

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

CAMILA DALLA PORTA MATTIUZI

GESTÃO INTEGRADA DOS RECURSOS HÍDRICOS: ALOCAÇÃO OTIMIZADA COM USO  
CONJUNTO DE ÁGUA SUPERFICIAL E SUBTERRÂNEA PARA REDUÇÃO DA  
ESCASSEZ HÍDRICA NA BACIA DO RIO SANTA MARIA/RS

PORTO ALEGRE

2018

CAMILA DALLA PORTA MATTIUZI

GESTÃO INTEGRADA DOS RECURSOS HÍDRICOS: ALOCAÇÃO OTIMIZADA COM USO  
CONJUNTO DE ÁGUA SUPERFICIAL E SUBTERRÂNEA PARA REDUÇÃO DA  
ESCASSEZ HÍDRICA NA BACIA DO RIO SANTA MARIA/RS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestra.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Fernandes Marques

Coorientador: Prof. Dr. Joel Avruch Goldenfum

PORTO ALEGRE

2018

## CIP - Catalogação na Publicação

Dalla Porta Mattiuzi, Camila

Gestão Integrada dos Recursos Hídricos: Alocação Otimizada com Uso Conjunto de Água Superficial e Subterrânea para Redução da Escassez Hídrica na Bacia do Rio Santa Maria/RS / Camila Dalla Porta Mattiuzi.

-- 2018.

93 f.

Orientador: Guilherme Fernandes Marques.

Coorientador: Joel Avruch Goldenfum.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Uso conjunto. 2. Modelo hidroeconômico. 3. Escassez hídrica. 4. Água subterrânea. I. Fernandes Marques, Guilherme, orient. II. Avruch Goldenfum, Joel, orient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

CAMILA DALLA PORTA MATTIUZI

GESTÃO INTEGRADA DOS RECURSOS HÍDRICOS: ALOCAÇÃO OTIMIZADA COM USO  
CONJUNTO DE ÁGUA SUPERFICIAL E SUBTERRÂNEA PARA REDUÇÃO DA  
ESCASSEZ HÍDRICA NA BACIA DO RIO SANTA MARIA/RS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestra.

Aprovado em: Porto Alegre, 23 de fevereiro de 2018.

---

Prof. Dr. Fernando Dornelles – IPH/UFRGS  
Examinador

---

Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan – IPH/UFRGS  
Examinador

---

Prof. Dr. Geraldo Lopes da Silveira – UFSM  
Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela oportunidade de realizar este trabalho.

Aos meus pais, Mauri e Regina, por todo incentivo, apoio e carinho durante esta jornada.

Ao orientador deste trabalho, Prof Guilherme Fernandes Marques, pelos conhecimentos e ensinamentos transmitidos, pela compreensão e persistência, e por acreditar em mim e na realização deste trabalho.

Ao Prof. Joel Avruch Goldenfum, co-orientador deste trabalho, pelo apoio, incentivo e pelas orientações sempre perspicazes e importantes.

Ao Prof. Josué Medellín-Azuara pelos conhecimentos transmitidos e pelo apoio na realização deste estudo mesmo à distância.

A todas as pessoas que contribuíram de forma direta ou indireta para o desenvolvimento deste trabalho, que me incentivaram e ajudaram a ver a luz no fim do túnel, meus sinceros agradecimentos.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas pelo ensino de qualidade.

*Nothing is more useful than water: but it will purchase scarce anything; scarce anything can be had in exchange for it. A diamond, on the contrary, has scarce any value in use; but a very great quantity of other goods may frequently be had in exchange for it.*

Paradox of value

Adam Smith - The Wealth of Nations

## RESUMO

A falta de gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas, aliada ao seu uso intensivo, acarretou em efeitos indesejados como escassez hídrica e perdas econômicas. A partir do conhecimento sobre as disponibilidades e demandas hídricas é possível promover estratégias de alocação otimizada de água para redução da escassez e dos custos da escassez. O uso conjunto de água superficial e subterrânea consiste no desenvolvimento de estratégias de alocação que explorem as vantagens e particularidades de cada manancial, assim reduzindo o efeito das variabilidades e incertezas na disponibilidade de água. O presente trabalho apresenta um estudo de alocação otimizada utilizando água superficial e subterrânea visando à redução da escassez hídrica, a redução no custo da escassez e o aumento no atendimento das demandas agrícolas na Bacia do Rio Santa Maria, localizada no Rio Grande do Sul/Brasil. O trabalho foi estruturado em três artigos científicos. O primeiro artigo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o conceito, benefícios e desafios na implementação de estratégias de uso conjunto; a partir da análise das informações levantadas na revisão bibliográfica foi possível delinear estratégias que podem ser aplicadas no contexto brasileiro, embasadas nos instrumentos de gestão previstos na Política Nacional de Recursos Hídricos. O segundo artigo apresenta a obtenção das funções de benefício marginal dos usuários de água para irrigação na área estudada; estas funções são conhecidas como "curvas de demanda" e avaliam a disponibilidade de um usuário a pagar pelo recurso, de maneira que, quanto mais escasso o recurso, maior será seu valor marginal; estas funções são necessárias para a aplicação do modelo hidroeconômico. Neste artigo também foi realizado um estudo do caso dos eventos de estiagem de 2006 e 2011 na Bacia do Rio Santa Maria, sendo analisados os prejuízos econômicos advindos da escassez. O terceiro artigo apresenta a aplicação do modelo hidroeconômico de alocação da água no sistema da Bacia do Rio Santa Maria; a função objetivo do modelo é minimizar o custo da escassez. Os resultados apontaram a alocação de água otimizada economicamente e os benefícios advindos da utilização de água subterrânea no atendimento das demandas, evidenciando a importância da gestão eficiente da água para flexibilizar e tornar o sistema hídrico mais resiliente.

**Palavras-chave:** Uso conjunto; modelo hidroeconômico; escassez hídrica; água subterrânea.

## ABSTRACT

The lack of integrated management of surface and groundwater, coupled with its intensive use, has led to undesirable effects such as water shortages and economic losses. The knowledge about water availabilities and demands makes it possible to promote optimized water allocation strategies to reduce scarcity and scarcity costs. Conjunctive use of surface water and groundwater consists of the development of allocation strategies that explore the advantages and peculiarities of each source, thus reducing the effect of variability and uncertainties on water availability. This work presents an optimized allocation study using surface and groundwater to reduce water scarcity, reduce scarcity cost, and increase agricultural demand attendance in the Santa Maria River Basin, located in Rio Grande do Sul/Brazil. This work was structured in three scientific articles. The first article presents a bibliographic review about the concept, benefits and challenges in the implementation of conjunctive use strategies; from the analysis of the information collected in the bibliographic review it was possible to outline strategies that can be applied in the Brazilian context, based on the management instruments provided in the National Water Resources Policy. The second article presents the obtaining of the marginal benefit curves of water used in irrigation in the studied area; these functions are known as "demand curves" and evaluate the user's willingness to pay for the resource, so that the scarcer the resource, greater is its marginal value; these functions are input data for the hydroeconomic model. In this paper it was also studied the droughts of 2006 and 2011 in the Santa Maria River Basin, analyzing the economic losses due to the scarcity. The third article presents the application of the hydroeconomic model to solve the problem of water allocation in the Santa Maria River basin system; the objective function of the model is to minimize scarcity cost. The results showed the economically optimized water allocation and the benefits derived from the use of groundwater in meeting the demands, showing the importance of efficient water management to make water systems more flexible and resilient.

**Keywords:** Conjunctive use; hydroeconomic model; water scarcity; groundwater.



## Sumário

<b>1. APRESENTAÇÃO</b> .....	8
<b>2. OBJETIVO</b> .....	9
2.1. Objetivo geral .....	9
2.2. Objetivos específicos .....	9
<b>3. CONFLITOS PELO USO DA ÁGUA E ESCASSEZ HÍDRICA</b> .....	10
3.1. Caso de Estudo: Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria/RS .....	11
3.1.1. Uso e Ocupação do Solo .....	12
3.1.2. Uso de Água na Bacia .....	12
3.1.3. Disponibilidades Hídricas .....	13
3.1.4. Caracterização Geológica .....	14
3.1.5. Caracterização Hidrogeológica .....	16
3.1.6. Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos na BHSM .....	18
<b>4. PROPOSTA METODOLÓGICA</b> .....	20
<b>5. ARTIGO 1 - USO CONJUNTO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS: ANÁLISE DE EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS E PERSPECTIVAS PARA O BRASIL</b> .....	24
5.1. Introdução .....	25
5.2. Conceito de Uso Conjunto .....	26
5.3. Estratégias de Uso Conjunto .....	26
5.4. Benefícios e Desafios da Implementação do Uso Conjunto .....	27
5.5. Aplicações do Uso Conjunto de Água Superficial e Subterrânea .....	28
5.6. Reflexões para o Cenário Brasileiro .....	32
5.7. Conclusões .....	34
5.8. Agradecimentos .....	35
5.9. Referências Bibliográficas .....	35
<b>6. ARTIGO 2 - EVALUATION OF MARGINAL BENEFIT CURVES OF WATER USE IN AN AGRICULTURAL RICE AND SOYBEAN REGION - CASE OF SANTA MARIA RIVER BASIN</b> .....	39
6.1. Introduction .....	39
6.2. Methods .....	40
6.2.1. Study Area: Santa Maria River Basin .....	40
6.2.2. Positive Mathematical Programming (PMP) .....	42
6.2.3. Statewide Agricultural Production (SWAP) .....	42
6.3. Results and Discussion .....	45
6.3.1. Shadow Value and Water Management .....	49

6.3.2. Scarcity Cost on Drought Periods.....	50
6.4. Conclusions .....	55
6.5. Acknowledgements .....	56
6.6. Referencies.....	56
<b>7. ARTIGO 3 - USE OF A HYDROECONOMIC MODEL WITH CONJUNCTIVE USE OF SURFACE AND GROUNDWATER TO REDUCE THE SCARCITY COST IN AN AGRICULTURAL AREA OF RICE AND SOYBEAN IN SOUTHERN BRAZIL.....</b>	<b>59</b>
7.1. Introduction .....	60
7.2. Materials and Methods.....	60
7.2.1. Study Site .....	61
7.2.2. Data Acquisition.....	63
7.3. Results and Discussion.....	72
7.3.1. Results Obtained for the Different Scenarios.....	72
7.3.2. Permit and Economic Model.....	77
7.3.3. Economic Model with Outflow Restriction .....	78
7.3.4. Scenarios with Groundwater Availability.....	78
7.3.5. Outflow Restriction .....	81
7.3.6. Hydroeconomic Model Overall Results.....	81
7.3.7. Relevance for Water Management.....	82
7.4. Conclusions .....	83
7.5. Acknowledgements .....	83
7.6. Referencies.....	83
<b>8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>87</b>
<b>9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>89</b>
BBC. The 11 cities most likely to run out of drinking water - like Cape Town. Disponível em: < <a href="http://www.bbc.com/news/world-42982959">http://www.bbc.com/news/world-42982959</a> >. Acesso em Fevereiro de 2018.....	89

## 1. APRESENTAÇÃO

A falta de gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas, aliada ao seu uso intensivo, acarretou em diversos efeitos indesejados em várias regiões, causando escassez e perdas econômicas (Marques et al., 2010). Estas externalidades negativas podem ser mitigadas a partir do conhecimento sobre as disponibilidades hidrológicas e demandas hídricas, promovendo estratégias de alocação otimizada para redução dos custos da escassez.

Experiências em outros países indicam que é possível integrar o uso de água subterrânea de forma estratégica ao uso dos mananciais superficiais com o objetivo de ampliar a confiabilidade no abastecimento, reduzir custos e aumentar ganhos econômicos com melhores garantias de atendimento hídrico. Esse uso integrado, denominado uso conjunto, explora as vantagens e particularidades de cada manancial, em termos de capacidade de armazenamento, custo de desenvolvimento, disponibilidade sazonal, qualidade, épocas de recarga, etc, resultando em maiores benefícios do que se os mananciais fossem operados de forma dissociada (Pulido-Velazques et al., 2003). O uso conjunto consiste no desenvolvimento de planos e métodos de gerenciamento embasados em estudos técnicos, científicos e econômicos acerca das demandas, disponibilidades e decisões operacionais, reduzindo o efeito das variabilidades e incertezas na disponibilidade de água.

A Política Nacional dos Recursos Hídricos - Lei 9.433/1997 (Brasil, 1997) afirma que água consiste em um bem de domínio público e, enquanto recurso escasso, possui valor econômico. Na mesma lei estão previstos instrumentos de gestão que têm a finalidade de promover a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, assegurando sua disponibilidade e qualidade. Dessa forma, é importante avaliar se as estratégias, técnicas de manejo e instrumentos de gestão estão contribuindo para a eficiência econômica no uso da água, de modo a sinalizar para os usuários o seu valor.

O presente trabalho apresenta o uso conjunto de água superficial e subterrânea como forma de manejo dinâmica e integrada a partir da utilização de um modelo hidroeconômico de otimização de alocação de água, com o intuito de apontar novas direções para planos e ações, e assim contribuir para melhorar o gerenciamento dos recursos hídricos no Brasil.

## **2. OBJETIVO**

### **2.1. Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é a avaliação de estratégia de uso conjunto de água superficial e subterrânea para alocação otimizada dos recursos hídricos visando à redução da escassez e do custo da escassez.

### **2.2. Objetivos específicos**

- realizar uma estimativa do valor econômico da água utilizada para irrigação na Bacia do Rio Santa Maria/RS;
- avaliar a alocação economicamente otimizada da água e o impacto do uso de água subterrânea na redução da escassez hídrica.

### 3. CONFLITOS PELO USO DA ÁGUA E ESCASSEZ HÍDRICA

Embora o Brasil possua recursos hídricos em abundância, a má distribuição geográfica deste recurso, bem como a superexploração e falta de programas adequados de manejo, causaram graves crises de escassez hídrica em diversas regiões do país. Dentre as principais pode-se citar a região nordeste, que possui um clima semiárido e baixa disponibilidade de água superficial; a região sudeste, que apresenta problemas graves de quantidade e qualidade de água devido à falta de manejo adequado e às altas taxas de urbanização e industrialização; e a região sul, que utiliza grandes quantidades de água para a irrigação de culturas como arroz, milho e soja (ANA, 2010).

O período de estiagem do sudeste, iniciado em 2012 e ainda em curso, de acordo com o monitoramento de estiagem realizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, expôs de forma clara as limitações existentes no planejamento e operação de alguns sistemas hídricos na região, resultando em baixos níveis de armazenamento, falhas no abastecimento e perdas econômicas (ANA, 2015; CPRM, 2018). No caso da cidade de São Paulo medidas emergenciais de gestão de crise foram adotadas como uso do volume morto do Reservatório Cantareira, descontos programados para usuários que diminuem o consumo de água e acréscimos nas tarifas para usuários cujo consumo aumentou em relação a períodos anteriores, ampliação de sistemas de tratamento de efluentes e utilização de água de reuso, e a perfuração de poços tubulares para captação de água subterrânea. Essas medidas proporcionaram atendimento às demandas e diminuição no estresse hídrico superficial na região. No entanto a superexploração de água subterrânea na região metropolitana de São Paulo já é uma realidade (Bertolo et al., 2014). Dessa forma estratégias de uso conjunto apresentam grande potencial para gestão integrada dos recursos superficiais e subterrâneos, tornando o sistema hídrico mais robusto e flexível, e ao mesmo tempo evitando o risco agravamento do estresse hídrico superficial e subterrâneo. Com relação a situação da cidade de São Paulo, além da falta de chuvas, foi apontado por uma missão das Nações Unidas que o principal responsável pela crise hídrica foi a falta de gestão e investimentos na área (BBC, 2018).

Neste contexto de conflitos entre demandas e disponibilidades hídricas nos diversos usos de água, modelos de otimização de alocação surgem como ferramentas para melhorar o atendimento das demandas e reduzir as perdas econômicas. Essa avaliação pode ser realizada com modelos hidroeconômicos, que representam em escala hidrológica regional os aspectos técnicos e ambientais dos sistemas de hídricos, através da inclusão dos conceitos econômicos e manejo de recursos hídricos. Estes modelos são utilizados para o estudo de novas estratégias que promovam eficiência e transparência no uso de água, associados à aplicação de legislações e instrumentos de gestão (Harou, 2009).

Modelos hidroeconômicos vêm sendo utilizados desde a década de 60 para a resolução de diversos problemas relacionados à escassez de água, inclusive utilizando abordagens de uso conjunto. Burt (1964) utilizou um modelo de programação dinâmica estocástica para maximizar os benefícios líquidos da produção agrícola no Vale do Rio San Joaquin, na Califórnia; Bear et al. (1966)

utilizaram as curvas de demanda para otimizar economicamente o uso de água subterrânea em um sistema em Israel; De Ridder et al. (1977) combinaram um modelo de otimização de produção agrícola com um modelo de distribuição de água subterrânea ligado a uma rede de água superficial na Planície de Varamin, no Irã; O'mara et al. (1984) realizaram uma simulação conjunta do efeito econômico da alocação de água para irrigação e da taxa ou subsídio da extração de água subterrânea na Bacia Indus, no Paquistão; mais recentemente Pulido-Velazquez et al. (2004) e Harou et al. (2008) realizaram estudos de otimização de uso conjunto para resolver os problemas de escassez de água no sul da Califórnia, nos Estados Unidos.

No presente trabalho é estudada uma região de conflito pelo uso de água entre agricultores de arroz e soja na qual existe escassez hídrica, pois o período de seca coincide com o início da irrigação das áreas cultivadas. No entanto, a metodologia de alocação otimizada e uso conjunto de água superficial e subterrânea pode ser aplicada em outras situações de conflito, envolvendo demandas agrícolas, urbanas e industriais, e outros fatores, como mudanças climáticas; alterações em ecossistemas, e crises hídricas.

### **3.1. Caso de Estudo: Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria/RS**

A área de estudo deste trabalho é a Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria (BHSM) (Figura 1), localizada na parte sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul, fazendo parte da Região Hidrográfica do Rio Uruguai (RHU). Em janeiro de 2015 foi realizada uma visita à região, durante a qual foi possível obter dados e informações para melhor caracterizar a situação hídrica da bacia, sendo visitadas três propriedades agrícolas que cultivavam arroz e soja e também a *Associação dos Usuários da Água da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria (AUSM)*.

A BHSM possui uma área de aproximadamente 15.790 km<sup>2</sup> e uma população em torno de 243 mil habitantes em 2010 (IBGE, 2015). A precipitação média anual é de 1.444 mm, e em anos secos, as taxas médias de evapotranspiração superam as de precipitação na bacia, influenciando diretamente a situação de escassez hídrica (ANA, 2006). Destaca-se a utilização amplamente majoritária dos recursos hídricos para irrigação de arroz, o que tem gerado conflitos com o abastecimento público, principalmente em ocasiões de estiagens extremas, sendo esta uma das justificativas para a realização deste trabalho (ANA, 2006).

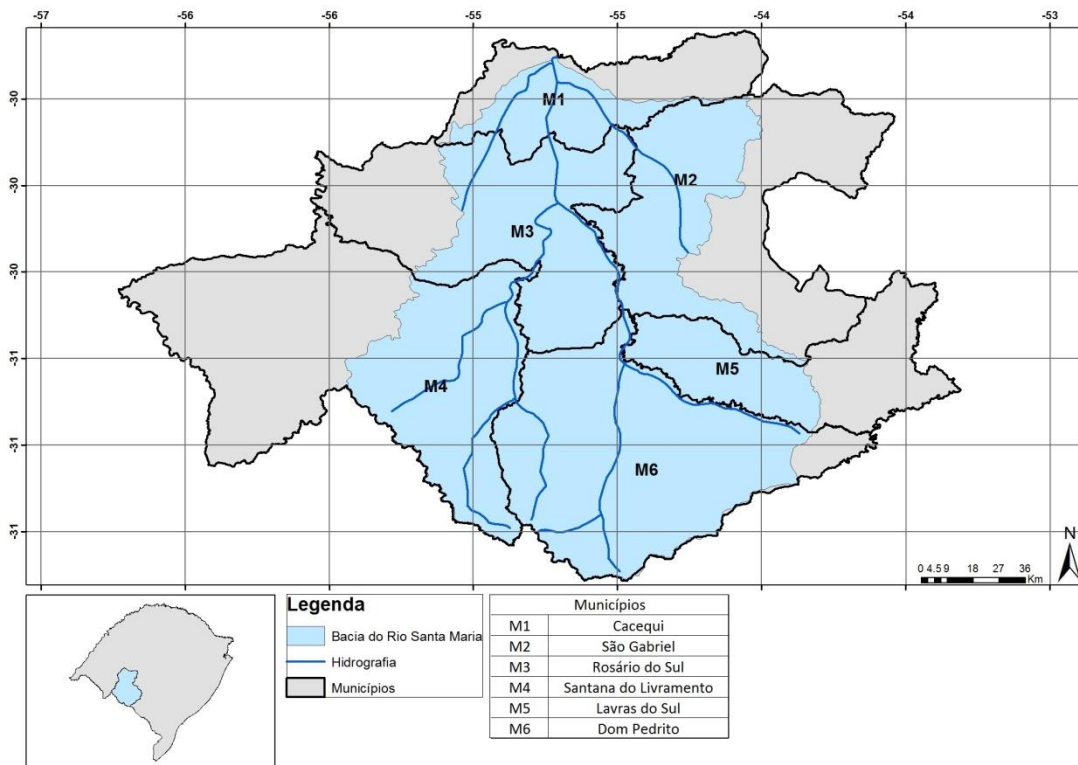


Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria

### 3.1.1. Uso e Ocupação do Solo

Os principais usos do solo na BHSM são campo/pastagem (74%), soja (11%) e arroz (6%). A seguir serão descritas as tipologias de uso de solo (DRH/SEMA, 2016):

- **Campo/Pastagem:** região campestre apresenta relevo uniforme com domínio de cobertura vegetal simples chamada estepe, que é uma formação gramíneo-lenhosa; de um modo geral estas áreas de campo são usadas como pastagem natural e/ou manejada.
- **Soja:** cultura temporária de curta duração que requer novo plantio após cada colheita; a irrigação é realizada principalmente por aspersão (pivô central).
- **Arroz:** cultivado em grandes áreas irrigadas, com predominância do sistema de cultivo em taipas de nível, no qual a água é colocada no ponto mais alto e conduzida por gravidade; a principal fonte de captação de água para irrigação da lavoura de arroz é proveniente de açude/barragem.

Os outros usos do solo presentes na bacia são mata nativa (5%), hidrografia (2%), silvicultura – pinus e eucalipto (1,3%), área urbana - Cacequi, Rosário do Sul, Santana do Livramento e Dom Pedrito (0,7%).

### 3.1.2. Uso de Água na Bacia

Conforme o Plano de Recursos Hídricos da BHSM (DRH/SEMA, 2016), os principais usos consuntivos de água são:

- **Abastecimento urbano - 12 hm<sup>3</sup>/ano:** o abastecimento das demandas urbanas de Dom Pedrito e Rosário do Sul é realizado com mananciais superficiais, e

as demandas de Cacequi e Santana do Livramento, com mananciais subterrâneos.

- Criação animal - 12 hm<sup>3</sup>/ano: destaca-se a produção de bovinos, equinos, suínos, caprinos, ovinos, aves e galinhas, sendo que o rebanho bovino de corte é responsável por cerca de 87% da demanda.
- Abastecimento industrial - 1 hm<sup>3</sup>/ano: demandas industriais foram identificadas nos municípios de Dom Pedrito, Rosário do Sul e Santana do Livramento.
- Irrigação - 1.100 hm<sup>3</sup>/ano: é expressiva a irrigação de arroz na bacia.

A cultura de produção de arroz na região da BHSM foi iniciada por volta da década de 40, e no início havia disponibilidade extensa de terras e recursos hídricos. A partir da década de 80 a disponibilidade hídrica começou a se tornar um fator restritivo ao desenvolvimento da lavoura orizícola na região devido à baixa disponibilidade de água superficial, ao aumento das áreas cultivadas e à pressão do mercado consumidor de arroz, resultando em conflitos entre os setores agrícolas e os usuários de água.

O período de irrigação das lavouras de arroz na BHSM ocorre de novembro a fevereiro, coincidindo com a época de menor disponibilidade hídrica. A soja é uma cultura plantada em alternância com o arroz, garantindo melhorias na lavoura, fixação do nitrogênio no solo e oferecendo uma relação custo-benefício vantajosa para o produtor. Outras atividades agrícolas da BHSM são a produção de milho, fruticultura e pastagens; para o cultivo de milho e pastagens é utilizada água da precipitação e irrigação com pivôs centrais.

Durante a visita às propriedades agrícolas na BHSM percebeu-se que os produtores acumulam água em reservatórios particulares dentro de suas propriedades através de bombeamento do rio e também do acúmulo de escoamento gerado pela chuva na área de drenagem de cada reservatório. A decisão de área a ser plantada depende de vários fatores, como volume armazenado, previsão de chuva durante o período de plantio, valor dos insumos e preço de venda.

### **3.1.3. Disponibilidades Hídricas**

Conforme o plano de recursos hídricos da BHSM, o Comitê Santa Maria definiu como referência de disponibilidade hídrica, para fins de enquadramento e para o lançamento de efluentes, a vazão que oferece 90% de permanência, a chamada Q90 anual, que corresponde a uma vazão anual de 23,1 m<sup>3</sup>/s na foz do rio Santa Maria (DRH/SEMA, 2016).

A análise dos volumes de água armazenados na Bacia é de grande importância em função do elevado número de reservatórios implantados com a finalidade de irrigação do arroz. A BHSM possui uma cultura de armazenamento de água pois as precipitações estão concentradas nos meses de inverno e a intensa irrigação da atividade agrícola se concentra nos meses de verão. De acordo com o Plano de Recursos Hídricos existem 2.157 açudes, totalizando um volume armazenado de 1.104 hm<sup>3</sup>. Estes reservatórios são abastecidos principalmente pela captação do



escoamento superficial gerado após eventos de precipitação, bem como por bombeamento direto de cursos d'água.

Existem dois reservatórios em fase de construção em dois cursos d'água tributários do Rio Santa Maria, o Arroio Jaguari e o Arroio Taquarembó; estes reservatórios têm a função de complementar o fornecimento de água para irrigação das lavouras de arroz, e atenderão em torno 114.000 ha. O volume útil armazenados nas barragens conforme o projeto é 116,41 hm<sup>3</sup> e 111,74 hm<sup>3</sup> para as barragens de Jaguari e Taquarembó, respectivamente.

Os períodos de maiores secas na Bacia do Uruguai estão associados aos períodos de pouca ocorrência de precipitações. Devido à baixa capacidade de armazenamento da BHSM e a grande profundidade dos mananciais subterrâneos mais volumosos, o regime de vazões é muito dependente do regime de chuvas. Os eventos de estiagens registrados apontam que os usos da água na bacia operam com elevado índice de risco, em que nos anos de precipitações abaixo da média ocorrem perdas na safra e problemas de abastecimento, principalmente na região norte da Bacia (ANA, 2006).

Frequentemente é relatado que a elevada exploração dos cursos de água da BHSM, principalmente na área de concentração orizícola, rebaixa os níveis dos rios a cotas inferiores às que podem ser registradas nas estações fluviométricas. Portanto, eventos de extremas estiagens, quando ocorrem, têm tido seu efeito potencializado pela intensa utilização dos recursos hídricos na Bacia (ANA 2006).

Esta contextualização com relação à situação de escassez hídrica evidenciou o motivo de escolha da área de aplicação da metodologia neste estudo: a Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria é uma região com diversos conflitos entre oferta e demanda de água, e por isso é uma área interessante para a aplicação de estratégias de uso conjunto e verificação de regras de alocação otimizada de água.

#### **3.1.4. Caracterização Geológica**

Para avaliar o uso de água subterrânea na BHSM é necessário ter conhecimento sobre as formações geológicas e o potencial hidrogeológico na região; estes dados estão apresentados a seguir.

A caracterização do arcabouço geológico da área da BHSM foi realizada com base no Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul, escala 1:750.000, elaborado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2007).

Conforme pode ser visualizado na Figura 2, as formações geológicas presentes na Bacia são muito heterogêneas, partindo desde rochas sedimentares como os arenitos e depósitos aluviais, que apresentam características de formação aquífera, até rochas fraturadas basálticas e cristalinas, como a Formação Serra Geral, que apresenta boa capacidade aquífera, e o Embasamento Cristalino, que se constitui em um aquífero de baixo potencial.

Regiões compostas predominantemente de rochas pertencentes ao Sistema Aquífero Guarani (SAG) de forma indistinta possuem um papel muito importante com relação à produção de recarga, pois os processos de infiltração vertical e efetiva são facilitados devido a grande permeabilidade dos estratos de superfície. As unidades

permeáveis da Formação Pirambóia ocorrem em uma faixa contínua a leste, sendo que a borda oeste é composta pelos estratos que compõem o SAG; assim, são importantes áreas de recarga para o SAG de forma geral.

Na Tabela 1 são apresentadas as proporções de cada Unidade Litológica dentro da BHSM e uma breve caracterização quanto às propriedades aquíferas.

