

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
CENTRO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA



Trabalho de Conclusão de Curso

**Impactos das mudanças climáticas sobre a demanda de
água para irrigação na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS**

Kayoma Karpinski da Silva

Pelotas, 2016

KAYOMA KARPINSKI DA SILVA

Impactos das mudanças climáticas sobre a demanda de água para irrigação na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS

Trabalho acadêmico apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Tirzah Moreira de Melo

Pelotas, 2016

Banca examinadora:

Prof^a. Dr^a. Andréa Souza Castro - Centro de Engenharias/UFPel

Prof^a. MSc. Katiúcia Nascimento Adam - Faculdade de Tecnologia/
TecBrasil – Unidade Porto Alegre

Prof^a. Dr^a. Tirzah Moreira de Melo - Centro de Engenharias/UFPel –
Orientadora

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ruberly e Lilia, por toda força, estímulo e ensinamentos. Agradeço por tê-los na minha vida, nada disso seria possível sem o apoio de vocês!

Ao meu irmão Kaetano e dinda Lila, por todo amor, ajuda e diversão nos momentos difíceis.

Ao Rodrigo, pela inspiração e por ter estado sempre ao meu lado.

À professora Tirzah de Melo por toda orientação, colaboração e paciência.

À professora Luciara Corrêa, pela dedicação e apoio concedido ao longo dos anos de graduação.

Aos professores que tive a oportunidade de conhecer, em especial àqueles da Engenharia Ambiental e Sanitária, que contribuíram com minha formação acadêmica e pessoal.

Aos meus amigos, pela amizade, sinceridade e encorajamento nas horas mais difíceis ao longo dos anos, em especial a Carolina, minha colega de apartamento e irmã de coração.

Às pessoas queridas, que de algum modo, contribuíram em determinado momento na minha graduação.

Muito obrigada!

RESUMO

SILVA, Kayoma Karpinski. **Impactos das mudanças climáticas sobre a demanda de água para irrigação na bacia hidrográfica do rio Ijuí, RS.** 2016. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

As mudanças de temperatura e precipitação aliadas às características físico-hidráulicas do solo influenciam na demanda de água para irrigação. O aumento de demanda em períodos de estiagem ou em locais com pouca disponibilidade hídrica pode prejudicar regiões que possuem sua economia voltada para a agricultura, como é o caso da bacia hidrográfica do rio Ijuí, pertencente à região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. A soja e o milho são as culturas não irrigadas mais importantes para a região, devido à sua contribuição para o agronegócio brasileiro. Deste modo, o objetivo do trabalho foi avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre a demanda de água para irrigação em quatro tipos de cultura (feijão, milho, trigo e soja), comparando um cenário atual e futuro. Foram utilizados dados de projeções meteorológicas, obtidas por um modelo de circulação regional, ETA 40 CTRL, em um cenário futuro A1B, referentes ao período atual (1961-1990) e futuro (2011-2100). O modelo unidimensional SWAP foi utilizado para estimar as demandas de água para irrigação. As demandas de água observadas mostraram que no futuro a necessidade de irrigação será menor para todas as culturas analisadas. Em curto prazo (2011-2040) a demanda de água se manteve próxima ao período atual, devido a menores anomalias de precipitação e temperatura. Os períodos de 2041-2070 e 2071-2100 indicaram maiores reduções de demandas, devido a uma precipitação média acumulada em torno de 2000 mm, o que pode resultar em menor impacto sobre os recursos hídricos da bacia, caso este cenário se confirme futuramente.

Palavras-chave: impactos das mudanças climáticas; modelo SWAP; demanda de água.

ABSTRACT

SILVA, Kayoma Karpinski. Impacts of climate change on irrigation water requirements in the Ijuí river basin, RS. 2016. 55f. Course Conclusion Paper (TCC). Graduation in Environmental and Sanitary Engineering. Federal University of Pelotas, Pelotas.

Changes in temperature and precipitation allied to the soil hydraulic characteristics influence in the demand of water for irrigation. The raise of demand in periods of drought or in places with limited water availability can harm regions that have your economy oriented to the agriculture, as in the case of the Ijuí river basin, located at the northwest region of the state of Rio Grande do Sul. Soy and corn are the most important non irrigated crops for the region, due to its contribution for the Brazilian agribusiness. In this way, the goal of the thesis was to evaluate the impact of the climate change on irrigation water requirements for four different crops (bean, corn, wheat and soy), comparing the current and future scenarios. Data from meteorological projections were utilized, gathered by a regional circulation model, ETA 40 CTRL, in a future scenario A1B, related to the current (1961-1990) and future period (2011-2100). The unidimensional SWAP model was used to estimate the demand of water for irrigation. The estimated water demands showed that in the future the need of irrigation will be smaller for all crops. In a short term (2011-2040) the water demand remained similar to the current period, due to minor anomalies of precipitation and temperature. The periods of 2041-2070 and 2071-2100 indicated higher reductions in water demands, due to an accumulated rainfall average around 2000 mm, which can result in a smaller impact on water resources at this basin, if this scenario is futurely confirmed.

Key-words: impacts of climate changes; SWAP model; demand of water.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS.....	16
1.1.1 Objetivo Geral.....	16
1.1.2 Objetivo Específico	16
2. REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 Mudanças Climáticas.....	17
2.2 Impactos das Mudanças Climáticas sobre os Recursos Hídricos e Agricultura	23
2.3 Histórico Climático sobre o Rio Ijuí e Região	26
2.4 Modelo Swap	28
3. METODOLOGIA	31
3.1 Caracterização da Área de Estudo	31
3.2 Dados Meteorológicos	32
3.3 Aplicação do Modelo SWAP	34
3.4 Dados agrônômicos	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 Análises das projeções de temperatura e precipitação.....	39
4.2 Demandas futuras de água para irrigação (IWR).....	43
4.3 Volume de água demandado.....	46

5. CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS.....	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Emissões globais de CO ₂ por setor em 2013.....	18
Figura 2. Anomalias das temperaturas médias anuais para 2015 com relação ao período-base 1951-1980.	19
Figura 3. Medidas de mitigação necessárias para trajetória de 2°C	19
Figura 4. Bacias de rios de domínio da União e dos Estados com trechos críticos identificados.	24
Figura 5. Produção de grãos no Rio Grande do Sul, em milhões de toneladas.....	27
Figura 6. Quantidade de soja produzida por mesorregião no período de 1991 a 2014	28
Figura 7. Balanço hídrico na zona das raízes.	29
Figura 8. Localização da bacia hidrográfica do rio Ijuí.	31
Figura 9. Métodos utilizados no SWAP para derivar a evaporação e a transpiração reais.	34
Figura 10. Projeções de temperatura e precipitação anual acumulada para o MCR e regressão linear ao longo do período estudado.	41
Figura 11. Demandas atuais e futuras de água para irrigação ao longo do século para as culturas analisadas.....	45
Figura 12. Volume demandado para as culturas de feijão, milho, trigo e soja em seus respectivos períodos de cultivo.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Variação do valor da produção no cenário B2, em comparação com valores atuais do IBGE, ano base 2006.	25
Tabela 2. Área de plantio para cada tipo de cultura.	37
Tabela 3. Culturas adotadas e parâmetros agronômicos.	38
Tabela 4. Temperatura média anual e precipitação acumulada projetada pelo modelo ETA 40 CRTL para o cenário climático A1B.	39
Tabela 5. Média das demandas futuras de água para irrigação (IWRs) e suas anomalias (Δ_a).	43

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AR	Relatório de Avaliação
EASM	Monção de verão do leste asiático
ENOS	El Niño Oscilação Sul
FARSUL	Federação da Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul
FEE	Fundação de Economia e Estatística
FEPAGRO	Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária
GEE	Gases do Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IWR	Demanda de água para irrigação
MCG	Modelo Climático de Circulação Global
MCR	Modelo Climático de Circulação Regional
PIB	Produto Interno Bruto
RCP	Caminhos Representativos de Concentração
RS	Rio Grande do Sul
SCM	Sistemas Convectivos de Mesoescala
SRES	Relatório Especial sobre cenários de Emissões
SWAP	Modelo Soil Water Atmosphere Plant
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

1. INTRODUÇÃO

Mudança climática, definida como o processo de mudança do clima devido às atividades antrópicas, difere da variabilidade climática, que é o processo de variação do clima condicionados por fatores naturais existentes no planeta e suas interações (TUCCI e BRAGA, 2003).

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), tais 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). Diante disso, sabe-se que as ações humanas interferem nas mudanças climáticas. Contudo, ainda não é possível mensurar a magnitude dessa interferência.

De tempos em tempos o IPCC emite relatórios de grupos de pesquisa com informações atualizadas sobre mudanças climáticas. Conforme o quinto relatório do IPCC (AR5), emitido em 2014, desde o ano de 1750 constata-se um aumento contínuo das concentrações atmosféricas de gases como dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), sendo tal aumento atribuído às atividades humanas. No ano de 2011 as concentrações destes gases do efeito estufa (GEEs) foram de 391 ppm e 1803 ppb, respectivamente, o que representa um acréscimo de 40% e 150% em relação a era pré-industrial (IPCC, 2013). As consequências decorrentes dessas práticas, além do aumento de temperatura, são maior frequência e intensidade de eventos extremos, mudanças na taxa de evaporação e transpiração, alterações nos regimes de chuva, perdas na agricultura, entre outros (MARENGO et. al. 2009).

Além disso, as alterações no regime hidrológico de uma região, tais como o aumento ou a redução da vazão dos rios, podem produzir danos aos ecossistemas, afetar a produção de alimentos, abastecimento de água, navegação e geração de energia (CHRISTENSEN e LETTENMAIER, 2007). Devido a esses fatores, é de extrema importância o estudo destes impactos para a adequada gestão dos recursos hídricos.

Uma das metodologias mais usuais para o estudo de processos climáticos é o uso de modelos hidrológicos associados a projeções do clima obtidas pela simulação de modelos climáticos globais (MCG's) e ou regionais (MCR's). Os MCGs são representações dos processos físicos na atmosfera, no oceano e na superfície da terra, que simulam a resposta do clima global terrestre ao aumento nas concentrações de GEEs. Esses modelos descrevem a atmosfera utilizando um grid tridimensional sobre o planeta (MELLO et al., 2008). Já os MCR's proporcionam uma simulação climática com maior resolução para uma área limitada.

Para aplicação de um dado modelo climático, é necessária a escolha de um cenário futuro sobre o clima. O quarto relatório (AR4) do IPCC (IPCC, 2007) utiliza quatro famílias de cenários (A1, B1, A2 e B2). Essas famílias possuem diferentes características, como quantidade de emissão de carbono, taxa de crescimento populacional, desenvolvimento econômico, mudanças tecnológicas, entre outros (HAMADA et al., 2011).

No quinto relatório (AR5), os cenários são classificados de forma distinta aos do (AR4). Estes são organizados conforme os Caminhos Representativos de Concentração (RCP) o qual são expressos em termos de concentrações de gases do efeito estufa em vez de níveis de emissões (IPCC, 2014).

As projeções dos modelos climáticos globais auxiliam a tomar medidas preventivas e mitigatórias com relação à disponibilidade hídrica e avaliam o grau de influência das mudanças climáticas sobre o ciclo hidrológico, a fim de entender as alterações que possam ocorrer na entrada e saída dos sistemas (precipitação, evapotranspiração, vazão dos rios, entre outros) (TUCCI, 2002).

De acordo com o IPCC, já foi registrado um aumento de temperatura de 0,74°C na média global (IPCC, 2007). Os efeitos já são visíveis no aumento das temperaturas médias do ar e do oceano, no derretimento generalizado da neve e do gelo, e na elevação dos níveis do mar. Dias frios, noites frias e geadas estão se tornando menos frequentes, enquanto as ondas de calor são mais comuns (BANCO MUNDIAL, 2010).

Alterações nos regimes de vazão devido a alterações no clima podem prejudicar ou favorecer países que têm sua economia voltada para a agricultura, como é o caso do Brasil, onde, segundo dados do Ministério da Agricultura, o Produto Interno Bruto (PIB) do agronegócio em 2014 representou entre 22,0% e 23,0% do PIB total da economia brasileira, com cerca de R\$ 1,1 trilhão (MAPA, 2014).

Dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) indicam que no Brasil houve um aumento de 79% no número de dias com tempestades entre os últimos 60 anos em comparação à primeira metade do século 20 (INPE, 2013). Essa mudança nos regimes de precipitação pode acarretar alterações nas vazões dos rios brasileiros, sendo um fator determinístico na disponibilidade hídrica de uma região.

Outro exemplo é a seca de 2010, que atingiu a Amazônia, e segundo Marengo et al. (2009) afetou uma grande área que compreendia o noroeste, centro e sudeste do estado, incluindo partes da Colômbia, Peru e do nordeste da Bolívia. Essa seca provocou graves impactos hidrológicos sobre os níveis de água.

O Rio Grande do Sul, estado com grande produtividade agrícola, também sofre com eventos resultantes dos fenômenos El Niño e La Niña, que provocam mudanças na precipitação, provocando enchentes ou estiagens na região. De acordo com a Fundação de Economia e Estatística (FEE) em 2012, a economia gaúcha recuou 2,1%, fortemente impactada pela estiagem, que prejudicou tanto o desempenho da agricultura (-43,3%) quanto o da indústria de transformação (-5,4%).

