a agricultura seja fortemente afetada por eventos extremos, é possível que os impactos sejam mais positivos do que negativos, em função do aumento de precipitação previsto para a região.

Além disto, impactos econômicos sobre a agricultura ocorrem em escala local ou regional, e o uso de modelos regionais justifica a importância dos resultados fornecidos pelo modelo ETA. Desta forma, é mais confiável adotar estratégias de manejo agrícola mais adaptáveis às projeções deste modelo do que aos resultados fornecidos quando do uso dos modelos globais, uma vez que estes últimos projetam tendências de alteração de precipitação opostas às projeções do modelo ETA.

Com relação à influência da temperatura e precipitação sobre as demandas de água para irrigação no futuro, pode-se deduzir que a precipitação representa uma relação maior com IWR do que a temperatura. Isto porque todas as projeções sugerem aumento de temperatura até o final do século, enquanto as maiores diferenças entre modelos apareceram para a precipitação e indicaram maior relação com o aumento ou diminuição do déficit hídrico da planta.

A incorporação da variabilidade espacial da condutividade hidráulica saturada e dos parâmetros da curva de retenção nas estimativas de IWR permitiu detectar que a influência da abordagem estocástica é significativa, a qual pode ser comprovada estatisticamente quando as

séries futuras de IWR determinísticas e estocásticas foram comparadas pelo teste de hipóteses de Kolmogorov-Smirnov. Dessa tese resultou que apenas a longo prazo (2085s), as estimativas das demandas futuras de água para irrigação não diferem de uma abordagem para a outra.

Estudos como este deixam como perspectiva que, se a produção agrícola deve crescer para sustentar uma população também em crescimento ao longo do século, então há uma necessidade imediata de mitigação dos impactos que poderão derivar de um clima em mudança. Embora os resultados apontem para aumento de precipitação anual acumulada na região Noroeste do RS, isto não implica em impactos unicamente positivos. Como visto anteriormente, em parte, esta alteração nos regimes de precipitação poderá concentrar as chuvas em eventos mais extremos, como analisado no Capítulo 4.

## **7.2 Recomendações**

Enquanto a agricultura libera grandes quantidades de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, isso é parcialmente balanceado pela existência destas áreas agrícolas, uma vez que a cobertura do solo pelas culturas auxilia, em parte, na resgate de CO<sub>2</sub> da atmosfera. Portanto, pesquisas sobre mudanças nas práticas de manejo agrícola tornam-se cada vez mais indispensáveis para reduzir as emissões destes gases, os quais por sua vez contribuem para a intensificação dos impactos das mudanças climáticas sobre este setor da economia. Como resposta a tal necessidade, é provável que pesquisas incluindo técnicas de biotecnologia poderão auxiliar neste processo de adaptação.

Novas pesquisas poderão atualizar as projeções realizadas neste estudo por meio do uso de projeções climáticas referentes aos novos cenários de mudanças climáticas, definidos pelo IPCC e considerados pelos modelos climáticos contidos no último relatório de avaliação (AR5). Estes cenários são conhecidos como “Caminhos Representativos de Concentração” e referem-se a cenários de forçantes radiativas: RCP 8,5; 6; 4,5 e 2,6 Wm<sup>-2</sup> (variando do cenário mais pessimista para o mais otimista). Os modelos climáticos utilizados neste último relatório se diferenciam dos modelos do AR4 por um melhoramento nas previsões de precipitação, especialmente sobre áreas tropicais. Da mesma forma, as estimativas de demandas futuras de água para irrigação poderão ser aperfeiçoadas.

Seria de grande importância avaliar detalhadamente qual fator influenciou mais nos resultados, ou seja, é a variabilidade espacial (ou temporal) dos atributos hidráulicos do solo

que mais influencia as estimativas de IWR obtidas ou seria maior a influência das projeções climáticas nas diferentes localizações?