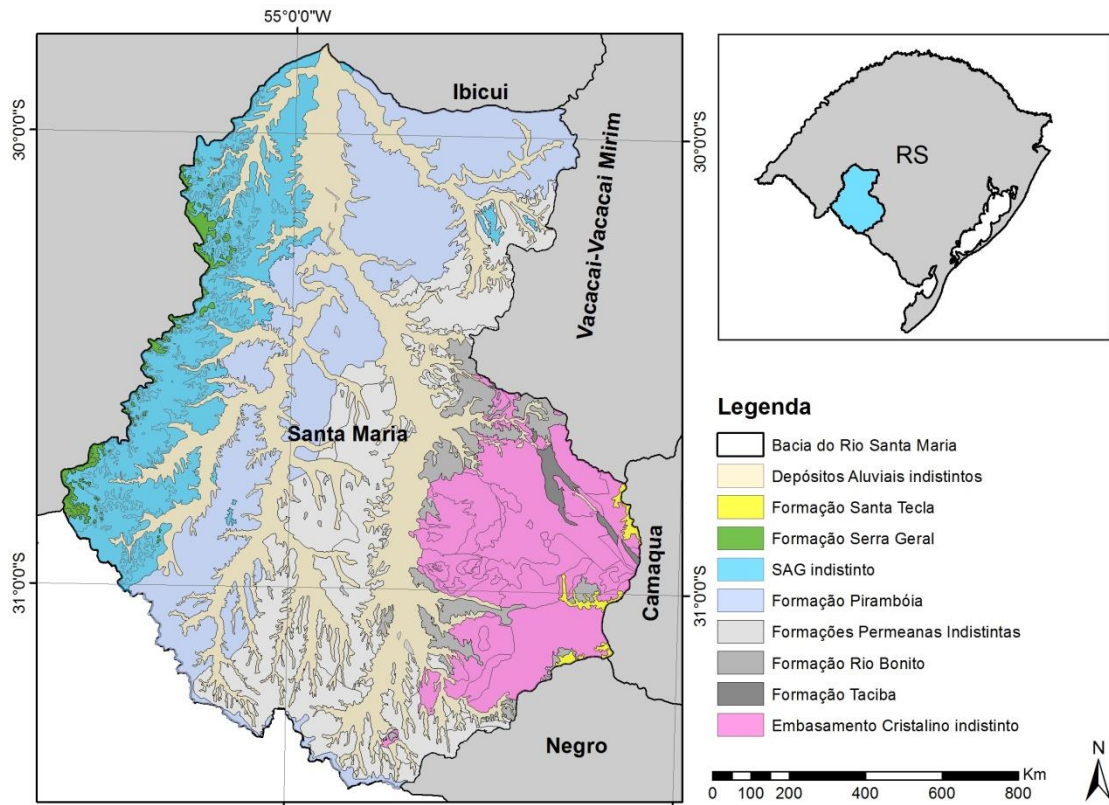


Figura 2. Formações Geológicas da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria

Tabela 1. Distribuição Litoestratigráfica na Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria

ERA	LITOESTRATIGRAFIA	%	LITOLOGIA E CARACTERÍSTICA AQUÍFERA
MESOZOICOCENOZÓICO	Depósitos Quaternários indistinto	27,2	Sedimentos inconsolidados formando aquíferos livres e detritos.
	Formação Santa Tecla	0,5	Arenitos formando aquíferos livres, porém restritos.
MESOZOICOCENOZÓICO	Formação Serra Geral	1,0	Sequências vulcânicas formando aquíferos fraturados importantes.
	SAG indistinto	14,2	Arenitos eólicos médios, parte do SAG e formando aquíferos livres e confinados.
PALEOZOICO	Formação Pirambóia	20,9	Estratificações entre pelitos e arenitos, parte do SAG e formando aquíferos livres a confinados. Muito heterogêneo.
	Formações Permeanas indistinta	17,3	Pelitos não aquíferos.
	Formação Rio Bonito	3,4	Pelitos com intercalações arenosas formando aquíferos regionais.
	Formação Itararé	0,6	Pelitos não aquíferos.
PROTEROZOICO	Embasamento Cristalino indistinto	15,0	Aquíferos Fraturados de baixo potencial.

### 3.1.5. Caracterização Hidrogeológica

A descrição hidrogeológica da BHSM, apresentada na Figura 3, foi realizada a partir das informações obtidas no Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul, 1:750.000 (CPRM, 2005). Neste trabalho, as litologias foram agrupadas em sistemas segundo suas semelhanças no comportamento hidrogeológico aflorante e seu potencial produtor de água subterrânea.

Conforme pode ser visto no mapa, a porção oeste da bacia apresenta aquíferos de alta a média possibilidade de águas subterrâneas, enquanto que a porção leste apresenta aquíferos de média a baixa possibilidade. As principais unidades aquíferas presentes na BHSM:

- Depósitos Colúvio Aluviais - 28%: Sistema Aquífero Quaternário Indiferenciado - Aquíferos Praticamente Improdutivos Para Água Subterrânea em Rochas com Porosidade Intergranular ou Por Fraturas; são constituídos por sedimentos inconsolidados de textura variando entre areia grossa a fina, cascalhos e sedimentos siltico-argilosos depositados em calhas de rios e

arrosios em Planícies Aluviais; salientam que os aluviões constituem um aquífero importante para a obtenção de pequenas vazões, os aluviões são alimentados pela precipitação direta, pelas águas de infiltração do solo que percolam junto ao substrato impermeável e, eventualmente, pelas inundações provocadas pelos cursos de água, o nível freático sofre grandes variações em função das precipitações locais.

- Sistema Aquífero Sanga do Cabral/Pirambóia – 23%: Aquíferos com Média a Baixa Possibilidade para Águas Subterrâneas em Rochas e Sedimentos com Porosidade Intergranular: camadas siltico-arenosas avermelhadas com matriz argilosa e arenitos finos a muito finos, avermelhados, com cimento calcífero. As suas capacidades específicas são muito variáveis, em geral entre 0,5 até 1,5 m<sup>3</sup>/h/m.
- Aquitardos Permianos -18%: Aquíferos Limitados de Baixa Possibilidade para Água Subterrânea em Rochas com Porosidade Intergranular ou por Fraturas, localizam-se em uma estreita faixa na Depressão Periférica, circundo as litologias do embasamento cristalino; formada por argilitos cinza escuros, folhelhos pirobetuminosos e pequenas camadas de margas e arenitos; normalmente os poços que captam somente essas litologias apresentam vazões muito baixas ou estão secos; as capacidades específicas são geralmente inferiores a 0,1 m<sup>3</sup>/h/m.
- Botucatu/Guará -12%: Aquíferos com Alta a Média Possibilidade para Águas Subterrâneas em Rochas e Sedimentos com Porosidade Intergranular; as litologias são compostas por arenitos médios a finos, quartzosos, de cores róseos a avermelhados, apresentando intercalações pelíticas; na zona aflorante as capacidades específicas variam entre 1 até 3 m<sup>3</sup>/h/m; nas zonas confinadas as capacidades específicas ultrapassam os 4 m<sup>3</sup>/h/m.
- Outras unidades aquíferas - 19%.

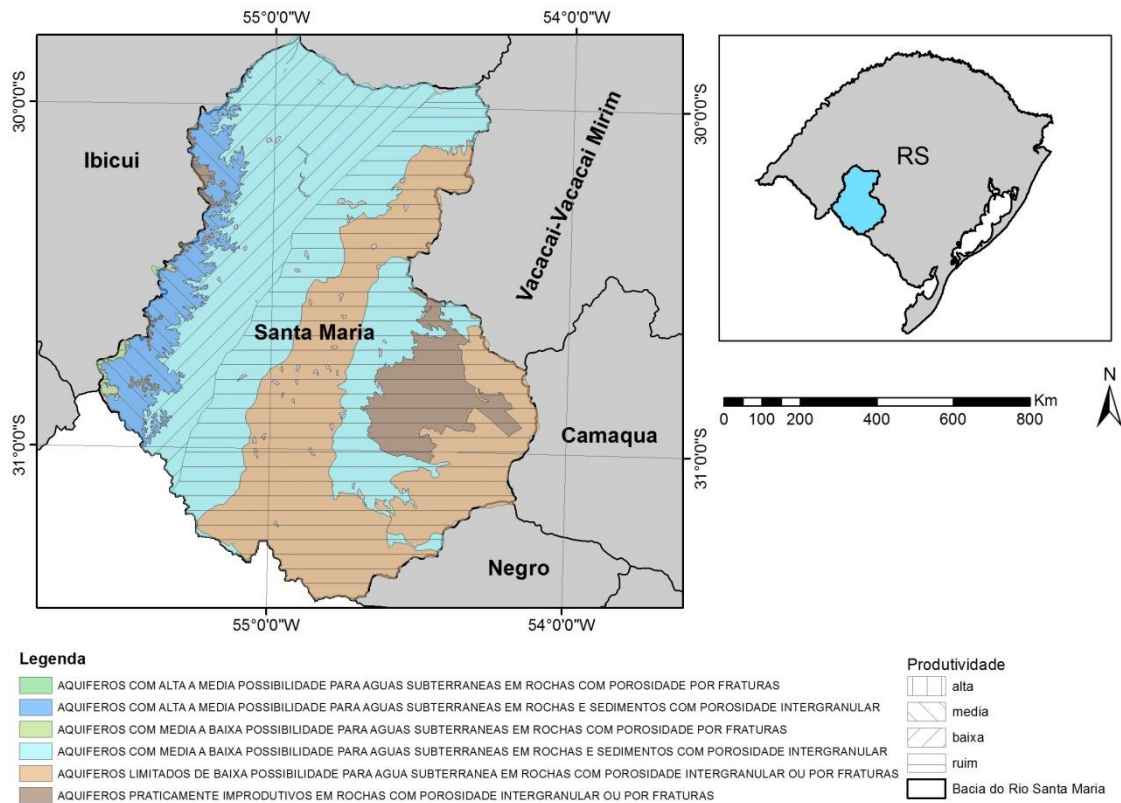


Figura 3. Hidrogeologia da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria

### 3.1.6. Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos na BHSM

A BHSM é considerada especial pelo Estado do Rio Grande do Sul (Art. 20 do Decreto Estadual n 37033/96) em função da existência do risco de racionamento em anos secos, o que limita a possibilidade de outorgar novos volumes de água, ficando a outorga sujeita à análise do DRH e à aprovação do Comitê. Na Bacia, a emissão de outorgas é realizada a cada safra, com prioridade para os usuários mais antigos, tendo em vista a dinamicidade da produção rural e a decisão da área e cultura de plantio.

No Plano de Recursos Hídricos da BHSM está prevista a implementação dos instrumentos de outorga, conforme descrito a seguir:

- **Outorga:** como dito anteriormente, a outorga é autorizada a cada safra e de maneira precária (ou seja, pode ser revogada em situação emergencial): conforme Portarias de Outorga do Departamento de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul a outorga permite irrigação durante 7 dias da semana, 24 horas por dia, num período total de 100 dias (DRH/RS, 2017). No Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Santa Maria foi estabelecido que a Q90 (vazão com 90% de permanência) é a vazão de referência, e o percentual máximo outorgável na bacia é de 50% da Q90. Atualmente já é outorgada 16% da Q90, porém distribuída de maneira irregular na bacia, o que ocasiona comprometimento de alguns cursos d'água (DRH/SEMA, 2016);

- Cobrança: ainda não foi implantada, mas existem estudos metodológicos e simulações desenvolvidas com a participação do Comitê da BHSM; o Plano de Recursos Hídricos somente define que cabe ao Comitê estabelecer os critérios e valores de cobrança (DRH/SEMA, 2016);
- Sistema de Informação: não existe um sistema de informação integrado;
- Enquadramento: foi regulamentado em 2005.

O Comitê Santa Maria definiu um conjunto de diretrizes que devem ser consideradas nos estudos de cobrança pelo uso de água, algumas das quais são colocadas a seguir (DRH/SEMA, 2016):

- Reconhecer a importância da implantação da Cobrança pelo Uso da Água, como mecanismo de indução ao uso racional e eficiente, e como forma de viabilizar a implementação das ações do Plano;
- Estimular a utilização de água reservada, através de um mecanismo que reduza a cobrança pelo uso em reservatórios;
- Considerar coeficiente com vistas a majorar o valor da água captada fora dos sistemas de reservação e distribuição de água a serem instituídos, no âmbito dos territórios de irrigação, quando a área beneficiada se encontrar dentro da abrangência do citado empreendimento;
- Garantir preços diferenciados para cobrança pelo uso da água em área rural, principalmente nas atividades agropecuárias, podendo inclusive prever a diferenciação de preços por cultura.

As diretrizes definidas acima pontuam a direção na qual se deseja que siga a gestão dos recursos hídricos na bacia como, por exemplo, estimular o uso de reservatórios de armazenamento de água, estimular o uso dentro do próprio sistema de água através de uma tarifa maior para água de outro sistema, estimular preços diferenciados para culturas e usos diferentes. Assim, percebe-se que o presente trabalho vai ao encontro das diretrizes que interessam ao comitê para propor os valores de cobrança e os métodos de cobrança na BHSM.

#### 4. PROPOSTA METODOLÓGICA

A metodologia proposta neste estudo consiste na utilização de um modelo hidroeconômico para avaliar o uso conjunto de água superficial e subterrânea visando à otimização econômica da alocação de água entre os usuários na Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria. Portanto é necessária a obtenção de dados que caracterizem adequadamente o sistema hídrico estudado bem como o uso de ferramentas que permitam simular e otimizar este sistema. Esta dissertação é apresentada sob a forma de três artigos científicos submetidos ou a serem submetidos para publicação em revistas de divulgação técnico-científica.

Primeiramente foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o conceito, benefícios e dificuldades na implementação de estratégias de uso conjunto de água superficial e subterrânea. A partir da análise de casos de uso conjunto no mundo, foi possível delinear estratégias que podem ser aplicadas no contexto brasileiro, embasadas nos instrumentos de gestão previstos na Política Nacional de Recursos Hídricos. Este estudo é o primeiro artigo apresentado neste trabalho, intitulado "*Uso Conjunto de Águas Superficiais e Subterrâneas: Análise de Experiências Internacionais e Perspectivas para o Brasil*".

Para a utilização do modelo hidroeconômico de otimização de alocação de água são necessárias as funções de benefício marginal dos usuários de água para irrigação na área estudada; estas funções são conhecidas como "curvas de demanda" e avaliam a disponibilidade de um usuário a pagar pelo recurso, de maneira que, quanto mais escasso o recurso, maior será seu valor marginal. Para obtenção destas curvas foi utilizado o modelo SWAP (Statewide Agricultural Production), o qual é um modelo de otimização da produção agrícola com abordagem *positiva* que utiliza dados observados como caso base no processo de auto-calibração (Howitt et al., 2012); o resultado deste modelo são as curvas de demanda. A aplicação desta metodologia resultou no segundo artigo deste trabalho, intitulado "*Evaluation of Marginal Benefit Curves of Water Use in an Agricultural Rice and Soybean Region - Case of Santa Maria River Basin*". No artigo, além da descrição do método do modelo e da apresentação do valor econômico da água na região da BHSM, também foi realizado um estudo do caso dos eventos de estiagem de 2006 e 2011, sendo analisados os prejuízos advindos da escassez e a importância da gestão eficiente da água para tornar o sistema hídrico mais resiliente e flexível.

O modelo hidroeconômico resolve a alocação da água no sistema hídrico, a sua função objetivo é minimizar o custo da escassez; o resultado do modelo é a alocação otimizada de água, o valor da escassez e do custo da escassez. A aplicação do modelo hidroeconômico necessita de outros dados de entrada além das curvas de demanda, como os influxos de água na bacia que foram obtidos a partir do uso do Modelo Hidrológico de Grandes Bacias - MGB/IPH (Collischonn et al, 2007), demandas urbanas, reservatórios, entre outros. Neste estudo o modelo foi simulado com cenários que incluem as outorgas existentes na bacia, alocação econômica sem restrições, restrição de vazão de saída para a bacia a jusante, bem como a adição de uma fonte de água subterrânea, para avaliação do uso conjunto. Os resultados representam a alocação otimizada e, à medida que são comparados

com a situação atual (caso base), é possível entender as mudanças que podem ser realizadas para reduzir a escassez e aumenta o benefício econômico dos produtores. O estudo hidroeconômico deu origem ao terceiro artigo apresentado neste trabalho, intitulado "*Use of a hydroeconomic model with conjunctive use of surface and groundwater to reduce the scarcity cost in an agricultural area of rice and soybean in southern Brazil*".

O fluxograma apresentado na Figura 5 resume a organização da metodologia do presente trabalho.

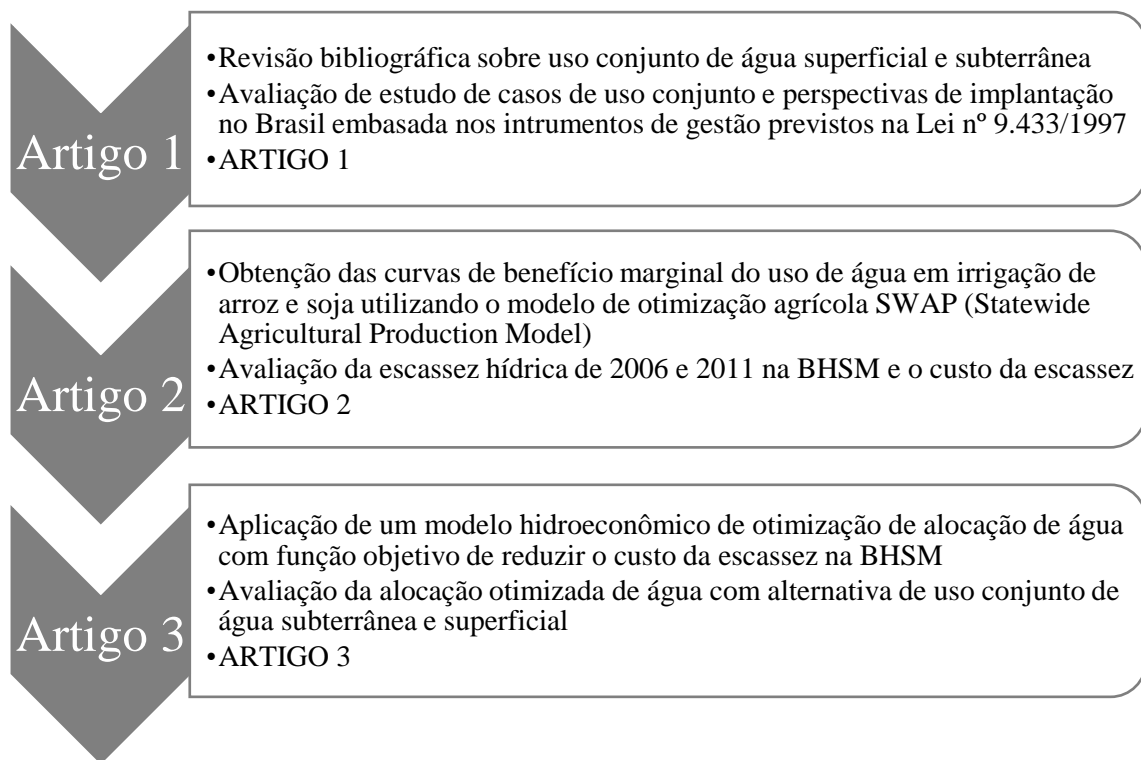


Figura 5. Fluxograma de organização dos artigos que compõem a dissertação

Para a realização deste estudo foram delimitadas condições de contorno, que são apresentadas a seguir.

- Na BHSM, embora existam outras demandas de água, como a cultura de milho, pecuária, e usos industriais, foram levadas em consideração neste estudo somente as culturas de arroz e soja, pois (i) são as culturas com maior retorno econômico na bacia, (ii) são responsáveis pela maior demanda de água na bacia; a representação de demandas menores, sobre as quais existem incertezas, pode acarretar em um sistema excessivamente complexo para responder as perguntas deste estudo.
- As demandas urbanas foram colocadas no modelo com alta prioridade de recebimento de água, pois, (i) o abastecimento humano é definido como uso



- prioritário, e (ii) não faz parte do escopo deste trabalho discutir o valor da água para abastecimento urbano.
- As outorgas na bacia, conforme relatado anteriormente, são fornecidas para 7 dias por semana, 24 horas por dia, durante 100 dias. Entretanto, sabemos que a decisão do produtor de retirar água dos cursos d'água depende de fatores como previsão de chuva, volume reservado, entre outras, e assim existe incerteza acerca do volume efetivamente retirado pelo usuário outorgado; neste estudo foi simulado que o usuário retira 100% do seu volume outorgado, ou seja, é a situação de retirada máxima de água do rio, sendo o caso mais crítico para os recursos hídricos.
  - Na região oeste do Rio Grande do Sul, onde está inserida a BHSM, é uma prática comum dos produtores armazenarem água em pequenos reservatórios dentro de suas propriedades, os quais são abastecidos com água derivada dos rios e também pelo escoamento gerado a partir da precipitação; no Plano de Recursos Hídricos foi obtida uma estimativa de 2.157 reservatórios particulares, essa quantidade de reservatórios torna extremamente complexa a representação de água reservada pelo modelo. Portanto, a solução encontrada foi agregar os reservatórios por município, ou seja, como existem seis municípios inseridos na BHSM, existem seis reservatórios que representam o agregado dos reservatórios particulares. Este método não representa com precisão a dinâmica de reservação na bacia, porém, através da visita na região, percebeu-se que os usuários tendem a operar seus reservatórios de maneira semelhante, e assim esta foi a solução adotada.
  - Assim como os reservatórios particulares, as demandas agrícolas também foram agrupadas por município, devido à área estudada ser extensa e à dificuldade em representar o comportamento exato dos produtores.
  - O calendário de irrigação pode mudar conforme o ano em função da previsão de chuva, mercado de venda, entre outros fatores; neste estudo, foi considerado o calendário de irrigação padrão, o qual se estende de outubro a fevereiro. Não está no escopo deste estudo avaliar a implicação que mudanças no calendário de plantio têm no resultado de escassez, no entanto, esta questão é relevante e pode ser estudada futuramente.
  - A decisão dos produtores de quanta área plantar depende de vários fatores: água reservada, previsão da chuva, preço dos insumos, valor de venda dos produtos, entre outras. Dessa forma, é extremamente difícil prever o comportamento dos usuários com relação à área plantada; neste estudo foram utilizados como valor base os dados de área plantada do IBGE do ano de 2015, pois este foi um ano típico do ponto de vista hidrológico e agrícola.
  - Neste trabalho foi avaliada a reserva de água subterrânea disponível para uso, porém não foram avaliados os custos de bombeamento e distribuição; para a implementação de estratégias de uso conjunto são necessários estudos técnicos sobre os custos da extração de água subterrânea;

- Neste trabalho não foram utilizados os custos de implementação de sistemas de irrigação e distribuição de água, sendo necessário um estudo de viabilidade financeira.

## **5. ARTIGO 1 - USO CONJUNTO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS: ANÁLISE DE EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS E PERSPECTIVAS PARA O BRASIL**

O uso conjunto de água superficial e subterrânea é uma estratégia que visa à otimização do uso dos recursos hídricos disponíveis e a redução dos prejuízos advindos da escassez de água. O atendimento das demandas hídricas é um problema recorrente no mundo todo, e em diversos locais foram aplicadas metodologias de uso conjunto visando o aumento da disponibilidade hídrica e atenuação de problemas relacionados com o uso extensivo destes recursos. Neste capítulo é introduzido o conceito de uso conjunto, seus benefícios e desafios, e também são apresentados casos de aplicação de estratégias de uso conjunto em vários países. A partir da análise destas experiências à luz do sistema de gerenciamento de recursos hídricos brasileiros são apresentadas sugestões e alternativas de aplicação de metodologias de uso conjunto. A motivação deste trabalho foi difundir o conhecimento sobre as estratégias de uso conjunto e fomentar a discussão da implementação destes métodos no Brasil.

Inicialmente é apresentado o conceito de uso conjunto e seu objetivo, que é entendido como "o uso coordenado e integrado de mananciais superficiais e subterrâneos para os mais diversos fins". São discutidas as estratégias de implantação de uso conjunto, bem como seus benefícios e desafios. Os principais benefícios elencados são (i) a melhoria na segurança e confiança de abastecimento; (ii) melhorias na eficiência dos sistemas hídricos e conservação dos recursos, e (iii) o manejo do impacto do uso de recursos hídricos. Os principais desafios são de caráter técnico (conhecimento científico das dinâmicas e processos rio-aquífero) e de gestão (integração de estratégias com instrumentos previstos na Política Nacional de Recursos Hídricos e conscientização dos usuários e dos gestores dos recursos hídricos).

Os principais objetivos de implementação de estratégias de uso conjunto estão relacionados à otimização do uso de recursos hídricos em situações de escassez de água devido à superexploração principalmente por demandas agrícolas, industriais e urbanas, e pela falta de gestão adequada dos recursos. A partir da revisão bibliográfica de estudos de caso percebe-se que o manejo conjunto dos recursos superficiais e subterrâneos pode trazer flexibilidade e resiliência aos sistemas hídricos, reduzindo a escassez da água e seus custos. No Brasil já existem situações de uso de água superficial e subterrânea de forma coordenada para o atendimento das demandas hídricas, porém muitas vezes não existem estudos de viabilidade e dos impactos que estão sendo gerados em ambos mananciais.

O sistema de instrumentos de gestão da água no Brasil pode ser explorado para projetar e dar suporte às estratégias de uso conjunto, contribuindo para tornar os sistemas hídricos mais robustos, flexíveis e adaptáveis. Na Política Nacional dos Recursos Hídricos estão previstos os instrumentos de outorga, cobrança e planos de recursos hídricos, que dão subsídio para o manejo integrado de águas superficiais e subterrâneas. Porém, além de conhecimento técnico e métodos de gerenciamento, deve-se estabelecer a coordenação entre gestores e usuários, para que cada esfera

assuma responsabilidades e trabalhe conjuntamente para a implementação de mecanismos que permitam a otimização dos recursos hídricos.

O artigo apresentado a seguir, intitulado "*Uso Conjunto de Águas Superficiais e Subterrâneas: Análise de Experiências Internacionais e Perspectivas para o Brasil*" será submetido à Revista de Gestão de Águas da América Latina - REGA.

### **5.1. Introdução**

As condições dos sistemas hídricos vêm se deteriorando em diversas regiões no mundo, principalmente devido ao aumento na demanda por água, ocasionado pelo crescimento populacional e econômico (ROSS, 2017, TABARI; YADZI, 2014). Conforme um relatório da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015) existe uma projeção de que a demanda hídrica deva aumentar mais de 40% até 2050. No Brasil, mesmo com uma elevada oferta de água, a má distribuição geográfica deste recurso, bem como a superexploração e falta de programas de gestão adequados, têm provocado graves crises de escassez hídricas em algumas regiões do país. Conforme relatórios da Agência Nacional de Águas (ANA, 2013, ANA, 2010), existem deficiências relacionadas à disponibilidade hídrica na região nordeste, que possui um clima semiárido e baixa concentração de água superficial, na região sudeste, apresentando problemas graves de quantidade e qualidade de água devido às altas taxas de urbanização e industrialização, e na região sul, que utiliza grandes quantidades de água para a irrigação de culturas como milho, soja e, principalmente, arroz. A gestão sustentável dos recursos hídricos se tornou uma questão importante frente aos problemas de disponibilidade de água no mundo; o planejamento do uso dos recursos superficiais e subterrâneos é fundamental para a manutenção dos recursos e seu uso sustentável (FASAKHODI; NOURI; AMINI, 2010). Estratégias de uso conjunto podem promover soluções robustas e eficientes no manejo dos recursos hídricos (SINGH, 2014, ROSS, 2017).

O uso conjunto consiste em uma estratégia de gestão na qual são utilizados, de forma coordenada e integrada, os recursos disponíveis de água superficial e subterrânea, de maneira a explorar de forma complementar as propriedades de ambos mananciais. (PULIDO-VELAZQUES et al., 2003, ROSS, 2017). As estratégias de uso conjunto são desenvolvidas a partir de planos e métodos de gerenciamento embasados em estudos técnicos, científicos, e econômicos acerca das demandas, disponibilidades e decisões operacionais, reduzindo o efeito das variabilidades e incertezas na disponibilidade de água, e melhorando os retornos econômicos. O uso coordenado dos mananciais pode trazer diversos benefícios, incluindo aumento na segurança hídrica e confiabilidade de abastecimento, melhora na qualidade da água, diminuição de perdas, aumento na resiliência do sistema hídrico com mudanças climáticas, e adaptação frente a incertezas na disponibilidade e mudanças nas demandas (MARQUES; LUND; HOWITT, 2010, ROSS, 2017). Estratégias de gestão de uso conjuntam visam, principalmente, obter o maior benefício a partir do uso de água de diversos mananciais. (GGGFA, 2015, ALLEY, 2016).

Nas últimas décadas a utilização de água subterrânea aumentou de maneira rápida e intensa visando o suprimento de diversas demandas, porém sem o acompanhamento técnico adequado (HERRÁIZ, 2009). Os recursos subterrâneos

estão diminuindo: estima-se que em torno de 20% dos aquíferos mundiais seja super-explotado, levando a graves consequências como subsidência, diminuição do escoamento de base, intrusão salina, entre outros (GLEESON et al, 2012). Recentemente, o manejo conjunto dos recursos hídricos foi apresentado como um princípio chave pelo projeto de Governança Global da Água Subterrânea (GGGFA, 2015).

O presente artigo apresenta o uso conjunto de água superficial e subterrânea como alternativa de gestão dos recursos hídricos, de maneira dinâmica e integrada. As variações na disponibilidade e demanda de água, bem como o mau gerenciamento deste recurso, são questões enfrentadas em todo mundo; ao explorar casos de implantação de metodologias de uso conjunto e analisar essas experiências ante o contexto brasileiro, este artigo traz uma contribuição nova para o gerenciamento dos recursos hídricos no Brasil, apontando direções para planos e ações.

## **5.2. Conceito de Uso Conjunto**

Historicamente o gerenciamento de recursos hídricos tem utilizado separadamente as águas superficiais e subterrâneas, ignorando a relação existente e a interdependência entre ambos mananciais. Entretanto, sabemos que estes mananciais não atuam de forma isolada, mas apresentam interações em diversos âmbitos, de maneira que o uso ou a contribuição de um recurso tem, normalmente, efeito sobre o outro. Essa natureza distinta e complementar tem importância fundamental na gestão dos sistemas hídricos (SAHUQUILLO, 2009).

A melhor abordagem do uso conjunto não é aquela que determina uma escolha entre mananciais, mas sim a que determina como melhor utilizar ambos os recursos de maneira conjunta e concomitante para resolver problemas e atender demandas (SAHUQUILLO, 1985). A Organização de Alimentos e Agricultura das Nações Unidas definiu o uso conjunto como “o uso combinado de fontes de água superficial e subterrânea para minimizar os efeitos físicos, ambientais e econômicos indesejados e otimizar o balanço de demanda e abastecimento de água” (FAO, 1995 *apud* EVANS; EVANS, 2011). O termo uso conjunto também foi definido como “a situação em que são desenvolvidos os mananciais subterrâneo e superficial para o abastecimento, mas não necessariamente utilizando ambas as fontes continuamente no tempo ou provendo a cada usuário água de ambas as fontes” (Foster et al, 2010). Pode-se afirmar que o objetivo principal do uso conjunto de água subterrânea e superficial é maximizar os benefícios inerentes do uso de cada manancial, e que o gerenciamento integrado de ambos pode complementar o sistema hídrico e otimizar a produtividade e a eficiência no uso da água.

## **5.3. Estratégias de Uso Conjunto**

As estratégias possíveis para o uso conjunto podem envolver diferentes arranjos e dependem do tipo de problema enfrentado; a definição da melhor estratégia depende da condição temporal e espacial de disponibilidade de água.