Conforme observações de Fochezatto e Grando (2009) a frequência das últimas estiagens no Rio Grande do Sul tem ocorrido, em média, de um a cada dois anos. Quando isso acontece, a produção das lavouras de verão acaba sendo fortemente prejudicada porque a fase de desenvolvimento dessas culturas coincide com o período do ano em que as estiagens são mais frequentes, ou seja, de novembro a março. As culturas mais vulneráveis à estiagem são: soja, fumo, milho e feijão, que representam em média 60% do total do valor da produção das lavouras temporárias no Estado.

Nesse contexto, a bacia hidrográfica do rio Ijuí, pertencente à mesorregião noroeste do RS, é crucial para o desenvolvimento socioeconômico do estado, pois possui sua atividade voltada para o setor primário, predominando culturas não irrigadas, como é o caso da soja, do milho, trigo, entre outros (SEMA, 2007).

Contudo, essa região sofre com os impactos das mudanças climáticas, devido às alterações na disponibilidade de água em períodos de seca ou de excesso de água. De acordo com o site notícias agrícolas, em setembro de 2015 as lavouras de trigo da região de Ijuí (RS) sofreram com as chuvas excessivas ocasionando perdas na produtividade, em torno de 40% da produção.

Além do excesso de chuva, as estiagens são uma das maiores causas de perdas agrícolas no RS. Com base no 10º levantamento da quebra de safra de grãos de verão, divulgado pela Federação da Agricultura do Rio Grande do Sul (Farsul), as perdas em função da seca chegaram a um índice de 38% em maio de 2012, tendo queda na produção de 54% no milho, 45% na soja, 15% no arroz e 17% no fumo, somando uma perda equivalente a mais de seis bilhões de reais (CORREIO DO POVO, 2012).

Diante dessa problemática, é essencial o conhecimento sobre o efeito das mudanças climáticas sobre as variáveis de precipitação, vazão e evapotranspiração, a fim de analisar a sua influência sobre a capacidade hídrica dos rios e assim, determinar a possibilidade de irrigação de culturas normalmente não irrigadas em períodos de seca.

Para avaliar estas questões, pode-se associar as projeções climáticas ao uso de modelos que simulem a demanda hídrica da planta. Um modelo agro-hidrológico extensivamente testado 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*). 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).

Portanto, este trabalho visa fornecer informações à sociedade e aos gestores públicos para propiciar um adequado gerenciamento dos recursos hídricos, tendo em vista as possíveis alterações nos regimes de chuvas e na demanda de água para irrigação.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é quantificar as demandas de água para irrigação, em função de diversos tipos de culturas (soja, milho, trigo e feijão), comparando as demandas futuras com as do período atual, com base em projeções do clima em um cenário futuro (A1B) e utilizando-se o modelo agro-hidrológico SWAP.

1.1.2 Objetivo Específico

- Quantificar a demanda de água para irrigação no cenário atual (1961-1990) e futuro (2011-2100) das culturas na área de contribuição da seção do rio Ijuí.
- Avaliar se os impactos das mudanças climáticas serão positivos ou negativos com relação às demandas de água necessárias para irrigação, comparando um cenário atual e futuro.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Mudanças Climáticas

A United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (apud Barry e Chorley, 2013) define mudança climática como: "*uma alteração no clima que é atribuída direta ou indiretamente à atividade humana, que modifica a composição da atmosfera e que se soma à variabilidade climática natural observada ao longo de escalas temporais comparáveis*". Essa visão enfatiza que as mudanças climáticas são decorrentes de forças antropogênicas, enquanto a variabilidade está mais associada a processos naturais.

Entretanto, apesar da dependência do ser humano em relação às condições da atmosfera, a compreensão do sistema climático e suas interações é ainda parcial, visto que os processos atmosféricos são muito variáveis, sensíveis e de difícil percepção, devido à complexidade das interações entre o Sol, a atmosfera, os oceanos, o gelo, o relevo, as terras emersas, a vegetação e os seres vivos (NUNES, 2002).

Os dois últimos relatórios de avaliação do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) AR4 e AR5 (IPCC 2007, 2013) apontam que as mudanças de temperatura e precipitação estão relacionadas com o aumento dos níveis dos gases do efeito estufa, como dióxido de carbono, metano e óxido de nitrogênio. Esse aumento, principalmente causado pela queima de combustíveis fósseis na atmosfera, está alterando as características do ciclo hidrológico e segundo projeções do IPCC (2007), poderão acarretar impactos, como aumento geral na evaporação, aumento na variabilidade das descargas dos rios junto à elevação da pluviosidade, entre outros.

Conforme a Figura 1, cerca de dois terços da produção mundial de CO₂ corresponde aos setores de eletricidade e calor (42%) e transporte (23%). Isso se dá devido a muitos países ainda produzirem sua energia a partir da combustão de carvão.

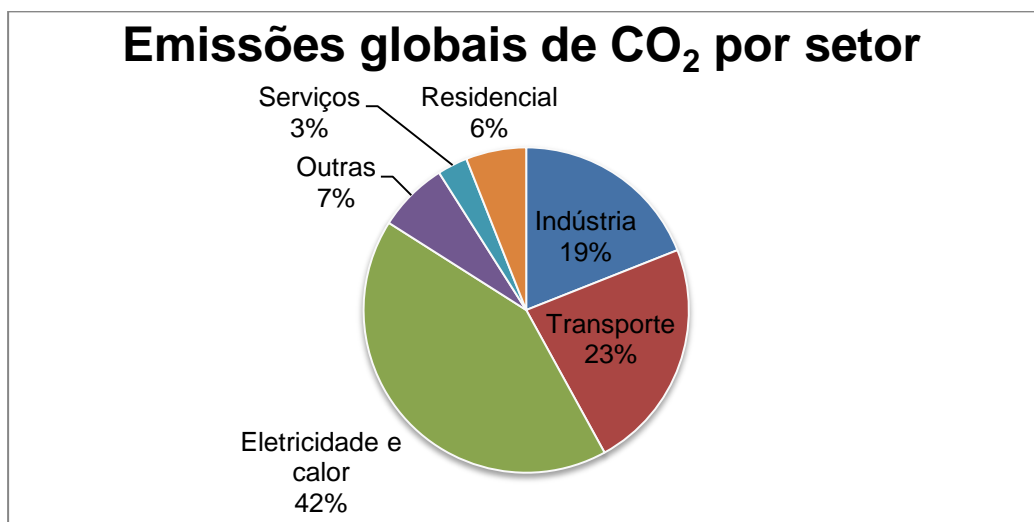


Figura 1. Emissões globais de CO₂ por setor em 2013. Fonte: Adaptado de International Energy Agency, 2015.

Em consequência disso pode haver maiores mudanças climáticas previstas para este século, onde segundo Yoo et al. (2012), incluem o aumento na temperatura média, 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, chuvas intensas e estiagens.

De acordo com Barry e Chorley (2013) a medida mais fundamental do estado climático da Terra é a média global anual da temperatura do ar junto à superfície. A Figura 2 apresenta as anomalias registradas para a temperatura superficial média no ano de 2015 com relação ao período de comparação de 1951-1980. Observa-se que grandes ondas de calor ocorreram principalmente no hemisfério norte e na América do Sul. No Brasil, a temperatura observada para 2015 estava entre 1 e 2°C acima das médias para o período de comparação. Áreas em cinza indicam não haver dados suficientes para calcular anomalias.

Para impedir que a temperatura da Terra se eleve mais em relação ao período pré-industrial, deve haver a implementação de ações de abrangência global. Para tanto, seria necessário que até 2050 as emissões estejam abaixo de 50% dos níveis de 1990 e praticamente zero até 2100 (Banco Mundial, 2010). Na Figura 3 estão apresentadas algumas medidas de mitigação necessárias para evitar um aquecimento superior a 2°C.

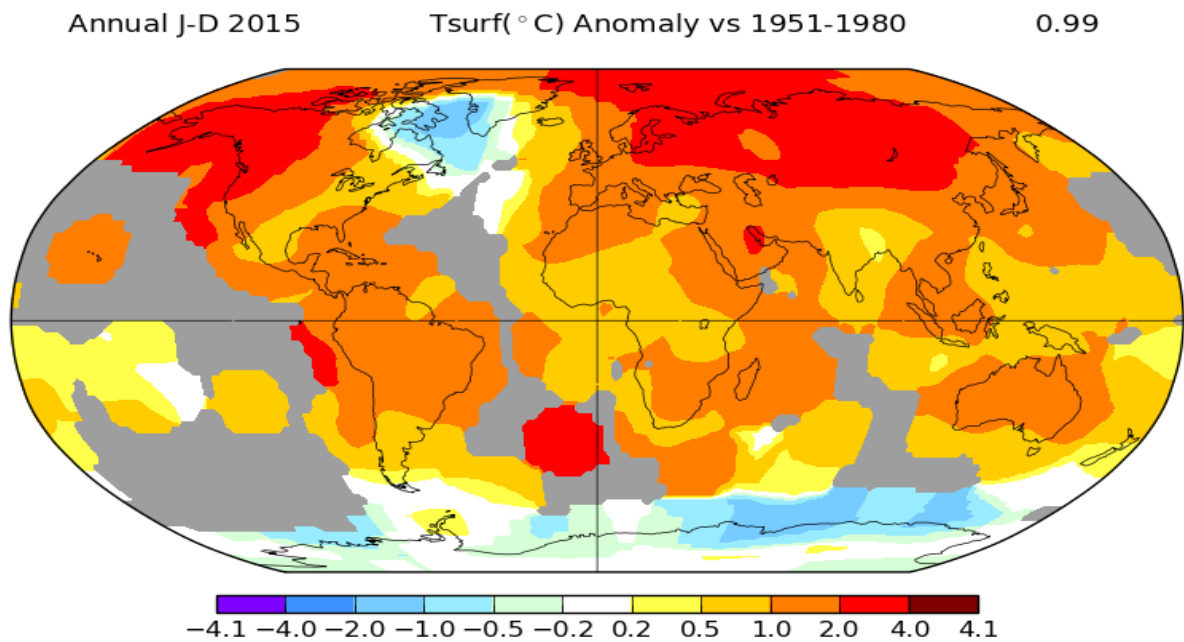


Figura 2. Anomalias das temperaturas médias anuais para 2015 com relação ao período-base 1951-1980 (NASA, GISS, disponível em: <<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>>. Acesso em 28/03/2016).

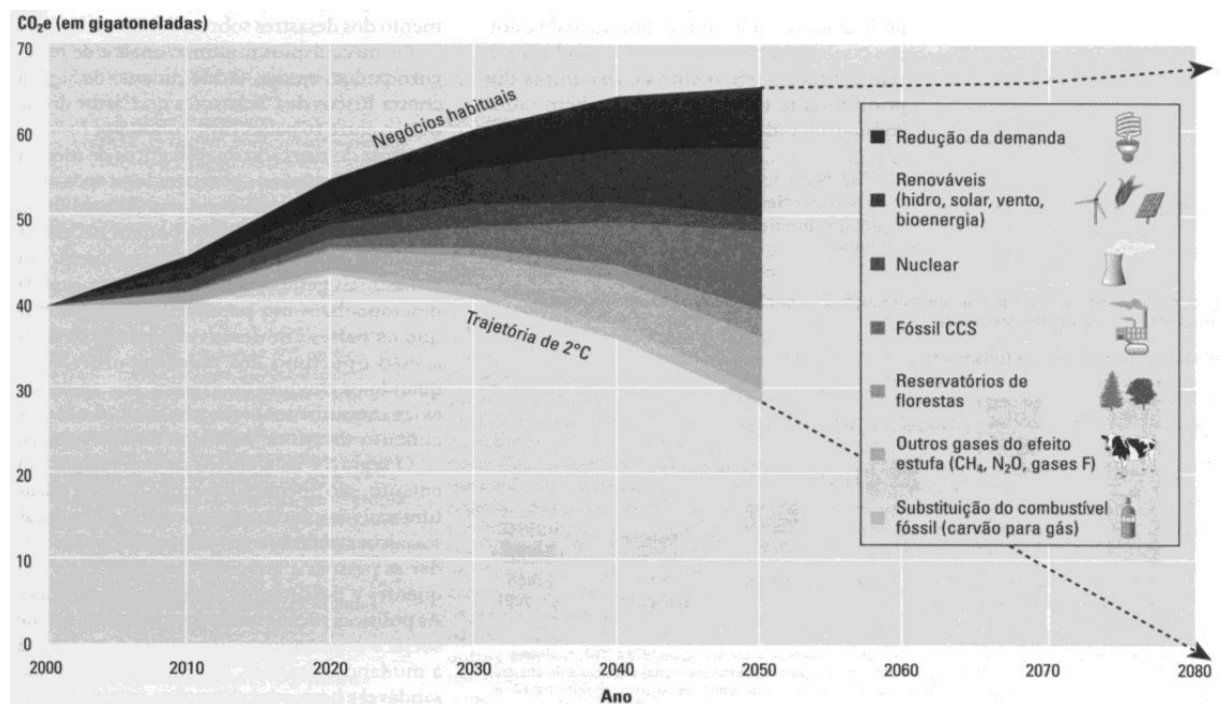


Figura 3. Medidas de mitigação necessárias para trajetória de 2°C. Fonte: Banco Mundial, 2010.