Cabe salientar que os resultados obtidos neste estudo ao longo dos capítulos desenvolvidos são válidos apenas sob algumas suposições, além das já mencionadas anteriormente, e que, trabalhos futuros poderão reduzir as suposições, aproximando-se de cenários mais realísticos:

- ✓ As parcelas de transpiração potencial e real obtidas nas simulações realizadas com o modelo SWAP supõem que a cultura da soja é cultivada em grande áreas, livre de doenças e em boas condições de nutrientes no solo;
- ✓ O calendário agrícola foi assumido como constante ao longo do século;
- ✓ Nos cálculos das demandas futuras de água para irrigação não foi assumido nenhum fator de eficiência de métodos de irrigação. Portanto, as demandas reais certamente poderão ser maiores do que as obtidas neste estudo, o qual se limitou a determinar o déficit hídrico da soja e não os montantes efetivos de água a ser irrigada;
- ✓ Apenas um cenário climático foi considerado (A1B), não sendo o mais pessimista. Este cenário supõe, principalmente, que no futuro haverá um meio termo entre o uso de combustíveis fósseis e o uso de outras fontes de energia. Logo, a menos que significativas mudanças nas práticas econômicas e de exploração dos recursos naturais ocorram, é possível que os impactos futuros sejam ainda mais severos do que os obtidos neste trabalho;
- ✓ Não foram considerados cenários de alterações genéticas da soja ou mesmo adaptações agrícolas, tais como a época de plantio diferente em direção ao mês anterior ou seguinte com maiores precipitações;
- ✓ Sabe-se que outros parâmetros hidrológicos no modelo SWAP também possuem muitas incertezas associadas, bem como os parâmetros das culturas, sendo que a variabilidade de tais parâmetros não foi adicionada às simulações;

Estudos futuros poderão desenvolver outros cenários, incluindo cenários agrícolas e de uso da terra, bem como formas de adaptação a eventos extremos ou mesmo incluir situações em que parte da demanda hídrica da planta já está sendo suprida pela irrigação. Convém salientar que novas configurações de cenários para o futuro não invalidam as conclusões apresentadas, cuja interpretação está vinculada aos conceitos e às previsões estatísticas conhecidas, e cujo valor reside, em grande parte, na metodologia utilizada. Esta metodologia pode ser empregada nos futuros cenários, uma vez que estes resultam de aperfeiçoamentos

contínuos sobre o assunto. Além disso, progressos a serem feitos no controle de emissão de poluentes atmosféricos podem resultar em cenários mais positivos, ou inversamente, na ausência de impactos benéficos.

## **ANEXOS**

**ANEXO 1 – Dados de condutividade hidráulica Saturada, da curva de retenção de água  
no solo e dos ajustes dos parâmetros do modelo de Van Genuchten**

**Tabela A1.1:** Dados de condutividade hidráulica saturada para a bacia do Arroio Donato.

<b>Ponto</b>	<b>K<sub>sat</sub> (cm/d)</b>	<b>Ponto</b>	<b>K<sub>sat</sub> (cm/d)</b>
<b>D001</b>	1,380	<b>D033</b>	0,363
<b>D002</b>	0,413	<b>D034</b>	187,901
<b>D004</b>	0,000	<b>D035</b>	10,811
<b>D006</b>	1,790	<b>D036</b>	0,000
<b>D007</b>	0,000	<b>D037</b>	12,961
<b>D010</b>	14,850	<b>D038</b>	0,000
<b>D011</b>	0,000	<b>D039</b>	1,126
<b>D012</b>	169,836	<b>D040</b>	0,000
<b>D013</b>	0,000	<b>D041</b>	0,000
<b>D014</b>	1,171	<b>D042</b>	0,000
<b>D015</b>	6,897	<b>D043</b>	41,611
<b>D016</b>	0,000	<b>D044B</b>	0,000
<b>D017</b>	13,790	<b>D045</b>	8,360
<b>D018</b>	193,661	<b>D046</b>	6,343
<b>D019</b>	0,203	<b>D047</b>	0,000
<b>D020</b>	0,000	<b>D048</b>	1,261
<b>D021</b>	0,000	<b>D049</b>	0,000
<b>D022</b>	0,000	<b>D050</b>	0,000
<b>D023</b>	0,000	<b>D051</b>	33,780
<b>D024</b>	1,978	<b>D052</b>	0,236
<b>D025</b>	190,291	<b>D053</b>	0,562
<b>D026</b>	3,582	<b>D054</b>	0,000
<b>D027</b>	0,000	<b>D055</b>	0,000
<b>D028</b>	0,000	<b>D056</b>	1,132
<b>D029</b>	5,300	<b>D057</b>	0,000
<b>D031</b>	0,000	<b>D058</b>	0,000
<b>D032</b>	0,000	<b>D059</b>	25,559