Podem ser citadas estratégias que dependem de mudanças nas estruturas físicas dos sistemas, como, por exemplo, modificações em projeto de reservatórios e canais para promover recarga artificial; aumento na capacidade de poços para garantir maior abastecimento em períodos secos; construção de sistemas dedicados para

recarga (bacias de infiltração e poços de injeção), construção de barragens para armazenamento da água em épocas chuvosas, entre outros. Existem estratégias que não dependem de mudanças físicas, como por exemplo, a operação integrada de sistemas de reservatórios superficiais, subterrâneos, canais e rios; acordos temporários para aproveitamento de oportunidades de abastecimento de modo a responder à escassez temporária; coordenação na operação de infraestruturas para armazenamento e extração da água; operação coordenada da interação rio-aquífero com objetivos de uso conjunto; incentivos econômicos para o uso de cada recurso na época planejada; operação de canais e/ou reservatórios para aumentar a recarga em períodos úmidos, entre outros. (MARQUES; LUND; HOWITT, 2010)

Além de avaliar qual é a abordagem mais adequada para a resolução do problema, também é necessário verificar qual o impacto que a estratégia de uso conjunto pode ter sobre o manancial. A investigação da conexão entre os mananciais superficiais e subterrâneos é essencial para verificar os possíveis impactos, já que ambos os recursos apresentam variabilidade temporal, espacial e quantitativa, sendo que muitas vezes a conexão não é plenamente compreendida. Podem-se citar alguns impactos que devem ser investigados, como a redução no escoamento de base dos rios devido ao bombeamento de água subterrânea; a diminuição na água disponível para recarga através da retirada excessiva de água superficial; o carreamento de poluentes pelos rios e a infiltração destas substâncias; salinização de água superficial a partir de descargas aquíferas, entre outros. Além dos impactos físicos, também se deve avaliar a possibilidade de conflitos políticos, que são muito comuns em momentos de escassez hídrica e altas demandas (ROSS, 2017).

#### **5.4. Benefícios e Desafios da Implementação do Uso Conjunto**

A aplicação de estratégias de uso conjunto permite minimizar e distribuir impactos no âmbito espacial e temporal, podendo trazer diversos benefícios ao sistema hídrico, principalmente com relação à segurança, eficiência e gestão dos recursos, conforme descrito a seguir (NWC, 2014, SAHUQUILLO, 1985, EVANS; EVANS, 2011):

Melhora na segurança e confiança de abastecimento: através da manutenção da disponibilidade hídrica frente a variações no cenário climático; manejo do fornecimento de água através do uso intercalado dos mananciais, de acordo com a disponibilidade de cada um, e levando em consideração os impactos ao curso d'água e ao aquífero; aumento da disponibilidade hídrica através de métodos como recarga artificial, reservação de água superficial, entre outros.

Melhora na eficiência do sistema hídrico e conservação dos recursos: redução nas perdas através do entendimento da dinâmica dos mananciais (o caráter mais lento das mudanças subterrâneas, bem como as rápidas respostas superficiais a eventos climáticos e temporais); armazenamento oportuno durante o excesso de disponibilidade superficial; variações mais suaves das demandas de água durante o período de irrigação; uso de ambos mananciais para o abastecimento urbano, evitando o comprometimento quantitativo e qualitativo dos recursos superficiais; redução nas perdas por evaporação em reservatórios através do uso do reservatório subterrâneo (aquéferos).

Manejo de impactos do uso dos recursos hídricos: manutenção da qualidade da água; diminuição no deplecionamento dos níveis dos aquíferos; manutenção do fluxo de base nos rios; aumento das recargas subterrâneas.

Os principais desafios na implementação de estratégias de uso conjunto são de ordem técnica e de gestão. Os desafios técnicos são aqueles relacionados com o conhecimento científico acerca da dinâmica do sistema rio aquífero, como a caracterização da conexão hidráulica, das variações sazonais, atenuações e extrações, bem como o desenvolvimento de modelos conceituais. Os desafios relacionados à gestão envolvem a integração das estratégias de uso conjunto com instrumentos de gestão, como a outorga e a cobrança; a conscientização dos usuários sobre mudanças no método de gerenciamento das águas, e a adaptação de modelos teóricos na simulação da realidade, mediante questões políticas, culturais e econômicas existentes.

### **5.5. Aplicações do Uso Conjunto de Água Superficial e Subterrânea**

Existem diversos estudos que relatam a aplicação do uso conjunto no mundo, através de variadas estratégias e metodologias, para resolver problemas hídricos. A seguir serão apresentados alguns estudos de caso, ressaltando informações acerca dos procedimentos e da metodologia adotada, os resultados obtidos, e os desafios encontrados.

- China (DAI et al; 2016): Em uma bacia hidrográfica de aproximadamente 2.920 km<sup>2</sup> foi desenvolvido um método de otimização de larga escala para a gestão integrada de um sistema de distribuição de água; os principais usos de água são urbano, industrial e agrícola, os quais vêm aumentando devido ao desenvolvimento econômico da região. O modelo faz o balanço hídrico de vários reservatórios para atender as demandas industriais e agrícolas em diversos cenários de alocação; o objetivo foi minimizar o custo total de uso da água, incluindo os custos da transferência de água, armazenamento em reservatórios, bombeamento de água subterrânea, e elevação do nível d'água no aquífero. O modelo utiliza programação de funções de associações *fuzzy*, as quais usam medidas de credibilidade para verificar parâmetros *fuzzy* das restrições para minimizar o custo das operações de alocação de água. Os resultados do modelo indicaram, em diversos níveis de credibilidade, os esquemas de alocação de água mais eficientes, sugerindo uso de água de diversas fontes ao longo do ano, como subterrânea, transferência entre bacias e reservatórios; também foram identificadas as regras de operação ótimas para os reservatórios.
- China (WU et al; 2015): Neste estudo foram investigados os conflitos por água na Bacia do Rio Heihe, na China. Os agricultores da parte média da bacia retiram grandes quantidades de água, reduzindo a disponibilidade na porção baixa, a qual está sobre o deserto de Gobi, e assim afetando o ecossistema nessa região. Foram criadas regulações para a retirada de água superficial, o que implicou no aumento de extração de água subterrânea, causando o declínio no armazenamento aquífero. Para investigar os conflitos de água na região do médio Rio Heihe, foi utilizado um modelo integrado de fluxo de água superficial e subterrânea juntamente com um modelo matemático de otimização dinâmica (abordagem *surrogate-based*). O objetivo foi maximizar o armazenamento de água na zona saturada, mediante as

demandas e regulações existentes. Os resultados da modelagem conjunta indicaram que o uso integrado de ambos mananciais para os objetivos propostos é factível; o modelo também apontou como solução ótima um arranjo de retiradas de água do rio diferente do que está em prática atualmente; a redução da evapotranspiração também seria fundamental para a otimização do sistema. A conclusão final do trabalho foi que a regulamentação das retiradas na parte média da bacia existente favorece a recuperação do ecossistema na parte baixa, no entanto, acelera a degradação da parte média da bacia do Rio Heihe.

- Espanha (KAHIL et al; 2016): Um modelo hidroeconômico foi aplicado no complexo sistema da bacia hidrográfica do Rio Jucar, que se estende por mais de 22mil km<sup>3</sup> no sudeste da Espanha; o modelo foi utilizado para avaliar impactos de mudanças climáticas e políticas de regulação, além de analisar o atendimento das demandas urbanas e agrícolas. O uso intensivo de água superficial e subterrânea durante mais de 30 anos na bacia ocasionou deplecionamento dos níveis aquíferos e diminuição das vazões superficiais, deflagrando problemas severos de qualidade e disponibilidade de água, além de ter deixado o sistema muito sensível a variações climáticas. O modelo otimiza os fluxos e o armazenamento de água na bacia, as decisões de uso do solo e variáveis econômicas, a partir da aplicação de políticas de gestão de recursos hídricos, bem como cenários de mudanças climáticas. Os resultados do modelo indicaram que, na ausência de políticas adequadas de proteção e uso dos recursos naturais, os usuários de água irão deplecionar rios, reservatórios e aquíferos. Assim, se torna importante a criação de políticas de gestão factíveis que aliem o atendimento às demandas com as medidas para melhorar a sustentabilidade do sistema hídrico, tornando-o mais resiliente e visando adaptações para as mudanças climáticas.
- Estados Unidos (DRAPER et al; 2003): Este estudo apresenta um modelo de otimização econômica do principal sistema de águas da Califórnia; o modelo atende 92% da população do estado da Califórnia e 88% da área plantada, realizando operações de água superficial e subterrânea e alocação de água para maximizar o valor econômico dos usos agrícola e urbano, mediante restrições físicas, ambientais e legais (JENKINS et al; 2004). Este modelo, de escala regional, necessitou de diversas informações de entrada de fontes confiáveis, bem como grandes recursos computacionais para representar a complexidade do sistema de água da Califórnia. Os objetivos da utilização do modelo foram verificar a disponibilidade dos usuários a pagar por água; identificar a possibilidade de integração de operações, como uso de água superficial e subterrânea; verificar a possibilidade de transferência de água entre bacias hidrográficas, e identificar as possíveis soluções para reduzir a escassez de água. A função objetivo do modelo maximiza o benefício econômico do uso de água através da diminuição dos custos, assim priorizando a entrega de água para usos economicamente mais viáveis. Os resultados do modelo permitiram avaliar cenários e regras de operação que promovem a redução no custo da escassez de água, bem como o mix de fontes de água ideal para cada cenário. Dessa forma, o modelo fornece subsídio para o gerenciamento dos recursos hídricos da Califórnia.
- Estados Unidos (MANI et al; 2016): Soluções de manejo dos recursos hídricos foram investigadas para uma rede de abastecimento de água no norte da Louisiana, nos Estados Unidos, pois projeções de cenários de mudanças



climáticas indicam que a vazão dos rios provavelmente vai diminuir no inverno, e aumentar nas outras estações, refletindo no armazenamento dos reservatórios superficiais. O aquífero da região vem sendo extensivamente utilizado, o que ocasionou a diminuição do nível d'água e intrusão salina. Tendo como base estes cenários, foi utilizado um método de programação linear mista para otimizar o uso conjunto futuro do uso de água superficial e subterrânea. O modelo maximiza a razão entre o uso de água subterrânea e uso de água do reservatório, o aporte de água no reservatório foi estimado a partir de vazões obtidas em um modelo hidroclimático. Os resultados do modelo indicaram que as demandas de água do período de 2011 a 2025 devem ser atendidas mesmo com uma projeção de diminuição de 2,5% no aporte de água superficial e com a diminuição do bombeamento de água subterrânea, para elevar o nível d'água no aquífero. Os resultados indicaram um conjunto ótimo de fontes de abastecimento, partindo de vários reservatórios e baterias de poços na região do estudo.

- Índia (SINGH, 2016): Em um estudo realizado no estado de Haryana, no nordeste da Índia, foram aplicados dois modelos de otimização para maximizar o retorno financeiro de uma área irrigada através da alocação de água e da área plantada. A região do estudo possui uma área de 41.952 ha e apresenta precipitação média anual de 397 mm, concentrada principalmente nos meses de julho a setembro; a região também possui problemas com o aumento do nível d'água do lençol freático, devido à falta de drenagem das áreas de irrigação. Foi utilizado um modelo de programação linear no qual foi inserida uma componente de água subterrânea para controlar a elevação dos níveis d'água, permitindo o uso de água subterrânea para agricultura. O resultado do modelo indicou que a alocação otimizada dos recursos aumentaria em 31% o retorno financeiro dos agricultores a partir do fornecimento de água para culturas com maior retorno econômico, e que o aumento no uso de água subterrânea para irrigação manteve estáveis os níveis d'água. Os autores do estudo aconselharam os produtores e as agências do governo a praticar o uso conjunto de água subterrânea para maximizar o retorno marginal e para atenuar o problema da elevação do nível d'água sem a necessidade de instalação de novos sistemas de drenagem.
- Índia (RAUL; PANDA, 2013): Em uma área de aproximadamente 2.540 km<sup>2</sup> no leste da Índia a produção de arroz é irrigada a partir do sistema de canais Hiraakud, o qual garante o atendimento de somente 54% da demanda de irrigação com 90% de probabilidade. Foi utilizada uma modelagem de simulação-otimização para obter a maior quantidade possível de água subterrânea que poderia ser bombeada para complementar o sistema de irrigação com limitação no rebaixamento do nível d'água; também foi desenvolvido um modelo de programação linear de alocação de recursos para otimizar o mix de culturas e maximizar o retorno líquido anual. Os resultados dos modelos indicaram que existe disponibilidade de uso da água subterrânea, e que a otimização dos mix de cultura e das estratégias de bombeamento pode levar a um aumento no retorno líquido anual entre 12,5 % e 51,3%. Assim, os autores recomendam a adoção destas estratégias de uso conjunto para o manejo sustentável dos recursos de água e terra disponíveis.
- Irã (ABDOLVANDI et al; 2014): Foi estudado, através de uma abordagem de *system dynamics*, o uso de água em um reservatório no Irã em conjunto com água subterrânea para irrigação, uso industrial, e abastecimento urbano, bem

como os impactos gerados no aquífero pela construção de um novo reservatório. Esta metodologia é baseada na lógica sistêmica para estudar e melhorar sistemas complexos, sendo orientado pelo *feedback* dos processos, enfatizando uma visão contínua do problema através de equacionamento matemático. Foram simulados cenários de uso de água sem reservatório, com reservatório, e com um aumento de 5% na eficiência do uso de água na agricultura. Os resultados do trabalho indicaram que a construção do reservatório implicaria na diminuição do nível aquífero, em consequência das menores recargas aquíferas ocasionadas pela impermeabilização do solo. Para a manutenção do nível aquífero, seria necessário diminuir as extrações de água subterrânea, o que é possível a partir do aumento na eficiência dos usos. Um índice de confiança que representa o atendimento da demanda agrícola a partir da construção do reservatório foi desenvolvido: a confiança no atendimento aumentou de 39.41% (sem reservatório) para 88.21% (com reservatório). Foi testado o aumento de 5% na eficiência de irrigação, e o resultado apontou que com a construção do reservatório e aumento na eficiência, o índice de confiança de atendimento de demanda seria de 90.45%. Também foram aplicados índices de sustentabilidade e de vulnerabilidade: com a maior eficiência na irrigação, a sustentabilidade do sistema aumentou, e a vulnerabilidade diminuiu.

- Irã (REZAEI; SAFAVI; ZEKRI, 2017): Uma metodologia de otimização com um algoritmo fuzzy multi-objetivo foi aplicada na bacia do rio Zayandeh-Rud, no centro do Irã para resolver um problema de uso conjunto com três objetivos: atender demandas de irrigação, maximizar a sustentabilidade no uso de água subterrânea, e maximizar os benefícios econômicos da agricultura. A precipitação média na bacia do rio Zayandeh-Rud é 144 mm/ano; nesta região existe grande pressão sobre recursos hídricos para o atendimento das demandas agrícolas, urbanas e industriais. A falta de disponibilidade superficial ocasionou a extração elevada dos recursos subterrâneos, fazendo com que, em algumas áreas, houvesse deplecionamento aquífero superior a 20m em apenas uma década. Os resultados da aplicação do modelo indicaram o mix de uso de fontes de água que aumenta a eficiência através da diminuição de perdas e diminuição do consumo de água pela irrigação, e no aumento da produtividade para cada área irrigada, ao longo do período analisado. Também foram identificadas as culturas plantadas que aumentavam o benefício econômico.
- Rússia (FILIMONOVA; BALDENKOV, 2015): Foi verificada a possibilidade de utilização de um sistema de água combinado para atender a demanda de água potável na cidade de Arkhangelsk no nordeste da Rússia. O abastecimento de água na cidade de Arkhangelsk é realizado pelo rio Vaymuga, o qual apresenta má qualidade da água; na região existe outro manancial disponível, o sistema aquífero Permilovo. O estudo propôs o design de um sistema de água combinado no qual baterias de poços são colocadas nas margens do rio Vaymuga e induzem a infiltração de água do rio; durante a época de baixa vazão, ocorre o bombeamento de água do aquífero para o abastecimento. Para avaliar este design, foi desenvolvido um modelo numérico de fluxo subterrâneo, no qual foram simulados os cenários de bombeamento e o impacto no nível aquífero e no rio. O resultado da modelagem indicou eficiência na compensação de bombeamento, de maneira que a depleção de água no rio causada pela operação conjunta é igual à

vazão mínima permitida pela legislação, de forma que foi possível atender as demandas por água potável e evitar danos ambientais.

A partir da análise dos estudos de caso apresentados anteriormente é possível concluir que não existe um modelo pronto de uso conjunto, uma vez que a estratégia adotada depende de questões econômicas, sociais, políticas, hídricas e hidrogeológicas. A quantidade, qualidade, acessibilidade e conectividade das águas superficiais e subterrâneas variam substancialmente, de maneira que os impactos em ambos mananciais variam também.

As abordagens descritas acima foram aplicadas em diversas escalas, partindo do abastecimento municipal até a resolução de complexos problemas em nível regional, como na Califórnia; assim, evidencia-se a necessidade de comunicação entre os gestores das esferas políticas e governamentais. As estratégias de uso conjunto foram desenvolvidas para a resolução de diversos problemas, como o abastecimento urbano e atendimento à potabilidade; diminuição da escassez hídrica; atendimento de demandas agrícolas e industriais; recuperação de ecossistemas, e maximização dos benefícios econômicos. Os métodos utilizados foram os mais diversos, sendo principalmente ferramentas de otimização, tanto em termos econômicos como físicos. Os estudos de caso têm em comum o objetivo principal de otimizar o uso dos recursos, promovendo eficiência e sustentabilidade no sistema hídrico.

## **5.6. Reflexões para o Cenário Brasileiro**

A diversificação no uso de fontes de água para atender as demandas hídricas é uma situação recorrente em vários países, e no Brasil não é diferente. Atualmente tem se utilizado água de mananciais superficiais e subterrâneos para melhorar os sistemas hídricos: conforme o Atlas de Abastecimento Urbano de Água 14% dos municípios brasileiros são abastecidos com sistema misto, existindo potencial para aumento desse percentual (ANA, 2010). A Região Metropolitana de São Paulo, que é abastecida por um sistema de reservatórios, recentemente passou por uma crise hídrica sem precedentes, e a utilização de poços de água subterrânea surgiu como alternativa para minimizar a falta de água (BERTOLO et al, 2015). Entretanto, ressalta-se a importância dos estudos de viabilidade e dos impactos, citando-se como exemplo a Região Metropolitana de Recife, na qual a superexploração do manancial subterrâneo ocasionou um grave problema de intrusão salina (HIRATA et al, 2012). A região da Ilha de São Luís, no Maranhão, possui um sistema de abastecimento diversificado, com utilização de poços tubulares, reservatório de água e transposição de água do continente para a ilha (CAEMA, 2012).

A água subterrânea também tem sido utilizada para agricultura, como é o caso da produção de frutas na região do semiárido na Chapada do Apodi, no Ceará, onde a disponibilidade subterrânea subsidiou o desenvolvimento agrícola e econômico da região (MEDEIROS et al, 2003). No oeste da Bahia, a água do Aquífero Urucua tem sido utilizada para irrigação e expansão da fronteira agrícola; entretanto deve-se observar a importância deste manancial, que é responsável pela vazão de base dos afluentes da margem esquerda do Rio São Francisco, e pelas nascentes de tributários da margem direita do Rio Tocantins (GASPAR, 2006). No planejamento

do uso de água subterrânea para agricultura deve-se atentar às consequências adversas do seu uso extensivo, como rebaixamento do nível d'água e salinização do solo, problemas que já ocorrem em aquíferos da região Nordeste, como no Sistema Aquífero Jandaíra e no Sistema Aquífero Beberibe (ANA, 2005).

O uso de água de fontes superficiais e subterrâneas de forma concomitante já é observado em vários locais no Brasil, entretanto, em muitos casos não existem estudos de impactos nos mananciais, ou regras de operação. Existem diversas oportunidades para a aplicação de estratégias de uso conjunto no país, principalmente devido à diversificação de fontes de água e ao elevado potencial aquífero e superficial ao longo do território brasileiro.

Analisando o sistema de gerenciamento de recursos hídricos também é possível destacar oportunidades para o desenvolvimento de programas de uso conjunto embasados por instrumentos de gestão da Política Nacional de Recursos Hídricos, a Lei das Águas - 9.433/97 (BRASIL, 1997). Instrumentos de gestão podem ser aplicados para estimular o uso de mananciais superficiais ou subterrâneos conforme a sazonalidade e a distribuição, dentro de estratégias operacionais previamente determinadas. Dentre os instrumentos definidos pela Lei das Águas estão a outorga dos recursos hídricos, a cobrança pelo uso da água, e os planos de recursos hídricos.

A outorga para o uso da água tem como objetivo assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água, através da preservação do uso múltiplo (BRASIL, 1997); dentre os usos citados pela política nacional de recursos hídricos estão abastecimento público, insumo em processo produtivo, disposição final de resíduos, e aproveitamentos hidrelétricos. A outorga pode ser empregada na configuração de estratégias de uso conjunto, de forma que em épocas de escassez, seja destinada água para usos mais prioritários; este mecanismo pode estar disposto já na concessão da outorga, de maneira que os usuários e o órgão gestor tenham conhecimento da priorização de destino de água em uma bacia hidrográfica.

A cobrança pelo uso de recursos hídrico tem como objetivo reconhecer a água como bem econômico e dar ao usuário uma indicação de seu real valor, incentivar o uso racional da água e a obtenção de recursos financeiros para o financiamento dos programas e intervenções contemplados nos planos de recursos hídricos. Os usos de recursos hídricos passíveis de outorga estão sujeitos à cobrança, o valor arrecadado é aplicado prioritariamente na bacia hidrográfica em que foram gerados, sendo destinados ao financiamento de estudos, projetos e obras (BRASIL, 1997). O instrumento de cobrança pode ser implementado em estratégias de uso conjunto para incentivar o uso em demandas economicamente mais rentáveis, bem como subsidiar estudos e financiar obras de melhoria no sistema hídrico.

Planos de recursos hídricos visam fundamentar e orientar o gerenciamento dos recursos hídricos; como os planos tem caráter de longo prazo, o horizonte de planejamento permite o diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos, a análise de alternativas de crescimento demográfico, de evolução de atividades produtivas e de modificações dos padrões de ocupação do solo; o balanço entre disponibilidades e demandas futuras dos recursos hídricos, em quantidade e

qualidade, com identificação de conflitos potenciais; metas de racionalização de uso; medidas e projetos a serem desenvolvidos para o atendimento das metas previstas, propostas para a criação de áreas sujeitas a restrição de uso, com vistas à proteção dos recursos hídricos (BRASIL, 1997). Através dos planos de recursos hídricos devem ser identificadas as demandas e disponibilidades de água atuais e futuras, com a intenção de verificar conflitos atuais e prever conflitos futuros pela água; assim é possível, já no Plano, identificar possíveis soluções e propostas de estudos específicos de estratégias de uso conjunto. O diagnóstico da situação dos recursos nas bacias hidrográficas é fundamental para o desenvolvimento de mecanismos planejamento que otimizem o uso destes recursos.

Outro programa existente é o pagamento por serviços ambientais (PSA), sobre o qual tramita um projeto de lei atualmente - PL 792/2007 (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2007). O pagamento por serviços ambientais tem como objetivo compensar aqueles que promovem a conservação dos serviços ambientais, como por exemplo, preservação de nascentes, manejo do solo para diminuição da erosão, manutenção de matas ciliares para regular o fluxo nos rios, dentre outras. As estratégias de uso conjunto podem ser associadas a programas de pagamento por serviços ambientais, objetivando a preservação e manutenção dos recursos hídricos.

A alocação negociada é outro mecanismo que objetiva a compatibilização entre a oferta de água em uma bacia e as demandas dos diversos usos, atuais e futuros, funcionando como um sistema de repartição da água da bacia de maneira sistêmica e baseada na gestão participativa e integrada (CBHRSF, 2004). Dos fatores positivos para a implementação da alocação negociada, destaca-se a forte participação pública, estabelecimento de mecanismos de acompanhamento e controle, e a determinação da operação do sistema, a qual é definida pelos usuários com participação da sociedade e tem suporte técnico dos órgãos responsáveis (LOPES; FREITAS, 2007).

A partir dos mecanismos citados acima é possível depreender que o rico arcabouço de instrumentos de gestão da água no Brasil pode e deve ser explorado para configurar e dar suporte às estratégias de uso conjunto, contribuindo para tornar os sistemas hídricos mais robustos, flexíveis e adaptáveis. Entretanto, deve-se ressaltar a importância em estabelecer a coordenação entre as esferas administrativas e os usuários, pois a fragmentação da definição de responsabilidades é um dos maiores obstáculos na implementação de mecanismos de gestão (BANCO MUNDIAL, 2006). Estratégias de uso conjunto transpassam escalas geográficas e administrativas, necessitando de coordenação entre as políticas relacionadas à água subterrânea e superficial, e também políticas sobre o manejo do solo e o planejamento energético (ROSS; MARTINEZ-SANTOS, 2010).

## **5.7. Conclusões**

O uso conjunto consiste no uso integrado e planejado de água oriunda de mananciais superficiais e subterrâneos. Questões relacionadas ao atendimento de demandas hídricas e variações na quantidade e qualidade da água são problemas recorrentes e enfrentados em vários países; para a resolução destes problemas e o aumento na eficiência do sistema hídrico, diversas metodologias de uso conjunto foram aplicadas. Mediante estudos técnicos e coordenações administrativas, é

possível e viável a implementação de estratégias de uso conjunto que promovem a flexibilidade e resiliência dos sistemas hídricos com relação às variações das demandas e disponibilidades temporal e espacial.

Estratégias de uso conjunto podem ser aplicadas para resolver questões em níveis municipais a regionais, problemas de qualidade e quantidade de água, bem como otimização de sistemas, aumentando a eficiência e no lucro. Além disso, promovem a flexibilização a partir da diversificação de mananciais, diminuindo riscos de prejuízo e aumentando a garantia do atendimento de demandas. O conhecimento técnico e o planejamento adequado subsidiam a manutenção da sustentabilidade dos recursos hídricos, preservando mananciais e reservas de água.

Para o sucesso na implementação de estratégias de uso conjunto é importante a participação dos usuários de água, tanto superficiais como subterrâneas, para que haja o entendimento da relação existente entre ambos mananciais, de maneira que o conhecimento sobre os mecanismos irá ajudar os usuários a entender a importância do planejamento e da manutenção dos recursos. A integração entre os usuários, gestores, e técnicos é fundamental para o planejamento de soluções adequadas para o gerenciamento integrado dos recursos hídricos (EVANS; EVANS, 2011).

## 5.8. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento, e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo apoio na realização deste estudo.

## 5.9. Referências Bibliográficas

ABDOLVANDI, A.F.; PARSAMEHR, A.; ABAZADEH, H.; ESLAMIAN, S.; HOSSEINIPOUR, Z. Conjunctive Use of Surface and Groundwater Resources Using System Dynamics Approach (Case Study: Namroud Dam). World Environmental and Water Resources Congress, p. 323–34, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Disponibilidade e Demandas dos Recursos Hídricos no Brasil. Caderno de Recursos Hídricos, Brasília/DF, 134p, 2005.

\_\_\_\_\_. Atlas Brasil: Abastecimento Urbano de Água – Panorama Nacional, Volume 1. Brasília, DF, 72 p. 2010.

\_\_\_\_\_. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Brasília, DF, 432 p., 2013. Disponível em: <  
[http://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/conjuntura/webSite\\_relatorioConjuntura/pr ojeto/index.html](http://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/conjuntura/webSite_relatorioConjuntura/pr ojeto/index.html)>

ALLEY, W.M. Drought-proofing groundwater. Groundwater, v. 54, p. 309, 2016.

BANCO MUNDIAL. Conjunctive Use of Groundwater and Surface Water. World Bank, Washington. 2006. Disponível em: <  
<http://documents.worldbank.org/curated/en/387941468041438440/pdf/370310ARD0 Notes1Issue601PUBLIC1.pdf>>.

BERTOLO, R.; HIRATA, R.; CONICELLI, B.; SIMONATO, M.; PINHATTI, A.; FERNANDES, A. Água subterrânea para abastecimento público na Região Metropolitana de São Paulo: é possível utilizá-la em larga escala? Revista DAE, maio-agosto, p. 6-17, 2015.

BRASIL. Lei n 9.433. de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, Brasília, DF, 1997.

COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO MARANHÃO - CAEMA. Relatório Anual da Qualidade da Água Produzida Pelo Sistema de Abastecimento de Água de São Luís e São José De Ribamar. São Luís/MA, 2p, 2012.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. Projeto de Lei que dispõe sobre a definição de serviços ambientais e dá outras providências. 2007. Disponível em: <[http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/prop\\_mostrarintegra;jsessionid=7F6069F0ECC458B0975F8E6122CA2869.proposicoesWebExterno1?codteor=453221&filena me=PL+792/2007](http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra;jsessionid=7F6069F0ECC458B0975F8E6122CA2869.proposicoesWebExterno1?codteor=453221&filena me=PL+792/2007)>

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO – CBHRSF. Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco: Subprojeto 4.5C – Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco - PBHSF (2004-2013). Brasília, DF, p. 53, 2004.

DAI, C.; CAI, Y.P.; LU, W.T.; LIU, H.; GUO, H.C. Conjunctive Water Use Optimization for Watershed-Lake Water Distribution System under Uncertainty: A Case Study. *Water Resources Management*, v. 30, p. 4429-4449, 2016.

DRAPER, A.J.; JENKINS, M.W.; KIRBY, K.W.; LUND, J.R.; HOWITT, R.E. Economic-Engineering Optimization for California Water Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 129, p. 155–164, 2003.

EVANS, W.R.; EVANS, R. Thematic Paper 2: Conjunctive Use and Management of Groundwater and Surface Water. In: *Groundwater Governance: A Global Framework For Country Action*. 2011. Disponível em: <<http://www.groundwatergovernance.org/resources/thematic-papers/en/>>

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO, 1995. Land and water integration and river basin management. Proceedings of an FAO informal workshop, Rome, Italy, 31 January -2 February 1993.

FASAKHODI, A., NOURI, S., AND AMINI, M. Water resources sustainability and optimal cropping pattern in farming systems: A multi-objective fractional goal programming approach. *Water Resources Management*, vol. 24, p. 4639–4657, 2010.

FILIMONOVA, A.A; BALDENKOV, M.G. A Combined-Water-System Approach for Tackling Water Scarcity: Application to the Permillovo Groundwater Basin, Russia. *Hydrogeology Journal*, vol 24, p. 489–502, 2015.

FOSTER, S.; STEENBERGEN, F. VAN; ZULETA, J.; GARDUÑO, H. Conjunctive use of groundwater and surface water: from spontaneous coping strategy to adaptive

resource management. GW-MATE Strategic Overview Series 2, World Bank, Washington DC, 2010.

GASPAR, M.T.P. Sistema Aquífero Urucuia: Caracterização Regional e Propostas de Gestão. Tese de doutorado, Universidade de Brasília, 204 p., 2006.

GLEESON, T.; WADA, Y.; BIERKENS, M.F.; VAN BEEK, L.P. Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, vol. 488, p. 197–200, 2012.