Em virtude da preocupação com o aquecimento global foi criado em 1988 o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Este reúne cientistas de todo o mundo e fornece Relatórios de Avaliação (ARs) que mostram uma visão científica sobre as mudanças do clima e seus potenciais impactos ambientais e sócio econômicos.

Desde sua criação foram emitidos cinco relatórios: o AR1 (1990), o AR2 (1995), o AR3 (2001), o AR4 (2007) e o mais recente AR5 em 2014, com o propósito de contribuir na formulação de políticas públicas e na tomada de decisões pelos governantes.

Estes estudos apresentados pelo IPCC são baseados em modelos climáticos de circulação geral. Segundo Lee e Huang (2014), modelos climáticos são ferramentas avançadas para simular a resposta do sistema climático global devido ao aumento das concentrações dos gases do efeito estufa na atmosfera e nos diferentes cenários climáticos futuros.

Os cenários climáticos utilizados no AR4 são apresentados no *Special Report on Emission Scenarios* (SRES) (IPCC, 2000), e agrupados em diferentes famílias A1, A2, B1 e B2. Estas são baseadas em um conjunto de suposições, que incluem tendências futuras de demanda energética, emissões de gases do efeito estufa, mudanças no uso do solo e aproximações nas leis que regem o comportamento do sistema climático sobre grandes períodos de tempo (HAMADA et al., 2008).

Segundo Hamada et al. (2011), esses cenários podem ser descritos como:

A1- Descreve um mundo com rápido crescimento econômico, baixa taxa de crescimento populacional e rápida introdução de novas e mais eficientes tecnologias. As principais características incluem a convergência entre regiões, o desenvolvimento das capacidades e o aumento das interações culturais e sociais, com importante redução nas diferenças regionais da renda per capita. Considera direções alternativas de mudança tecnológica no sistema de energia. Dentro desta família estão inseridos os cenários A1F1 com ampla utilização dos combustíveis fósseis, A1T sem utilização e o cenário A1B que compreende um equilíbrio entre os anteriores.

A2- Descreve um mundo futuro muito heterogêneo, com preservação das identidades locais e da tradição. Os padrões de fertilidade entre regiões convergem muito lentamente, o que resulta em alto crescimento populacional. O desenvolvimento econômico per capita e a mudança tecnológica são mais fragmentados e mais lentos, comparados às outras famílias de cenários.

B1- Descreve um mundo convergente com baixo crescimento populacional, porém com rápidas mudanças nas estruturas econômicas, com redução na utilização de material e a introdução de tecnologias limpas e eficientes na utilização de recursos. A ênfase é nas soluções globais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental, incluindo a melhoria na equidade, porém sem iniciativas climáticas adicionais.

B2- Descreve um mundo no qual a ênfase está em soluções locais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental. É um mundo com moderado crescimento populacional, níveis intermediários de desenvolvimento econômico e mudanças climáticas menos rápidas e mais diversas do que B1 e o A1. É orientado para a proteção do meio ambiente e a igualdade social, mas com foco nos níveis local e regional.

Já no AR5, o IPCC estabeleceu quatro Caminhos Representativos de Concentração (RCP): RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5. O número associado ao RCP é o valor do fluxo radiativo em Watts/m^2 , o que equivale respectivamente, a um nível de emissão de CO_2 de 490 ppm (partes por milhão), 650 ppm, 850 ppm e 1370 ppm (MOSS et al., 2010).

Neste estudo, foram utilizados dados de projeções climáticas de modelos do AR4 devido aos dados do AR5 não estarem disponíveis. Espera-se que os resultados não apresentem diferenças significativas em relação aos modelos do AR5. De acordo com o IPCC (2014), uma das principais melhorias da nova geração de modelos deste último relatório inclui uma física de oceano melhorada e um acoplamento fisicamente consistente entre a atmosfera e o oceano, tornando desnecessárias as correções de fluxo conhecidos como processo ad hoc. O modelo global HADCM3, aplicado neste trabalho individualmente ou para derivar os dados do modelo regional ETA já não utiliza tal processo de correção (GORDON et al., 2000).

De acordo com Adam (2016) as variáveis atmosféricas utilizadas para alimentar o modelo ETA são: umidade específica do ar, temperatura potencial do ar, pressão atmosférica à superfície terrestre e vento horizontal. Estas variáveis estão

distribuídas em uma grade de malha regular com resolução de 2,5° na latitude por 3,75° na longitude, na horizontal, e 19 níveis na vertical.

Bork (2015) realizou um estudo a fim de detectar mudanças nos padrões de temperatura e de precipitação na região da bacia do rio Taquari-Antas com o uso de diferentes modelos climáticos de circulação geral e o modelo regional ETA. As projeções indicaram um aumento de temperatura média anual de quase 3°C até o final do século, bem como um aumento expressivo na precipitação anual acumulada. Essas alterações podem influenciar positivamente a economia do Estado, com relação à água disponível para a agricultura e geração de energia, contudo pode gerar impactos negativos nas partes mais baixas da bacia, visto a possibilidade de maior número de inundações.

Adam (2011) encontrou resultado semelhante para a temperatura na região da bacia do rio Ibicuí – RS. A estimativa de anomalias previstas pelo conjunto de GCM's analisados para o ano de 2050 apontou, quanto à totalidade dos modelos, para o acréscimo de temperatura. Contudo, com relação às anomalias da variável precipitação há maiores incertezas, principalmente quanto à magnitude dessas variações.

Essas mudanças de temperatura podem interferir nos eventos El Niño Oscilação Sul, gerando impactos significativos no clima e consequentemente, na precipitação e nas vazões dos cursos de água. Wei et al. (2013) analisaram o impacto da monção de verão do leste asiático (EASM) e do El Niño – Oscilação Sul (ENOS) na mudança das vazões do rio Chang Jiang e concluiu que: eventos relativamente fracos de EASM e de La Niña podem induzir aumento nas vazões dos rios; e eventos relativamente fortes de EASM e El Niño podem causar redução das vazões.

Diante dessa perspectiva, é de extrema importância o uso de modelos climáticos para o estudo das variáveis climáticas e suas influências sobre a disponibilidade hídrica, agricultura, geração de energia, entre outros. Entretanto, não há um consenso sobre quão perto os modelos climáticos estão de representar as incertezas associadas à geração de variáveis climáticas em cenários futuros (MELO, 2015).

2.2 Impactos das Mudanças Climáticas sobre os Recursos Hídricos e Agricultura

As alterações no ciclo hidrológico de uma região são relacionadas com diversos fatores, tais como a própria variabilidade do clima, mudanças causadas por fenômenos naturais ou antrópicos, mas também com fatores não climáticos, como alterações na cobertura e uso do solo (SANDERSON et al., 2002). Segundo o IPCC (2013) essas alterações poderão afetar significativamente a disponibilidade e a distribuição temporal das vazões nos rios, ocasionando cheias, secas, danos aos ecossistemas, erosão e deterioração da qualidade das águas.

Nesse contexto, para estimar impactos das mudanças climáticas sobre a bacia hidrográfica torna-se necessário o uso de modelos hidrológicos que simulem os processos envolvidos e também as características físicas da bacia (ADAM, 2011).

O Brasil, país com grande diversidade climática, tem sofrido com as mudanças de temperatura e precipitação. De acordo com a Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil, desenvolvido pela Agência Nacional de Águas, as principais áreas afetadas pela seca de 2012-2014 são a região nordeste e a região centro-oeste do país. Essas áreas possuem grande vulnerabilidade e complexidade de abastecimento de água, agravadas principalmente pelo regime de chuvas ocorrido em 2012, que apresentou comportamento pluviométrico bem abaixo da média em diferentes regiões (ANA, 2015).

Na Figura 4 é possível a identificação de trechos críticos em corpos d'água federais (16% do total). Essas áreas necessitam de ações imediatas de gestão de recursos hídricos por já estarem em conflito, seja pela concorrência entre usos ou pela baixa oferta de água. Além disso, essas bacias podem se tornar ainda mais críticas em períodos de eventos extremos com acentuada escassez de chuvas.

Esse desequilíbrio nos regimes de precipitação também pode afetar a produção agrícola do país. Conforme Melo (2015), maiores temperaturas e maior variabilidade temporal da precipitação podem causar maiores demandas de água para irrigação. Este talvez seja o maior desafio a ser enfrentado pela agricultura ao longo deste século, uma vez que 80% das áreas cultivadas no mundo não são irrigadas (Bates et al., 2008), ou seja, dependem exclusivamente da água que

precipita. Desta forma, se não houver maior investimento em infraestrutura e inovação tecnológica, o Brasil sofrerá com perdas na produtividade devido às mudanças do clima.

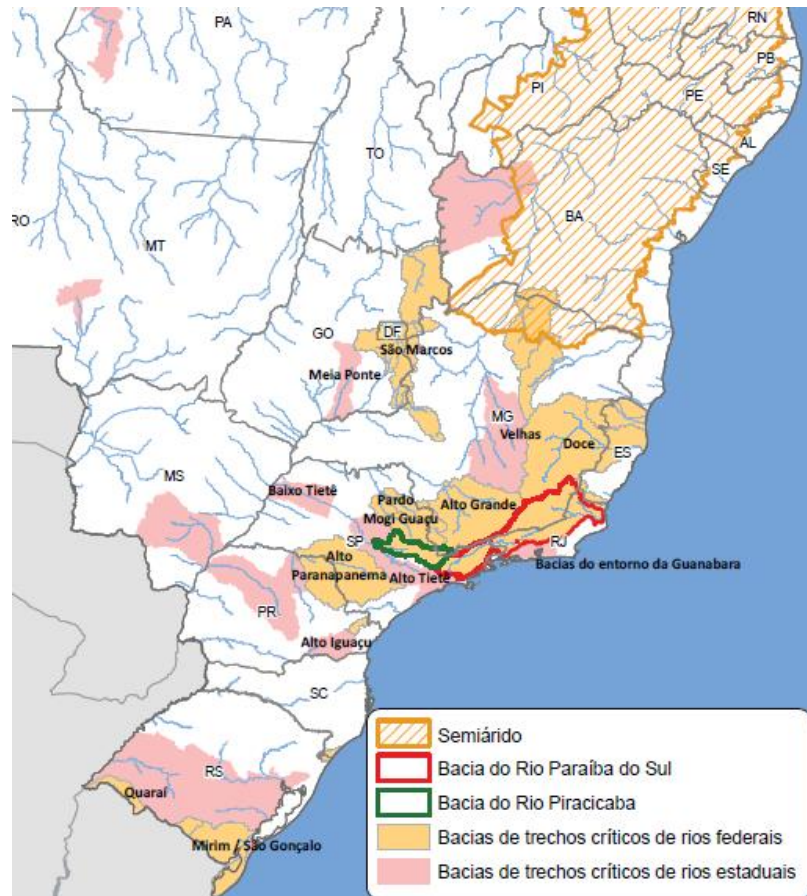


Figura 4. Bacias de rios de domínio da União e dos Estados com trechos críticos identificados. Fonte: ANA, 2015.

Um estudo realizado por Yoo et al. (2012), a partir de modelos climáticos, demonstrou que as demandas de água para irrigação no futuro serão menores do que 3% na Coreia do Sul com relação ao presente. Já na Califórnia foi estimado por Mehta et al. (2013), um aumento de 26-32%, devido a um clima mais quente e mais seco nesta região, especialmente no final do século. Devido a essas características, torna-se necessário o conhecimento da relação entre disponibilidade e demanda de água, a fim de auxiliar no adequado gerenciamento dos recursos hídricos.

Segundo Marengo et al. (2009) este aumento da temperatura também pode mudar a geografia de produção de diversas culturas brasileiras, tornando algumas áreas inaptas para cultivo.

Nesse sentido, um estudo desenvolvido pelo Ministério da Agricultura e do Desenvolvimento Agrário, com base na tecnologia de Zoneamento de Riscos Climáticos, buscou avaliar os impactos das mudanças climáticas nas culturas. Foram adotados os cenários A2 e B2 na simulação de cenários agrícolas do Brasil para os anos de 2010 (próxima ao atual), 2020, 2050 e 2070 (ASSAD e PINTO, 2008).

Os resultados obtidos mostraram uma redução de área favorável para a cultura do milho em torno de 12% em 2020, para os dois cenários devido ao aumento de temperatura. Isso poderia provocar uma queda de 1,2 bilhões no valor da produção. Com relação à cultura de soja pode haver uma perda de 3,9 bilhões a 4,3 bilhões em 2020, sendo a cultura mais atingida.

Tabela 1. Variação do valor da produção no cenário B2, em comparação com valores atuais do IBGE, ano base 2006.

