

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**METODOLOGIA DE BALANÇO HÍDRICO E CRITÉRIOS DE OUTORGA EM
BACIAS HIDROGRÁFICAS COM USO INTENSO DE RESERVATÓRIOS DE
PEQUENO PORTE: ESTUDO DE CASO NA BACIA DO RIO QUARAÍ**

Rafael Henrique Bloedow Kayser

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Walter Collischonn

Banca examinadora:

Prof. Dr. Christian Chreties Ceriani	IMFIA/ UDeLaR
Prof. Dr. Fernando Setembrino Cruz Meirelles	IPH/UFRGS
Prof. Dr. Guilherme Fernandes Marques	IPH/UFRGS

Porto Alegre, RS – Brasil

Dezembro de 2014.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**METODOLOGIA DE BALANÇO HÍDRICO E CRITÉRIOS DE OUTORGA EM
BACIAS HIDROGRÁFICAS COM USO INTENSO DE RESERVATÓRIOS DE
PEQUENO PORTE: ESTUDO DE CASO NA BACIA DO RIO QUARAÍ**

Rafael Henrique Bloedow Kayser

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Prof. Dr. Walter Collischonn
(Orientador)

Prof. Dr. Christian Chreties Ceriani

Prof. Dr. Fernando Setembrino Cruz
Meirelles

Prof. Dr. Guilherme Fernandes Marques

AGRADECIMENTOS

Agradeço o meu orientador, Prof. Walter, pelos ensinamentos de grande valia na área de hidrologia e também pela sua capacidade motivacional, sendo sem sombra de dúvidas meu grande estímulo na minha formação como engenheiro hidrólogo.

Também aos professores do Programa de Pós-Graduação, em especial ao Prof. Juan Martin, Prof. Carlos André, Prof. Beatriz, Prof. Lawson Beltrame e Prof. Eduardo Lanna, que colaboraram com os ensinamentos em áreas relacionadas ao trabalho, pelo incentivo à pesquisa e à prática acadêmica, ou ainda pelo incentivo ao envolvimento de projetos de planejamento de bacias hidrográficas, projetos os quais são fonte de inspiração para o desenvolvimento de pesquisas na área de hidrologia integrada à gestão de recursos hídricos. Aos colegas e amigos do grupo de pesquisa de Hidrologia de Grande Escala, sempre dispostos a cooperar no que fosse possível.

Ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas, ao disponibilizar de um ambiente propício à pesquisa, e também pelo apoio de organismos como a CAPES e CNPq, pelo fornecimento de bolsa de pesquisa durante o curso de mestrado.

Ao pesquisador e vizinho uruguaio, o Eng. Nicolás Failache Gallo, pelo fornecimento dos dados de precipitação da porção uruguaia da área de estudo. Ao professor Fernando Meirelles pelo fornecimento do Plano Diretor de Irrigação da Bacia do Rio Quaraf. Também aos membros da Divisão de Outorgas do Departamento de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul, Rejane de Abreu e Silva e Cláudio Daudt Vanni, pelo fornecimento do cadastro de usuários de água da bacia do rio Quaraf.

Agradecimento especial aos meus pais, que são meus maiores exemplos de força e superação pessoal, e que mesmo diante de todas as dificuldades, possibilitaram que eu pudesse dar um passo tão grande como este. Agradeço também minha irmã, sempre incentivadora da minha carreira.

Por fim, agradeço também aos amigos e pessoas especiais, pessoas que por vezes entram em nossas vidas e que por algum motivo acabam se distanciando, outras que continuam sendo parceiras nos bons e nos maus momentos, mas que de alguma forma, deixaram ou ainda deixam alguma contribuição para que eu possa sempre seguir em frente alcançando meus objetivos.