GROUNDWATER GOVERNANCE GLOBAL FRAMEWORK FOR ACTION - GGGFA. Global Framework for Action. 2015. Disponível em: <[http://www.groundwatergovernance.org/fileadmin/user\\_upload/groundwatergovernance/docs/general/GWG\\_FRAMEWORK.pdf](http://www.groundwatergovernance.org/fileadmin/user_upload/groundwatergovernance/docs/general/GWG_FRAMEWORK.pdf)>

HIRATA, R.; MONTENEGRO, S.; PETELET, E.; WENDLAND, E.; MARENGO, J.; MARTINS, V.; BERTOLO, R.; CARY, L.; MEDEIROS, E.; FRANZEN, M.; PIERRE, D.; AQUILINA, L.; GIGLIO-JACQUEMONT, A.; BATISTA, J. Coqueiral: uma proposta metodológica para solucionar o problema de salinização do Sistema Aquífero da Planície do Recife (PE). XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Bonito/MS, 2012.

HERRÁIZ, A.D. La Importancia de las Aguas Subterráneas. *Revista Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 103, p. 97-114, 2009.

JENKINS, M.W.; LUND, J.R.; HOWITT, R.E.; DRAPER, A.J.; MSANGI, S.M.; TANAKA, S.K.; RIZTEMA, R.S.; MARQUES, G.F. Optimization of California's Water Supply System: Results and Insights. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 130, p. 271-280, 2004.

KAHIL, M.T.; WARD, F.A.; ALBIAC, J.; EGGLESTON, J.; SANZ, D. Hydro-Economic Modeling with Aquifer-River Interactions to Guide Sustainable Basin Management. *Journal of Hydrology*, vol. 539, p. 510-529, 2016.

LOPES, A.V.; FREITAS, M.A.S. A Alocação de Água como Instrumento de Gestão de Recursos Hídricos: Experiências Brasileiras. *REGA*, vol. 4, p. 5-28, 2007.

MANI, A.; TSAI, F.; KAO, S.; NAZ, B.; ASFAQ, M.; TASTOGI, D. Conjunctive Management of Surface and Groundwater Resources under Projected Future Climate Change Scenarios. *Journal of Hydrology*, vol. 540, p. 397-411, 2016.

MARQUES, G.F.; LUND, J.R.; HOWITT, R.E. Modeling Conjunctive Use Operations and Farm Decisions with Two-Stage Stochastic Quadratic Programming. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 136, p. 386–394, 2010.

MEDEIROS, J.F.; LISBOA, R.A.; OLIVEIRA, M.; SILVA JUNIOR, M.J.; ALVES, L.P. Caracterização das águas subterrâneas usadas para irrigação na área produtora de melão da Chapada do Apodi. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol.7, p. 469-472, 2003.

NATIONAL WATER COMMISSION – NWC. Integrating groundwater and surface water management in Australia. 28 p., 2014.



ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. The Millennium Development Goals Report 2015. 2015. Disponível em: <[http://www.un.org/millenniumgoals/2015\\_MDG\\_Report/pdf/MDG%202015%20rev%20\(July%201\).pdf](http://www.un.org/millenniumgoals/2015_MDG_Report/pdf/MDG%202015%20rev%20(July%201).pdf)>

PULIDO-VELAZQUEZ, M.; MARQUES, G.F.; JENKINS, M.W.; LUND, J.R. Conjunctive use of ground and surface water: Classical approaches and California examples. Proc., 11th World Water Congress, International Water Resources Association, Madrid, Spain, 2003.

RAUL, S.K.; PANDA, S.N. Simulation-Optimization Modeling for Conjunctive Use Management under Hydrological Uncertainty. *Water Resources Management*, vol. 27, p. 1323-1350, 2013.

REZAEI, F.; SAFAVI, H.R.; ZEKRI, M. A Hybrid Fuzzy-Based Multi-Objective PSO Algorithm for Conjunctive Water Use and Optimal Multi-Crop Pattern Planning. *Water Resources Management*, vol. 31, p. 1139-1155, 2017.

ROSS, A.; MARTINEZ-SANTOS, P. The challenge of groundwater governance: case studies from Australia and Spain. *Regional Environ. Change*, vol. 10, p. 299–310, 2010.

ROSS, A. Speeding the Transition towards Integrated Groundwater and Surface Water Management in Australia. *Journal of Hydrology*, 2017.

SAHUQUILLO, A. Groundwater in Water Resources Planning: Concjunctive Use. *Water International*, vol 10, p. 57-63, 1985.

SAHUQUILLO, A. La Importancia de las Aguas Subterráneas. *Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp)*, vol. 103, p. 97-114, 2009.

SINGH, A. Simulation and Optimization Modeling for the Management of Groundwater Resources. II: Combined Applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* , vol. 140, p. 1–9, 2014.

SINGH, A. Optimal Allocation of Resources for Increasing Farm Revenue under Hydrological Uncertainty. *Water Resources Management*, vol. 30, p. 2569–2580, 2016.

TABARI, M.M.R.; YAZDI, A. Conjunctive use of surface and groundwater with inter-basin transfer approach: case study Piranshahr. *Water Resour Manag*, vol. 28; p.1887–1906, 2014.

WU, X.; ZHENG, Y.; WU, B.; TIAN, Y.; HAN, F.; ZHENG, C. Optimizing Conjunctive Use of Surface Water and Groundwater for Irrigation to Address Human-Nature Water Conflicts: A Surrogate Modeling Approach. *Agricultural Water Management*, vol. 163, p. 380-392, 2015.

## 6. ARTIGO 2 - EVALUATION OF MARGINAL BENEFIT CURVES OF WATER USE IN AN AGRICULTURAL RICE AND SOYBEAN REGION - CASE OF SANTA MARIA RIVER BASIN

Para o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento de recursos hídricos são necessárias diversas informações, dentre elas os benefícios econômicos dos usos da água, que são base para o planejamento da otimização dos sistemas hídricos; o benefício econômico pode ser entendido com a disponibilidade do usuário a pagar pela água. Este capítulo apresenta o estudo realizado para a avaliação das curvas de benefício marginal do uso de água para agricultura de arroz e soja na Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria. Este trabalho foi realizado para o entendimento das funções de benefício marginal, as quais dão subsídio para a discussão dos valores de cobrança para o uso de água agrícola na região estudada. As curvas de benefício marginal são dados de entrada para o modelo hidroeconômico de alocação otimizada de água.

Para a obtenção da disponibilidade dos usuários a pagar pela água para fins de irrigação na Bacia do Rio Santa Maria foi utilizado o modelo SWAP (Statewide Agricultural Production), o qual é um modelo de otimização que maximiza os ganhos (benefícios marginais) dos produtores. O modelo utiliza o método de Programação Matemática Positiva, o qual tem as vantagens de ser auto-calibrável e necessitar de um conjunto pequeno de dados de entrada, para obter as curvas de benefício marginal em cada região da Bacia do Rio Santa Maria em diversos níveis de escassez de água.

Os resultados da utilização do modelo SWAP apontam que o valor marginal da água variou de 0.02 R\$/m<sup>3</sup> a 0.10 R\$/m<sup>3</sup> com 99% de disponibilidade de água; este valor pode auxiliar em estudos de cobrança de água na região. Outros resultados do modelo compreendem as variações nas áreas plantadas conforme aumenta a escassez de água: em algumas regiões da bacia o modelo aponta que substituir culturas pode trazer maior retorno econômico. Estes resultados são importantes para dar suporte no gerenciamento da água e manejo das regiões agrícolas, reduzindo perdas econômicas e a escassez de água. Recentemente houve dois períodos de baixa disponibilidade hídrica na bacia; com os resultados do SWAP foi possível avaliar o custo da escassez destes anos, pois com a escassez de água a produção de arroz e soja diminuiu e assim houve redução no retorno econômico da agricultura da região. Estes valores são relevantes já que permitem a compreensão de que investimentos em estratégias de manejo podem flexibilizar o sistema hídrico e torná-lo mais robusto frente a situações críticas de disponibilidade hídrica.

O artigo apresentado a seguir, intitulado "*Evaluation of Marginal Benefit Curves of Water Use in an Agricultural Rice and Soybean Region - Case of Santa Maria River Basin*", com autoria de Camila Dalla Porta Mattiuzi, Guilherme Fernandes Marques, Josué Medellín-Azuara e Joel Avruch Goldenfun, e ainda não foi submetido para publicação.

### 6.1. Introduction

Although Brazil has a relatively abundance of water resources, the geographic distribution of this resource, as well as the overexploitation and lack of adequate

management programs have caused serious crises of water scarcity in some regions of the country. Northeast Brazil has scarcity problems due to low precipitation and lack of management policies; metropolitan areas such as São Paulo, Rio de Janeiro and Belo Horizonte have problems related to water quality and availability, and the south of the country has scarcity due to large amounts of water used for the irrigation of crops such as rice and soybeans (ANA, 2010; ANA, 2013).

The state of Rio Grande do Sul, located in southern Brazil, accounts for approximately 50% of rice production and 16% of soybean production in the country (CONAB, 2016). In the western region of the state, despite the relatively high water availability, water demands for agriculture causes a situation of scarcity, thus creating a conflict among users. In addition, the variability of rainfall along the year decreases water supply reliability among users. Therefore, the region needs an adequate management system to ensure the distribution of water among all the uses.

Knowledge of the economic value of water is essential to support the instruments of water resources management. This information can be obtained through marginal benefit curves: these curves relate the user's willingness to pay for water with the availability of water, so that the scarcer the resource, greater is the value to be paid (MANKIW, 2014; GRIFFIN, 2006). The marginal benefit curves are important for hydroeconomic models and can be employed to support decision making in water resources management, as well as in policy analysis, efficient water allocation decisions, and others (HOWITT *et al.*, 2012; TILMANT *et al.*, 2008).

The objective of this work is to calculate the economic cost of water scarcity in a region producing irrigated rice and soybean to evaluate the economic value of the water and the price for raw water charging. For this purpose, marginal benefit curves of water use for agriculture were calculated in the Santa Maria River Basin, in western Rio Grande do Sul. These results are of great importance for water management because they provide subsidies that allow comparing the costs and benefits of water supply through improvements in water management. In addition, the economic values of water calculated here serve as a reference for the improvement of economic management instruments, such as charges of raw water.

## **6.2. Methods**

### **6.2.1. Study Area: Santa Maria River Basin**

The Santa Maria River Basin (SMRB) is located in the west region of Rio Grande do Sul, being part of the Hydrographic Region of Uruguay River (Figure 1). SMRB comprises an area of approximately 15.790 km<sup>2</sup> (IBGE, 2015); 11% of its territory is used for soybean production, and 6% for rice production, these are the two main crops of the basin (DRH/SEMA, 2016). Soybean is a temporary culture in which the irrigation system used is center-pivot (sprinklers); rice is cultivated in large irrigated areas, irrigation occurs by gravity, where is supplied from higher areas and is conducted to the lower elevation (DRH/SEMA, 2016).

There are six counties on the SMRB, and they were used as the territory division to obtain the marginal benefit curves; the regions can be seen on Figure 1, and the cropped areas of rice and soybean in each region is given on Table 1. Two gauging stations of the National Water Agency (ANA, 2017) were used for the hydrologic

analysis; Dom Pedrito (stations 76251000 and 03054002) and Rosário do Sul (stations 76310000 and 03054007).

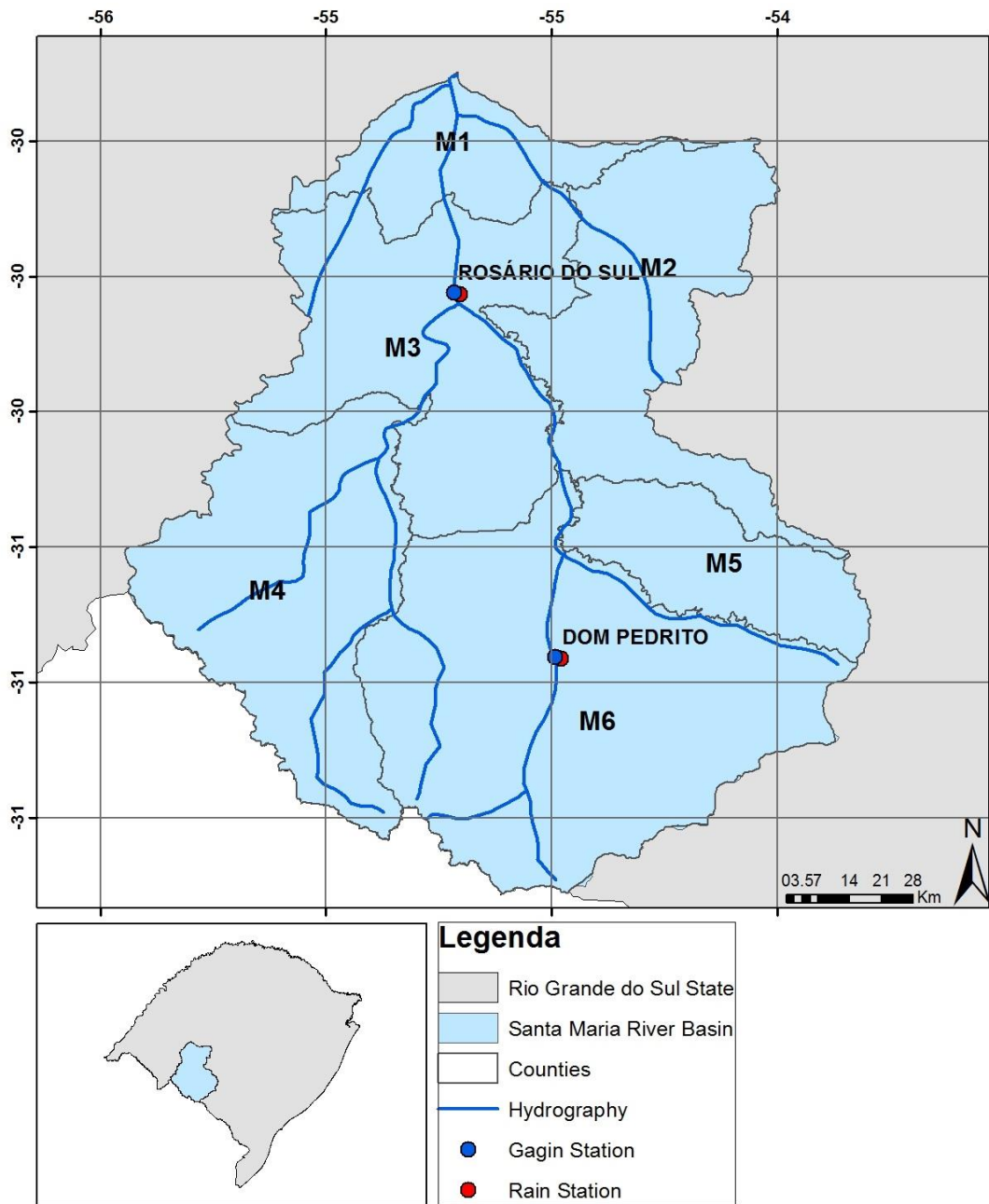


Figure 1. Location of the Santa Maria River Basin and counties

Table 1. Average Annual Rice and Soybean Production in the SMRB for base year 2015 (IBGE, 2015)

	Region	Rice (ha)	Soybean (ha)
M1	Cacequi	7.656	7.178
M2	São Gabriel	13.410	31.130
M3	Rosário do Sul	14.138	24.376
M4	Santana do Livramento	4.053	15.225
M5	Lavras do Sul	1.475	5.710
M6	Dom Pedrito	42.985	71.563

### 6.2.2. Positive Mathematical Programming (PMP)

Positive Mathematical Programming (PMP) is a deductive approach developed by Howitt (1995) to model agricultural production and water use with self-calibration to a base dataset. The main advantages of PMP are nearly exact auto calibration to a base dataset, the ability to set a working model with minimum data requirements, and the versatility in analyzing water management and policy decisions. (HOWITT et al., 2010, Young, 2005).

The PMP self-calibration process presents three stages: (i) linear programming for profit maximization, in which the constraints of the calibration are relative to land use, the set of crops, and their base values; (ii) derivation of the parameters of a quadratic cost function based on Lagrange multipliers obtained from the calibration constraints of the first step and the first order conditions of the objective function; (iii) incorporation of functions that were previously calibrated into a non-linear profit maximization program, subject to constraints on the uses of the factors of production (water, land, labor, and supplies) used in step one and a new restriction on annual water consumption. The economic water demand functions are obtained from various restrictions on water availability for the studied region. (HOWITT et al., 2012, BOOKER et al., 2012).

### 6.2.3. Statewide Agricultural Production (SWAP)

The method of Positive Mathematical Programming was employed in the SWAP (Statewide Agricultural Production) model by HOWITT et al. (2012). SWAP is an optimization model that maximizes the sum of producer surplus (regional profits), that is, the economic benefit to farmers from cropping operations (HOWITT et al., 2012; DRAPER et al., 2003). The model is defined over relatively homogenous agricultural regions. The SWAP model selects crops, water supplies, and other inputs subjected to constraints on water and land, and economic conditions such as prices, yields and costs to optimize production and the economic benefit (HOWITT et al., 2012).

SWAP has been used in several studies, such as in assessing the impacts of climate change on agricultural water demand in California (MEDELLIN-AZUARA et al., 2011); economic evaluation in conjunctive use and water reservation in Southern California (PULIDO-VELAZQUEZ et al., 2004); economic simulation of a water system in California (MARQUES et al., 2006); integrated modeling of conjunctive

water use in a canal-well irrigation region (LIU et al., 2013); among other applications. SWAP was chosen mainly because it is self-calibrating with endogenous data, it needs a relatively small data set, and because it provides the demand curves which can be used on further hydroeconomic analysis.

The use of SWAP for this application demands data from various sources. The economic values for water use were estimated for six regions located in the Santa Maria River Basin; for each region a loss function was obtained which represents the reduction of the marginal benefit of each producer according to the limitations in the availability of water. These six regions are the counties located on the basin, and this division was used because economic and agricultural data are available by county. There are four data set inputs: land irrigated area, applied water per unit area (based on crop requirements for irrigated crops), labor expenses per unit area, and supplies (fertilizers and other inputs). Other input data includes crop yields and prices.

The SMRB model calibrates a CES (Constant Elasticity of Substitution) production function for each crop and region; this production function defines the rates at which inputs can be substituted for each other (HOWITT et al., 2012).

The input data were obtained from several sources, including the Brazilian Institute of Geography and Statistics- IBGE (2015), the Brazilian Agricultural Research Corporation - EMBRAPA (2015), Rio Grande do Sul Institute of Rice - IRGA (2015), Mato Grosso Institute of Agricultural Economy - IMEA (2015). Data was also collected from a visit in the study area and with the members of Association of the Water Users of the Santa Maria River Basin -AUSM; Table 2 summarizes the main input data.

Table 2. Summary of SMRB model input data

	Rice	Soybean
Water use (1000m <sup>3</sup> /ha)	11.5	5.23
Yield (ton/ha)	7.15	2.25
Selling price (1000 R\$/ton)	0.74	1.2
Work (hours/ha)	12.8	8.16

Below we summarize the SMRB PMP model following HOWITT et al. (2012). The index  $g$  is the region of calculation (M1, M2, M3, M4, M5, M6) and  $i$  is the planted crop (rice, soybean). GAMS (General Algebraic Modeling System) (BROOKE et al., 1998), was used to solve the model.

The first stage of the SMRB model is to solve the calibration of the linear program; the objective function maximizes the marginal benefit, according to Equation 1.

$$Max \Pi = \sum_g \sum_i (v_{gi} yld_{gi} - \sum_{j \neq water} \omega_{gij} a_{gij}) x l_{gi,land} - \sum_g \sum_w (wat l_{gw} \varpi_{gw}) \quad \text{Equation 1}$$

Where  $v_{gi}$  are the prices of each crop (marginal revenue),  $yld_{gi}$  are the average crop productivity  $i$  in the region  $g$  for the base year,  $\omega_{gij}$  are the average variable costs,  $\varpi_{gw}$  are the water costs,  $x l_{gi,land}$  are the amount of land used,  $wat l_{gw}$  are the amount of water used,  $a_{gij}$  are the Leontief coefficient, which is given by the ratio of the total observed inputs normalized by the observed planted area ( $\tilde{x} l_{gi,land}$ ).

Production is constrained by the availability of the resources water, land, or both. The land resource constraints are defined by Equation 2, where  $b_{g,land}$  are the region-specific land availability constraints. The water constraints are defined by region and water source, according to Equations 3 and 4, respectively; where  $watcons_{gw}$  are region and water source-specific constraints and  $aw_{gi}$  are crop water requirements.

$$\sum_i x_{l_{gi}} \leq b_{g,land} \quad \forall g \quad \text{Equation 2}$$

$$\sum_i aw_{gi} x_{l_{gi}} \leq \sum_w wat_{l_{g,w}} \quad \forall g \quad \text{Equation 3}$$

$$\sum_w wat_{l_{g,w}} \leq \sum_w watcons_{gw} \quad \forall g \quad \text{Equation 4}$$

There is also a calibration constraint to force the program to reproduce the base year observed crop pattern (Equation 5), it is included a perturbation ( $\varepsilon = 0.0001$ ) to decouple the resource and the calibration constraints. More details can be found at HOWITT (1995) Appendix B.

$$x_{l_{gi,land}} \leq \tilde{x}_{l_{gi,land}} + \varepsilon \quad \forall g, i \quad \text{Equation 5}$$

The shadow values of equations 2, 3 and 5 are defined as  $\lambda_g^L$ ,  $\lambda_g^W$  and  $\lambda_{gi}^C$ ; these are the Lagrange multipliers which will be used in the second step of SMRB calibration process, also known as *dual value*, *shadow value* or *lambda value*. The variations on the lambda values can also be interpreted as an indicator of the marginal benefit.

The second stage of SMRB model is CES production function parameter calibration and the derivation of the parameters of the PMP cost function. The model calibrates de CES production function for each crop and region, according to Equation 6.

$$y_{gi} = \tau_{gi} [\sum_j \beta_{gij} x_{gij}^\rho]^\frac{v}{\rho} \quad \text{Equation 6}$$

Where  $y_{gi}$  are the output of crop  $i$  for region  $g$ , by combing aggregates  $j$ ;  $\tau_{gi}$  are the scale parameters,  $\beta_{gij}$  are the relative use of production factors,  $x_{gij}$  are the production factor use,  $v$  are the returns to scale coefficient (the constant return to scale CES production function requires that the coefficient  $v$  must be set as 1); for more details on the parameters  $\beta_{gij}$  and  $\tau_{gi}$  see HOWITT et al (2012).

The parameter  $\rho$  is a function of the elasticity of substitution ( $\sigma$ ), and can be determined by Equation 7. On this calibration process the elasticity of substitution was set as  $\sigma = 0.2$ ; this value allows for limited substitution between inputs and was obtained through previous analysis and bibliographic research (HOWITT et al., 2012; TORRES et al., 2011; MANETA et al., 2009).

$$\rho = \frac{\sigma-1}{\sigma} \quad \text{Equation 7}$$

The condition for optimal input allocation is that the marginal value of each input for each crop and region must be equal to the marginal cost plus the opportunity cost of the input; this is equal to the base input price plus the dual value on the resource constraints  $\lambda_g^L$  and  $\lambda_g^W$ , and, when binding, the dual value on the calibration constraint  $\lambda_{gi}^C$ . The opportunity cost can be defined as the value of the next best choice that could have been undertaken: when someone makes a choice and pursues it, other choices are sacrificed (GRIFFIN, 2006).

After calibrating the CES production function, the PMP exponential cost function must be estimated using information from acreage response elasticities and shadow values; the exponential cost function is, by definition, always bounded above zero. The exponential cost function gives a better fit without forcing the marginal cost of a product to have unrealistic values; an advantage over the quadratic cost function (HOWITT et al., 2012).

The total land cost exponential parameter  $TC(x_{land})$  is defined by Equation 8. Where  $\delta$  is the intercept and  $\gamma$  is the elasticity parameter for the exponential land area response function; these parameters are obtained from a regression of the calibration shadow values following Howitt et al. (2012).

$$TC(x_{land}) = \delta e^{\gamma x_{land}} \quad \text{Equation 8}$$

The last stage in the SMRB model is to calibrate a non linear optimization program; it is used to ensure that the calibrated model reproduces the observed base year conditions (Equation 9).

$$\begin{aligned} \text{Max}_{x \geq 0} \Pi = \\ \sum_g \sum_i v_{gj} y_{gi} x_{gi,land} - \sum_g \sum_i (\alpha_{gi} + \gamma_{gi} x_{gi,land}^2) - \sum_g \sum_i \sum_{j \neq land} (\omega_{gij} a_{gij} x_{gij}) \end{aligned} \quad \text{Equation 9}$$

There are three assumptions made in the SMRB model: (i) the water is interchangeable among crops within each region; (ii) farmers act to maximize profits, equating the marginal revenue of water to its marginal cost, (iii) it is selected the crop mix that maximizes profits within a region.

### 6.3. Results and Discussion

The PMP method was applied through the SMRB model to estimate the marginal benefit curves in six counties located on the Santa Maria River Basin, the resulting curves are shown on Figure 2. The marginal benefit value represents the user's willingness to pay for an additional unit of water, it is an indicator of the economic potential of water (PULIDO-VELAZQUEZ, 2004).

The availability of water on SWAP was set from 100% to 50% to obtain the marginal value at each point. According to the results, lambda values ranged from 0.02 R\$/m<sup>3</sup> (M1) to 0.31 R\$/m<sup>3</sup> (M4 and M5).

As reported before and seen on Table 2, the crops used in this work were rice and soybean; rice has a higher demand for water than soybean (approximately two times more), rice has a higher yield (approximately three times more), but soybean has higher selling prices (approximately the double of rice selling price). The other inputs – costs of land, water, and labor, also influence the marginal value of water, but they are more similar between soybean and rice.

The marginal benefit curves are the result of a combination of several factors. Figure 2 shows that the behavior is different on M6 compared to the other regions. This diverse behavior happens because M6 has the largest cropped area and it needs great changes on the availability of water to produce a change on the lambda value. In other regions such as M5, which has the smallest cropped area, the opposite occurs; small changes on water produce great changes on the lambda value.



Another factor that influences the marginal benefit curve is the crop mix. Crops with higher economic return are given priority to receive water, whilst crops with lower return tend to receive water after. This can be seen when comparing M1 to M4 curves, although M1 has a higher rice planted area, M4 has higher yield. This means that, for the same amount of water, users on M4 are willing to pay more than those on M1.

Figure 3 shows the percentage change of cropping area of on each region response to different scarcity levels. Regions M2, M3 and M6 didn't present much variation on the percentage of each culture through the scarcity levels analyzed and this may indicate that the division of soybean and rice planting could be already optimized; also, these regions have higher cropped area than the others and it is necessary a higher change on water availability to make a change on land allocation. Regions M1, M4 and M5 increased the rice production and decreased soybean production with higher scarcities, this indicates that there could be a change of cropped culture to maximize economic benefit and water use, since with small variations on water availability the model indicates a change on the percentage of cropped area of rice and soybean; region M1 had the highest change: the current culture division is 50% rice and 50% soybean, but with 50% scarcity the model indicated that the optimal division should be 60% rice and 40% soybean. This analysis is important for the producers to know what culture should be prioritized on situations of low water availability.

Figure 4 shows the change in applied water under scarcity, for water availability of 99% and 50%. These results indicate the decrease on model applied water in each region under different levels of scarcity. Regions with higher % change on applied water were M1, M4 and M5; this is related with the change on cropped area presented on figure 3. Regions M2, M3 and M6 have lower percentage difference on applied water; this indicates that the ration water use/cropped area is more stable being in accordance with results presented on Figure 3, in which this regions had lower changes on cropped cultures.

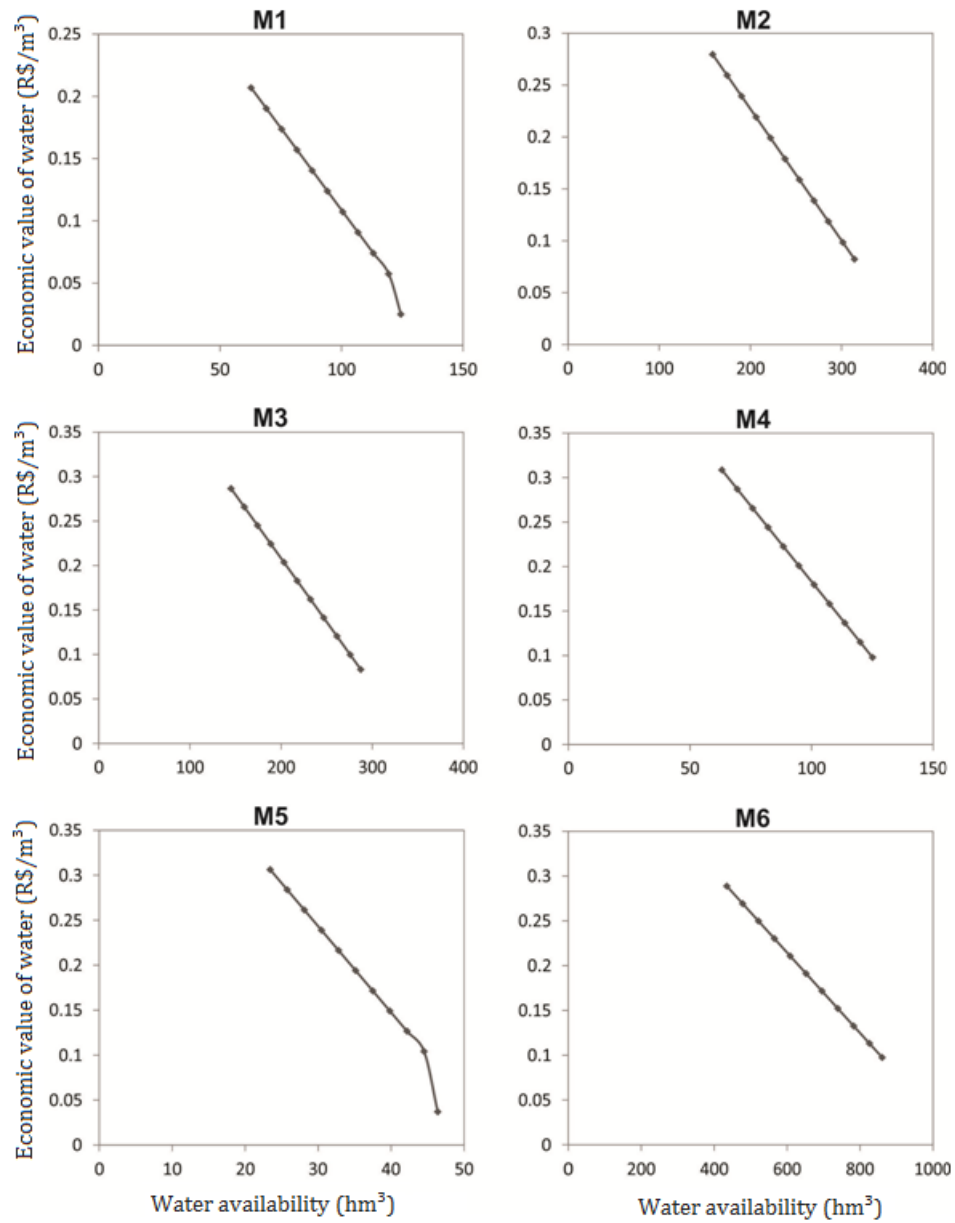


Figure 2. Marginal benefit curves for the six regions.