Culturas	Produção Atual (toneladas)	Valor da Produção (R\$ 1.000)	Impacto na Produção Modelo Precip B2, 2020 (R\$ 1.000)	Impacto na Produção Modelo Precip B2, 2050 (R\$ 1.000)	Impacto na Produção Modelo Precip B2, 2070 (R\$ 1.000)
Algodão	2.898.721	2.831.274	-312.572	-401.191	-444.793
Arroz	11.526.685	4.305.559	-362.047	-539.486	-616.125
Café	2.573.368	9.310.493	-628.458	-1.705.682	-2.569.696
Cana	457.245.516	16.969.188	29.005.433	24.905.677	24.337.209
Feijão	3.457.744	3.557.632	-154.757	-356.119	-453.598
Girassol	-	-	-	-	-
Mandioca	26.639.013	4.373.156	-109.766	318.803	726.381
Milho	42.661.677	9.955.266	-1.211.555	-1.506.231	-1.732.216
Soja	52.454.640	18.470.711	-3.993.367	-5.478.412	-6.438.890

Fonte: Assad e Pinto, 2008.

Outros impactos relacionados às mudanças climáticas e extremamente prejudiciais à agricultura são a maior ocorrência de eventos extremos. As projeções apresentadas pelo Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas indicam alta probabilidade de aumento de secas e estiagens prolongadas principalmente nos biomas da Amazônia, Cerrado e Caatinga. O relatório também afirma que parte do litoral Sul e Sudeste do país sofrerão com maior frequência os efeitos de ciclones extratropicais contribuindo para fenômenos naturais como ondas altas, ventos fortes e precipitações intensas (PBMC, 2013).

Segundo Marengo et al. (2009) a seca que vem afetando o Sul do Brasil e o Nordeste da Argentina desde 2008 afetou a produção de soja e grãos na Argentina e, junto com a queda nos preços internacionais gerou uma previsão de redução de cerca de 30% das exportações, e cerca de 8 a 9 bilhões de dólares em 2009.

Outro fator relevante é a relação da temperatura com a ocorrência de doenças, pragas e plantas invasoras. Conforme Hamada et al. (2011) o ambiente pode influenciar o crescimento e a suscetibilidade da planta hospedeira, a multiplicação, a disseminação, a sobrevivência e as atividades do patógeno, assim como a interação entre a planta hospedeira e o patógeno. Logo, a análise desses efeitos é fundamental para a adoção de medidas de adaptação, com a finalidade de evitar prejuízos futuros (GHINI, 2005).

2.3 Histórico Climático sobre o Rio Ijuí e Região

A bacia do rio Ijuí está localizada na região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Essa região sofre influência de sistemas atmosféricos, como frentes frias e sistemas convectivos de mesoescala (SCM) causadores de eventos extremos e desastres naturais. Além disto, os fenômenos climáticos *El Niño* e *La Niña* também determinam a ocorrência de inundações e grandes secas na região Sul do Brasil (NEDEL et al., 2010).

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 (MELO, 2015). As áreas plantadas de soja e milho na região noroeste são de 2.892.420 ha e 464.958 ha, respectivamente (FEE, 2014). Entretanto, mudanças no clima podem provocar redução na produtividade, como a seca ocorrida em 2005 e 2012, que causou queda na produção de grãos no RS (Figura 5).



Figura 5. Produção de grãos no Rio Grande do Sul, em milhões de toneladas. Fonte: FARSUL, 2012.

Tais efeitos estão relacionados com as condições climáticas da região nesse período. Em ambos os anos foram registrados redução dos índices pluviométricos, resultando em grande escassez hídrica e consequentemente perdas no cultivo de culturas não irrigadas. Segundo dados divulgados pela FEPAGRO (2012) houve grandes anomalias observadas em diferentes cidades no Estado do Rio Grande do Sul. A cidade de Cruz Alta, a 150 km da área de estudo, apresentou um dos menores índices pluviométricos (311 mm sendo a normal de 865 mm) no período de novembro/2011 a maio/2012.

Para demonstrar a grande importância da região noroeste para produção de grãos, está apresentada na Figura 6 a produção de soja (em toneladas) para todas as regiões do Estado durante o período de 1991 a 2014. Em destaque aparece a região Noroeste como maior produtora dessa cultura. Também cabe salientar o ano de 2013 que foi marcado pela recuperação das perdas sofridas pela seca tendo um aumento de 54,2 % em comparação a 2012.

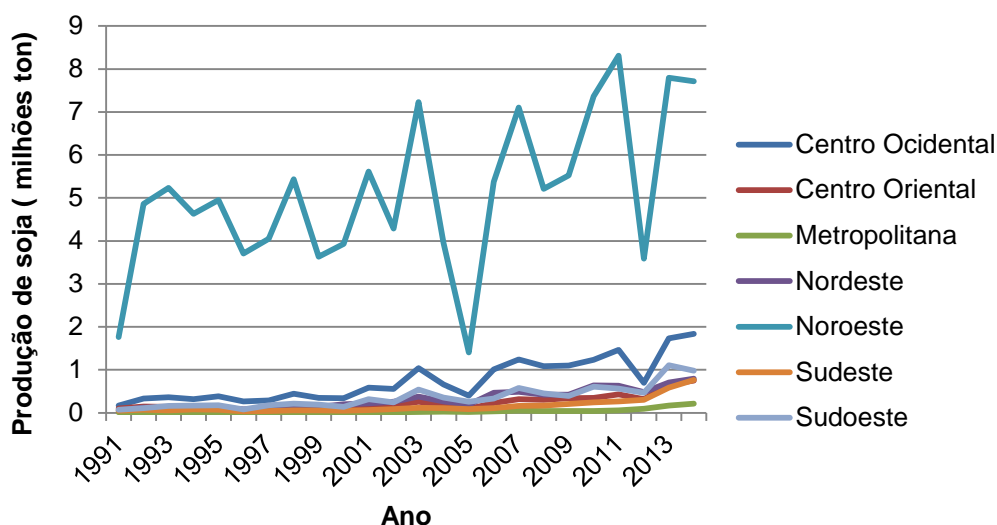


Figura 6. Quantidade de soja produzida por mesorregião no período de 1991 a 2014. Fonte: FEE, 2014.

Dessa forma, há uma preocupação com os eventos climáticos futuros sobre o cultivo agrícola, por afetarem diretamente o desenvolvimento das plantas e consequentemente a economia do Estado. Logo, o estudo da influência das possíveis mudanças climáticas sobre a agricultura torna-se relevante, a fim de determinar a demanda de água necessária para um bom rendimento e qualidade final dos grãos.

2.4 Modelo Swap

Entre os fatores do ambiente que afetam o crescimento vegetal e a produtividade agrícola, a disponibilidade hídrica é o mais importante na maioria das regiões, pois define o grau de aptidão climática das regiões às culturas (COELHO FILHO et al. 2009).

Segundo Melo (2015) o movimento de água no solo determina quanto de água estará disponível para a planta ou quanto deverá ser repostado pela chuva ou irrigação. Dessa forma, o estudo do fluxo e armazenamento de água no solo (em condições úmidas ou secas) torna-se necessário para quantificação dos recursos hídricos na agricultura.

O modelo SWAP é bastante utilizado para simulação das demandas futuras de água para irrigação. Em sua versão mais recente, este modelo unidimensional simula os fluxos de água e calor, transporte de solutos, desenvolvimento das

culturas e a interação com a água superficial, tendo como base os conceitos e técnicas atuais de modelagem e simulação (VAN DAM, 2000).

O balanço de água no perfil do solo é determinado pela solução numérica da equação de Richards (1931) na forma:

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

onde θ ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) é a umidade volumétrica do solo associada a um determinado potencial matricial ψ (cm); $K(\psi)$ é a condutividade hidráulica do solo (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 (dia^{-1}). Ao resolver essa equação, o modelo determina um balanço hídrico nas zonas das raízes utilizado de referência para todos os demais módulos (Figura 7).

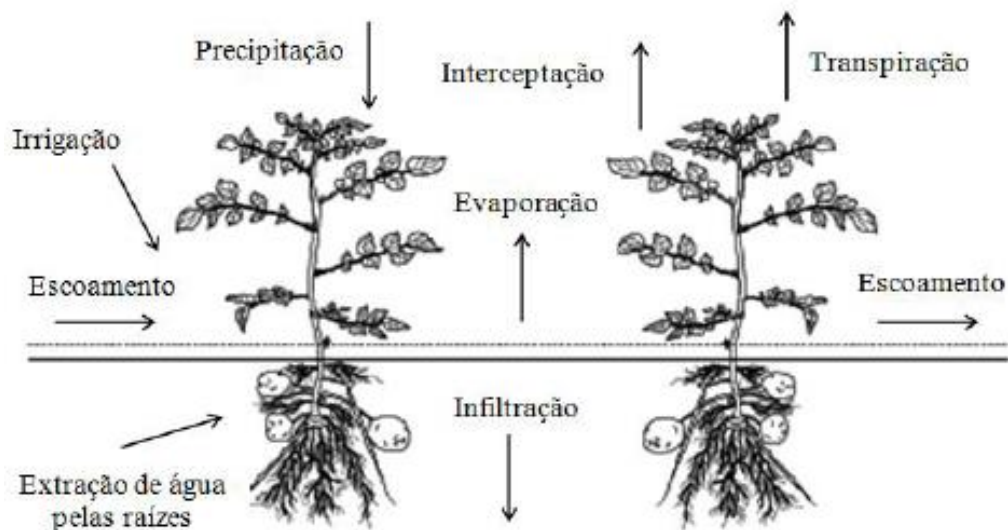


Figura 7. Balanço hídrico na zona das raízes. Fonte: Adaptado Kroes et al. (2008).

Segundo Melo (2013) para a aplicação do modelo SWAP quatro conjuntos de dados devem ser informados:

- Dados gerais: incluem informações referentes ao período de simulação e de cultivo, tipo de culturas, regimes de irrigação, condições iniciais e de contorno do perfil do solo, características físico-hídricas do solo, etc.;

- Dados meteorológicos: incluem dados diários de precipitação, umidade do ar, temperatura máxima e mínima, radiação solar, velocidade do vento e evapotranspiração de referência (opcional caso sejam fornecidas as informações anteriores para calculá-la);
- Dados da cultura: duração do período de cultivo, parâmetros das culturas por estágio de desenvolvimento da planta, critérios de irrigação, estresse hídrico, parâmetros para calcular a interceptação, densidade das raízes, etc.;
- Dados de drenagem: parâmetros para os modelos possíveis de serem utilizados, características dos drenos, etc.

A partir da entrada dos dados mencionados o modelo calcula a demanda de água para cada tipo de cultura isoladamente.

3. METODOLOGIA

3.1 Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo compreende uma porção de área da bacia hidrográfica do rio Ijuí, referente apenas à área de contribuição à seção do rio indicado na Figura 8. Esta bacia localiza-se na região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul e possui área de drenagem de 10.649,13 Km², inserida entre as coordenadas 27°45'S e 26°15'S de latitude e 53°15'W e 56°45'W de longitude. Além disso, o rio Ijuí é um dos principais afluentes da margem esquerda da bacia do rio Uruguai (Figura 8).

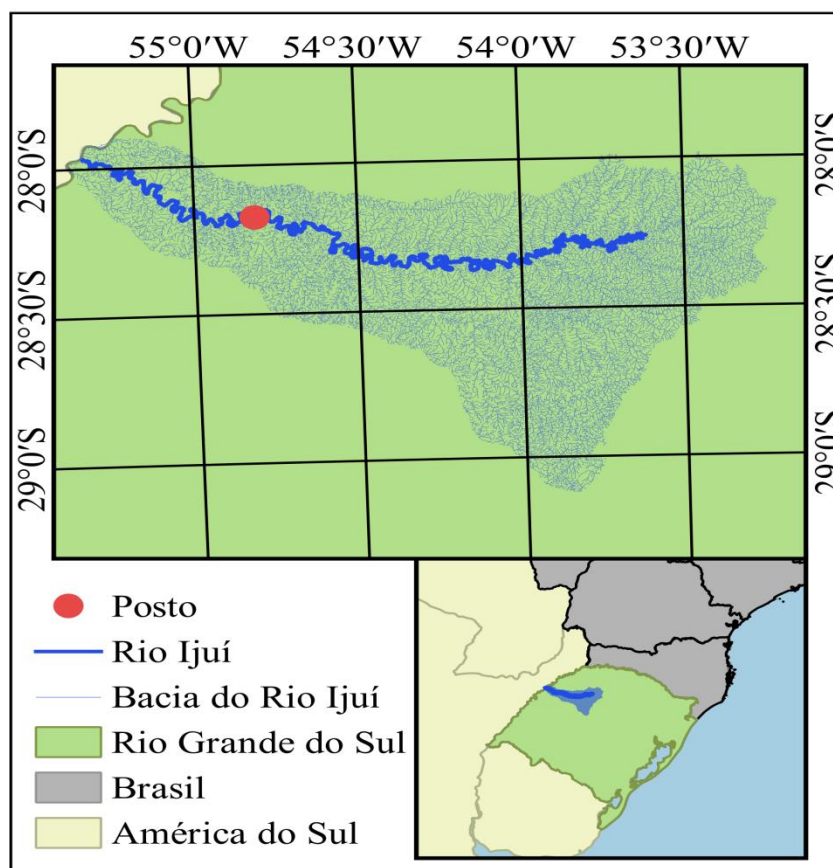


Figura 8. Localização da bacia hidrográfica do rio Ijuí.