**Tabela A1.2:** Curvas de retenção de água no solo obtidas pelo método da Câmara de Richards.

Ponto	Tensão (atm)										
	0	0.1	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	5.0
D001	0,544	0,439	0,437	0,427	0,424	0,421	0,419	0,418	0,411	0,408	0,403
D002	0,340	0,273		0,259	0,247	0,231		0,213		0,177	0,152
D004	0,382	0,291		0,276	0,262	0,254		0,232		0,203	0,180
D006	0,511	0,434	0,430	0,419	0,415	0,412	0,404	0,403	0,397	0,393	0,386
D007	0,505	0,453	0,450	0,441	0,437	0,435	0,431	0,431	0,425	0,420	0,413
D007*	0,526	0,443	0,441	0,429	0,428	0,425	0,422	0,421	0,416	0,411	0,405
D010	0,3841	0,313		0,295	0,279	0,266		0,250		0,224	0,194
D011	0,364	0,268		0,251	0,238	0,229		0,208		0,181	0,157
D012	0,3312	0,263		0,241	0,220	0,203				0,174	0,153
D013	0,366	0,273		0,256	0,241	0,233		0,212		0,177	0,157
D014	0,403	0,297		0,279	0,259	0,246		0,230		0,182	0,166
D015	0,383	0,290		0,250	0,233	0,216		0,150		0,129	0,115
D016	0,328	0,247		0,222	0,205	0,190		0,136		0,109	0,097
D017	0,467	0,299		0,272	0,253	0,226		0,166		0,126	0,117
D018	0,326	0,270		0,245	0,230	0,220		0,172		0,151	0,140
D019	0,321	0,248		0,231	0,215	0,198		0,148		0,129	0,114
D020	0,282	0,233		0,217	0,203	0,186		0,136		0,117	0,104
D021	0,356	0,287		0,260	0,242	0,227		0,178		0,152	0,146
D022	0,342	0,291		0,264	0,247	0,234		0,177		0,154	0,137
D023	0,391	0,303	0,291	0,275	0,261	0,254	0,233	0,212	0,204	0,196	
D024	0,419	0,318		0,290	0,262	0,257		0,203		0,165	0,143
D025	0,393	0,305		0,280	0,266	0,238		0,189		0,164	0,142
D026	0,444	0,353	0,334	0,313	0,298	0,292	0,273	0,254	0,244	0,234	
D027	0,525	0,374	0,373	0,361	0,360	0,349	0,322	0,324	0,323	0,321	0,314
D028	0,426	0,360	0,342	0,318	0,307	0,301	0,283	0,266	0,255	0,244	
D029	0,469	0,372	0,354	0,334	0,320	0,313	0,292	0,273	0,262	0,252	
D031	0,510	0,417	0,408	0,390	0,377	0,374	0,368	0,365	0,362	0,361	0,338
D032	0,375	0,310	0,297	0,282	0,271	0,265	0,247	0,229	0,220	0,213	
D033	0,404	0,342	0,305	0,277	0,266	0,263	0,256	0,251	0,242	0,234	
D034	0,489	0,345	0,341	0,331	0,328	0,325	0,321	0,320	0,314	0,310	0,307
D035	0,476	0,362	0,347	0,331	0,317	0,316	0,313	0,310	0,307	0,305	0,287
D036	0,506	0,420	0,416	0,405	0,401	0,397	0,392	0,390	0,382	0,378	0,371
D037	0,494	0,441	0,441	0,432	0,431	0,428	0,425	0,425	0,420	0,416	0,409
D038	0,515	0,459	0,452	0,438	0,426	0,425	0,419	0,419	0,415	0,413	0,387
D039	0,554	0,492	0,482	0,467	0,454	0,451	0,447	0,443	0,438	0,437	0,397
D040	0,567	0,471	0,461	0,448	0,432	0,425	0,423	0,417	0,413	0,408	0,371
D041	0,562	0,501	0,495	0,483	0,471	0,468	0,464	0,460	0,457	0,455	0,433
D042	0,552	0,479	0,471	0,452	0,438	0,436	0,429	0,426	0,422	0,420	0,399
D043	0,564	0,483	0,473	0,457	0,444	0,442	0,440	0,438	0,435	0,432	0,416
D044	0,534	0,374	0,354	0,323	0,300	0,284	0,271	0,263	0,253	0,246	0,225
D044B	0,540	0,377	0,365	0,348	0,336	0,330	0,322	0,317	0,313	0,311	0,288
D045	0,564	0,493	0,486	0,466	0,452	0,440	0,435	0,430	0,426	0,423	0,402
D046	0,522	0,467	0,464	0,456	0,453	0,450	0,445	0,445	0,438	0,434	0,428
D047	0,530	0,464	0,461	0,453	0,451	0,449	0,444	0,444	0,438	0,434	0,428
D048	0,549	0,462	0,450	0,430	0,413	0,406	0,400	0,395	0,390	0,386	0,367
D049	0,545	0,458	0,451	0,444	0,440	0,431	0,425	0,422	0,417	0,413	0,402
D050	0,535	0,326	0,318	0,310	0,300	0,299	0,291	0,290	0,287	0,281	0,274
D051	0,518	0,466	0,460	0,455	0,453	0,445	0,441	0,439	0,436	0,432	0,425
D052	0,542	0,426	0,415	0,398	0,386	0,385	0,379	0,377	0,373	0,371	0,358
D053	0,550	0,395	0,381	0,366	0,355	0,352	0,347	0,341	0,337	0,334	0,309
D054	0,518	0,405	0,393	0,381	0,380	0,363	0,361	0,358	0,354	0,350	0,343
D055	0,451	0,368	0,355	0,339	0,326	0,324	0,318	0,316	0,311	0,310	0,281
D056	0,536	0,415	0,406	0,399	0,387	0,383	0,375	0,371	0,366	0,358	0,343
D057	0,503	0,389	0,387	0,382	0,373	0,369	0,360	0,358	0,348	0,343	0,331
D058	0,502	0,414	0,413	0,405	0,404	0,397	0,392	0,390	0,386	0,381	0,372
D059	0,550	0,437	0,436	0,432	0,422	0,422	0,416	0,414	0,410	0,405	0,396