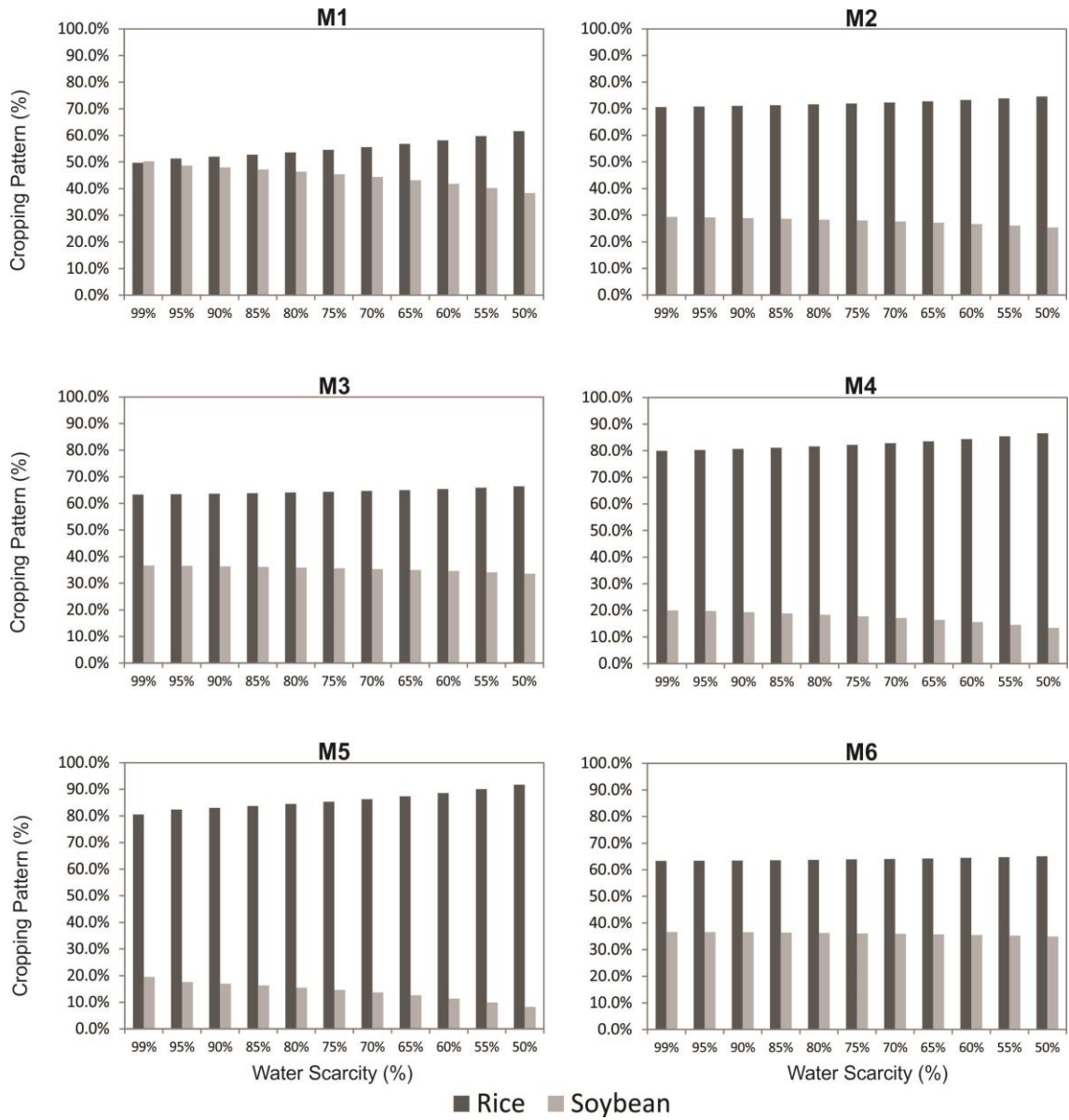


Figure 3. Change on cropping pattern according water scarcity on the six regions.

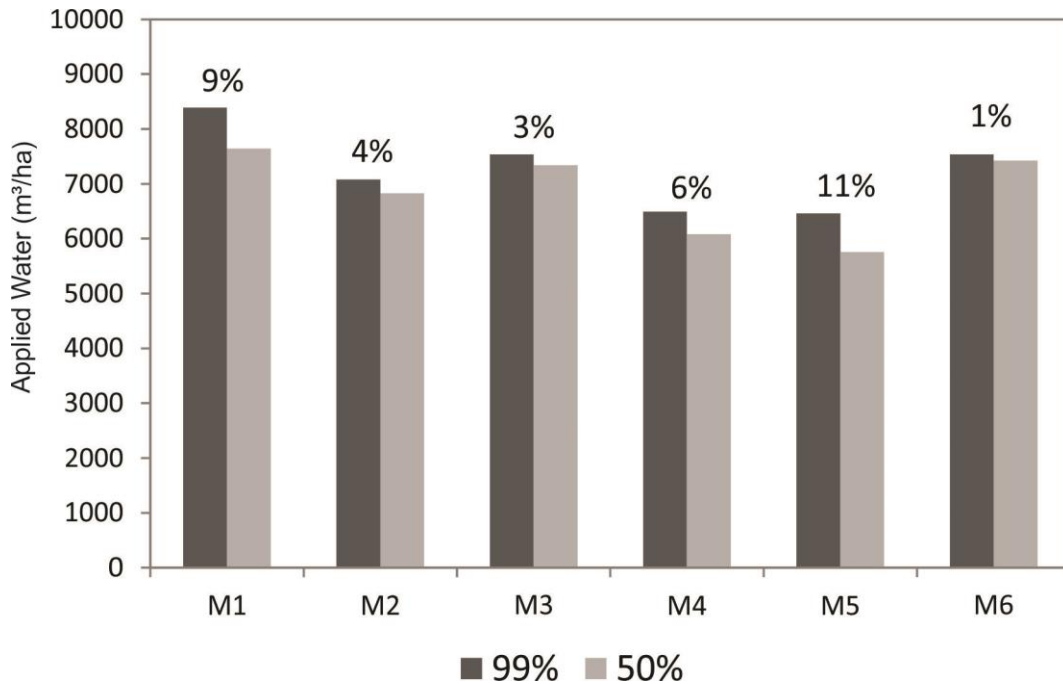


Figure 4. Change in applied water under scarcity (99% and 50% availability) in m<sup>3</sup>/ha.

### 6.3.1. Shadow Value and Water Management

Water charging is an instrument for achieving policy objectives in three ways: (i) financial, to recover capital and costs; (ii) economical, to conserve water and raise productivity and (iii) environmental, to reduce pollution and enhance water quality (MOLLE & BERKOFF, 2007).

Shadow values on the water constraint, also known as Lambda or limited resource La Grange multiplier values, are an important reference on the discussion of raw water charges. The values obtained on this work are an indicator of the economic benefit from the use of water for rice and soybean production. These values alone shouldn't be used for water charges because there are other factors influencing the price of water; but they can still serve as guidance, especially when it comes to charging water for agricultural uses. On this study, Lambda values ranged from 0.02 R\$/m<sup>3</sup> (M1) to 0.10 R\$/m<sup>3</sup> (M4 and M6) at 99% availability of water, when the users have access to almost all water they need. This is an enormous range for an area with similar characteristics, and thus it evidences the particularities of each region.

According to the Association of Water Users on the Santa Maria River Basin (AUSM) the water price isn't defined yet on the basin, as there are some strategies being studied (AUSM, 2017). AUSM made a simulation using, as reference, a charging model proposed for the Hydrographic Region of Guaíba, also located in the Rio Grande do Sul state. This study resulted in two values for water use on irrigated rice: 0.007 R\$/m<sup>3</sup> and 0.015 R\$/m<sup>3</sup>; these values take in account the price for water diversion, use, and organic matter release provided by the National Water Agency. This study doesn't take in account the difference between the several sources used for irrigation on the SMRB, i.e. rivers, reservoirs and dams. Another problem to be solved is the return flow of the irrigation process since the irrigation of rice occurs by inundation of large areas, thus contributing to the water cycle (through infiltration,

return flows, and evaporation). More information about this study can be found at AUSM (2009).

Another study that simulated the charging of raw water on the SMRB was made with the participation of a member of the Santa Maria River Basin Committee. The proposed model considers the charging for organic matter release according to the classification of the river quality, thus stimulating the reuse and treatment of water. The resulted values varied from 0.008 R\$/m<sup>3</sup> to 0.012 R\$/m<sup>3</sup>. The simulations of this study indicated that the charging of raw water is viable on the SMRB, as long as the economic impacts on the different users are taken into account. More information can be found at FATEC/UFSM/FINEP (2009).

With the objective to evaluate the acceptance of the raw water artificial groundwater recharge, a questionnaire was given to members of the Santa Maria River Basin Committee (FORGIARINI et al., 2007). The results indicated that the members of the Committee are in favor of establishing a charge system, and it should prioritize the efficiency of the use and the transparency on the use of the water resources. In a study developed by FATEC/UFSM/FINEP (2009), questionnaires were applied to the population of the SMRB; the results indicated that the residents of the Basin favor a recharge system, mainly because they believe this policy will reduce water use and will generate investments on infrastructure.

### **6.3.2. Scarcity Cost on Drought Periods**

Another way to interpret the results from SWAP modeling is to calculate the penalty curves, which are curves that indicate the economic benefit of increments in water supply (MARQUES et al., 2006). In other words, these curves give the cost of limitation on water availability, which is the scarcity cost. The penalty curves for the six studied regions are shown on Figure 5.

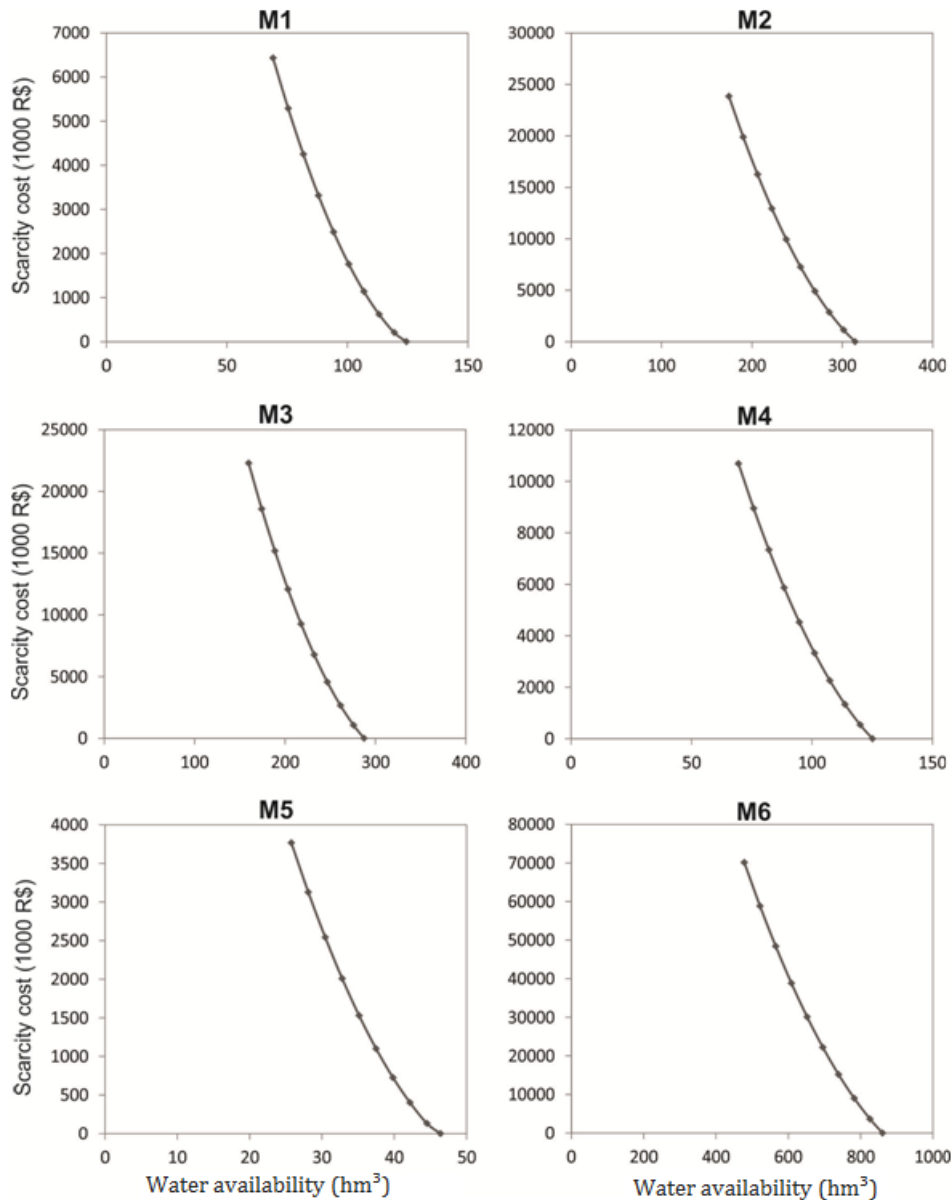


Figure 5. Penalty curves for the six regions.

During a visit to the Santa Maria River Basin, several producers reported two dry periods that recently occurred and had a negative impact on the agricultural production – the crop years 2006/2007 and 2011/2012. An investigation about the variations in the planted area and the hydrological variables that characterize the dry period is shown here; with this data it is possible to estimate the scarcity cost of those periods.

The amount of area of rice and soybean planted in each county of the Santa Maria Basin was obtained with IBGE (2017) and can be seen on Figure 6. In the graphs it is shown that on the reported years there was a great diminution of area on both irrigated crops. Rice planted area on Dom Pedrito went through a cutback of 37% on 2006/2007 and 35% on 2011/2012, compared to their respective former year. In Santana do Livramento, the reduction was 30% and 27%, respectively. São Gabriel and Rosário do Sul also had cut backs varying from 15% to 27%. In the county of Cacequi there was no reduction on the planted area. A similar situation is seen on

the soybean production: Dom Pedrito had a cutback of 45% on 2006/2007 and 23% on 2011/2012; São Gabriel had a reduction of 20% on the planted area in 2006/2007. In the other counties the variation was very small; this can be explained by the lower dependence of the soybean production on the water availability. It is important to say that there are other factors that influence the producers' decision on the amount of area to plant each year, for example, the cost of other supplies, the price of selling, market variations, amongst others.

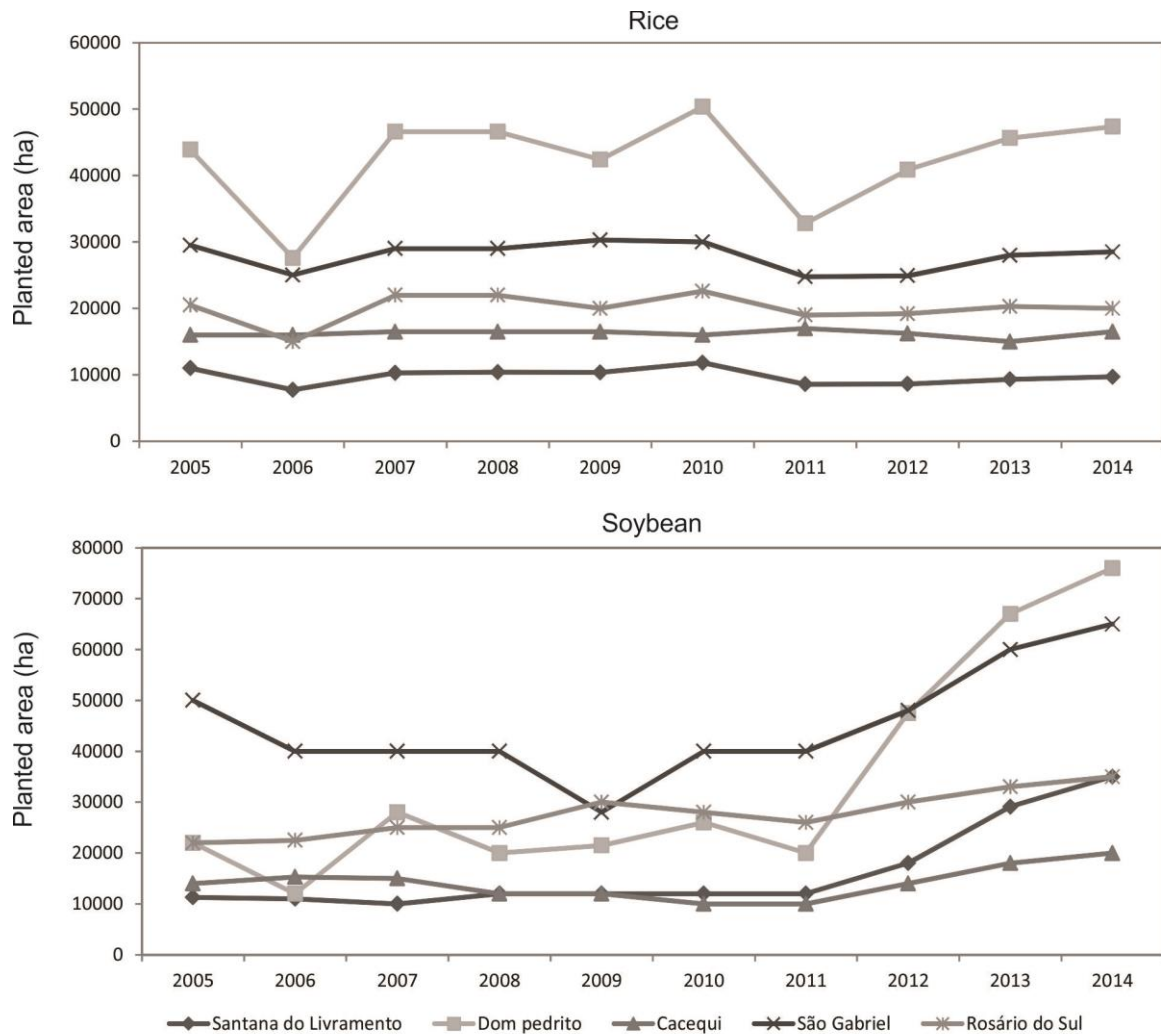


Figure 6. Rice and soybean planted area for the six regions (2005-2014).

Figure 7 present annual average streamflow of the Santa Maria River and the accumulated annual precipitation at two sites: Dom Pedrito and Rosário do Sul, respectively. The data was obtained from the website of the National Water Agency (ANA, 2017). On Rosário do Sul there was a lack of rain data in the years 2009 and 2010; the series was completed with data from the Precmerge product, which uses satellite observed precipitation (Rozante et al, 2010). The two dry periods reported before can be seen on both graphs; the reduction of streamflow on the years 2006 and 2011, and low annual precipitations. According to ANA (2006) the average precipitation on the Santa Maria River Basin is 1444 mm/year. It is important to point out that the results are attached to the observed precipitation series and no stochastic modeling was made.

Water availability in river flow depends on temporal variability, therefore the scarcity can also be seen through the permanence curve, which is a function that characterizes frequency of flow offer; it relates river discharge with the percentage of time it is exceeded or equaled over the whole analyzed period (Cruz & Tucci, 2008). Figure 8 presents the permanence curve of the Santa Maria River for the years 2006, 2011 and the complete series on Dom Pedrito (2000-2016) and Rosário do Sul (1967-2016). The curves from both 2006 and 2011 are below the complete series curve, meaning that on those years the availability of water was lower than the average; these results reinforce the information obtained from the farmers and the crop area data from IBGE.

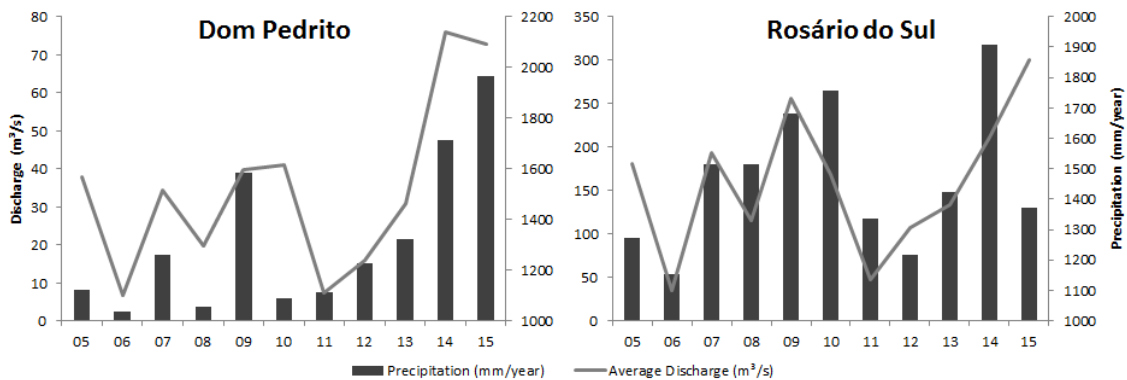


Figure 7. Annual average stream flow and accumulated annual precipitation of the Santa Maria River.

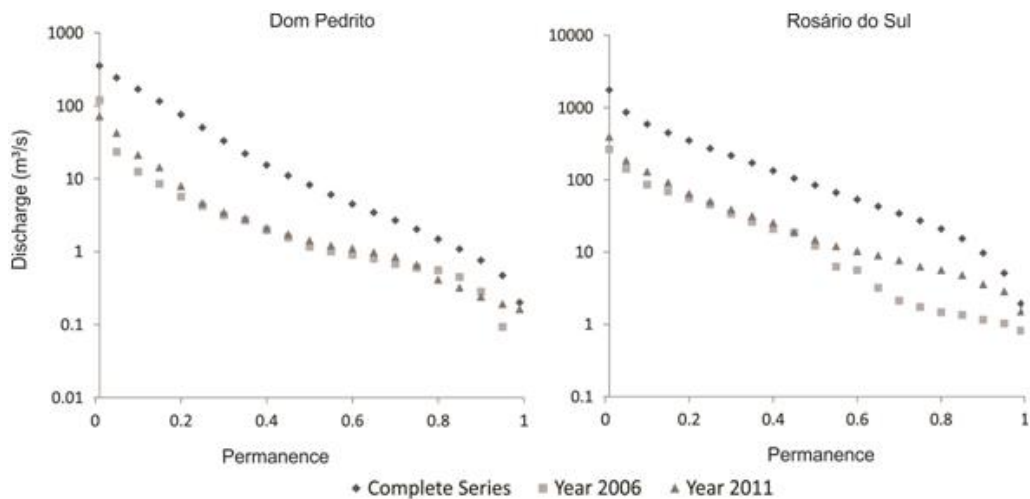


Figure 8. Permanence curve of the Santa Maria River for the years 2006, 2011 and the complete series on Dom Pedrito (2000-2016) and Rosário do Sul (1967-2016).

As reported before, the decision of how much area to plant depends on several factors, including water availability. If we consider that on the years 2006 and 2011 the producers would plant the same area as the former years, assuming that the other factors didn't change in this period (e.g. price of selling, yield), we can have an



estimate of the scarcity cost of those years. This comparison is shown on Table 3. The area of rice and soybean is the total planted area from IBGE (2017) weighted by the area of the county that is inside the Santa Maria River Basin. The amount of water is derived from the consumption of water by the crops ( $\text{hm}^3/\text{ha}$ ), obtained from EMBRAPA (2015) and IRGA (2015). The scarcity cost, in 1000 R\$, is obtained from the penalty curves, as presented on Figure 5.

Water scarcity is the difference between water used and the amount of water that users would take if it were freely available with zero marginal cost; the scarcity cost provides an economic basis for a volumetric definition of shortage (DRAPER et al., 2011). The results in Table 3 are the scarcity cost of the years 2006/2007 and 2011/2012; both periods presented similar values, indicating that the low water availability was similar in those years, which is in agreement with the hydrological analysis presented before.

The scarcity cost ranged from R\$ 554,000 (Lavras do Sul - 2011/2012) to R\$ 34,025,000 (Dom Pedrito - 2011/2012). This result shows how much the producers could have earned if they had other sources of water. The increase on water availability by using different sources can improve the resilience of the water system and return great benefits for the agricultural regions (PULIDO-VELAZQUEZ, 2004). In order to verify the magnitude of the scarcity cost, it was compared with the net return of producers on the studied regions; results are shown in Table 4. The net return was calculated by production gross return minus production costs using the same information as the input for SWAP described before. Results show that scarcity cost accounted for 2.2% (São Gabriel – 2011/2012) to 9.2% (Dom Pedrito – 2006/2007) of the net return.

The results presented above bring up the discussion about water management costs and its importance for economy and society. Usually the decision on how much area to plant depends on water availability, which is related to several factors such as distance to streams and water sources, permits, water prices, weather forecast, among others. The problem is that some of these factors aren't always predictable with a good level of confidence and occasionally there could be a smaller availability of water than what was planned, thus causing economic losses that directly affect producers and society. As shown here, on the years of 2011/2012 rain and stream discharge was below average, and the loss on soybean and rice production in a portion of Dom Pedrito which comprises the Santa Maria River Basin was around R\$32 million, which represented 9.2% of the total net return. Looking at these numbers gives an idea of the losses on tax collection, the local economic impacts, and the cost of water management.

Investments on infrastructures and studies could improve water management and the resilience of the water system; for example, in case of abnormal low water availability there could be an additional water supplied from groundwater sources, water transfers from other basins, construction of reservoirs, and also non-structural measures such as altering the planting schedule or changing crops for a less water consume. This way, system operation would be more flexible and economic losses could be minimized. While assessment and constructions of these various options

have a cost, water management cost becomes a consideration, and the economic losses and social impacts that could be avoided in the future.

Table 3. Scarcity cost of the years 2006/2007 and 2011/2012 for the six regions

Region	Rice (ha)		Soybean (ha)		Water (hm <sup>3</sup> )		Scarcity Cost (1000R\$)	
	2006/07	2011/12	2006/07	2011/12	2006/07	2011/12	2006/07	2011/12
Santana do Livramento	1,419	1,408	130	-	1,702	1,621	R\$ 2,324	R\$ 2,186
Dom Pedrito	15,348	16,525	9,416	5,650	22,598	21,982	R\$ 34,025	R\$ 32,788
Cacequi	-	-	-	-	-	-	-	-
São Gabriel	2,155	2,510	4,789	-	4,987	2,889	R\$ 6,182	R\$ 3,048
Rosário do Sul	3,830	2,507	-	1,393	4,410	3,615	R\$ 5,520	R\$ 4,288
Lavras do Sul	-	-	-	952	-	498	-	R\$ 554

Table 5. Scarcity cost percentage of net return for the six regions

Region	Net Return (1000 R\$)	Scarcity Cost (1000R\$)		Scarcity Cost percentage of Net Return (%)	
		2006/2007	2011/2012	2006/2007	2011/2012
Santana do Livramento	R\$ 58,092.94	R\$ 2,324	R\$ 2,186	4.0%	3.8%
Dom Pedrito	R\$ 369,587.98	R\$ 34,025	R\$ 32,788	9.2%	8.9%
Cacequi	R\$ 47,818.42	-	-	-	-
São Gabriel	R\$ 137,278.88	R\$ 6,182	R\$ 3,048	4.5%	2.2%
Rosário do Sul	R\$ 133,519.10	R\$ 5,520	R\$ 4,288	4.1%	3.2%
Lavras do Sul	R\$ 23,295.74	-	R\$ 554	-	2.4%

#### 6.4. Conclusions

The SMRB PMP agricultural optimization model was employed to obtain the marginal benefit curves of water use in an agricultural rice and soybean region in southern Brazil. The results indicate that there is a range of marginal values between 0.02 R\$/m<sup>3</sup> (Cacequi) and 0.10 R\$/m<sup>3</sup> (Dom Pedrito). These values represent the users' willingness to pay, reflecting the economic value of water used to irrigate rice and soybeans in the Santa Maria River Basin. These results can be used as reference in studies to assess the potential of raw water charging in the basin, thus contributing to the water management on the basin.

Model results indicate that on regions M1 (Cacequi), M2 (São Gabriel) and M5 (Lavras do Sul) there could be a change on type of culture cropping from soybean to rice in low water availability periods, to increase economic benefits under scarcity. This could indicate a change on the behavior of the users to reduce losses.

The marginal benefit curves were employed to estimate the scarcity cost of two dry periods on the Santa Maria River Basin. The results provide a starting point to estimate revenue losses related to water between a dry and relatively wet period.

The scarcity cost ranged from R\$ 554,000 to R\$ 34,025,000. It was compared with the net return of producers on the studied regions, and results showed that scarcity cost accounted for 2.2% to 9.2% of the net return.

With these results and insights, the potential of various water management alternatives is highlighted. The approach used in this work has distinguished from considering the marginal value of water, improving decision making information to evaluate optimal water allocation among users and helping in the proper planning of the use of this resource.

### **6.5. Acknowledgements**

The authors thank IPH/UFRGS and CNPq for their support in this study; the Association of Water Users of the Santa Maria River Basin for their support on the field and data collecting. We thank Professor Emeritus Richard Howitt for facilitating some portions of the PMP routines employed in this study.

### **6.6. Referencics**

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Caderno da Região Hidrográfica – Uruguai. Brasília/DP, 132 p., 2006.

\_\_\_\_\_. Atlas Brasil: Abastecimento Urbano de Água – Panorama Nacional, Volume 1. Brasília, DF, 72 p. 2010.

\_\_\_\_\_. Hidroweb. Available at: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Access in 2017.

ASSOCIAÇÃO DOS USUÁRIOS DE ÁGUA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SANTA MARIA – AUSM. Simulação de Tarifa por Uso de Água por Hectare para Lavoura de Arroz Segundo Modelo Proposto para a Região Hidrográfica Do Guaíba. Dom Pedrito, 2009.

\_\_\_\_\_. Gestão: Tarifação. Available at: <http://www.ausm.com.br/gestao>. Access in 2017.

BOOKER, J. F.; MICHELSEN, A. M.; HOWITT, R. E.; YOUNG, R. A. Economics and the modeling of water resources and policies. *Natural Resource Modeling Journal*, v. 25, n. 1, 2012.