O clima da região, segundo Beltrame (2000), está dentro da classificação de Köppen, mesotérmico brando superúmido sem seca (Cfa), com média das temperaturas máximas de 32°C e mínima de 8°C. De acordo com Rossato (2011), a temperatura média anual oscila entre 17° e 20°C e a precipitação média anual varia entre 1.700 mm e 1.800 mm, entre 100 e 120 dias de chuva por ano, em média.

O uso do solo é essencialmente agrícola com a prática de cultivo direto, sendo as culturas de soja, milho e trigo as mais comuns (MELO, 2015). Durante o período de primavera-verão é realizado o plantio de feijão, soja e milho e durante o inverno diversifica-se entre os proprietários o cultivo de trigo e aveia.

Por serem culturas não irrigadas, há certa preocupação sobre as condições meteorológicas que ocorrerão durante o desenvolvimento da planta, caso estas afetem negativamente o regime de precipitação. Diante disso, torna-se importante o estudo das mudanças climáticas sobre a região a fim de evitar perdas futuras de produtividade, e consequentemente prejuízos para a economia do Estado.

3.2 Dados Meteorológicos

Os dados de entrada do modelo SWAP, utilizado para quantificação da demanda de água da planta, foram obtidos por meio do modelo climático regional ETA 40 CTRL, em 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”, desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (MELO, 2013).

Este projeto teve como objetivo 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. Foram determinadas demandas hídricas futuras para o abastecimento urbano e rural, industrial e irrigação a fim de obter quais seriam as vazões remanescentes nos rios para utilização no setor energético (MELO, 2013).

Os conjuntos de informações meteorológicas utilizadas no modelo SWAP são referentes às séries temporais diárias das seguintes variáveis: precipitação (P - mm), pressão de vapor do ar (U - kPa), temperaturas mínima e máxima (T_{min} e T_{max} - °C), velocidade do vento (V - m/s) e radiação solar (R - KJ/m²). Estas variáveis são utilizadas para calcular a evapotranspiração de referência (ET_{ref}).

O modelo regional ETA é descendente do modelo HIBU (Hydrometeorological Institute and Belgrade University) previamente desenvolvido por Mesinger e Janjic (1974). Trata-se de um modelo regional que acopla o modelo HADCM3 (global) como condição de contorno lateral para simulações em mesoescala (BLACK, 1994).

No Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), o ETA gera operacionalmente previsões de tempo, previsões sazonais (CHOU et al., 2005), além de projeções de cenários de mudanças climáticas (CHOU et al., 2011 e MARENGO et al., 2012), em diferentes resoluções horizontais. A utilização destes modelos, em conjunto com os GCMs, possibilita o detalhamento dos processos climáticos a nível local, detectando as variações e particularidades de uma determinada região, o que melhora a compreensão de impactos em pequenas bacias (Marengo et al., 2009; 2012).

Além disso, este modelo faz uso de algumas simplificações, representadas por diferentes parametrizações. O uso de vários conjuntos de parâmetros resulta em uma saída diferente em cada simulação, representando a sensibilidade dos modelos aos parâmetros. Dessa forma, são gerados 4 membros de perturbação do modelo global (sem perturbação - CNTRL; baixa sensibilidade - LOW; média sensibilidade - MID; alta sensibilidade - HIGH), que representam a incerteza das condições de contorno. A resolução horizontal considerada foi de 40 km.

O ponto apresentado na Figura 8 indica a localização (28°18'O de latitude e 54°83'S de longitude) para qual foram projetadas as variáveis meteorológicas referentes ao período atual (1961-1990) e futuro (2011-2100). O período futuro foi dividido em três períodos menores: 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.

3.3 Aplicação do Modelo SWAP

Para as simulações das demandas de água futuras para irrigação escolheu-se o modelo SWAP. A sequência de etapas está esquematizada na Figura 9.

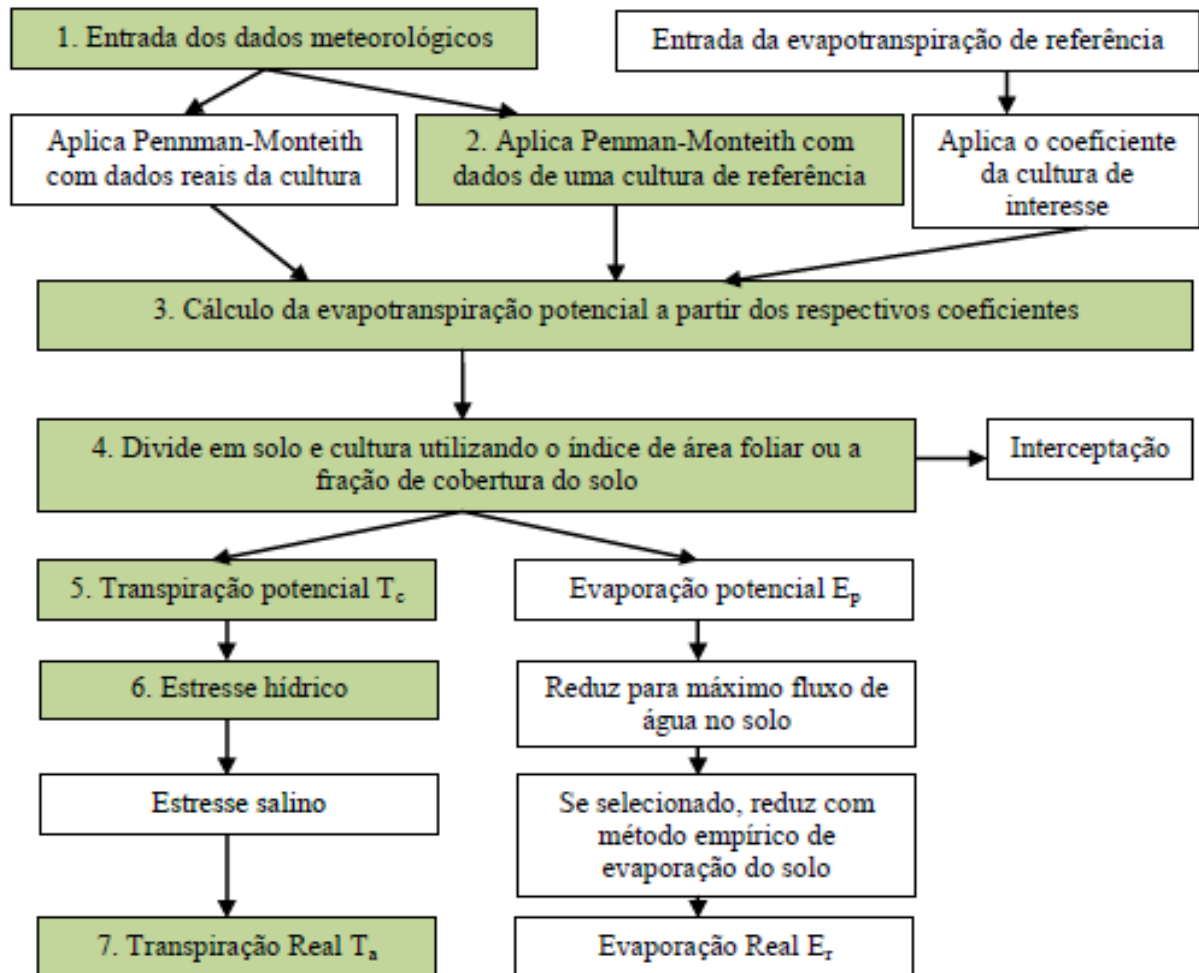


Figura 9. Métodos utilizados no SWAP para derivar a evaporação e a transpiração reais. Fonte: Adaptado Kroes et al. 2008.

Como as culturas agrícolas adotadas nesse estudo não são irrigadas, assumiu-se que toda a água requerida pela planta será suprida, logo:

$$IWR = T_c - T_a \quad (2)$$

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 possui nenhuma limitação hídrica e T_a é a transpiração real (cm). Portanto, qualquer valor de T_a menor que T_c significa que a planta sofrerá um déficit hídrico e necessitará ser irrigada.

Inicialmente, o modelo SWAP calcula a evapotranspiração para uma cultura de referência baseada na equação de Penman-Monteith, assumindo altura da planta de 0,12 m, resistência fixa da superfície 70 s m^{-1} e albedo de 0,23. O cálculo é dado por:

$$ET_{ref} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

onde ET_{ref} é a taxa de evapotranspiração de referência (mm d^{-1}), Δ 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), γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), u_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}) e T é a temperatura média diária do ar a 2 m de altura ($^\circ\text{C}$).

A partir da ET_{ref} o modelo calcula a taxa de evapotranspiração para um respectivo tipo de cultivo (ET_c), pelo uso do coeficiente da cultura (κ_c). Este coeficiente varia em função do estágio de desenvolvimento da cultura.

$$ET_c = \kappa_c \cdot ET_{ref} \quad (4)$$

Em sequência, os valores de transpiração potencial (T_c) da cultura e a evaporação do solo (E_p) são separados, utilizando-se o índice de área foliar (LAI), o qual também varia ao longo do período de desenvolvimento da cultura. A evaporação potencial é então calculada por:

$$E_p = E_{p0}(1 - W_{frac})e^{-\kappa_{gr}LAI} \quad (5)$$

$$W_{frac} = \frac{P_i}{ET_{w0}} \quad (6)$$

onde W_{frac} (-) é a fração do dia em que a cultura está úmida, P_i (cm d^{-1}) é a taxa de precipitação interceptada diariamente, ET_{w0} (cm d^{-1}) é a taxa de evapotranspiração potencial para a cultura úmida, E_{p0} (cm d^{-1}) é a taxa de evaporação de um solo úmido exposto e κ_{gr} (-) é o coeficiente de extinção para a radiação solar. Da equação 5, o modelo calcula T_c pela diferença:

$$T_c = ET_c(1 - W_{frac}) - E_p \quad (7)$$

onde ET_c (cm d^{-1}) é a taxa de evapotranspiração total em períodos com cultura seca. A transpiração potencial (T_c) é igual à taxa máxima de extração de água pelas raízes da planta (S_c), quando integrada ao longo de toda a profundidade das raízes. Partindo do valor de transpiração potencial calculada pelo SWAP, calcula-se a taxa potencial de extração de água pelas raízes em função da profundidade, dada por Kroes et al.(2008):

$$S_c(z) = \frac{\ell_{root}(z)}{\int_{-D_{root}}^0 \ell_{root}(z) dz} T_c \quad (8)$$

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.

Após o cálculo da taxa de transpiração potencial $S_c(z)$ o SWAP calcula a taxa de transpiração real $S_a(z)$ considerando alguns efeitos de estresse hídrico sobre a cultura. Logo o valor potencial $S_c(z)$ é reduzido ao valor real $S_a(z)$ por:

$$S_a(z) = \beta \cdot S_c(z) \quad (9)$$

onde β é o fator de estresse hídrico em condições secas.

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

$$T_a = \int_{D_{root}}^0 S_a(z) dz \quad (10)$$

A partir desses dados, o valor de demanda de água futura (IWR) é determinado pela equação 1. Em sequência, calcula-se a vazão de irrigação necessária para as áreas de cultivo de cada cultura, por meio da equação:

$$Q_i = IWR_i \cdot A_i \quad (11)$$

onde Q_i (m^3/ano) é a vazão a ser extraída do rio para irrigar a cultura i , IWR (m) é a demanda de água para irrigação da cultura i e A_i (m^2) é a área plantada da cultura i . Cabe lembrar que o ano representa apenas o período em que a cultura foi cultivada.

A partir destes resultados, será avaliado o impacto das mudanças climáticas sobre a demanda de água para irrigação comparando um cenário atual (1961-1990) e futuro (2025s, 2055s, 2085s).

3.4 Dados agronômicos

Na Tabela 2 estão apresentadas as culturas adotadas e suas respectivas áreas de cultivo. A escolha destas culturas se deve, principalmente, ao fato de apresentarem maior área de plantio com relação às outras cultivadas na região. O período de simulação foi de 01-jan-1961 a 30-nov-1990 (período base) e 01-jan-2011 a 30-nov-2099 (períodos futuros).

Tabela 2. Área de plantio para cada tipo de cultura.

Cultura	Área (ha)
Feijão	359,9
Milho	5285,9
Soja	14864,5
Trigo	2865,2

Os parâmetros agronômicos necessários para simulação com o modelo SWAP estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Culturas adotadas e parâmetros agronômicos.