RESUMO

Os reservatórios se constituem numa das principais formas estabelecidas pelo homem de modificar o ciclo hidrológico ao armazenar água para sua utilização no futuro. Em algumas regiões do país este mecanismo é de fundamental importância para o atendimento das demandas consultivas, seja pelas condições adversas do clima, como é o caso do semiárido nordestino, como também em função da alta demanda de água requerida para o atendimento da irrigação, como ocorre em algumas áreas do Rio Grande do Sul. Este trabalho apresenta uma metodologia de balanço hídrico em rios e reservatórios de pequeno porte, cujo foco é o atendimento aos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, como a outorga de direito de recursos hídricos e as políticas de planejamento. A metodologia está baseada na integração entre o modelo hidrológico chuva-vazão MGB-IPH como recurso para obtenção das séries afluentes de cada reservatório e trecho de rio do sistema hídrico. Associado ao modelo hidrológico, está a integração com os Sistemas de Informações Geográficas, que possuem a vantagem de obtenção das características físicas da bacia de forma automática, facilitando também a associação com os objetos que representam o sistema hídrico (i.e. demandas e reservatórios). O modelo de simulação realiza a contabilização do movimento de água através de um sistema de reservatórios e trechos de rio, cuja progressão de cálculo é realizada de montante para jusante. Como técnica de otimização, foi utilizado o algoritmo SCE-UA, baseado na teoria dos algoritmos evolucionários. A metodologia desenvolvida foi aplicada na Bacia do Rio Quaraí, caracterizada pelo intenso uso da água para o atendimento das demandas da irrigação, e também pelo estabelecimento de centenas de pequenas estruturas de reservação de água, destinadas ao abastecimento destas demandas. Os resultados indicaram que não há água suficiente para o atendimento das demandas da irrigação em 100% do tempo. Em média, apenas 75% do volume total de água requerido para o atendimento das demandas atuais poderia ser atendido, considerando o período simulado de 20 anos. Nos anos mais críticos pode ocorrer o esgotamento do curso principal do Quaraí e outros locais, decorrência das retiradas de água, além do efeito da reservação de água pelos açudes, pois admitiu-se a hipótese de não existirem descarregadores de fundo nessas estruturas. Como alternativas para a gestão da água na bacia, apontam-se a definição de critérios de outorga para retiradas e liberação de água em reservatórios, além de implementação de novas estruturas de reservação e regularização.

Palavras-chave: reservatórios, modelagem hidrológica, outorga, garantia de atendimento, otimização, Bacia do rio Quaraí.

ABSTRACT

Reservoirs are the most important form established by the man to modify the hydrological cycle to store water for use in the future. In some regions of Brazil this mechanism is crucial to meet the advisory needs, either by adverse weather conditions, such as the semi-arid northeast, but also due to the high demand of water required to meet the irrigation, as occurs in some areas of Rio Grande do Sul. This work presents a methodology of water balance in rivers and small reservoirs, whose focus is to achieve the goals of the instruments of the National Water Resources Policy, as the water rights and the planning policies. The methodology is based on the integration between the hydrological rainfall-runoff model MGB-IPH as a resource for obtaining streamflow series from upstreams of each reservoir and for all sub-watershed defined on the water system. Associated with the hydrological model is the integration with Geographic Information Systems, which have the advantage of obtaining the physical characteristics of the basin automatically, it also facilitates association with objects that represent the water system (i.e. demands and reservoirs). The simulation model performs accounting for the movement of water through a system of reservoirs and river stretches whose progression calculation is performed from upstream to downstream. As optimization technique, the SCE-UA algorithm, based on the theory of evolutionary algorithms was used. The procedure was applied in the Quaraí River Basin, characterized by intense use of water to meet the irrigation demands, and also by the establishment of hundreds of small structures reservation of water, destined to supply these demands. The results indicated that there is not water enough to meet the demands of irrigation at 100% of the time. On average, only 75% of the total volume of water required to meet the current demands could be met, considering the simulated period of 20 years. In the most critical years can occur exhaustion of the main course of the Quaraí and other sites, due to withdrawals plus the effect of the reservation by dams, it admitted the hypothesis that there are no releases in this structures. As alternatives to water management in the basin, point the definition of licensing criteria for withdrawals and releases in dams, as well as implementing new reservoir with regularization structures.

Key-words: reservoirs, hydrological modeling, water rights, reliability, optimization, Quaraí River Basin.