BROOKE, A., KENDRICK, D., MEERAUS, A., AND RAMAN, R. GAMS: A user's guide. GAMS Development Corporation, 1998.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos. Vol 4, 154p, 2016.

CRUZ, J.C. & TUCCI, C.E.M. Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.13, n.1, p. 111-124, 2008.

DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DA SECRETARIA DO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - DRH/SEMA. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria. 2016.

DRAPER, A.J.; JENKINS, M.W.; KIRBY, K.W.; LUND, J.R., HOWITT, R.E. Economic-engineering optimization for California water management. *J Water Resour Plan Manage*, v. 129, p. 155–164, 2003.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Cultivares: soja. 2015.

FATEC/UFSM/FINEP. Simulação para Aplicação da Cobrança em Escala Real – St Hidro. Relatório Técnico Do Projeto, volume 1. 2009.

FORGIARINI, F.R.; SILVEIRA, G.L.; CRUZ, J.C. Cobrança Pelo Uso da Água e Comitês de Bacia: Estudo de Caso da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria/RS. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo, 2007.

GRIFFIN, R.C. *Water Resource Economics, the Analysis of Scarcity, Policies and Projects*. Cambridge: MIT Press. 2006.

HOWITT, R. E. Positive mathematical programming. *American Journal of Agricultural Economics*, v. 77, n. 2, p. 329-342, 1995.

HOWITT, R. E.; WARD, K. B.; MSANGI, S. *Statewide Agricultural Production Model*. University of California, Davis. 2001.

HOWITT, R. E.; MEDELLÍN-AZUARA, J.; MACEWAN, D.; LUND, J. R. Calibrating disaggregate economic models of agricultural production and water management. *Environmental Modelling & Software*, v. 38, p. 244-258, 2012.

HOWITT, R.; MACEWAN, D.; MEDELLIN-AZUARA, J.; LUND, J.R. *Economic modelling of agriculture and water in California using the Statewide Agricultural Production Model (SWAP). A Report for the California Department of Water Resources . CA Water Plan*. 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Banco de Dados: Cidades. 2015

\_\_\_\_\_. Banco de Dados: Cidades. 2017.

INSTITUTO MATO-GROSSENSE DE ECONOMIA AGROPECUÁRIA - IMEA. Custos de Produção da Soja. 2015

INSTITUTO RIO-GRANDENSE DE ARROZ. Custos de Produção do Arroz Irrigado. 2015

LIU, L.; CUI, Y.; LUO, Y. Integrated Modeling of Conjunctive Water Use in a Canal-Well Irrigation District in the Lower Yellow River Basin, China. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 139, p. 775-784, 2013.

MANETA, M.; TORRES, M.; WALLENDER, W.; HOWITT, R.; VOSTI, S.; RODRIGUES, L.; BASSOI, L. A spatially distributed hydro-economic model to assess the effects of drought on land use, farm profits, and agricultural employment. *Water Resources Research*, vol. 45, 2009.

MANKIW, N. G. *Introdução À Economia - Tradução da 6ª Edição Norte-americana* - 2014.

MARQUES, G.F.; LUND, J.L.; LEU, M.R.; JENKINS, M.W.; HOWITT, R.; HARTE, T.; HATCHETT, S.; RUUD, N.; BURKE, S. Economically-Driven Simulation of Regional Water Systems: Friant-Kern California. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 132, n. 6, p. 468-479, 2006.

Medellin-AZUARA, J.; HOWITT, R. E.; WALLER-BARRERA, C.; MENDOZA-ESPINOSA, L. G.; LUND, J. R.; TAYLOR, J. E. A calibrated agricultural water demand model for three regions in northern baja California. *Agrociência*, v. 43, n. 2, p. 83-96, 2009.

MEDELLIN-AZUARA, J.; HOWITT, R. E.; MACEWAN, D.J.; LUND, J. Economic impacts of climate-related changes to California agriculture . *Climatic Change* v. 109, p. 387–405, 2011.

MOLLE, F.; BERKOFF, J. *Water Pricing in Irrigation: Mapping the Debate in the Light of Experience*, 2007.

PULIDO-VELAZQUEZ, M. Economic values for conjunctive use and water banking in southern California. *Water Resources Research*, 2004.

PULIDO-VELAZQUEZ, M.; JENKINS, M.W.; LUND, J.R. Economic values for conjunctive use and water banking in southern California. *Water Resources Research*, vol. 40, 2004.

ROZANTE, J.R.; MOREIRA, D.S.; GONÇALVES, L.G.; VILA, D.A. Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation over South America. *American Meteorological Society*, v. 25, p.885-894, 2010.

TILMANT, A.; PINTE, D.; GOOR, Q. Assessing marginal water values in multipurpose multireservoir systems via stochastic programming. *Water Resources Research*, v. 44, n. 12, 2008.

TORRES, M.O; MANETA, M.; HOWITT, R.; VOSTI, S.A; WALLENDER W.W; BASSOI, L.H.; RODRIGUES, L.N. Economic impacts of regional water scarcity in the São Francisco River Basin, Brazil: an application of a linked hydro-economic model. *Environment and Development Economics*, vol. 17, p. 227–248, 2011.

### **7. ARTIGO 3 - USE OF A HYDROECONOMIC MODEL WITH CONJUNCTIVE USE OF SURFACE AND GROUNDWATER TO REDUCE THE SCARCITY COST IN AN AGRICULTURAL AREA OF RICE AND SOYBEAN IN SOUTHERN BRAZIL**

A escassez de água resultante do uso intensivo dos recursos hídricos promove prejuízos econômicos, danos à sociedade e ao meio ambiente. A alocação otimizada de água tem como objetivo atender às demandas hídricas e reduzir o custo da escassez, ou seja, reduzir as perdas econômicas decorrentes da escassez de água. Este capítulo apresenta o estudo de alocação otimizada de água com uso conjunto de água superficial e subterrânea na Bacia do Rio Santa Maria. A interpretação dos resultados deste trabalho aponta que é possível diminuir a escassez na bacia e também diminuir o custo da escassez, através da realocação de água entre os usuários.

Inicialmente é apresentada a região de estudo, a Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria, e seus principais usos de água - agricultura de arroz e soja, e demandas urbanas. A região estudada apresenta disponibilidade hídrica superficial e subterrânea, porém somente água dos rios e reservatórios é utilizada para o atendimento das demandas. Em seguida são apresentadas as etapas de obtenção dos dados de entrada do modelo econômico: curvas de benefício marginal agrícola, demandas urbanas, vazões de entrada, disponibilidade subterrânea e disponibilidade em reservatórios. Finalmente é apresentado o modelo de otimização econômica, cuja função objetivo é minimizar o custo da escassez a partir da alocação de água. No total foram simulados seis cenários: simulação do modelo com as outorgas existentes na bacia (situação atual - base), modelo econômico (otimização econômica sem restrições), modelo econômico com restrição de saída, e adição de fontes de água subterrânea nas três simulações anteriores.

Os resultados encontrados apontam que no cenário atual da Bacia do Rio Santa Maria existe escassez de água em decorrência das altas demandas e da alocação do recurso disponível. A alocação com modelo econômico sem restrição de outorgas apresentou resultados inferiores de escassez, apontando que é possível otimizar a alocação de água entre os usuários na área estudada. O modelo econômico com restrição de vazão de saída também apresentou redução da escassez, quando comparado ao modelo de outorga (cenário base), indicando que mesmo com a restrição de entrega de uma quantidade de água para a bacia de jusante, ainda é possível otimizar a alocação. Foi adicionada água subterrânea como fonte adicional de água, e simulados novamente os cenários anteriores; os resultados apontam que a escassez foi reduzida em todos os modelos. O uso de água subterrânea foi mais eficiente no modelo econômico, o qual teve a melhor alocação de todos os cenários simulados. Estes resultados apontam a importância de um gerenciamento adequado dos recursos hídricos, mostrando que é possível otimizar a alocação de água e diminuir a escassez, tornando o sistema hídrico mais robusto e flexível. Ressalta-se que o uso de água subterrânea trouxe benefícios econômicos para o sistema, mas que deve ser realizado um estudo técnico hidrogeológico para a implementação destas alternativas.

O artigo apresentado a seguir é intitulado "*Use of a hydroeconomic model with conjunctive use of surface and groundwater to reduce the scarcity cost in an*

*agricultural area of rice and soybean in southern Brazil*", com autoria de Camila Dalla Porta Mattiuzi, Guilherme Fernandes Marques e Joel Avruch Goldenfun, e ainda não foi submetido para publicação.

### **7.1. Introduction**

Water resources overexploitation and lack of adequate management programs have caused serious crises of water scarcity in some regions of Brasil. In the south, more specifically on the Rio Grande do Sul state, high amounts of water demand for agriculture of rice and soybeans causes scarcity and creates conflict among users (ANA, 2010). In addition, the variability of rainfall along the year decreases water supply reliability among users. Therefore, the region needs an adequate management system to ensure the distribution of water among all the uses.

Historically, water resources management has used surface water and groundwater separately, ignoring the relationship between both sources. However, it is known that these sources are not isolated, and their distinct and complementary nature is fundamental in the management of water systems (Sahuquillo, 2009). The best approach to conjunctive use is not one that determines a choice between sources, but rather one that determines how best to use both resources, in a conjunctive and concomitant way, to solve water scarcity problems and increase the efficiency of allocation (Sahuquillo, 1985). The objective of conjunctive use is to maximize the inherent benefits of using each well and that integrated management of both can complement the water system and optimize water productivity and efficiency.

In order to evaluate economically the solutions of water allocation hydroeconomic models can be used. Such models represent in regional hydrological scale the technical, environmental and economic aspects of the water systems, through the inclusion of the economic concepts in models of management of water resources. These models are used to study new strategies that promote efficiency and transparency in water use, through the application of management strategies and policies (Harou, 2009).

The hydroeconomic models differ from other models in terms of carrying out an economic value assessment, that is, the economic demands of water are included, as well as the cost and benefit relationships, so that the physical and economic information are integrated into a system. This system is characterized by several items such as hydrological flows (water balance, groundwater recharge and discharge, return flows, etc.), relevant infrastructures (such as channels, reservoirs, tubular wells, etc.) and economic values (costs and benefits) of the demands (Harou, 2009).

On this work a hydroeconomic model was used to assess water allocation among users from the Santa Maria River Basin, on the south region of Brasil, with conjunctive use of surface water and groundwater.

### **7.2. Materials and Methods**

The methodology proposed in this study consists in the use of a hydroeconomic model to evaluate the implementation of a conjunctive use strategy aiming at the

optimization of the Santa Maria River basin system. It is necessary to obtain data that adequately characterize the water system, as well as the use of tools that allow simulating and optimizing this system. In this work two models were chosen: (1) SWAP (Statewide Agricultural Production), which is a model of optimization of agricultural production with a positive approach and (2) a hydroeconomic model that gives the water scarcity cost in the system. The hydroeconomic model solves the water allocation problem by following linear piece-wise economic penalty functions, developed from the marginal economic benefit functions calculated by the SWAP model.

### **7.2.1. Study Site**

The Santa Maria River Basin (SMRB) is located on the west region of Rio Grande do Sul, being part of the Hydrographic Region of Uruguai River (Figure 1). SMRB comprises an area of approximately 15.790 km<sup>2</sup> (IBGE, 2015); 11% of its territory is used for soybean production, and 6% for rice production, these are the two main crops of the basin (DRH/SEMA, 2016). Soybean is a temporary culture in which the irrigation system used is center-pivot (sprinkling); rice is cultivated in large irrigated areas, irrigation occurs by gravity (water is disposed on higher areas and is conducted to the low areas by gravity) (DRH/SEMA, 2016). The other soil use in the basin is pasture, which is dominated by a simple grassy vegetation cover; in general, these areas are used for raising animals. There are six counties on the SMRB, and they were used as the territory division to obtain the marginal benefit curves; the regions can be seen on Figure 1, and the cropped areas of rice and soybean in each region is given on Table 1.

Through a visit on the study area it was possible to better characterize the water situation of the basin; three farms that cultivated both soy and rice were visited. It was observed that the producers made several decisions based on the availability of water, such as defining the beginning of the growing season, the type of crop and the division of the area between rice and soy. The farms have their own water reservoirs, some are filled exclusively through precipitation (the volume depends on the contribution area of each reservoir and is also subject to variability in the rainfall regime); the other reservoirs are filled with rain and pumping water from rivers nearby. The producer defines the amount of area to be planted with rice from the amount of stored water on the reservoirs to reduce the risk of production losses. The irrigation period of BHSM rice crops occurs from November to February with the following distribution: 15% in October, 20% in November, 35% in December, 25% in January and 5% in February, which is the time of greatest water deficit, thus evidencing the importance of water storage in reservoirs. The total area of rice crops is estimated at 110,039 ha, and the annual demand to supply irrigation in this area is approximately 1,100,389 hm<sup>3</sup>/year. Soy is a crop planted in alternation with rice, ensuring nitrogen fixation in the soil and offering an advantageous cost-benefit ratio for the farmer. The total area for soybean cultivation in the SMRB is 207,582 ha, and the pro-crop water demand is 830 hm<sup>3</sup>/harvest. Other agricultural activities on the Basin are the production of maize, fruit and pasture; for the cultivation of maize and



pastures pivots are used to complement the precipitation, this demand is about 2,500 m<sup>3</sup>/harvest, between December and April.

The periods of greatest drought in the Uruguay Basin are associated with low rainfall occurrences. It is also noticed that extreme drought events, when they occur, have had their effect enhanced by the intense use of water resources in the Basin (ANA 2006). Thus, the reason for choosing the area of application of the methodology in this study is evident: the Santa Maria River Basin is a region with several conflicts between supply and demand of water, and is therefore an ideal area for the implementation of conjunctive use and verification of optimized water allocation rules

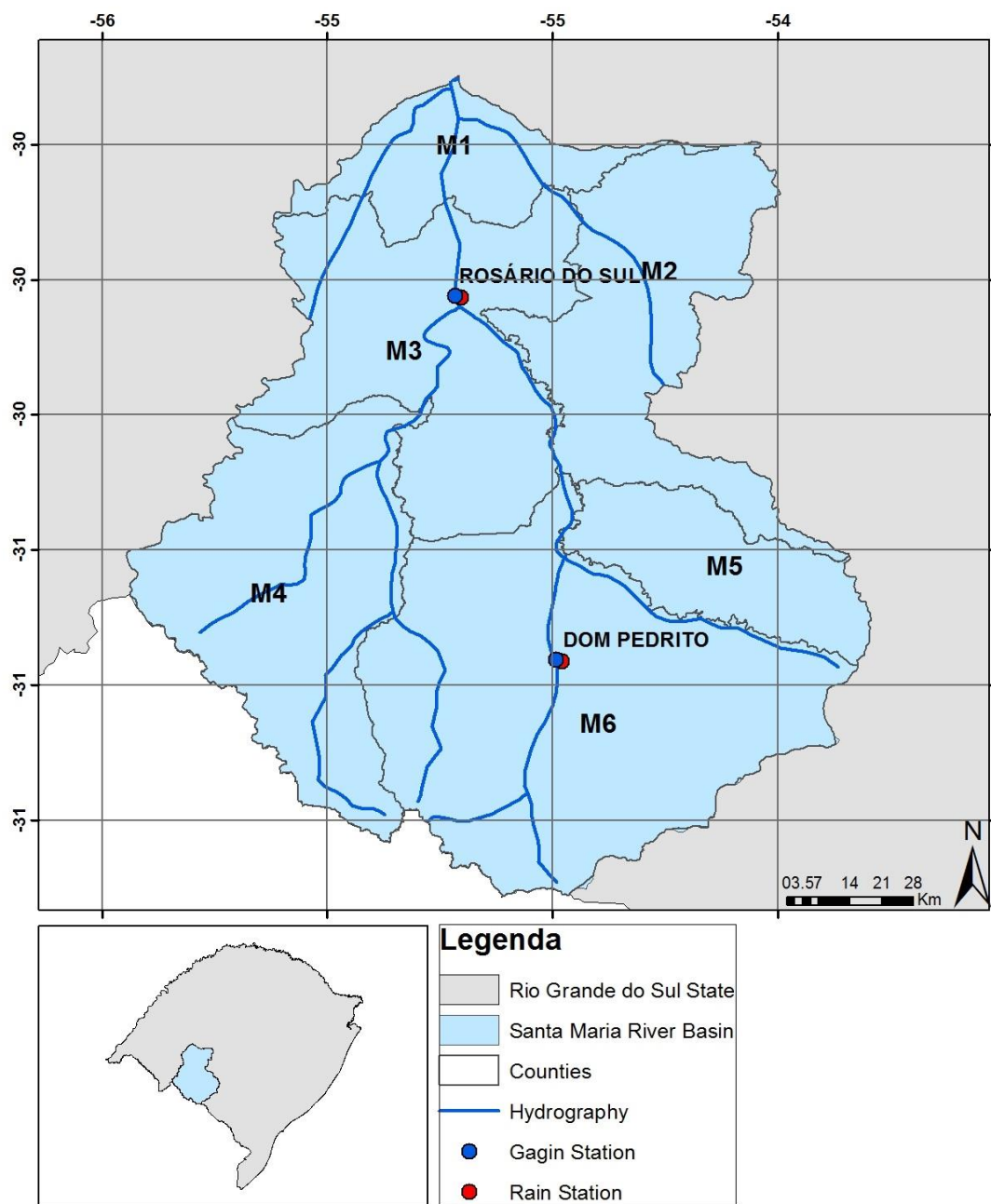


Figure 1. Location of the Santa Maria River Basin

Table 1. Rice and Soybean Production

	Region	Rice (ha)	Soybean (ha)
M1	Cacequi	7.656	7.178
M2	Sao Gabriel	13.410	31.130
M3	Rosario do Sul	14.138	24.376
M4	Santana do Livramento	4.053	15.225
M5	Lavras do Sul	1.475	5.710
M6	Dom Pedrito	42.985	71.563

## 7.2.2. Data Acquisition

### 7.2.2.1. Economic Values for Agriculture Water Use (SWAP)

Agricultural economic values for water use were estimated for the six regions of the SMRB; for each region an economic loss function was derived. These convex economic loss functions are the marginal benefit curves, which represent the reduction in net farm profits that results from limited water delivery: the curves relate the user's willingness to pay for water with the availability of water; the scarcer the resource, greater is the value to be paid (MANKIW, 2014; GRIFFIN, 2006). The marginal benefit curves are used in hydroeconomic models to support decision making in water resources management, as well as in policy analysis, efficient water allocation decisions, and others (HOWITT et al., 2012; TILMANT et al., 2008); on this study the curves were derived using SWAP (Statewide Agricultural Production Model). SWAP is an optimization model that maximizes the sum of producer surplus (regional profits), that is, the economic benefit of farmers (HOWITT et al., 2012; DRAPER et al., 2003). The model is defined over homogenous agricultural regions; SWAP selects crops, water supplies and other inputs, subjected to constraints on water and land, and economic conditions such as prices, yields and costs to optimize production and the economic benefit (HOWITT et al., 2012). SWAP uses Positive Mathematical Programming (PMP), which was developed by Howitt (1995); the main advantages of PMP are: auto calibration with exogenous variables, and the need for a small set of input data for a base year (HOWITT et al., 2010). PMP was incorporated into the SWAP model by HOWITT et al. (2001). SWAP assumptions are that water is interchangeable across cultures and regions, that farmers try to maximize profit, and that the selected crop mix is one that maximizes profits within a region.

The input data was obtained from several sources, including the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE, 2015), the Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA, 2015), Rio Grande do Sul Institute of Rice (IRGA, 2015), Mato Grosso Institute of Agricultural Economy (IMEA, 2015). The data was also collected from a visit in the study area and with the members of Association of the Water Users of the Santa Maria River Basin - AUSM. The SWAP calculation procedure is described in HOWITT et al. (2012) and MEDELLÍN-AZUARRA et al. (2009). GAMS (General Algebraic Modeling System) was used to solve the model

(BROOKE et al., 1998). A complete description of the SWAP methodology and results to the SMRB can be found at Mattiuzi et al (unpublished).

The marginal benefit value represents the users willingness to pay for an additional unit of water, it is an indicator of the economic potential of water (Pulido-Velazquez, 2004). The availability of water on SWAP was set from 99% to 50% to obtain the marginal value at each point. According to the results, lambda values ranged from 0.02 R\$/m<sup>3</sup> (M1) to 0.31 R\$/m<sup>3</sup> (M4 and M5). Shadow values, also known as Lambda values, are an important reference on the discussion of raw water charges, being an indicator of the economic benefit from the use of water for rice and soybean production on the present work. At 99% availability of water, when the users have access to almost all water they need, lambda values ranged from 0.02 R\$/m<sup>3</sup> (M1) to 0.10 R\$/m<sup>3</sup> (M4 and M6). The marginal benefit curves are the result of a combination of several factors, such as water demand by culture, yield, selling price, costs of land, water and labor.

### **7.2.2.2. Urban Demand Data**

The urban demands are responsible for the use of approximately 7.9 hm<sup>3</sup>/year of groundwater, and 5 hm<sup>3</sup>/year of surface water (DRH/SEMA, 2016). As reported on the study area, there are four counties on the SMRB: Rosário do Sul and Dom Pedrito use water from rivers and reservoirs, Santana do Livramento and Cacequi use water from the aquifers. In this work the urban demands were considered a fixed number, and were prioritized to make sure these demands would receive water.

### **7.2.2.3. Hydrological Data and Simulations**

Hydroeconomic models need as input the hydrologic inflows of all streams on the calculation nodes. On this study the runoffs were obtained using the MGB-IPH model (Collischonn *et al.*, 2007; Pontes *et al.*, 2017), which is rainfall-runoff model semi-distributed and developed for the use on large basins (> 10.000km<sup>2</sup>). The watershed is separated in small unit-catchments and in each one is calculated a vertical balance of the soil water budget, which includes the evapotranspiration, precipitation, vegetation interception, soil infiltration, and runoff generation, according to Equation 1. The generated volumes are transferred to linear reservoirs in each discrete basin and then are liberated through the drainage network; the discharges are propagated using the Muskingum-Cunge linear method. The GIS software MapWindow® is used to run the MGB-IPH model (Fan e Collischonn, 2014) with the IPH-HydroTools (Siqueira *et al.*, 2016).

$$\frac{dW}{dt} = P - ET - Dsup - Dint - Dbas \quad \text{Equation 1}$$

Where  $W$  (mm) is the water storage on the soil,  $P$  (mm/month) is the rainfall that reaches the soil,  $ET$  (mm/month) is the evapotranspiration from the soil,  $Dsup$  (mm/month) is the surface runoff,  $Dint$  (mm/month) is the subsurface flow and  $Dbas$  (mm/month) is the percolation to groundwater reservoir (Pontes *et al.*, 2017).

On the present work the MGB-IPH model was used to generate the hydrologic inflows of the Santa Maria Basin; the input data were digital elevation model from SRTM 90m (Farr et al., 2007); precipitation from the National Water Agency (ANA

2016); Hydrological Response Classes (Fan et al 2015); stream discharge from National Water Agency (ANA 2016). The simulation was done from 2000 to 2015, the Santa Maria Basin was divided into 1173 unit-catchments. The model was calibrated for four stations (76251000, 76300000, 76310000 and 76370000); the location of the stations can be found at Figure 1. The calibration was intended to reproduce the discharge on the months that there aren't water withdraws from the stream to irrigation, this way the model simulates the runoffs from the scarcity periods.

Figure 2 presents the calibration process for all stations and the Nash-Sutcliffe - NS (Nash and Sutcliffe, 1970). On the station 76370000 the NS of the simulation was 0.46; the difference between the simulated and the real discharge is mainly at higher values, this could be explained by the precipitation input, that can be overestimated by the model for this specific region. Also, this station has shorter period of calibration than the other, from 2004 to 2015. The other stations had NS that ranged from 0.71 to 0.93.

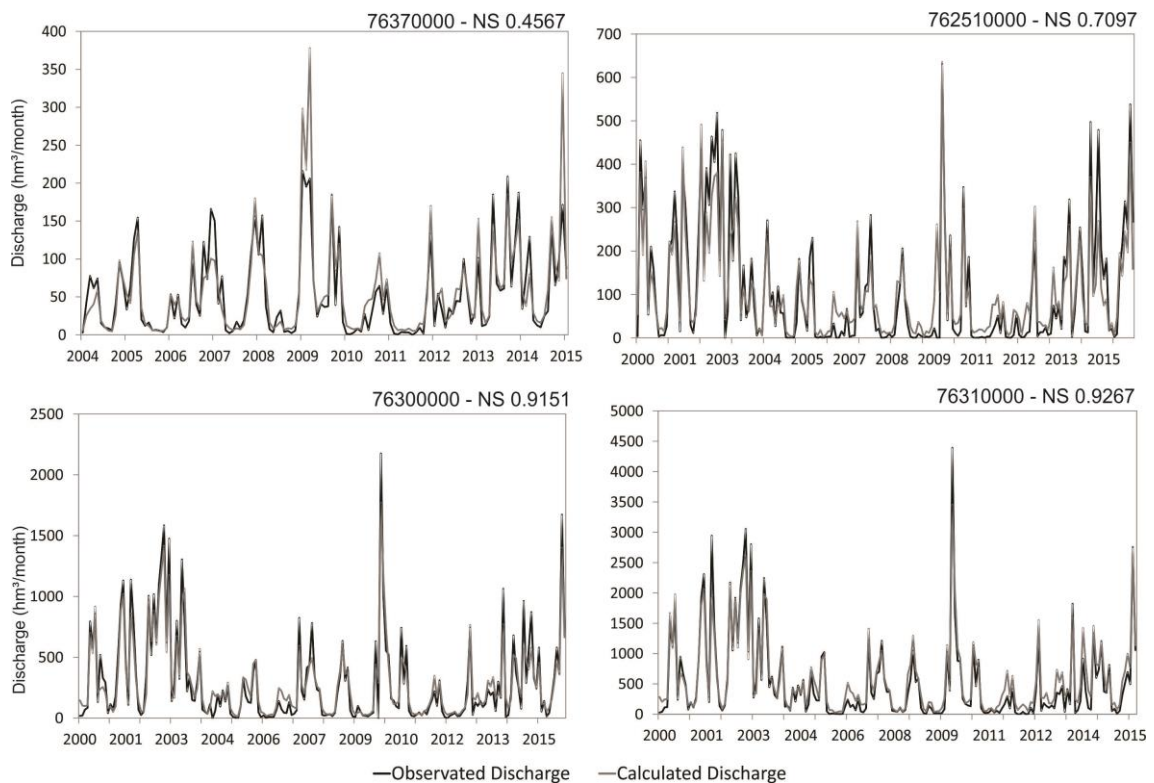


Figure 2. Discharge calibration with the MGB model for the gauging stations.

#### 7.2.2.4. Groundwater Data

For conjunctive use, groundwater reserves must be investigated; here follows a description of the geological and hydrogeological framework of the SMRB area, and the methods for the quantification of groundwater reserves.

Geological formations are very heterogeneous, ranging from sedimentary rocks such as sandstones and alluvial deposits, which have characteristics of aquifer formation, to fractured basaltic and crystalline rocks, such as the Serra Geral Formation, which

has an intermediate aquifer capacity, and Crystalline Rocks, with low potential aquifer.

Regions predominantly composed of rocks belonging to the Guarani Aquifer System have a very important role in the relationship with surface water, since the vertical and effective infiltration processes are facilitated due to the great permeability of the surface layers. This description is based on the Geological Map of the State of Rio Grande do Sul, scale 1:750,000, prepared by the Brazilian Geological Survey (CPRM, 2007).

Concerning the hydrogeology, the western portion of the basin presents high to medium capacity groundwater aquifers, while the eastern portion has medium to low capacity aquifers. The main aquifer units present in the BHSM are the Sanga do Cabral/Pirambóia Aquifer System (23% of the basin coverage), Botucatu/Guará Aquifer System (12% of the basin coverage); the other units form aquifers with low storage capacity. This description is based on the Hydrogeological Map of the State of Rio Grande do Sul, scale 1:750,000, prepared by the Brazilian Geological Survey (CPRM, 2005).

The baseflow separation method was used to estimate the aquifer recharge and quantify the available reserves, through the application of Eckhardt's Recursive Digital Filter (Eckhardt, 2005) with considerations proposed by Collischonn and Fan (2013). In this method baseflow in streams is calculated by separating the river flow into two components: direct flow (runoff) and indirect flow (baseflow). More details about the method application on SMRB can be found at Mattiuzi (2013) and Mattiuzi et al (2015).

The groundwater storage reserves can be classified in permanent reserves, which is the volume of water accumulated in the aquifer environment and does not respond to seasonal fluctuation of the potentiometric surface; and renewable reserves, which are the volume stored between the levels of maximum and minimum fluctuation of aquifers, with annual variations due to the seasonal contributions of surface water and groundwater. The renewable reserves are related to the annual aquifer recharge. (Feeze et al., 1979; CPRM, 2008)

On the present study the consideration proposed by ANA (2010) were taken: the active reserve is defined as part of the renewable reserve (baseflow subtracted of the minimum river flow); and the exploitable reserve is defined as 50% of the active reserve; this proposition allows for the sustainability of the use of groundwater resources. After de baseflow separation, the groundwater active reserve was found to be 1,432 hm<sup>3</sup>/year and thus, the exploitable reserve is 716 hm<sup>3</sup>/year for the whole SMRB. Monthly groundwater withdraw was defined by the baseflow average cycle: the average monthly baseflow was used to fill reservoirs -called groundwater reservoirs- totalizing 716hm<sup>3</sup> each year; the assumption made here is that the exploitable reserve is the same every year, considering the aquifer capacity of storage and recharge. These groundwater reservoirs stored volume can be used by the demands on scarcity periods, and this is one of the variables that are being analyzed with this study, which is, the rate of groundwater use on the basin in each scenario.

#### **7.2.2.5. Reservoirs Data**

It is a common practice to storage water from the rain on reservoirs to use on dry periods and to meet water demands. Producers on the Santa Maria River Basin use private reservoirs to storage water: each property has its own reservoirs that are filled with water from the rain, and with river withdraws - for which is necessary a permit from the state's environmental office. Representing the reservoir dynamics is a complicated question, since the producer's decision to use or store the water depends on several factors; in this work the particular reservoirs were aggregated in the six regions of the SMRB to allow simulation on the hydroeconomic model.

In order to define the distribution of the reservoirs on the Basin, a classification of a Landsat 8 image from the months of October of 2015 was done; this month was chosen because it is just before the beginning of the irrigation period, and the reservoirs should be at their highest levels. The result of the classification is shown on Figure 3 and it indicates the distribution and size of the reservoirs, and they were aggregated by region. The relation between surface area and volume was obtained through a curve available at DRH/SEMA (2016); the storage of the particular reservoirs is an input for the hydroeconomic model. It can be seen that regions M6, M3 and M2 have the higher amount of reservoirs.