		Feijão	Milho	Soja	Trigo
Período de cultivo*		02/out- 25/dez	19/out- 02/mar	16/nov- 22/mar	17/mai- 16/set
Tempo de desenvolvimento (dias)		95	128	140	148
Estádios de desenvolvimento (dias)	Inicial	20	18	20	18
	Desenv.	25	35	35	32
	Médio	30	35	60	48
	Final	20	40	25	50
Profundidade máxima das raízes (cm)		80	140	100	100
Coeficiente da cultura (kc) como função dos estádios de desenvolvimento	Inicial	0,35	0,34	0,40	0,42
	Desenv.	0,65	0,70	0,90	0,82
	Médio	0,90	0,99	1,21	0,93
	Final	0,80	0,61	1,09	0,53
Profundidade das raízes (z) como função dos estádios de desenvolvimento (m)	Inicial	0,1	0,1	0,1	0,3
	Desenv.	0,3	0,8	0,5	0,3
	Médio	0,8	1,4	1,0	1,0
	Final	0,8	1,4	1,0	1,0
Índice de área foliar (LAI) como função dos estágios de desenvolvimento	Inicial	0,1	0,1	0,1	0,1
	Desenv.	1,5	2,5	3,0	1,7
	Médio	4,0	4,8	7,0	4,7
	Final	2,0	2,0	1,5	1,7

* A duração total do período de cultivo foi dada pela soma de todos os estádios de desenvolvimento da cultura. Entretanto, adotou-se a metade dos dias de estágio de desenvolvimento final por considerar-se que apenas neste período a planta consome água.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análises das projeções de temperatura e precipitação

Na Tabela 4 estão apresentadas a média de temperatura e precipitação anual acumulada e suas anomalias previstas ao longo do século XXI para o modelo climático ETA 40 CTRL. A anomalia refere-se à diferença entre a variável em um período futuro e o seu valor no período base ou de comparação. Os períodos futuros foram representados pelos anos centrais de cada um (2025s, 2055s e 2085s).

Tabela 4. Temperatura média anual e precipitação acumulada projetada pelo modelo ETA 40 CTRL para o cenário climático A1B.

Período	Temperatura Média (°C)	Anomalia de Temperatura (°C)	Precipitação Média Acumulada (mm)	Anomalia de Precipitação (mm)
Base	17,6	-	1866	-
2025s	20,9	3,3	1912	47
2055s	21,9	4,2	2053	187
2085s	22,6	5,0	2181	316

As projeções de temperatura apresentaram aumento nos três períodos projetados (2025s, 2055s e 2085s), reafirmando a perspectiva dos padrões de temperatura futuros. Segundo projeções do IPCC a previsão é de que a temperatura global deverá aumentar, até o final do século, entre extremos de 1,2°C e 6,4°C, tendo a média de 1961-1990 como referência (IPCC, 2007). Neste estudo foram encontradas anomalias positivas de temperatura, tendo aumento em torno de 5°C para o final do século. Essas mudanças, aliadas ao processo de uso e ocupação dos solos, têm sido consideradas como as principais causas de alterações temporais da precipitação e da vazão (KLIMENT et al., 2011).

Além disso, segundo Nobre (2001), esse aumento provocaria a intensificação da evaporação, o que alteraria o balanço da vegetação natural e das culturas agrícolas. Pellegrino et al. (2007) simularam cenários de aumento de temperatura de 1°C, 3°C e 5,8°C associados ao acréscimo de até 15% na precipitação. Os autores observaram um aumento na área inapta para o plantio de soja no Estado do Rio Grande do Sul à medida que a temperatura se eleva. Nesse sentido, o

aquecimento global poderá alterar as áreas aptas para plantio além de aumentar o déficit hídrico da planta, provocando aumento de áreas com alto risco climático.

Os períodos de 2025s e 2055s demonstraram anomalias de temperatura de 3,3°C e 4,2°C, respectivamente. Melo et al. (2014) utilizaram cinco MCGs do AR4 e também projeções do modelo regional ETA (BLACK, 1994) para a região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Os resultados indicaram aumento de temperatura superior a 3°C até o fim do século, e um acréscimo significativo de precipitação, fornecidos principalmente pelos MCRs. As diferenças de ambos os resultados pode ser consequência do estudo de Melo et al. (2014) ter levado em consideração a média de sete localizações (calculadas a partir da média de 10 projeções climáticas) enquanto para este estudo adotou-se apenas uma localização e um modelo climático, tendo assim, maiores incertezas.

Com relação à precipitação, a anomalia para o período de 2025s apresentou menor flutuação do que os períodos subsequentes. Espera-se um maior aumento dos índices pluviométricos entre os anos de 2055s e 2085s, sendo a maior anomalia esperada para o final do século. Este aumento de precipitação apresenta impacto relativo diferenciado sobre a vazão de uma bacia hidrográfica (TUCCI, 2002), sendo um fator determinante na ocorrência de inundações, alagamentos e da disponibilidade de água para abastecimento público e irrigação.

Adam (2016) simulou a variação da precipitação média anual para a região da bacia hidrográfica do rio Uruguai, a partir de vários modelos climáticos globais e regionais em diferentes períodos de tempo (1961-1990, 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100). Os resultados encontrados para todas as versões do modelo regional preveem que a precipitação deverá aumentar, chegando a valores de anomalias maiores que 40%, em geral, crescendo com o tempo, ao longo do século XXI. Tais resultados são semelhantes aos encontrados neste estudo, porém com uma menor faixa de incertezas devido à adoção de mais de um modelo climático.

Os gráficos apresentados na Figura 10 referem-se às projeções do período atual e futuro de temperatura média anual (°C) e precipitação anual acumulada (mm). A reta representa a linha de tendência da regressão linear ajustada.

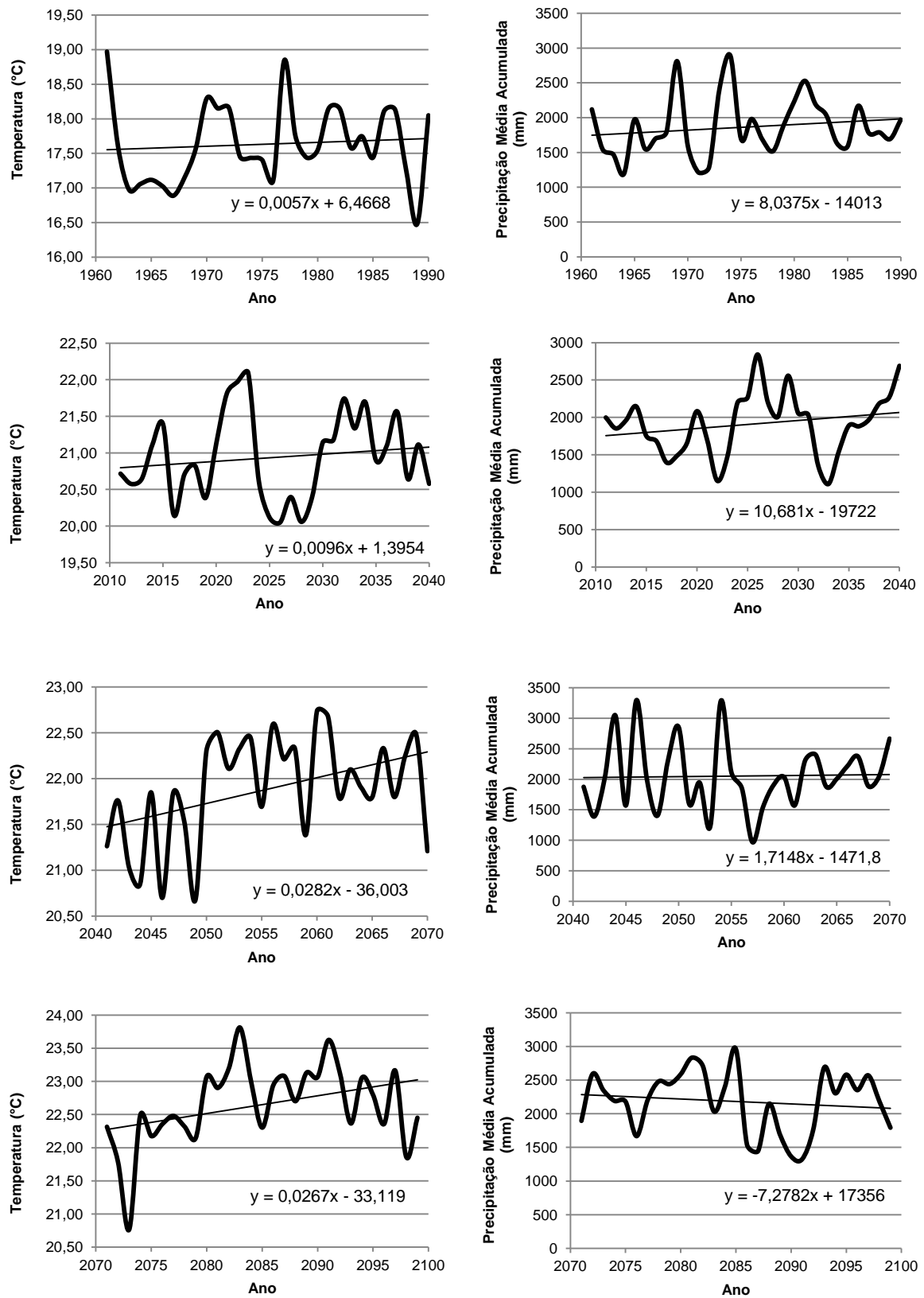


Figura 10. Projeções de temperatura e precipitação anual acumulada para o MCR e regressão linear ao longo do período estudado.

Observa-se que os períodos de 2055s e 2085s indicaram maior aumento de tendência para temperatura ($0,85^{\circ}\text{C}$ e $0,8^{\circ}\text{C}$), respectivamente quando comparados ao período de 2025s ($0,3^{\circ}\text{C}$). Além disso, demonstraram um clima mais quente em relação ao atual, com temperaturas mais abruptas a partir da metade de cada período.

Segundo Marengo et al. (2009), o aumento das temperaturas e do consequente teor de vapor de água na atmosfera deverá aumentar o índice de doenças em plantas agrícolas por criar melhores condições da formação de orvalho nas folhas e de conforto térmico para os fungos. Desta forma, as alterações previstas no clima poderão modificar o atual cenário da agricultura do Estado, podendo impactar de forma positiva ou negativa cada tipo de cultura.

Entretanto, não se sabe com que precisão os modelos climáticos podem representar o clima futuro, pois apresentam dificuldades na representação de certas variáveis climáticas naturais e por se tratar de um sistema complexo, onde há interação de fenômenos diversos, pode apresentar certas incertezas. Tais incertezas inerentes aos modelos podem ser atribuídas a diferentes discretizações, parametrizações e modelos de ciclo do carbono (NKOMOZEPI e CHUNG, 2012).

Quanto às projeções de precipitação, o período de 2025s apresentou distribuição heterogênea com destaque para três intervalos: 2010-2015 com precipitações próximas à média (1912 mm), 2024-2031 com picos maiores de 2000 mm e de 2032-2037 com redução de chuva. Já os períodos de 2055s e 2085s mostraram maior acréscimo de precipitação média acumulada quando comparados ao período atual. Percebe-se que a maioria dos dados permaneceram próximos a 2000 mm tendo o período de 2085s poucos picos abaixo desse valor.

Os excessos podem ser benéficos para as atividades dependentes de precipitação como agricultura, silvicultura, produção hidrelétrica e ecossistemas alagadiços, porém uma persistência de condições anormalmente úmidas também pode causar efeitos graves, como inundações e atrasos nas colheitas (MARENGO et al., 2009). Foi o que aconteceu no ano de 2016 na safra da soja, no noroeste do Rio Grande do Sul, onde o excesso de chuva deixou plantações inundadas,

provocando erosão, perda de nutrientes e consequentemente, da colheita, prejudicando o investimento feito pelos agricultores (GLOBO RURAL, 2016).

Um estudo realizado por Hwan et al. (2013) analisou o impacto das mudanças climáticas sobre a demanda de água para o cultivo de arroz, em um cenário futuro A1B em oito distritos de irrigação na Coreia. Foram consideradas mudanças no uso do solo e dados climáticos gerados. Como resultado, obtiveram uma redução no período de cultivo para 2071-2100 de até 12 dias em relação ao tempo de desenvolvimento no período base. Assim, caso a projeção de aumento de temperatura aliada a índices pluviométricos ótimos ocorra, poderá haver uma redução no tempo de cultivo das culturas que possuem maior necessidade térmica, como é o caso da soja e do milho, tendo assim, impacto positivo na produção.

No entanto, segundo Melo (2015) se o aumento de precipitação estiver relacionado com o aumento de dias secos e o número de dias úmidos se mantiver inalterado no futuro, é possível que as chuvas se tornem mais intensas e concentradas, ou seja, eventos extremos, prejudicando as colheitas.

4.2 Demandas futuras de água para irrigação (IWR)

Na Tabela 5 são apresentados os valores das demandas de água para irrigação. Cada valor refere-se à média acumulada para cada período de 30 anos, atual ou futuro, obtidas com o modelo SWAP. Os valores referem-se à média de demanda durante o período inicial e final de cultivo. Também estão representadas na Tabela 5 as anomalias de IWR, sendo os valores entre parênteses referentes às porcentagens destas anomalias com relação ao período base.

Tabela 5. Média das demandas futuras de água para irrigação (IWRs) e suas anomalias (Δ_a).

Culturas	Atual	IWR (2025s)	IWR (2055s)	IWR (2085s)	* Δ_a (2025s)	Δ_a (2055s)	Δ_a (2085s)
Feijão	1,85	1,01	0,31	0,31	-0,84 (-45)	-1,54 (-83)	-1,54 (-83)
Milho	1,90	1,49	0,44	0,54	-0,41 (-22)	-1,46 (-77)	-1,36 (-72)
Soja	7,59	5,65	4,25	2,64	-1,94 (-26)	-3,34 (-44)	-4,95 (-65)
Trigo	0,49	0,04	0,45	0,11	-0,44 (-91)	-0,03 (-7)	-0,38 (-78)

* Δ_a : anomalias de demanda de água para irrigação (cm).