SUMÁRIO

1. APRESENTAÇÃO	9
1.1. Introdução	9
1.2. Justificativa	10
1.3. Objetivos	13
1.4. Organização do trabalho	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1. Os reservatórios e a gestão de recursos hídricos.....	14
2.1.1. Panorama da utilização de reservatórios no Brasil e no mundo.....	14
2.1.2. Aspectos legais envolvendo a utilização de vazões regularizadas	17
2.1.3. O papel dos Sistemas de Suporte à Decisão no gerenciamento de reservatórios.....	23
2.2. Metodologias de Análise de Sistemas de Recursos Hídricos	24
2.2.1. Modelos de Simulação	25
2.2.2. Modelos de Otimização	29
2.2.3. Principais sistemas generalizados.....	33
2.3. Comparativo entre diferentes metodologias de sistemas de planejamento hídrico ...	35
2.3.1. Representação topológica e entrada de dados	36
2.3.2. Avanços na integração com Sistemas de Informações Geográficas.....	38
2.3.3. Abordagens utilizadas e objetivos dos modelos	40
3. METODOLOGIA PROPOSTA.....	47
3.1. Introdução	47
3.2. Dados de entrada.....	47
3.2.1. Processamento do Modelo Digital de Elevação	48
3.2.2. Disponibilidade hídrica – Modelo MGB-IPH	51
3.2.3. Demandas e reservatórios.....	58
3.3. Descrição do módulo de simulação de reservatórios.....	59

3.3.1.	Introdução	59
3.3.2.	Vazão afluyente por mini-bacia.....	61
3.3.3.	Balanço hídrico no trecho.....	61
3.3.4.	Balanço hídrico no reservatório.....	62
3.3.5.	Verificação da demanda não atendida pelo reservatório	65
3.4.	Descrição do módulo de otimização de reservatórios.....	66
3.4.1.	Descrição do esquema de otimização global SCE-UA	66
3.4.2.	Descrição da função-objetivo.....	71
4.	ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO QUARAÍ	74
4.1.	Caracterização da bacia.....	74
4.2.	Disponibilidades hídricas superficiais: aplicação do modelo MGB-IPH	76
4.2.1.	Dados hidrometeorológicos	76
4.2.2.	Dados de uso e tipo e solo e definição das Unidades de Resposta Hidrológica.....	82
4.2.3.	Discretização da bacia considerando os reservatórios a serem simulados	85
4.2.4.	Calibração do modelo e resultados.....	87
4.3.	Disponibilidade hídrica armazenada nos açudes	92
4.4.	Demandas hídricas e situação das outorgas na margem direita da bacia.....	94
4.4.1.	Estimativa das demandas da irrigação por imagens de satélite	94
4.4.2.	Situação das outorgas na bacia e comparação com os valores estimados	101
5.	RESULTADOS	104
5.1.	Simulação do modelo de reservatórios considerando as demandas atuais	104
5.1.1.	Análise da disponibilidade de água por temporada	104
5.1.2.	Verificação do atendimento às demandas da irrigação	106
5.1.3.	Disponibilidade de água nos trechos de rios	113
5.1.4.	Disponibilidade de água nos reservatórios	118
5.2.	Proposição de novos critérios de outorga a partir do modelo de otimização.....	120

5.2.1. Determinação da vazão regularizável nos açudes	120
5.2.2. Estudo comparativo utilizando o modelo Acquanet	127
5.3. Estudo de alternativas de incremento da disponibilidade hídrica na bacia.....	132
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	139
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143

1. APRESENTAÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

O surgimento das civilizações sempre esteve intimamente ligado à questão da água, através do estabelecimento dos primeiros povos em regiões abundantes deste recurso, do transporte realizado através das navegações, dentre tantas outras atribuições que ajudaram o homem a se desenvolver. A engenharia de recursos hídricos trouxe ao homem a possibilidade de modificar espacialmente ou temporalmente a distribuição de água para seu proveito, e ela está presente há pelo menos 5000 anos, quando há os primeiros registros de construção de reservatórios, utilizados para o abastecimento de povos antigos (WURBS, 1996). Nos últimos tempos, o crescimento acelerado da população tem gerado uma pressão em relação à utilização dos recursos hídricos, tanto diretamente através do consumo, quanto indiretamente como insumo para a produção de alimentos e outras utilidades.