\* Repetição da amostra. Colunas em branco referem-se às curvas pré-existentes e extraídas do trabalho de Medeiros (2004), a qual não considerou as mesmas tensões desta tese.

**Tabela A1.3:** Parâmetros ajustados da curva de retenção – 30 cm de profundidade.

Pontos	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	n (-)	$\theta_{\text{sat}}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\theta_{\text{res}}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	Pontos	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	n (-)	$\theta_{\text{sat}}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\theta_{\text{res}}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )
<b>D001</b>	6.84886	1.03577	0.54415	0.15823	<b>D033</b>	0.01892	1.37116	0.40404	0.19149
<b>D002</b>	0.00540	1.26772	0.32607	0.00000	<b>D034</b>	0.00316	1,21381	0.34881	0,25544
<b>D004</b>	0.02784	1.15564	0.37941	0.00000	<b>D035</b>	0.95376	1.07364	0.47647	0.08079
<b>D006</b>	1.31011	1.03088	0.51136	0.00000	<b>D036</b>	1.97018	1.03243	0.50608	0.00000
<b>D007</b>	0.71114	1.02311	0.50514	0.00000	<b>D037</b>	1.88584	1.01922	0.49403	0.00000
<b>D007*</b>	8.37902	1.02926	0.52558	0.08995	<b>D038</b>	0.12775	1.03905	0.51475	0.00000
<b>D010</b>	0.01352	1.16948	0.37891	0.00000	<b>D039</b>	0.07236	1.04726	0.55308	0.00000
<b>D011</b>	0.03419	1.16513	0.36234	0.00000	<b>D040</b>	0.21009	1.05278	0.56698	0.00000
<b>D012</b>	0.01736	1.19440	0.32884	0.00000	<b>D041</b>	0.17120	1.03494	0.56156	0.00000
<b>D013</b>	0.02548	1.17806	0.36282	0.00000	<b>D042</b>	0.16126	1.04556	0.55198	0.00000
<b>D014</b>	0.02425	1.19197	0.39977	0.00000	<b>D043</b>	0.61927	1.03645	0.56425	0.00000
<b>D015</b>	0.00780	1.38292	0.37196	0.00000	<b>D044</b>	0.09725	1.13450	0.53397	0.00000
<b>D016</b>	0.00540	1.43418	0.31112	0.00000	<b>D044B</b>	1.82675	1.06517	0.54032	0.00000
<b>D017</b>	0.02329	1.30326	0.46299	0.00000	<b>D045</b>	0.07350	1.05431	0.56351	0.00000
<b>D018</b>	0.00423	1.35364	0.31348	0.00000	<b>D046</b>	0.66598	1.02332	0.52147	0.00000
<b>D019</b>	0.00464	1.39953	0.30399	0.00000	<b>D047</b>	4.08523	1.02185	0.53045	0.02749
<b>D020</b>	0.00224	1.59009	0.26353	0.00000	<b>D048</b>	0.13130	1.05965	0.54900	0.00000
<b>D021</b>	0.00542	1.34122	0.34316	0.00000	<b>D049</b>	1,01624	1,03384	0,54480	0,00000
<b>D022</b>	0.00266	1.48293	0.32574	0.00000	<b>D050</b>	0,00565	1,13104	0,33524	0,16627
<b>D023</b>	0.02986	1.13481	0.38854	0.00000	<b>D051</b>	0,50363	1,02404	0,51748	0,00000
<b>D024</b>	0.00869	1.31176	0.40704	0.00000	<b>D052</b>	2.15292	1.04388	0.54219	0.00000
<b>D025</b>	0.00588	1.34996	0.37694	0.00000	<b>D053</b>	2.78488	1.05629	0.54989	0.00000
<b>D026</b>	0.03400	1.12694	0.44262	0.00000	<b>D054</b>	1,95725	1,04469	0,51794	0,00000
<b>D027</b>	3,51951	1,05265	0,52529	0,00000	<b>D055</b>	0.20561	1.06124	0.45078	0.00000
<b>D028</b>	0.01765	1.12685	0.42276	0.00000	<b>D056</b>	1,38713	1,04721	0,54565	0,00000
<b>D029</b>	0.03634	1.12051	0.46661	0.00000	<b>D057</b>	2,37807	1,04141	0,50272	0,00000
<b>D031</b>	0.40941	1.05069	0.51026	0.00000	<b>D058</b>	5,57678	1,02747	0,50184	0,00000
<b>D032</b>	0.2037	1.12420	0.37219	0.00000	<b>D059</b>	6,24941	1,02525	0,54992	0,00000