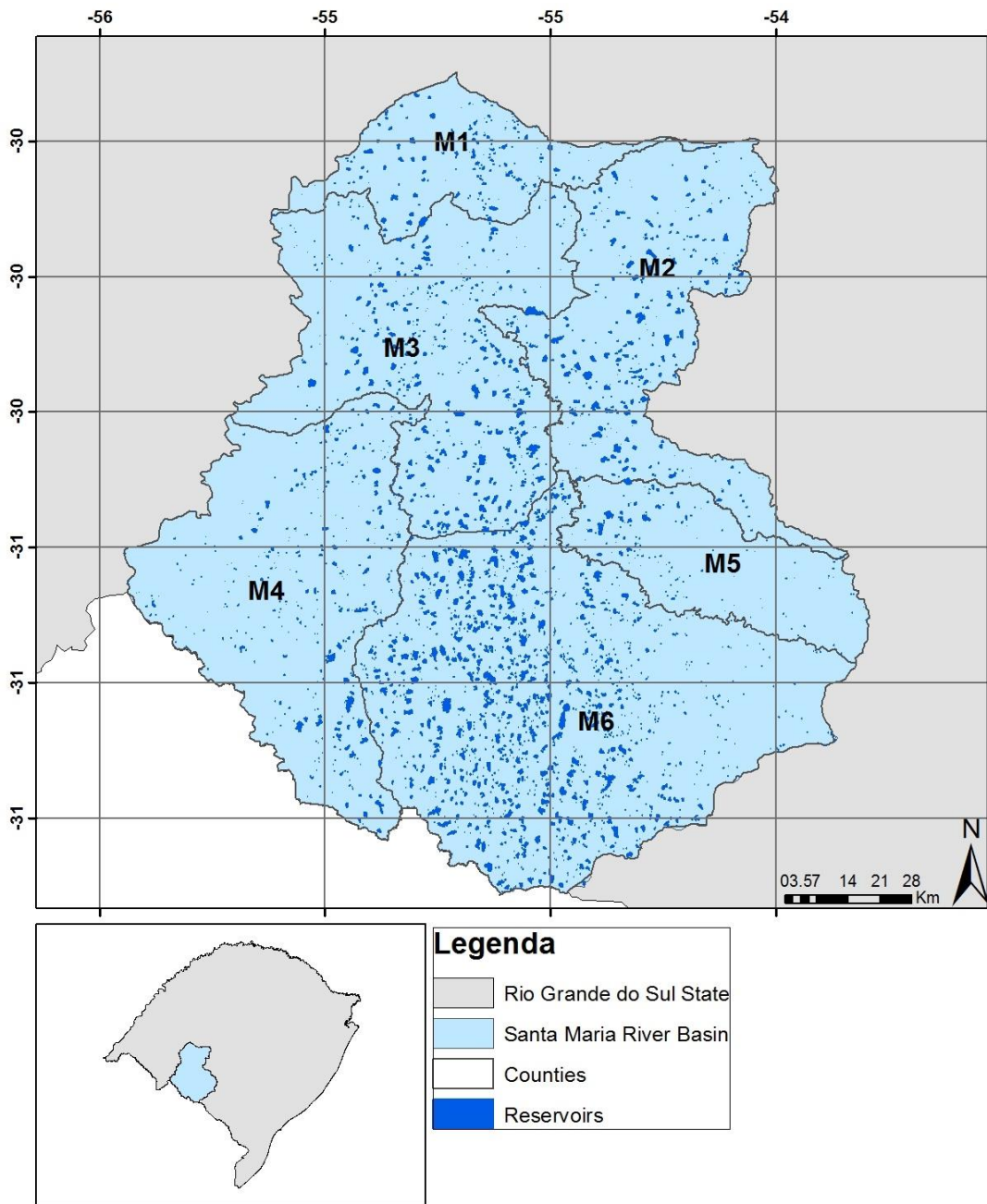


Figure 3. Reservoirs on the Santa Maria River Basin

#### 7.2.2.6. Hydroeconomic Model

In order to perform water allocation among the economic demands, an optimization model developed by Marques et al. (2010) was used; the model minimizes the total cost of water scarcity, having as decision variables the amount of water withdrawn from each water storage node. The objective function has a list of penalty functions, one for each demand and for each month, to calculate the total cost of water scarcity. Model constraints include mass balance at each node and physical constraints. GAMS (General Algebraic Modeling System - BROOKE et al., 1998) was used to solve the model.

### a) Input Variables and Equations

The hydroeconomic model has restrictions with the mass balance in all intersection nodes. Mass balance (Equation 2) calculates the storage on each node at time step  $T+1$ ;  $LINK$  is the connection between nodes  $I$  and  $J$ ,  $PER$  is the infiltration on the river at each month,  $\alpha_{T,PT}$  and  $\beta_{T,PT}$  are evaporation parameters,  $S_{T,PT}$  is the storage at time  $T$ ,  $S_{T+1,PT}$  is the storage at time  $T+1$ , and  $Q_{T,PT}$  is the water influx.

$$\begin{aligned} \sum_I (LINK_{T,I,PT}) - \sum_J \left( LINK_{T,PT,J} * \left( \frac{1}{PER_{PT,J}} \right) \right) \\ = (1 + \alpha_{T,PT}) * S_{T+1,PT} - (1 - \alpha_{T,PT}) * S_{T,PT} - Q_{T,PT} + \beta_{T,PT} \end{aligned} \quad \text{Equation 2}$$

Total liberated volume in each node is given by Equation 3, where  $X$  is the fraction of water allocated to the demand in each region, by time step.

$$\sum_I \left( LINK_{T,I,PT} * \left( \frac{1}{PER_{I,PT}} \right) \right) = \sum_{CST} X_{t,TS,CST} \quad \text{Equation 3}$$

The total liberated volume has a restriction given by Equation 4, where  $REST$  is the de size of each segment in the penalty curve in each region, by time step.

$$X_{t,TS,CST} < REST_{t,TS,CST} \quad \text{Equation 4}$$

Upper and lower restrictions for the link connections are described on Equations 5 and 6, where  $UP_{P,T}$  is the upper restriction and  $LOW_{P,T}$  is the lower restriction.

$$LINK_{T,I,PT} < UP_{P,T} \quad \text{Equation 5}$$

$$LINK_{T,I,PT} > LOW_{P,T} \quad \text{Equation 6}$$

Total scarcity cost ( $TSC$ ) for the simulated period is presented on Equation 7, where  $CMAX$  is the maximum scarcity cost for each time step;  $X$  is the fraction of the water allocated to the demand in each region, by time step;  $CM$  is the de slope of each segment in each region, by time step.

$$TSC = \sum_t (\sum_{TS} (CMAX_{TS} + \sum_{CST} X_{t,TS,CST} * CM_{CST,PT})) \quad \text{Equation 7}$$

The scarcity cost is calculated through penalties that occur when a demand doesn't receive enough water; on this model, the objective function is to minimize  $TSC$ , which is the sum of all penalties at each time step. The decision variable is the volume of allocated water through in each time step.

The variables used in the model are water influxes (water from rivers and streams, in  $hm^3/month$ ); groundwater reservoir (water available from groundwater resources, in  $hm^3/month$ ); private reservoirs (water available from the producers reservoirs, in  $hm^3/month$ ); evaporation coefficient (evaporation of the producers reservoirs, in



mm/month); urban demands (water demands, in  $\text{hm}^3/\text{month}$ ); scarcity cost agriculture functions (represent the agricultural demands, in  $\text{hm}^3/\text{month}$ ).

The result of the hydroeconomic model is the water allocation optimized from an economic point of view; the model provides the scarcity cost for each region, by comparing the water demand and the allocated volumes. It is assumed that monthly demands don't change during the simulated period, which was 192 months (16 years).

#### b) Model general schematic

On Figure 4 it is presented the general schematic of the hydroeconomic model. Each region has an agricultural demand node (green) and the aggregated private reservoirs (orange). The reservoirs are filled with water derived from the rivers by the permit nodes (blue), which are the sum of all permits on each region. Regions M2, M3, M4 and M5 also have urban demand nodes (pink), which in regions M2 and M4 are supplied by the groundwater reservoirs (purple), which represent the aggregated available groundwater on the region. Junctions nodes (light pink) connect all nodes. Agricultural demands are supplied by the private reservoirs and river derivations. On the scenarios with available groundwater the private reservoirs are also filled with groundwater with the monthly baseflow rate, as explained before.

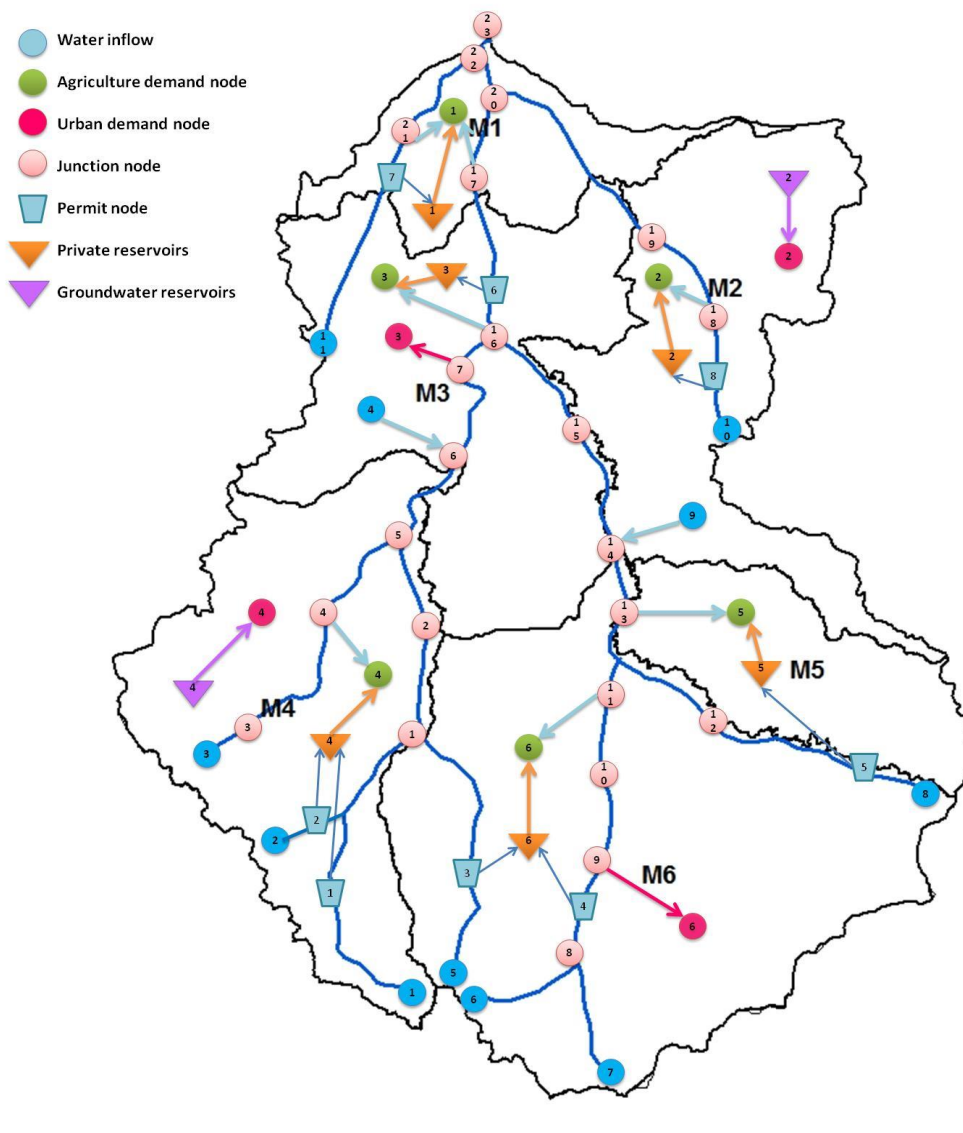


Figure 4. Model general schematic

### c) Hydroeconomic model simulations

Two major simulations were made: Permit Model and Economic Model. The permit model (PM) has restrictions from the existent water permits on the basin: there is a limited amount of water that can be withdrawn from rivers and reservoirs to be used on irrigation. The economic model (EM) doesn't have these restrictions, the model chooses the most valuable water uses and withdraws all the amount of water it needs, restricted only by water availability.

Both models were simulated for the current water use on the basin, which are rivers and reservoirs; two more simulations were done adding the groundwater source, which are PM+GW and EM+GW. Considering that downstream Santa Maria River Basin there is the Ibicuí River Basin, and there is a water flow from one basin to another, it was made an additional simulation: the outflow of SMRB simulated on the Permit Model was used to make a restriction on the Economic Model, this

restriction means that the EM can allocate the water economically but it has to fulfill the outflow restriction. This scenario is named Economic Model with Outflow (EM + Out), and, as the other scenarios, it was also simulated with groundwater availability (EM+Out+GW). The summary of the scenarios is listed on Table 2. There was no restriction related to an ecological minimum flow, the only restriction was the outflow on scenarios PM+Out, EM+Out and EM+Out+GW.

Table 2. Scenarios simulated on the hydroeconomic model

Scenario		Description
PM	Water Permit Model	The permits are aggregated by region (M1 to M6); the model can use all the water that the permit allows.
PM+GW	Permit Model with Groundwater	Equal to PM, but the model can use the annual exploitable groundwater reserve.
EM	Economic Model	The model allocates water to minimize the scarcity cost without restrictions.
EM+GW	Economic Model with Groundwater	Equal do EM, but the model can use the annual exploitable groundwater reserve.
EM+Out	Economic Model with Outflow Restriction	The model allocates water to minimize the scarcity cost, the only restriction is the outflow, which is the same as the outflow on PM.
EM+Out+GW	Economic Model with Outflow Restriction and Groundwater	Equal do EM+Out, but the model can use the annual exploitable groundwater reserve.

### 7.3. Results and Discussion

#### 7.3.1. Results Obtained for the Different Scenarios

Scarcity is defined as the difference between the amount of water utilized by the users and the amount of water that the users would utilize if they had unrestricted access and no costs; the scarcity cost is defined by the economic benefit that the users don't have because they lack access to the amount of water they want.

Hydroeconomic model for water allocation was run for 192 months (2000 to 2015), the results are the sum of scarcity ( $10^6$  m<sup>3</sup>) and scarcity cost ( $10^6$  R\$) for the 192 months in each region, and it is presented on Tables 3 and 4, respectively. Figures 5 and 6 show a graphic comparison of the results in all regions. Figures 7 and 8 present the evolution of all regions in each simulated scenarios through the analyzed years. Discussion of these results will be presented in the following.

Table 3. Scarcity ( $10^6$  m<sup>3</sup>) in each region for the simulated scenarios.

Scarcity ( $10^6$ m <sup>3</sup> )							
Region	M1	M2	M3	M4	M5	M6	$\Sigma$
PM	982	2,265	79	34	187	7,638	11,185
EM	0	915	0	0	0	2,408	3,323
EM+Out	1,740	1,922	1,524	576	228	5,290	11,279
PM+GW	299	344	72	14	41	702	1,472
EM+GW	0	63	0	0	0	114	177
EM+Out+GW	111	184	72	14	8	329	718

Table 4. Scarcity cost ( $10^6$  R\$) in each region for the simulated scenarios.

Scarcity Cost ( $10^6$ R\$)							
Region	M1	M2	M3	M4	M5	M6	$\Sigma$
PM	123	410	18	9	27	1,576	2,162
EM	0	134	0	0	0	400	534
EM+Out	276	319	240	96	36	948	1,915
PM+GW	27	45	17	3	4	102	197
EM+GW	0	14	0	0	0	23	36
EM+Out+GW	11	28	17	3	1	56	115

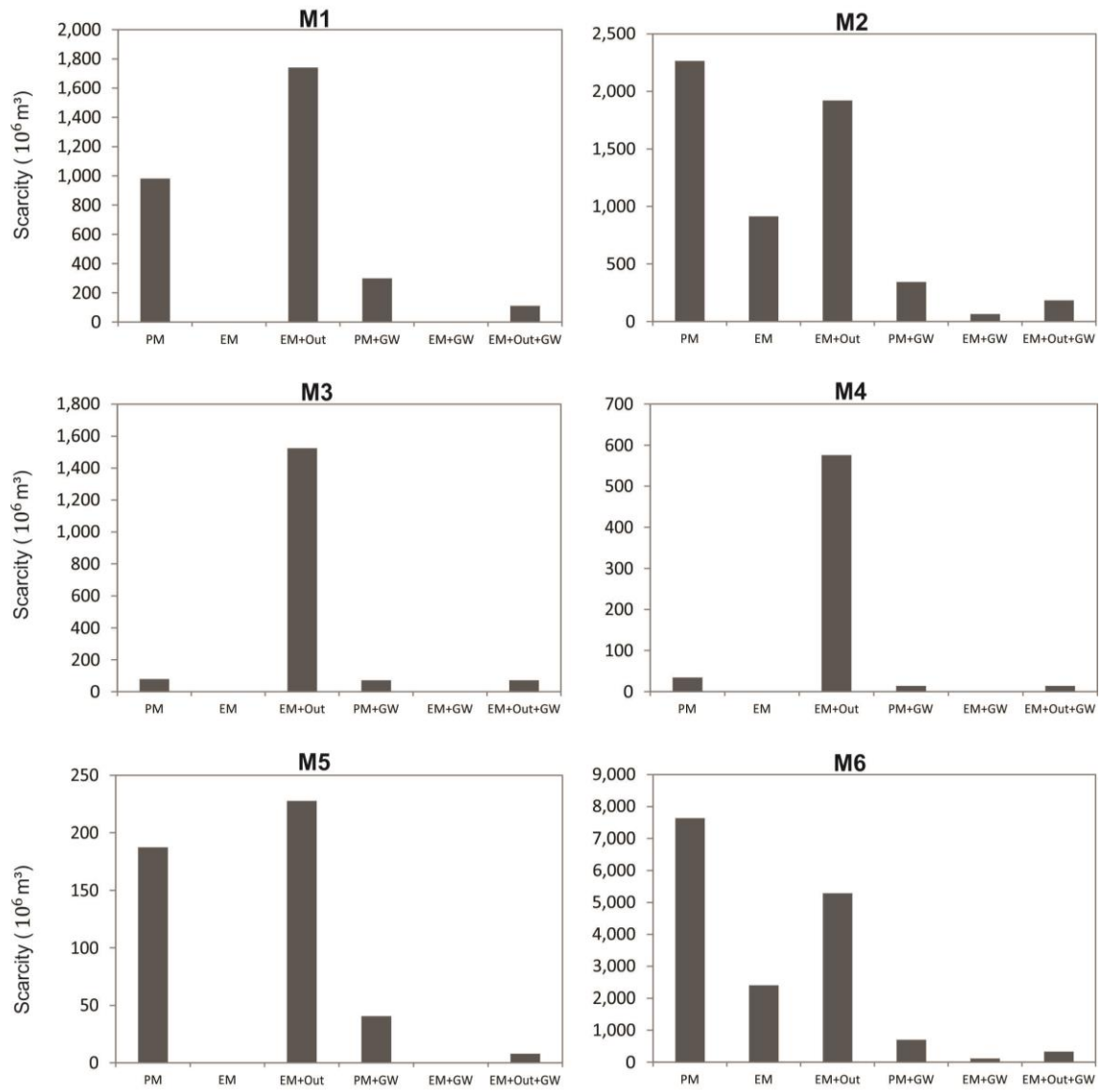


Figure 5. Scarcity ( $10^6 \text{ m}^3$ ) comparison of all scenarios simulated in each region.

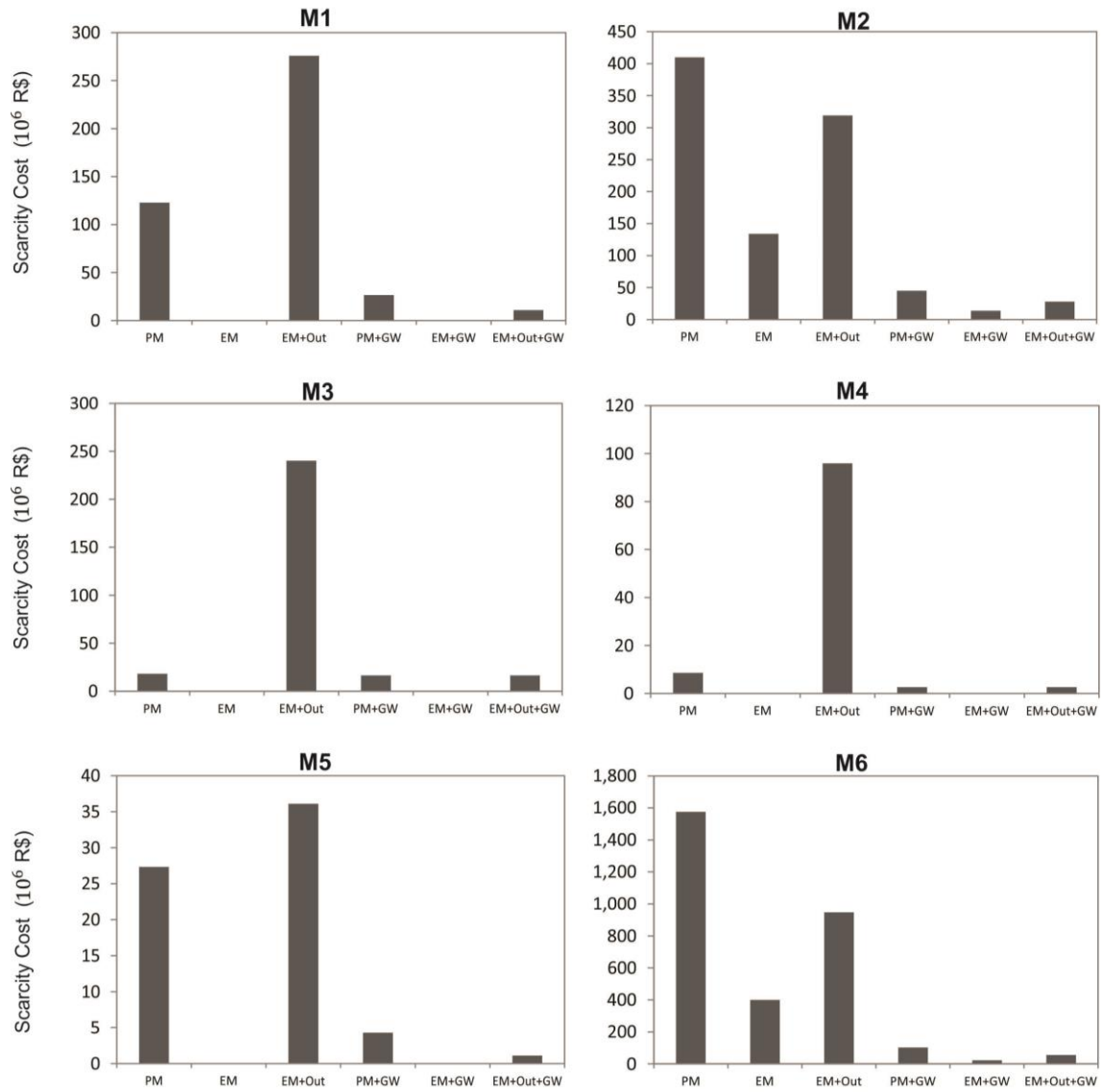


Figure 6. Scarcity cost (10<sup>6</sup> R\$) comparison of all scenarios simulated in each region.

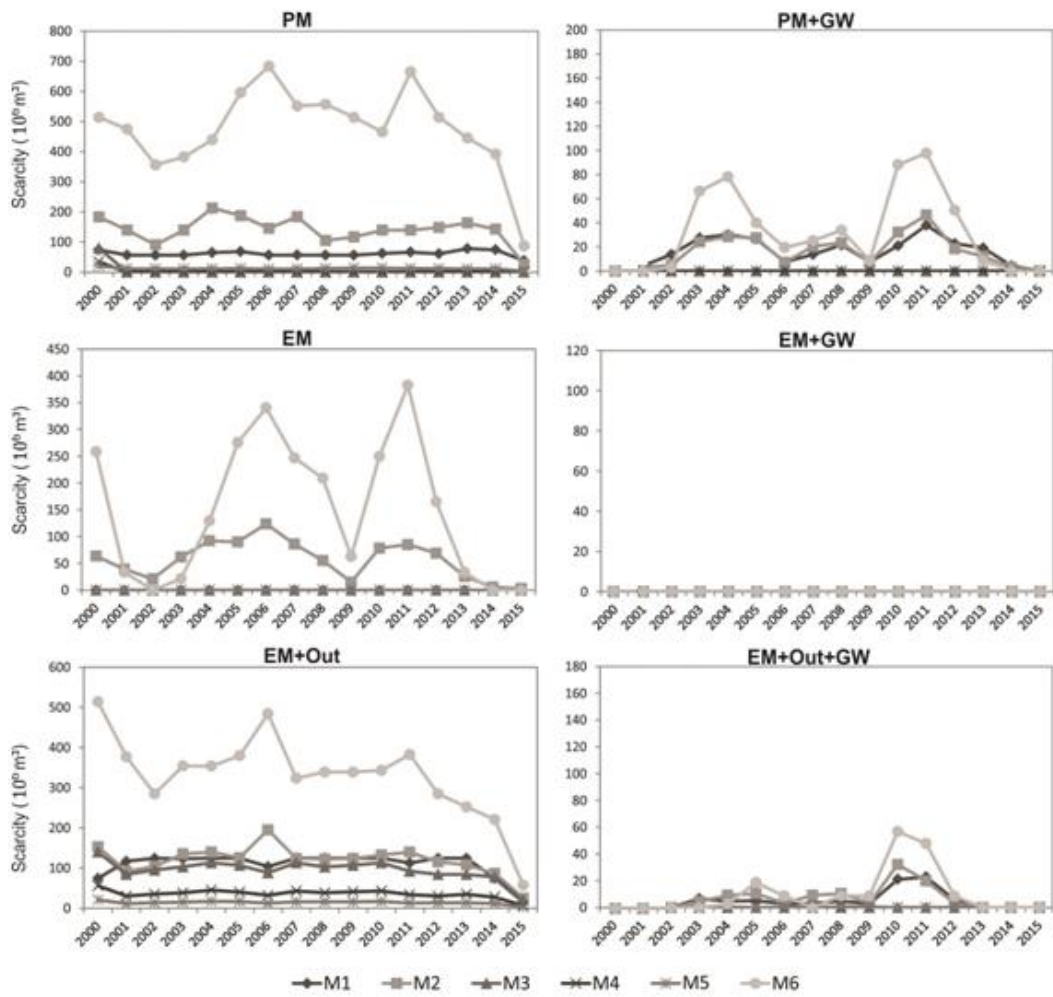


Figure 7. Scarcity ( $10^6 \text{ m}^3$ ) on the six regions in each simulated scenarios (2000-2015).

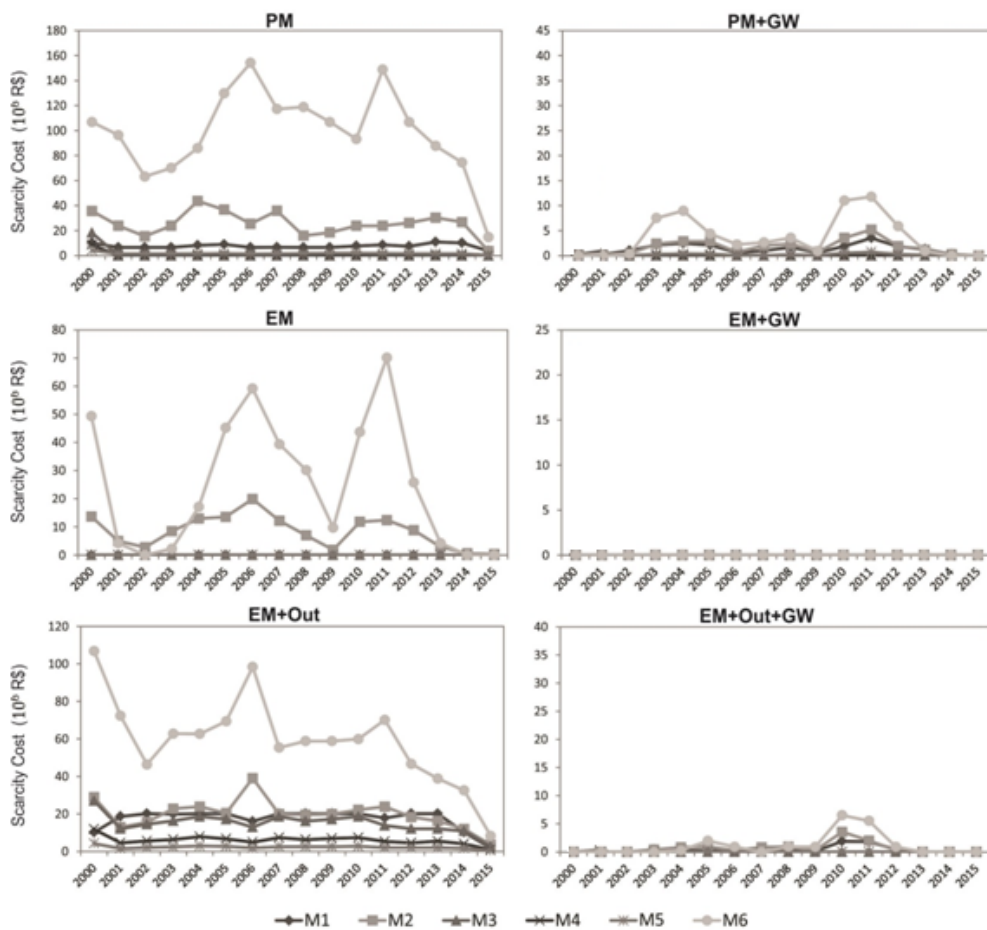


Figure 8. Scarcity cost ( $10^6$  R\$) on the six regions in each simulated scenarios (2000-2015).

### 7.3.2. Permit and Economic Model

The permit model, as described before, shows the current situation on the Santa Maria River Basin; the economic model represents the system without permits, and water deliveries are determined by the model to minimize the scarcity cost.

As can be seen on Figure 5 and Table 3, permit model results indicate that there is scarcity on all regions, most significant values are observed on regions M2 and M6: these regions have the higher planted area, and thus the greater water demand. Economic model results show that scarcity cost gets to zero on the regions with lower water demands (M1, M3, M4 and M5), as can be seen on Figure 6 and Table 4, but on M2 and M6 scarcity decrease 67% and 75%, respectively. These results indicate that, with the same amount of water available, there can be a better allocation to increase economic benefit and decrease scarcity. The years 2006 and 2011 were significant more scarce than others, as can be seen on Figures 7 and 8, because of low water availability due to precipitation lower than average.