Como pode ser visto, os valores negativos indicam uma redução da necessidade de irrigação para todas as culturas ao longo do século. Estes resultados são devido ao aumento da precipitação média acumulada encontrada para todos os períodos.

Observa-se também que a soja apresentou maior demanda de água quando comparada às outras culturas. Essa maior necessidade de irrigação pode estar relacionada ao fato desta cultura ser produzida no verão, estação com menores índices de chuva e maior temperatura no Estado, levando a um aumento das taxas de transpiração da planta.

Para a cultura do feijão poderá haver queda relevante na demanda de água nos períodos de 2055s e 2085s com uma redução de cerca de 83%. Segundo Back (2001) o feijão é sensível ao estresse hídrico e possui capacidade reduzida de recuperação devido ao seu sistema radicular pouco desenvolvido. Nesse sentido, a irrigação deve ser bem planejada para não resultar em excesso de água no solo e causar prejuízo à cultura.

Com relação ao trigo, a demanda de água poderá reduzir em torno de 91% em 2025s, 78% em 2085s e 7% em 2055s. Neste período houve uma redução pouco significativa de demanda, sendo esta influenciada por outros fatores, que não a precipitação. É possível que maiores valores acumulados estejam concentrados em meses que não são interessantes sob o ponto de vista agrônômico na região, sendo necessários estudos adicionais sobre a distribuição da chuva ao longo do ano.

Na Figura 11 estão apresentados os gráficos referentes à variabilidade de IWR para os quatro períodos analisados, de 30 anos cada um. Observa-se que em alguns anos do período 2025s a cultura da soja apresenta maior déficit hídrico em relação aos outros períodos futuros, tendo picos próximos ou superiores ao período atual. Entretanto, com relação à média para todo o período continua tendo demanda inferior ao período de comparação. Esses resultados indicam demandas decrescentes ao longo do século, com diferenças significativas para os três períodos (2025s, 2055s, 2085s). Para o Estado, tais indícios favorecem a produção de soja, contudo é importante lembrar que os impactos de aumento de precipitação podem

ser compensados pelo aumento de temperatura, devido a maiores taxas de evapotranspiração (MELO, 2015). Além disso, esse aumento pode ocasionar maior ocorrência de eventos extremos, como tempestades de granizo, levando a destruição das lavouras.

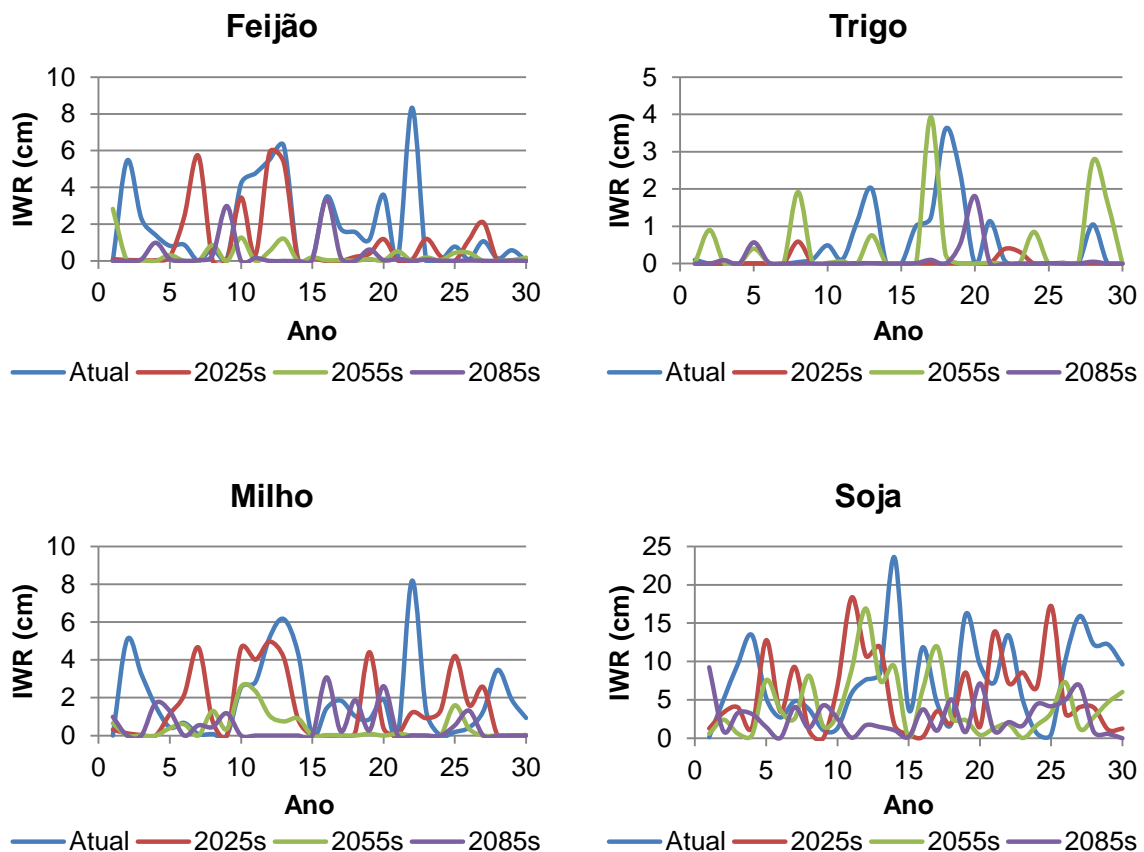


Figura 11. Demandas atuais e futuras de água para irrigação ao longo do século para as culturas analisadas.

Para a cultura do feijão, os maiores picos de IWR também são referentes ao período de 2025s, com maiores necessidades hídricas em curto prazo. Isto está de acordo com a projeção de precipitação média acumulada, onde neste período apresentou menor valor quando comparado aos outros períodos. Em 2055s não houve IWR significativa, sendo a produção pouco afetada pelas variações no regime de chuvas. Contudo, uma análise diferenciada do excesso ou falta de água nos diferentes estádios de crescimento e desenvolvimento das plantas se faz necessário, devido o excesso de água expressar menor viabilidade as sementes, prejudicar as plantas e favorecer a maior intensidade de doenças (THEISEN et al., 2009).

A cultura de trigo apresentou um maior pico de IWR em 2055s (3,93 cm) em comparação ao período atual (3,61 cm). Isto mostra a importância da análise gráfica nesse estudo, por indicar pontos em que a demanda futura de água ultrapassa a atual, não sendo esse resultado identificável nas médias e anomalias (Tabela 5). Os períodos de 2025s e 2085s apresentaram IWR bem baixas, com apenas um pico acima de 1,0 cm em 2085s. Isto porque o trigo é cultivado no inverno, quando chove bastante.

No caso do milho, houve redução de demanda para os períodos de 2055s e 2085s. Em 2025s a cultura apresentou maior variabilidade nos dados, com alguns picos de demanda próximos ao período atual e outros bem inferiores. Um estudo feito por Matzenauer, Westphalen, Maluf (1986) sobre o efeito da irrigação em diferentes períodos de desenvolvimento do milho, na depressão central do Rio Grande do Sul, mostrou que a irrigação tem maior efeito sobre o rendimento do grão no período reprodutivo. Dessa forma, o déficit hídrico nesse período prejudica o desenvolvimento da espiga, afetando sua qualidade. Além disso, o aumento de temperatura noturna também influencia no rendimento das lavouras por acelerar o desenvolvimento e a maturidade das plantas, reduzindo o período de enchimento de grãos, levando a perdas de produtividade (EMATER, 2014).

Tais resultados revelam a importância do estudo das demandas hídricas para irrigação, tornando possível um melhor planejamento das lavouras, a fim de obter máximas produtividades e maior sustentabilidade no uso dos recursos hídricos.

4.3 Volume de água demandado

A Figura 12 apresenta o volume de água demandado por cultura ($\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$) a partir de suas respectivas áreas de plantio (m^2) (Tabela 2). Cabe lembrar que o ano representa apenas o período em que a cultura foi cultivada e não os respectivos 365 dias. Além disso, cada cultura foi simulada isoladamente, logo o volume total demandado seria a soma de todas as culturas durante o ano.

A partir da análise gráfica constata-se que os maiores volumes de água são referentes às culturas de soja e milho, devido a maiores áreas plantadas. A única cultura que apresentou decréscimo de vazão a cada período analisado (2025s,

2055s e 2085s) foi a soja, com redução de aproximadamente três milhões de $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$. Esse resultado demonstra que as mudanças climáticas poderão afetar positivamente a produção de soja na bacia, tendo menor necessidade de irrigação.

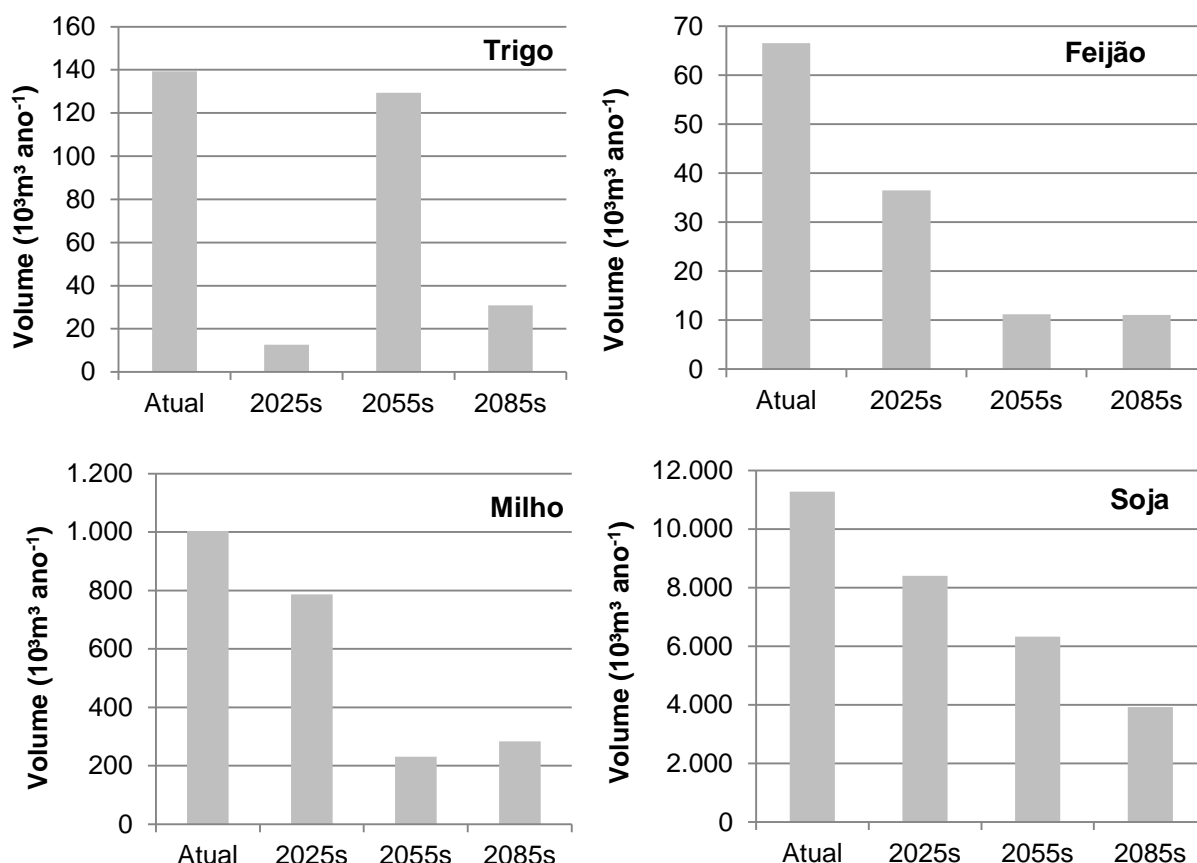


Figura 12. Volume demandado para as culturas de feijão, milho, trigo e soja em seus respectivos períodos de cultivo.

Contudo, como a região possui nascentes e pequenos córregos com baixas vazões, a drenagem de água dessas áreas para reservatórios agrícolas pode impactar negativamente o ambiente e reduzir a disponibilidade hídrica à jusante, prejudicando outros setores. Além disso, a redução da vazão dos cursos hídricos pode interferir nos padrões de qualidade de água, devido sua menor capacidade de diluição. Nesse sentido, o manejo inadequado de água para irrigação aliada ao uso intensivo de fertilizantes agrícolas, pode causar sérios prejuízos tanto ao meio ambiente quanto à saúde humana.

Em relação ao volume necessário para irrigação da cultura do trigo no tempo futuro, foi estimado um volume máximo de $130.000 \text{ m}^3 \text{ano}^{-1}$ para o período de 2055s. Com relação à 2025s e 2085 o volume estimado foi inferior, em torno de

30.000 m³ ano⁻¹. O milho, entretanto, apresentou um volume superior de água, com aproximadamente 800.000 m³ ano⁻¹ no período de 2025s, seguido de menores vazões para o restante do século.