A adoção de políticas de gerenciamento das águas se torna cada vez mais importante, pois é através dela que poderão ser atribuídas as prioridades para a utilização do recurso, além do estabelecimento das obras de engenharia que poderão trazer os melhores benefícios para a população como um todo. Aliada à prática de gestão, o embasamento técnico e o conhecimento sobre a bacia devem estar sempre presentes, através de estudos hidrológicos e da utilização de ferramentas que auxiliem na tomada de decisão.

Em algumas regiões do país, como na região Nordeste e no Estado do Rio Grande do Sul, existe uma distribuição bastante particular dos sistemas de reservatório, em que há uma grande quantidade de pequenas reserwações de água destinadas principalmente ao atendimento da demanda da irrigação, distribuídas ao longo do sistema hídrico (COLLISCHONN, et al., 2011; GUNTNER, et al., 2004). No primeiro caso, a implementação destas estruturas é importante devido às condições climáticas adversas da região, no segundo o fator preponderante são as altas taxas de água demandada, destinadas basicamente ao atendimento das demandas da irrigação da rizicultura. A bacia do rio Quaraí, inserida neste contexto, está localizada na fronteira entre o Brasil e o Uruguai, possuindo um uso intenso da água, com significativas retiradas de água diretamente dos cursos d'água e também dos reservatórios existentes na bacia. Existem centenas de estruturas de reservação de água, construídas principalmente pela iniciativa dos proprietários de terra, destinadas a fornecer água nos meses de irrigação do arroz, num período correspondente aos meses de novembro a fevereiro, sendo constituídas

basicamente por estruturas simples, muitas vezes sem a capacidade de controle de sua vazão de saída.

Estudos de balanço hídrico entre disponibilidades e demandas nestas regiões necessitam de uma análise da capacidade de atendimento dos reservatórios, podendo ser realizado por sistemas de apoio à decisão que contemplem tais estruturas. A função essencial de um reservatório é regularizar a vazão, que naturalmente possui características sazonais, com maior ou menor intensidade, dependendo das condições climáticas da bacia. Os estudos envolvendo a regularização de vazões são essenciais para o dimensionamento das estruturas dos reservatórios, bem como na definição de políticas e regras de operação para gerenciamento de suas águas. A bibliografia apresenta diversas metodologias envolvendo a alocação de água em reservatórios, sendo a simulação do balanço hídrico o método mais usual. Devido à complexidade envolvendo a análise do estudo, principalmente em se tratando de reservatórios que visam o atendimento aos usos múltiplos, na maioria das vezes lança-se mão de modelos de otimização que realizam determinada rotina de cálculo até que possa alcançar determinado objetivo.

1.2.JUSTIFICATIVA

Os modelos de simulação de reservatórios são geralmente baseados em procedimentos de cálculo de balanço de massa, através do movimento de água num sistema de rios e reservatórios. As rotinas computacionais são repetidas sequencialmente para cada intervalo de tempo ao longo do período de simulação (WURBS, 1996). Nesse sentido, diversas abordagens podem ser encontradas quanto ao desenvolvimento destes modelos, incluindo nesse aspecto seu caráter genérico ou não, o modo de obtenção das séries hidrológicas, a possibilidade de representação por meio de objetos ou então de integração com Sistemas de Informação Geográfica, associação com rotinas de otimização, dentre outros aspectos.

As informações das séries de vazões naturais nos modelos de gerenciamento são fundamentais para o bom desempenho do mesmo. A associação da modelagem hidrológica com estes sistemas é bastante comum, ainda que também possam ser verificados modelos híbridos em que a simulação dos processos hidrológicos está inserida dentro da mesma sequência de simulação de reservatórios e alocação de demandas. A integração entre os tipos de modelagem é por vezes trabalhosa devido à necessidade de compatibilização entre os dados de saída de um sistema e de entrada do outro, porém existem metodologias em que um modelo de gerenciamento possui maiores afinidades com determinado modelo hidrológico, geralmente

desenvolvido pela mesma instituição. Verifica-se a necessidade de contar com sistemas de gerenciamento adaptados aos modelos hidrológicos já consagrados e difundidos à nossa realidade local, como o Modelo de Grandes Bacias.