\* Repetição da amostra.

## ANEXO 2 – Parâmetros da soja e outros parâmetros utilizados no modelo SWAP

Os dados listados abaixo referem-se aos parâmetros da cultura (soja) e outros parâmetros necessários para as simulações com o modelo SWAP.

### A2.1 Parâmetros Gerais

- *Períodos de simulação*: 01-jan-1961 a 30-nov-1990 (período base) e 01-jan-2011 a 30-nov-2099 (períodos futuros);
- *Condições iniciais*: o potencial mátrico é função da profundidade e assumiu-se igual a -300 cm ao longo de toda a profundidade;
- Não foi considerado nenhum valor para a geração de escoamento superficial a partir de uma lâmina de água fixa;
- *Evaporação do solo*: calculado a partir do fator do solo (CFBS = 0,5) para derivar a evaporação potencial a partir da evapotranspiração de referência;
- *Discretização vertical do perfil do solo*:

Camadas no perfil do solo	Subcamadas	Espessura das subcamadas (cm)	Espessura dos compartimentos (cm)	Número de compartimentos
1	1	5,0	1,0	5
1	2	15,0	2,5	6
1	3	10,0	5,0	2
2	1	30,0	5,0	6
2	2	50,0	10,0	5

- *Funções hidráulicas do solo*: foram utilizados os parâmetros de van Genuchten-Mualem. Estes valores foram empregados apenas nas simulações do Capítulo 5. No Capítulo 6 foram utilizados os 1827 conjuntos destes parâmetros obtidos da simulação geoestatística.

Camadas no perfil do solo	$\theta_{res}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\theta_{sat}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$n$ (-)	$K_{sat}$ (cm/d)	$\lambda$ (-)
1	0,0160	0,4550	0,9210	1,1450	25,4550	0,5
2	0,5326	0,4784	0,8939	1,0461	57,7389	0,5

- *Condições de contorno*: como os solos são profundos na região, considerou-se drenagem livre ao longo do perfil;