Para o feijão, o volume de água demandado reduziu cerca de 80% nos períodos de 2055s e 2085s em comparação ao período atual. Esses valores demonstram que do meio do século em diante o volume necessário à irrigação do feijão não impactará de forma relevante o rio Ijuí, devido esta vazão ser muito inferior. Entretanto quando comparada a pequenos córregos da bacia, poderá ser significativa.

Assim, entende-se que além das variáveis físico hidráulicas do solo, o tipo e a quantidade de modelos climáticos influenciam sobre as respostas das culturas as variações do clima. Dessa forma, a adoção de diferentes modelos aliados a estudos sobre as características do solo e da cultura permitem mitigar o grau de incertezas sobre a demanda de água para irrigação. Segundo Wada et al. (2013) 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.

Nesse sentido, para reduzir o grau de incertezas seria necessário à utilização de diferentes modelos climáticos e a incorporação da variabilidade espacial dos atributos físico hidráulicos do solo, que desempenham 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).

5. CONCLUSÃO

O estudo proposto teve como objetivo determinar as demandas de água para irrigação em um cenário atual e futuro na bacia hidrográfica do rio Ijuí, pertencente à região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Esta bacia tem extrema importância para a agricultura da região, sendo uma das maiores produtoras de soja e milho do Estado.

As demandas observadas mostraram que no futuro poderá haver uma diminuição da necessidade de irrigação para todas as culturas analisadas (feijão, milho, trigo e soja). Com relação aos períodos futuros, em curto prazo (2011-2040) a demanda de água se manteve próxima ao passado (1961-1990), contudo a partir da metade do século se espera o oposto. Isto pode estar relacionado devido às anomalias de temperatura e precipitação serem maiores para o meio do século em diante do que em curto prazo.

De forma geral, pode-se concluir que, se as previsões do modelo ETA se confirmarem, as mudanças do clima afetarão positivamente a região, com relação às simulações de demanda de água com o modelo SWAP. Por outro lado, as projeções do clima não são capazes de determinar a probabilidade de ocorrência de eventos extremos, como tempestades, granizo e geadas que podem prejudicar as lavouras, levando a perdas de safra.

Além disto, os dados meteorológicos utilizados neste estudo foram baseados em projeções de apenas um modelo climático para uma localização, o que permite alto grau de incertezas. Logo, o uso de diversos modelos se faz necessário a fim de mitigar esse problema e contribuir com uma correta tomada de decisão sobre a adequação dos sistemas de irrigação.

REFERÊNCIAS

- ADAM, Katiúcia Nascimento. **Análise dos impactos de mudanças climáticas nos regimes de precipitação e vazão na Bacia do Rio Ibicuí**. 2011. 147f. Dissertação de Mestrado. (Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- ADAM, Katiúcia Nascimento. **Incertezas e impactos de mudanças climáticas sobre o regime de vazões na bacia hidrográfica do Rio Uruguai**. 2016. 218f. Dissertação de Doutorado. (Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: Encarte Especial sobre a crise hídrica – Informe 2014**. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos - SPR Brasília - DF 2015.
- ASSAD, E.; PINTO, H. S. **Aquecimento Global e a nova Geografia da Produção agrícola no Brasil**. São Paulo: EMBRAPA, 2008. 84 p.
- BACK, A. J. **Necessidade de irrigação da cultura de feijão no sul do estado de Santa Catarina**. Rev. Tecnol. Ambiente, Criciúma, v.7, n.1, p.35-44, jan/jun. 2001.
- BANCO MUNDIAL. **Relatório sobre o desenvolvimento mundial de 2010: desenvolvimento e mudança climática**. São Paulo: UNESP, 2010. 440 p.
- BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, Tempo e Clima**. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 512 p.
- 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, 210 p.
- BELTRAME, L. F. de S. (coord.). **Consistência de Dados Hidrológicos da Bacia Hidrográfica do Alto Uruguai, Sub-Bacia 75**. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, 2000.
- BLACK, T.L. **The new NMC mesoscale Eta Model: Description and forecast examples**. Weather Forecasting, v. 9, p. 265-278, 1994.
- BORK, Carina Krüger. **Projeções de temperatura e precipitação para detecção de mudanças climáticas na Bacia do Rio Taquari - Antas, RS**. 2015. 95f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.
- CHOU, S. C. et al. (2011). **Downscaling of South America present climate driven by 4-memberHadCM3 runs**. Climate Dynamics. DOI 10.1007/s00382-011-1002-8.
- CHOU, S.C.; BUSTAMANTE JF, GOMES JL (2005). **Evaluation of Eta model seasonal precipitation forecasts over South America**. Nonlinear Processes in Geophysics. Vol 12. 4ed. p. 537-555.

CHRISTENSEN, N.; LETTENMAIER, D. P. **A multimodel ensemble approach to assessment of climate change impacts on the hydrology and water resources of the Colorado River basin.** Hydrol Earth Syst Sci, v. 11, p. 1417–1434, 2007.

COELHO FILHO, M. A.; BASSOI, L. H.; ANGELOCCI, L. R.; COELHO, E. F.; PEREIRA, F. A. de C. **Relação solo-planta-atmosfera: Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças.** Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, v. 1, p. 27-90, 2011.

CORREIO DO POVO. **Perdas de safras pela seca impacta economia do RS.** Disponível em: <<http://www.ijui.com/rural/34196-perda-de-safras-pela-seca-impacta-economia-do-rs-em-r-23-7-bilhoes.html>> Acesso em: 10 mar. 2016.

EMATER/RS – ASCAR. Disponível em: <http://www.emater.tche.br/site/arquivos/milho/O_Milho_e_o_Clima.pdf> Acesso em: 23 jun. 2016.

FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA DO RIO GRANDE DO SUL – FARSUL. **Relatório Econômico 2012 e perspectivas para 2013.** Assessoria Econômica, 2012. 66 p.

FOCCHEZZATO, A.; GRANDO, M. Z. **Efeitos da estiagem na economia do Rio Grande do Sul: uma abordagem multisetorial.** Textos para Discussão FEE nº 62. Secretaria do Planejamento e Gestão Fundação de Economia e Estatística Siegfried Emanuel Heuser. Porto Alegre, p.21, 2009.

FUNDAÇÃO DE ECONOMIA E ESTATÍSTICA – FEE. Disponível em: <<http://www.fee.rs.gov.br/indicadores/pib-rs/estadual/destaques/>> Acesso em: 06 mar. 2016.

FUNDAÇÃO DE ECONOMIA E ESTATÍSTICA – FEE. **Quantidade de soja produzida por mesorregião.** Disponível em: <<http://dados.fee.tche.br/>> Acesso em: 18 abril. 2016.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – FEPAGRO. **Nota Técnica nº 10 – A estiagem de 2011/2012 e sua influência na produção agropecuária do Rio Grande do Sul.** Cemet/RS, 2012.

GHINI, R. **Mudanças climáticas globais e doenças de plantas.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2005.

GLOBO RURAL. **Excesso de chuva provoca perdas na safra de soja produzida no RS.** Disponível em: <<http://alfonsin.com.br/excesso-de-chuva-provoca-perdas-na-safra-de-soja-produzida-no-rs/>> Acesso em: 23 jun. 2016.

GORDON, C.; COOPER, C.; SENIOR, C. A.; BANKS, H.; GREGORY, J.M.; JOHNS, T.C.; MITCHELL, J.F.B.; WOOD, R. A. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climae Dynamics*, v 16, p. 147-168, 2000.

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: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2008. 331 p.

HAMADA, E.; GHINI, R.; MARENGO, J. A.; THOMAZ, M. C. Projeções de Mudanças Climáticas para o Brasil no final do século XXI. In: GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. (eds). **Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil.** Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2011. p. 43-46.

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.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **INPE revela aumento de tempestades com raios.** São José dos Campos, Brasil, 16 ago. 2013. Disponível em: <http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=3358> Acesso em: 06 mar. 2016.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013, 1536 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Change 2007: Synthesis Report.** Core Writing Team, PACHAURI, R. K.; REISINGER, A. (eds). Geneva: IPCC, 2007, 104 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report.** Core Writing Team, PACHAURI, R. K.; MEYER, Leo. (eds). Geneva: IPCC, 2014, 132 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Summary for Policymakers: Emissions Scenarios.** A Special Report of IPCC Working Group III, 2000. 27p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Key Trends in CO2 emissions.** Excerpt from: Emissions from fuel combustion, 2015. Disponível: <<http://www.iea.org/statistics/topics/co2emissions/> ou publicação> Acesso em: 11abril. 2016.

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.

KLIMENT, Z.; MATOUŠKOVÁ, M.; LEDVINKA, O.; KRÁLOVEC, V. **Trend analysis of rainfall-runoff regimes in selected headwater areas of the Czech Republic.** Journal of Hydrology and Hydromechanics, v.59, n.1, 2011, p.36–50.

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.** Alterra, Wageningen, Alterra Report 1649(02) – SWAP32 Theory description and user manual. Doc, 2008, 262 p.

LEE, J.L. E HUANG, W.C. **Impact of climate Change on the Irrigation Water Requirement in Northern Taiwan**. Agricultural Water Management, v. 6, p. 3339-3361, 2014.

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D. C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Parana River Basins. **Climate Dynamics**, v. 38, p. 1829–1848, 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. 76 p.

MATZENAUER, R.; WESTPHALEN, S. L.; MALUF, J. R. T. **Efeito de períodos de irrigação sobre o rendimento e desenvolvimento do milho, em diferentes épocas de semeadura – 1985/86**. In: REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DO MILHO, 31, 1986, Porto Alegre. Ata. Porto Alegre: IPAGRO; EMATER/RS, 1986, p. 37-41.

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.

MELLO, E. L. et al. **Efeito das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do Rio Paracatu**. Revista de Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 28, p.635-644, 2008.

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 Drainage Systems Engineering, v. 3, p. 13, 2014.

MELO, Tirzah Moreira. **Avaliação estocástica dos impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura na região noroeste do Estado Rio Grande do Sul**. 2013. 94f. Exame de Qualificação (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS.

MELO, Tirzah Moreira. **Avaliação estocástica dos impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura na região noroeste do Estado Rio Grande do Sul**. 2015. 133f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS.

MESINGER, F.; Z. I. JANJIC. Noise due to time-dependent boundary conditions in limited area models. The GARP Programme on Numerical Experimentation, Rep. N°. 4, WMO, Geneva, p. 31-32, 1974.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. Disponível em:<<http://www.agricultura.gov.br/comunicacao/noticias/2014/12/produto-interno-bruto-da-agropecuaria-deve-ser-de-rs-1-trilhao>> Acesso em: 06 mar. 2016.

MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VANVUUREN, D. P.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEH, G.A.; MITCHELL, J. F. B.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S. J.; STOUFFER, R.J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P.; WILBANK, T. J., 2010. **The next generation of scenarios for climate change research and assessment**, Nature, vol. 463, pp. 747-756. Londres, Reino Unido, 11 February 2010.

NASA GODDARD INSTITUTE FOR SPACE STUDIES – NASA GISS. Disponível em: < <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/> > Acesso em: 28 mar. 2016.

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.; 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. **Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do País**. Parcerias Estratégicas, Brasília, n. 12, p.238-258, 2001.

NOTÍCIAS AGRÍCOLAS. **Perdas na produtividade das lavouras de trigo**. Disponível em: <<http://www.noticiasagricolas.com.br/videos/graos/162210-em-ijui-rs-perdas-na-produtividade-das-lavouras-de-trigo-podem-chegar-a-40-devido-a-geada-e-o-excesso.html#.Vub0BX0rLIV> > Acesso em: 10 mar. 2016.

Nunes, L. H. **Aproximações sobre mudanças climáticas globais**. Terra Livre, v. 1, n.18, p. 179-184, 2002.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS – PBMC. **Contribuição do Grupo de Trabalho 2 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do PAINEL Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Sumário Executivo do GT2. PBMC, Rio de Janeiro, Brasil. 28 p. 2013.

PELLEGRINO, G. Q.; ASSAD, E. D.; MARIN, F. R. **Mudanças Climáticas Globais e a Agricultura no Brasil**. Revista Multiciência. v. 8, p. 139-162, 2007.

ROSSATO, Maira Suertegaray. **Os climas do Rio Grande do sul: variabilidade, tendências e tipologia**. 2011, 240p. Tese (Doutorado em Geografia), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SANDERSON, E. W. et al. **The human footprint and the last of the wild**. BioScience, v. 52, 891–904, 2002.

SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – SEMA. **Relatório anual sobre a situação dos recursos hídricos no estado do Rio Grande do Sul**. Departamento de Recursos Hídricos, Porto Alegre/RS, 2007.

THEISEN, G. et al. **Manejo da Cultura da Soja em Terras Baixas em Safras com El-Niño**. Embrapa Clima Temperado/Circular Técnica 82 ISSN 1981-5999. Pelotas/RS Dezembro de 2009.

TUCCI, C. E. M. **Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos**. Brasília: Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas, 2002. 150 p.

TUCCI, C. E. M; BRAGA, B. **Clima e recursos hídricos no Brasil**. Porto Alegre: ABRH, 2003. 348 p.

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.

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.

WEI, W.; CHANG, Y.; DAI, Z. **Streamflow changes of the Changjiang (Yangtze) River in the recent 60 years: Impacts of the East Asian summer monsoon, ENSO, and human activities**. *Quaternary International*, p. 1-10, 2013.

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.