Observa-se também que há uma tendência na utilização dos recursos SIG para auxiliar na estruturação do sistema e também para a obtenção dos dados físicos da bacia. Entretanto, para a maioria das aplicações existentes, a integração entre o SIG e o modelo se dá através da sobreposição de camadas, na qual o usuário pode alocar os objetos de forma georeferenciada. Propõe-se que seja explorada mais a fundo as ferramentas de geoprocessamento, como a integração das técnicas de discretização para definição dos trechos de rio, além da extração das informações topológicas a partir dos Modelos Digitais de Elevação.

As metodologias de otimização são amplamente utilizadas nestes modelos de gerenciamento, tanto isoladas quanto agregadas a um modelo de simulação. Sua utilização sempre reflete na maximização ou minimização de determinada condição, expressada através de uma função objetivo. As técnicas de Programação Linear, aliadas à representação do sistema hídrico via Rede de Fluxos são algumas das técnicas mais consagradas na bibliografia. Nas últimas décadas, viu-se despontar o desenvolvimento de modelos heurísticos, ou métodos de busca, baseado em analogias inspiradas na natureza para a resolução destes problemas. A utilização dos métodos heurísticos possui grande potencial para o desenvolvimento de novas pesquisas, pois possui a vantagem de serem associados diretamente com os modelos de simulação, além da eliminação dos problemas de não-linearidades encontrados na aplicação da Programação Linear. Contudo, ainda é necessário o melhoramento das técnicas de busca direta, no sentido de garantir a obtenção dos ótimos globais, além da otimização do esforço computacional.

O modelo hidrológico MGB-IPH (Modelo de Grandes Bacias) vem sendo desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) ao longo da última década, sendo possível encontrar aplicações bem sucedidas do modelo em toda a América do Sul. As publicações mais recentes em relação ao modelo mostram uma tendência de integração do mesmo com os Sistemas de Informação Geográfica, devido principalmente à facilidade em se obter os dados relativos à descrição fisiográfica da área de estudo. Dentre as aplicações realizadas com o modelo, destacam-se os trabalhos de previsão de vazão, mudanças climáticas, modelagem da qualidade da água, modelagem da produção e transporte de sedimentos, além da integração com modelos de gestão e sistemas de apoio à decisão. Com

relação a este último campo de aplicações, os trabalhos até então desenvolvidos estão relacionados a estudos de balanço hídrico quantitativo envolvendo regime permanente de vazões, ou outras palavras, um retrato de uma determinada condição hídrica da bacia, geralmente uma situação de escassez, comparada à demanda típica ao longo do tempo (PEREIRA, 2010; KAYSER 2011).

Nesse sentido, o presente trabalho se propõe a aprimorar a integração entre o modelo hidrológico MGB-IPH e as metodologias de gerenciamento de recursos hídricos, incluindo análises de balanço hídrico em regime não permanente de vazões, isto é, com a utilização de séries de vazões geradas pelo modelo hidrológico como dado de entrada. A proposta é que a estruturação do sistema seja feita a partir de um processo de discretização de bacia em unidades irregulares, definidas a partir de dados do relevo de um Modelo Digital de Elevação (MDE), denominadas mini-bacias, mesma metodologia adotada atualmente pelo modelo hidrológico MGB-IPH. Da mesma forma, verifica-se também a necessidade de desenvolvimento de sistemas que envolvam um grande número de pequenos reservatórios, como é o caso da bacia do rio Quaraí, local em que será aplicado o estudo de caso.

O objetivo da aplicação é contribuir para o avanço dos instrumentos de gestão na bacia, além de outras que possuam características semelhantes. Um dos instrumentos a serem discutidos é a questão da outorga para retiradas em reservatórios. Em vazões sazonais, normalmente adota-se algum ponto da curva de permanência, em geral a Q90 ou a Q95. Com relação a retiradas realizadas em reservatórios, o conceito de vazão de referência associado a uma vazão mínima perde o significado, uma vez que as infraestruturas de armazenamento são construídas justamente para aumentar a disponibilidade hídrica que o rio teria naturalmente (ANA, 2013). Outra questão a ser levantada é a possibilidade de incremento das disponibilidades, através da proposição de novas estruturas de reservação, a fim de que as demandas sejam atendidas. Para tanto, lança-se mão da utilização de rotinas de otimização baseadas em métodos de busca, mais precisamente, o modelo SCE-UA (*Shuffled Complex Evolution*), da Universidade do Arizona. As rotinas de otimização podem auxiliar na definição de valores ótimos de referência para captações em reservatórios de acordo com um determinado valor de garantia de atendimento.