## A2.2 Parâmetros da Cultura

- *Período de cultivo da soja*: 15 de novembro a 22 de março;
- *Tempo de desenvolvimento da soja*: 128 dias. O tempo real é 140 dias, porém se supôs que durante a segunda metade do último estágio de desenvolvimento a falta de água não é crítica, por isso não foi considerada nas simulações;
- *Estádios de desenvolvimento da soja*: inicial (20 dias), desenvolvimento (35 dias), médio (60 dias) e final (25 dias)
- Não foi considerada nenhuma taxa de aplicação de irrigação;
- *Profundidade máxima das raízes da soja*: 110 cm;
- *Coefficiente de extinção para luz visível difusa*: 0,60 (-)
- *Coefficiente de extinção para luz visível direta*: 0,75 (-)
- *Coefficiente da cultura ( $k_c$ ) como função dos estádios de desenvolvimento*: inicial (0,40), desenvolvimento (0,90), médio (1,21) e final (1,09);
- *Profundidade das raízes( $z$ )como função dos estádios de desenvolvimento*: inicial (0,1 m), desenvolvimento (0,2 m), médio (1,0 m) e final (1,0 m);
- *Índice de área foliar (LAI) como função dos estádios de desenvolvimento*: inicial (0,1), desenvolvimento (3,0), médio (7,0) e final (1,5);
- Considerou-se a resposta de produtividade relativa máxima (= 1) durante todo o período de cultivo da soja;
- *Potenciais de estresse hídrico*: foram assim definidos para garantir que a planta não sofreria déficit hídrico por falta de água, supondo que a demanda de água para irrigação (IWR) seria atendida (ver Figura 5.4). Considerou-se o conceito macroscópico (Feddes et al., 1978)
  - $\psi_1$ (não há extração de água pelas raízes em altos potenciais matriciais): 90 cm
  - $\psi_{2U}$  (potencial matricial abaixo do qual inicia-se a extração ótima de água pelas raízes na camada superior do solo): 100 cm
  - $\psi_{2L}$  (potencial matricial abaixo do qual inicia-se a extração ótima de água pelas raízes na camada inferior do solo): 100 cm
  - $\psi_{3H}$  (potencial matricial abaixo do qual inicia-se a diminuir a extração de água pelas raízes para altos valores de  $T_p$ ): - 1000 cm
  - $\psi_{3L}$  (potencial matricial abaixo do qual inicia-se a diminuir a extração de água pelas raízes para baixos valores de  $T_p$ ): - 1000 cm

- $\psi_4$  (não há extração de água pelas raízes a baixos potenciais matriciais): -8000 cm.
- Não foi considerado o estresse salino;

Os parâmetros biofísicos que serviram de dados de entrada no modelo SWAP foram obtidos a partir de revisão bibliográfica de artigos e textos técnico-científicos da área, cujas fontes e forma de organização estão descritos a seguir, conforme foram apresentados no Relatório Final do Projeto sobre Mudanças Climáticas mencionado anteriormente, de onde vieram os dados:

- **Duração das etapas do ciclo:** a fonte destes dados foi o Boletim da FAO (2006). A duração total do ciclo foi dada pela soma da duração das diversas etapas do desenvolvimento, quais sejam: inicial, desenvolvimento, médio e final. Este parâmetro indica o período de permanência da cultura, ou seja, o período em que a cultura consome água;
- **Coefficiente de cultura ( $k_c$ ):** a fonte foi o Boletim da FAO (2006). O  $k_c$  representa a influência da planta no processo evapotranspirativo e está relacionado aos fatores ambientais e fisiológicos das plantas;
- **Profundidade do sistema radicular ( $m$ ):** a fonte foi o Boletim da FAO (2006). Este parâmetro define o volume de solo que a planta consegue explorar, tanto para consumo de água como de nutrientes;
- **Índice de Área Foliar (LAI):** a fonte principal foram artigos científicos publicados em revistas indexadas. O LAI é definido como a área de folha por unidade de área de solo, estando associado à área evapotranspirante da planta;
- **Potencial Matricial Crítico:** a fonte foi artigos científicos publicados em revistas indexadas e textos técnicos. O potencial matricial crítico foi obtido tomando como base a fração “p” de redução da água disponível do solo para uma demanda atmosférica média e o potencial matricial do solo em capacidade de campo para uma textura média dos solos em estudo. Este parâmetro representa o valor do potencial matricial da água no solo no qual se deve promover a irrigação para a obtenção da máxima produtividade.
- **Época de semeadura:** representa a data de início do cálculo do uso consuntivo de água para fins agrícolas. A fonte refere-se às portarias publicadas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) disponíveis *online* (MAPA, 2012).

### **A2.3 Referências Bibliográficas**

- ALLEN, R.G. *et al.* Evapotranspiración del cultivo – Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO, 2006. 298p.
- FEDDES, R.A., KOWALIK, P.J.; ZARADNY, H. Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs. Pudoc. Wageningen, 1979. 189 pp.
- MAPA. Zoneamento Agrícola de Risco Climático – Ministério da Agricultura. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/politica-agricola/zoneamento-agricola>>. Acesso em 4 set 2012.
- MEDEIROS, J.D.F. Variabilidade espacial do conteúdo de água no solo na Bacia do Arroio Donato-RS. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004. 141p. (Tese de doutorado)