### 7.3.3. Economic Model with Outflow Restriction

Results of the use of permit model outflow as a restriction for the economic model outflow are shown on Figure 5 and Table 3; with this restriction, all regions had scarcity.

Comparing the permit model with economic model outflow results show that some regions (DA2 and DA6) had a decrease on scarcity and scarcity cost, but all the other areas had larger values than before; the overall results indicate that economic model with outflow restriction had an increase of 1% on the scarcity, but a decrease of 11% on the scarcity cost, these results indicate that the water allocation is more efficient on the economic model, even with the outflow restriction. The economic model with outflow restriction, as expected, increased both scarcity and scarcity cost; this is due to the limitations on water allocation imposed by the outflow restriction. Overall scarcity and scarcity cost increased 71% and 72%, respectively.

Figure 9 shows the permanence curve of the economic model and permit mode outflows, it's possible to see that the EM outflow is lower than the PM outflow on lower discharge values, suggesting that on low water availability periods the economic model deliveries less water to the downstream basin. A more detailed outflow comparison is presented on section 3.5.

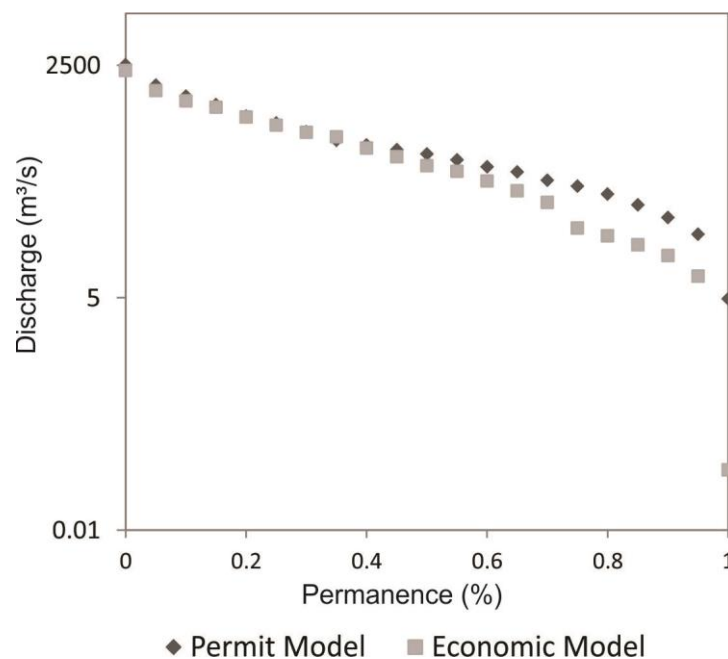


Figure 9. Permanence curve comparison between permit and economic model.

### 7.3.4. Scenarios with Groundwater Availability

Groundwater use on all scenarios resulted on decrease of scarcity and scarcity cost: on the permit model overall decrease was 87% and 91%, respectively; on the economic model 95% and 93%, respectively, and on the economic model with permit limitation on the outflow resulted on decrease of 94% for both scarcity and scarcity cost. These results can be seen on Tables 3 and 4, and Figures 5 to 8.

Table 5 shows the total use of groundwater on the three analyzed scenarios; it can be seen that permit model with groundwater and economic model with restriction outflow and groundwater used almost all groundwater available (which was 11,504 hm<sup>3</sup> for the 16 years), while the economic model with groundwater used 30% of all available reserve. This result enhance the importance of economic optimization to make allocation decisions, because the economic model objective is to decrease total scarcity cost, and thus it allocates water efficiently among users; in this case we can see that the EM+GW scenario had the lowest scarcity and scarcity cost of all GW scenarios, and it used the least amount of groundwater of the three simulated scenarios.

Evolution of groundwater use on these scenarios through the 16 years are shown on Figure 10. In all scenarios it can be seen the effect of the low water availability years of 2006 and 2011, specially on regions M2 and M6, which have the greater planted area on the SMRB. PM GW model used groundwater according to the water demands restricted by the permits in each region, while EM out GW allocated water economically but restricted only to the outflow for the downstream basin. This explains their different behaviors along the years, PM GW had to fulfill the permits while EM out GW could allocate water to minimize the scarcity cost. The EM GW model was free of restrictions, allocating water from all sources economically, and this explains the use of groundwater on regions M2 and M6, which have the greater scarcity among all regions.

These results can indicate a strategy for conjunctive use of surface water and groundwater: for the SMRB case, the period with the lowest water availability matches with the highest water demand for irrigation, and so groundwater could be used on this time of the year to increase water availability and reduce economic losses.

Table 5. Groundwater use on the simulations

Groundwater use (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )							
Region	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Total
EM Out GW	4,939	2,012	1,799	10	4	2,615	11,378
EM GW	0	901	57	0	9	2,501	3,468
PM GW	907	2,426	235	108	531	7,172	11,378

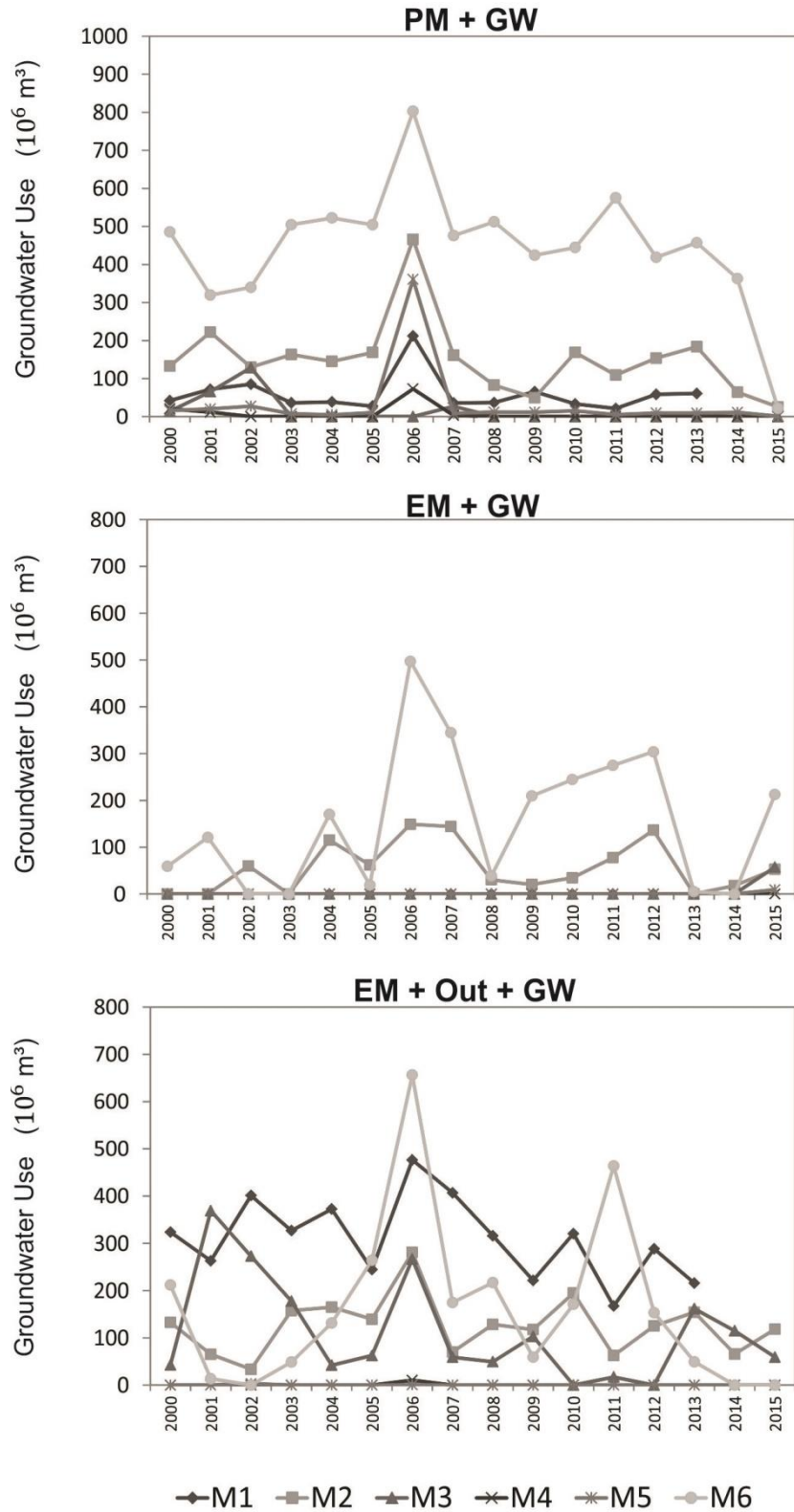


Figure 10. Evolution of groundwater use on the simulations (2000-2015).

### 7.3.5. Outflow Restriction

On the Santa Maria Basin Management Plan, which is a document with all the information about the situation and development of the basin, there is a restriction of the maximum flow which can be given as permit. The purpose of this restriction is to adequately manage the water uses and to not let the rivers with low flows, thus damaging the river system and water users. The document set that the maximum permit would be 50% of the 90% percentile of the river flow (Q90), which is, the flow that is equaled or exceed 90% of the time; the average annual Q90 on the Santa Maria River mouth is 23,1 m<sup>3</sup>/s (DRH/SEMA, 2016); thus, the maximum permit would be 11.55m<sup>3</sup>/s annually. The other 50% of the Q90 is the volume that should be the outflow for the downstream basin.

Figure 11 shows a comparison between the outflows on all simulated scenarios with the limited outflow (50% of the Q90). It can be seen that all simulated scenarios delivery more water than the minimum to the downstream basin, thus being in conformance with the restriction proposed on the Basin Management Plan.

When comparing the outflow of scenarios with and without the groundwater use, it can be seen that models with groundwater availability have higher outflow than the respective scenario without groundwater: PM + GW deliveries 9% more outflow than PM; EM + GW deliveries 2% more than EM, and EM+Out+GW deliveries 7% more than EM+Out. These results show that groundwater use could be important for the water resources management, e.g., in case the downstream basin needed more water, the increase on groundwater use on the upstream basin could solve this problem and improve flexibility and economic benefit on both basins.



Figure 11. Comparison between the outflows on all simulated scenarios with the limited outflow (50% of the Q90).

### 7.3.6. Hydroeconomic Model Overall Results

Difference between scarcity and scarcity cost variations are due to the objective function of the model, which is to minimize the total scarcity cost, this means the

model allocates resources (water) to the regions where the attendance of the demands will generate more benefit.

It is important to emphasize that the results obtained in this work could be overestimated, because the small reservoirs on the SMRB region are filled with water taken from the rivers and also the runoff generated by the rain which is a difficult variable to represent, because each small reservoir has a different drainage area; the groundwater is also represented as reservoirs with monthly inflows, and are disconnected from the water system. Although this accumulated water from the rain is often used on agriculture, the producers can't always be secure about the volumes that will be on the reservoirs, since rain prediction involves a lot of uncertainties. This means the hydroeconomic model presented on this studied works with the quantifiable variables, which increases water use security.

Results of the scarcity and scarcity cost of the economic model are lower than the permit model, indicating that there can be an allocation of water that generates more economic benefit to the SMRB economy. Comparing the results of the economic model with the outflow restriction and the permit model shows that even with the requirement to deliver an outflow to the basin downstream, there is still possibility to allocate water more efficiently and increase benefits. Results also showed that with the use of groundwater the scarcity and scarcity cost decreased in all simulated scenarios, and also that the economic model with groundwater allocated water and obtained the lowest scarcity cost among all simulations, using the least amount of groundwater and delivering an outflow that is in accordance with the proposed outflow reference on the Basin Management Plan.

Most complicated regions concerning water scarcity were M2 and M6, which are the counties of São Gabriel and Dom Pedrito, both have their economies centered on agricultural production. The results of this work can be useful to lower economic losses due to water scarcity on the SMRB, thus increasing resilience on the water system, and also providing tools to increase the efficiency of the water use on the basin.

### **7.3.7. Relevance for Water Management**

The results presented before show the importance of making the water system more flexible and robust; the scarcity and economic losses can be reduced by having different water sources and infrastructures that allow integrated management. With economic water allocation in some regions water scarcity increased while the opposite occurred in other regions, however, the sum of the economic benefit in all regions was bigger than the economic losses. This suggest that the SMRB agricultural producers would have more benefit with strategies such as adding groundwater and changing crop mix between regions, even though some regions would experience economic loss. The Basin Committee could use the economic benefits from some regions to support the regions which had more scarcity, which is called negotiated water allocation. It is difficult for producers to accept that if they gave their water to other producers they would still have economic benefit, and perhaps even more than if they had used their water. Nevertheless this could be a tool for water management and could increase efficiency and economic benefits when facing low water availability. This situation is captured by the term opportunity

cost, which is the value of the next best selection that could have been undertaken (Griffin, 2006), which means the economic benefit generated by allocating water from one use to a more profit use.

Water charging could have different prices depending on its source (e.g. groundwater, reservoirs, rivers) and depending on its use (e.g. type of culture, industry); that means the Basin Committee would be inducing producers' decisions, reducing scarcity cost and improving economic development on the Basin. This strategy is foreseen on the Santa Maria River Basin Management Plan, where the Basin Committee defined guidelines that involve different prices for water charging.

#### **7.4. Conclusions**

Water scarcity results from the intensive use of water resources and promotes economic losses to society and the environment. In this work, a hydroeconomic model of optimized allocation with conjunctive use of surface water and groundwater was used to reduce the cost of scarcity, that is, to reduce the economic losses due to water scarcity in the Santa Maria River Basin

The results indicate that it is possible to reduce water shortage in the basin and also to reduce the cost of scarcity, through the relocation of water between users and the use of groundwater and surface water concomitantly. In the current (base) scenario of the Santa Maria River Basin there is water shortage due to the high demands and the allocation of available resources. The scenario of the economic model without restriction presented lower results of scarcity, pointing out that it is possible to optimize the allocation of water among users in the studied area. The economic model with outflow restriction also showed a reduction of the scarcity, when compared to the permit model (base scenario), indicating that even with the restriction of delivery of a quantity of water to the downstream basin, it is still possible to optimize the allocation. Groundwater was added as an additional source of water, and the previous scenarios were simulated again; the results indicate that the scarcity was reduced in all models. The use of groundwater was more efficient in the economic model, which had the best allocation of all simulated scenarios.

These results point to the importance of adequate management of water resources, showing that it is possible to optimize water allocation and reduce scarcity, making the water system more robust and flexible. It should be emphasized that the use of groundwater brought economic benefits to the system, but that a hydrogeological technical study should be carried out to verify the possibility of implementing these alternatives.

#### **7.5. Acknowledgements**

The authors thank IPH/UFRGS and CNPq for their support in this study; the Association of Water Users of the Santa Maria River Basin for their support on the field and data collecting.

#### **7.6. Referencies**

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Caderno da Região Hidrográfica – Uruguai. Brasília/DF, 132 p., 2006.

- \_\_\_\_\_. Atlas Brasil: Abastecimento Urbano de Água – Panorama Nacional, Volume 1. Brasília, DF, 72 p. 2010.
- BROOKE, A., KENDRICK, D., MEERAUS, A., AND RAMAN, R. GAMS: A user's guide. GAMS Development Corporation, 1998.
- COLLISCHONN, W., ALLASIA, D.G., SILVA, B.C., TUCCI, C.E.M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modeling. *Hydrol. Sci. J.* 52, 878 and 895, 2007.
- COLLISCHONN, W.; FAN, F. Defining Parameters for Eckhardt's Digital Baseflow Filter. *Hydrological Processes*, v. 27, n, 18, p. 2614-2622, 2013.
- COMPANHIA DE PESQUISA EM RECURSOS MINERAIS – CPRM. Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul. Programa Geologia do Brasil. Porto Alegre/RS, 254p, 2010.
- \_\_\_\_\_. Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações. 3ª edição, 812p, 2008.
- \_\_\_\_\_. Isoietas Anuais na escala 1:5.000.000. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?inoid=1351&sid=9>>. Acesso em: setembro, 2013
- DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DA SECRETARIA DO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - DRH/SEMA. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria. 2016.
- DRAPER, A.J.; JENKINS, M.W.; KIRBY, K.W.; LUND, J.R., HOWITT, R.E. Economic-engineering optimization for California water management. *J Water Resour Plan Manage*, v. 129, p. 155–164, 2003
- ECKHARDT, K. How to construct recursive digital filters for base flow separation. *Hydrological Process*, v.19, p. 507-515, 2005.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Cultivares: soja. 2015
- FAN, F.M., COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. *RBRH - Rev. Bras. Recur. Hídricos* 19 (1), 243 and 254, 2014.
- FAN, F. M; BUARQUE, D. C.; PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. Um mapa de respostas de unidades hidrológicas para a América do Sul. *Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Brasília/DF, 2015.
- FARR, T.G., CARO, E., CRIPPEN, R., DUREN, R., HENSLEY, S., KOBRICK, M., PALLER, M., RODRIGUEZ, E., ROSEN, P., ROTH, L., SEAL, D., SHAFFER, S., SHIMADA, J., UMLAND, J., WERNER, M., BURBANK, D., OSKIN, M., ALSDORF, D. The shuttle radartopography mission. *Rev. Geophys.* 45 (2), 241 e 262, 2007.
- FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. *Groundwater*. Prentice Hall, Inc, 1979.
- GRIFFIN, R.C. *Water Resource Economics, the Analysis of Scarcity, Policies and Projects*. Cambridge: MIT Press. 2006.
- HOWITT, R. E. Positive mathematical programming. *American Journal of Agricultural Economics*, v. 77, n. 2, p. 329-342, 1995.

- HOWITT, R. E.; MEDELLÍN-AZUARA, J.; MACEWAN, D.; LUND, J. R. Calibrating disaggregate economic models of agricultural production and water management. *Environmental Modelling & Software*, v. 38, p. 244-258, 2012.
- HOWITT, R.; MACEWAN, D.; MEDELLIN-AZUARA, J.; LUND, J.R. Economic modelling of agriculture and water in California using the Statewide Agricultural Production Model (SWAP). A Report for the California Department of Water Resources . CA Water Plan. 2010.
- HOWITT, R.E.; TAUBER, M.; PIENAAR, E. Impacts of Global Climate Change on California's Agricultural Water Demands. Department of Agricultural and Resource Economics, University of California, Davis., .(2003)
- HOWITT, R. E.; WARD, K. B.; MSANGI, S. Statewide Agricultural Production Model. University of California, Davis. 2001 Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística - IBGE. Banco de Dados: Cidades. 2015
- INSTITUTO MATO-GROSSENSE DE ECONOMIA AGROPECUÁRIA - IMEA. Custos de Produção da Soja. 2015
- INSTITUTO RIO-GRANDENSE DE ARROZ - IRGA. Custos de Produção do Arroz Irrigado. 2015
- LIU, L.; CUI, Y.; LUO, Y. Integrated Modeling of Conjunctive Water Use in a Canal-Well Irrigation District in the Lower Yellow River Basin, China. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 139, p. 775-784, 2013.
- MACHADO, T. D. Uso de Modelagem Hidro Econômica em Estratégias de Alocação da Demanda Agrícola em Períodos Críticos. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MANKIW, N. G. Introdução À Economia - Tradução da 6ª Edição Norte-americana - 2014.
- MARQUES, G.F.; LUND, J.L.; LEU, M.R.; JENKINS, M.W.; HOWITT, R.; HARTE, T.; HATCHETT, S.; RUUD, N.; BURKE, S. Economically-Driven Simulation of Regional Water Systems: Friant-Kern California. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 132, n. 6, p. 468-479, 2006.
- MARQUES, G.F.; LUND, J.R.; HOWITT, R.E. Modeling Conjunctive Use Operations and Farm Decisions with Two-Stages Stochastic Quadratic Programming. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 136, p. 386-394, 2010.
- MATTIUZI, C. D. P.; KIRCHHEIM, R.; COLLISCHONN, W.; FAN, F.M. Estimativa De Recarga Subterrânea A Partir Da Separação De Escoamento De Base Na Bacia Hidrográfica Do Rio Ibicuí (América Do Sul). *Revista Águas Subterrâneas*, vol 29, p. 285-300, 2015.
- MATTIUZI, C.D.P. Estimativa de Recarga a partir da Separação de Escoamento de Base na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí/RS. 69p. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Ambiental – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.



- MEDELLIN-AZUARA, J.; HOWITT, R. E.; WALLER-BARRERA, C.; MENDOZA-ESPINOSA, L. G.; LUND, J. R.; TAYLOR, J. E. A calibrated agricultural water demand model for three regions in northern baja California. *Agrociência*, v. 43, n. 2, p. 83-96, 2009.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. E. River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles. *J. Hydrol.*, v. 10, n. 3, p. 282-290, Apr. 1970.
- PONTES, P.R.M; FAN, F.M.; FLEISCHMANN, A.S.; PAIVA, R.C.D; BUARQUE, D.C.; SIQUEIRA, V.A.; JARDIM, P.F.; SORRIBAS, M.V.; COLLISCHONN, W. MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. *Environmental Modelling & Software* 94, 2017.
- PULIDO-VELAZQUEZ, M. Economic values for conjunctive use and water banking in southern California. *Water Resources Research*, 2004.
- SAHUQUILLO, A. Groundwater in Water Resources Planning: Conjunctive Use. *Water International*, vol 10, p. 57-63, 1985.
- \_\_\_\_\_. La Importancia de las Aguas Subterráneas. *Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fís. Nat. (Esp)*, vol. 103, n. 1, p. 97-114, 2009.
- SIQUEIRA, V.A., FLEISCHMANN, A., JARDIM, P.F., FAN, F.M., COLLISCHONN, W. IPHhydro tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an opensource environment. *Rev. Bras. Recur. Hídricos* 21 (1), 274 and 287, 2016.
- TILMANT, A.; PINTE, D.; GOOR, Q. Assessing marginal water values in multipurpose multireservoir systems via stochastic programming. *Water Resources Research*, v. 44, n. 12, 2008.

## 8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nos fundamentos da Política Nacional dos Recursos Hídricos está descrito que a água é um bem de domínio público, e que, além de ser um recurso natural limitado, também é dotado de valor econômico. Para que seja realizada a gestão adequada dos recursos hídricos devem ser levados em consideração os custos e os benefícios econômicos advindos da utilização da água em seus diversos fins. O planejamento adequado dos sistemas hídricos promove o uso sustentável da água, bem como um equilíbrio entre demandas e disponibilidades, aumentando a resiliência e flexibilidade dos sistemas frente a situações de conflito e escassez hídrica.

Neste trabalho foi estudada a alocação economicamente otimizada de água na Bacia do Rio Santa Maria, uma região na qual existem conflitos entre as demandas agrícolas e que, em anos de baixa precipitação, ocorrem situações de escassez hídrica. Também foi avaliado o manejo integrado de água superficial e subterrânea, chamado de uso conjunto, o qual através da diversificação de mananciais de água visa diminuir a escassez hídrica e assim evitar perdas econômicas.

Na primeira etapa deste trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica na qual foram trazidas explicações sobre a definição de uso conjunto, os benefícios e desafios na sua implementação. A partir desta revisão foi possível perceber que as situações de conflito e escassez hídrica são comuns em muitos países, e que nesses locais estratégias de manejo integrado de água superficial e subterrânea foram bem sucedidas para melhorar a gestão dos recursos hídricos. Além disso, percebe-se que o sistema de instrumentos de gestão da água no Brasil pode ser explorado para projetar e dar suporte às estratégias de uso conjunto: na Política Nacional dos Recursos Hídricos estão previstos os instrumentos de outorga, cobrança e planos de recursos hídricos, que dão subsídio para o manejo integrado de águas superficiais e subterrâneas.

A etapa seguinte deste trabalho consistiu na obtenção de informações sobre os benefícios econômicos correspondentes aos diversos usos de água; estas informações são importantes para o planejamento da otimização dos sistemas hídricos. Os resultados do modelo apontam que o valor marginal da água utilizada a irrigação de arroz e soja na Bacia do Rio Santa Maria o qual pode ser utilizado em estudos de cobrança de água na região. Outras análises dos resultados apontam que, em situações de escassez hídrica, a substituição entre culturas (arroz e soja) traria maiores retornos econômicos; estes resultados podem auxiliar a tomada de decisão dos produtores para a diminuição das perdas agrícolas.

Na terceira etapa deste trabalho, na qual foi utilizado o modelo hidroeconômico de alocação de água, os resultados indicaram que existe escassez hídrica atualmente devido às demandas estarem concentradas em algumas regiões, e que é possível através da alocação econômica diminuir a escassez. A adição de uma fonte de água subterrânea teve como resultado a diminuição na escassez em todos os cenários simulados. Estes resultados apontam para a importância do manejo adequado dos recursos hídricos, evidenciando que é possível otimizar a alocação de água, reduzindo o custo da escassez e tornando os sistemas hídricos mais robustos e flexíveis.

Para a realização deste trabalho foram estabelecidas algumas condições de contorno, principalmente devido ao tamanho da Bacia (aproximadamente 15mil km<sup>2</sup>), que não permite uma maior discretização da região estudada. Os reservatórios particulares foram agregados em seis grandes reservatórios, porém, sabe-se que a operação deles não segue uma regra, e pode variar ao longo da Bacia. Usos de água menores, como culturas de milho e pastagens, foram desconsiderados neste trabalho, pois as maiores demandas de água são irrigação de arroz e soja e demandas urbanas. O calendário de irrigação foi considerado o mesmo em todos os anos, embora se saiba que, dependendo da disponibilidade hídrica, os produtores podem antecipar ou atrasar o início do plantio. Os fatores citados acima têm influência no resultado, mas foram condições adotadas para viabilizar este estudo na escala da Bacia do Rio Santa Maria.

Em trabalhos futuros sugere-se que estudos como esse sejam realizados em áreas menores, para melhorar a caracterização da área estudada e obter resultados mais representativos. Também devem ser aprofundadas as relações de interação rio-aquífero, de maneira a melhor avaliar a interferência na retirada de água dos mananciais.

Esta dissertação trouxe o tema de otimização de alocação de água e uso conjunto de água superficial e subterrânea em regiões de conflito e escassez hídrica. Espera-se que as discussões levantadas neste estudo possam subsidiar os gestores e usuários na tomada de decisão quanto ao uso de água na região, além de fomentar medidas de implementação dos instrumentos de gestão previstos na Política Nacional dos Recursos Hídricos, assim contribuindo para a gestão das águas no Brasil.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Caderno da Região Hidrográfica – Uruguai. Brasília/DF, 132 p., 2006.

\_\_\_\_\_. Atlas Brasil: Abastecimento Urbano de Água – Panorama Nacional, Volume 1. Brasília, DF, 72 p. 2010.

\_\_\_\_\_. Sistema Cantareira. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/outorgaefiscalizacao/sistemacantareira.aspx>> Acesso em: janeiro, 2015

BBC. The 11 cities most likely to run out of drinking water - like Cape Town. Disponível em: <<http://www.bbc.com/news/world-42982959>>. Acesso em Fevereiro de 2018.

BEAR, J.; LEVIN, O. Optimal utilization of an aquifer as an element of a water-resources system. P.N. 5/66, Hydraulic Lab., Technion – Israel Inst. of Technology, Haifa, 1996.

BERTOLO, R.; HIRATA, R.; CONICELLI, B. Situação das Reservas e Utilização das Águas Subterrâneas na Região Metropolitana de São Paulo. Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas – USP, 7p, 2014.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997. Institui a Política Nacional dos Recursos Hídricos, Cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, Regulamenta o Inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e Altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de Março de 1990, que Modificou a Lei nº 7.990, de 28 de Dezembro de 1989. Diário Oficial da União, p. 470, janeiro de 1997.

BURT, O.R. Optimal Resource Use Over Time With An Application To Ground Water. Management Science, vol. 11, p. 80–93, 1964.

COLLISCHONN, W., ALLASIA, D.G., SILVA, B.C., TUCCI, C.E.M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modeling. Hydrol. Sci. J. 52, 878 and 895, 2007.

COMPANHIA DE PESQUISA EM RECURSOS MINEIRAIS – CPRM. Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul, escala 1:750.000. Serviço Geológico Brasileiro, 2005.

\_\_\_\_\_. Mapa Geológico do Rio Grande do Sul, escala 1:750.000. Serviço Geológico Brasileiro, 2007.

\_\_\_\_\_. Monitoramento da estiagem do sudeste. Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/sace/index\\_secas\\_estiagens.php](http://www.cprm.gov.br/sace/index_secas_estiagens.php)>. Acesso em: 2018

DE RIDDER, N.A., EREZ, A. Optimum use of water resources. Publication 21. International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI, Wageningen, The Netherlands, 1977.

DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DA SECRETARIA DO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - DRH/SEMA. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria. 2016.

DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL (DRH/RS). Portaria DRH nº 443/2017 que prorroga o prazo da outorga para

captação ou derivação de água superficial, mediante cadastro, aos usuários localizados na bacia hidrográfica do rio santa maria e modifica a tabela anexa à portaria DRH nº 1206/2015. Porto Alegre, setembro de 2017.

HAROU, J. J., PULIDO-VELÁZQUEZ, M., ROSENBERG, D. E., MEDELLÍN-AZUARA, J., LUND, J. R., HOWITT, R. E.. Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects. *Journal of Hydrology*, 375(3-4), 627-643, 2009.

HAROU, J.J., LUND, J.R. Ending groundwater overdraft in hydrologic–economic systems. *Hydrogeology Journal* 16 (6), 1039–1055, 2008.

HOWITT, R.R.; MEDELLÍN-AZUARA, J.; MacEWAN, D.; LUND, J.R. Calibrating Disaggregate Economic Models of Agricultural Production Management. *Environmental Modelling and Software*, vol. 38, p. 244-258, 2012.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Banco de Dados: Cidades. 2015

MARQUES, G.F.; LUND, J.R.; HOWITT, R.E. Modeling Conjunctive Use Operations and Farm Decisions with Two-Stages Stochastic Quadratic Programming. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 136, p. 386-394, 2010.

O'MARA, G.T., DULOY, J.H. Modeling efficient water allocation in a conjunctive use regime – the Indus Basin of Pakistan. *Water Resources Research*, vol. 20, n. 11, p. 1489–1498, 1984.

PULIDO-VELAZQUEZ, M.; JENKINS, M.W.; LUND, J.R. Economic values for conjunctive use and water banking in southern California. *Water Resources Research*, vol. 40, 2004.

PULIDO-VELAZQUEZ, M.; MARQUES, G. F.; JENKINS, M. W.; LUND, J. R. Conjunctive use of ground and surface water: Classical approaches and California examples. Proc., 11th World Water Congress, International Water Resources Association, Madrid, Spain, 2003.