1.3.OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é contribuir no gerenciamento de bacias com uso intenso da água e com grande presença de estruturas de reservação de água. Para atender o objetivo proposto, foi desenvolvida uma metodologia de aprimoramento do sistema de apoio à decisão integrado a um SIG e ao modelo MGB-IPH, com a inclusão de reservatórios, operação em regime não permanente de vazões e inserção de rotinas de otimização.

1.4.ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho foi dividido em quatro etapas que são descritas brevemente a seguir:

- Uma revisão bibliográfica (capítulo 2) realizando um panorama sobre a questão dos reservatórios e sua inserção no contexto do gerenciamento de recursos hídricos. Também é tratada a importância dos Sistemas de Apoio à Decisão, apresentando os modelos de simulação e otimização, além de um comparativo entre os principais exemplos de sistemas encontrados na literatura.
- Uma descrição da metodologia proposta (capítulo 3), apresentando as propriedades de obtenção da estrutura da bacia através do SIG, a integração com o modelo MGB-IPH, a descrição do modelo de balanço hídrico nos reservatórios e nos trechos de rio, quantificação dos déficits e das garantias de atendimento, além da descrição do modelo de otimização agregado ao modelo de simulação.
- Uma apresentação da bacia do rio Quaraí, onde foi aplicado o estudo de caso (capítulo 4), no qual é descrita a aplicação do modelo MGB-IPH no local, além da descrição das estimativas dos reservatórios existentes, as demandas de água, entre outros dados de entrada do modelo de reservatórios.
- A apresentação dos resultados obtidos (capítulo 5), contendo a descrição do balanço hídrico nos rios e reservatórios ao longo da série de vazões simulada, considerando alguns cenários e hipóteses Também são apresentados os resultados obtidos com o modelo de otimização, referente à proposição de critérios para outorgas em reservatórios, baseado no conceito de garantia de atendimento, além de um estudo com a possibilidade de incremento na disponibilidade hídrica na bacia.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.OS RESERVATÓRIOS E A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

2.1.1. Panorama da utilização de reservatórios no Brasil e no mundo

Um reservatório pode ser entendido metaforicamente como uma máquina do tempo capaz de fornecer a água que foi armazenada no passado para ser utilizada no presente. Devido muitas vezes à sua distribuição irregular no tempo e no espaço, a utilização destas estruturas para a regularização espacial e temporal da água passou a ser fundamental ao homem para o suprimento do recurso em períodos de escassez. A capacidade do homem em construir reservatórios é antiga, há registros que estes tenham sido implementados há pelo menos 5000 anos com o intuito de servir a população das antigas civilizações dos povos babilônicos, Egito, Índia, Pérsia e os povos do oriente. A história dos reservatórios e barragens segue o apogeu e o declínio de civilizações, especialmente em culturas altamente dependente da irrigação (WURBS, 1996).

O armazenamento de água em reservatórios é necessário para prover o melhor aproveitamento dos recursos hídricos frente aos diferentes propósitos: suprimento de água para abastecimento público e industrial, irrigação, geração de energia elétrica, navegação, etc. Barragens e outras estruturas são importantes para reduzir danos causados pelas cheias. Neste contexto também se inserem outras questões como a qualidade da água, erosão e sedimentação, proteção da vida aquática, as quais devem ser consideradas no gerenciamento de rios e reservatórios.

A Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB) mantém um Registro Mundial de Grandes Barragens (SÓRDIA, 2008). Para uma barragem ser considerada grande e ser incluída no registro a mesma deve cumprir alguns requisitos, como a capacidade de armazenar mais de 3 milhões de metros cúbicos de água em seu reservatório. Os dados mundiais de 2000 indicam haver cerca de 50 mil grandes barragens em operação. A maioria das barragens no Registro da CIGB (71,7%) é de barragens de uso único, embora haja um número crescente (28,3%) de barragens de usos múltiplos. Hoje, a irrigação é a função mais comum das barragens no Registro da CIGB. A distribuição das funções entre as barragens de uso único no mundo é a seguinte:

- 48,6% para irrigação
- 17,4% para hidreletricidade
- 12,7% para suprimento de água
- 10,0% para controle de enchentes
- 5,3% para recreação
- 0,6% para navegação e piscicultura
- 5,4% para outras funções

A construção de reservatórios no Brasil deu-se início no Nordeste pelos portugueses, com o objetivo de conduzir água até os moinhos dos engenhos no início da colonização. Durante a colonização do interior do país, a açudagem foi uma das estratégias utilizada pelos sertanejos para minimizar os efeitos das secas e resolver o problema do abastecimento d'água que atingia os colonizadores e os seus rebanhos. Essa técnica de manejo do meio ambiente, frente à adversidade climática, foi o único meio de suprir a falta de rios perenes e de fontes permanentes de água no sertão nordestino (REBOUCAS, 1997).

As características hidrológicas dos cursos d'água do semiárido nordestino não permitem o aproveitamento direto dos deflúvios, requerendo que soluções estruturais fossem construídas para regularizar as variações das disponibilidades e possibilitar seu uso regular (REIS, 2002). O ano de 1877 marcou uma das maiores tragédias naturais do país: a Grande Seca no Nordeste durou três anos e foi um marco no Brasil para a construção de inúmeras estruturas de armazenamento de água no semiárido e em todo o país.

A irrigação da lavoura no Rio Grande do Sul pode ser considerada como uma consequência natural da disponibilidade de terras planas, de difícil drenagem natural, das condições climáticas do período da primavera e do verão e uma relativa abundância de água. O início da irrigação do arroz data do início do séc. XX na região de Pelotas, avançando significativamente no período da Segunda Guerra Mundial, havendo um incremento de 25% neste período (MEIRELLES, 2009). A partir dos anos 70, ocorreu uma significativa expansão devido a fatores como a disponibilidade de terras em qualidade e quantidade, disponibilidade de recursos hídricos, mercado de consumo em expansão e crédito subsidiado (ARNÉZ, 2002).

A irrigação é, globalmente, o maior uso consuntivo de água, tanto em número de captações. Dentre as diversas culturas irrigadas, o arroz representa o maior consumo, devido ao fato de necessitar de uma lâmina permanente de 10cm acima do solo, para impedir o crescimento de espécies invasoras. Desta forma, algumas bacias hidrográficas no sul do Brasil,

embora apresentem disponibilidades hídricas relativamente altas em comparação a outras regiões do país, começam a apresentar balanço hídrico crítico, devido ao fato de boa parte da produção nacional de arroz se situar nesta região (COLLISCHONN e COLLISCHONN, 2009).

Associado a este contexto de alta demanda de água para a irrigação, aparece também a implementação das estruturas de reservação para o suprimento de água. Através de dados da EMATER de 2001, estimava-se que o Estado possuía quase 10.000 açudes ou barragens destinadas à irrigação, em sua maioria, construídos pela iniciativa privada. Segundo MEIRELLES (2009), na Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul as estruturas de armazenamento respondem por 61,6% das captações de água para as lavouras, sendo o restante atendido por bombeamento direto de rios e córregos.

A Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME, identificou e quantificou todos os espelhos d'água do País, naturais e artificiais, com uma área superficial a partir de 20 hectares. Como ferramenta principal para o mapeamento foram utilizadas imagens do satélite Sino-Brasileiro, CBERS. Associado ao mapeamento foi concebido um banco de dados constando alguns atributos como a área (ha), perímetro (km) e o atributo do tipo de espelho: artificial (reservatório) ou natural (lagos, lagoas, outros). Figura 2.1 apresenta a distribuição do número de espelhos d'água artificiais em relação à área superficial. Observa-se que 66% do número de reservatórios no país possuem até 50 hectares, em sua grande maioria constituída por açudes que atendem as demandas de irrigação, e uma pequena parcela de represas que atendem as PCHs (FUNCEME, 2008).

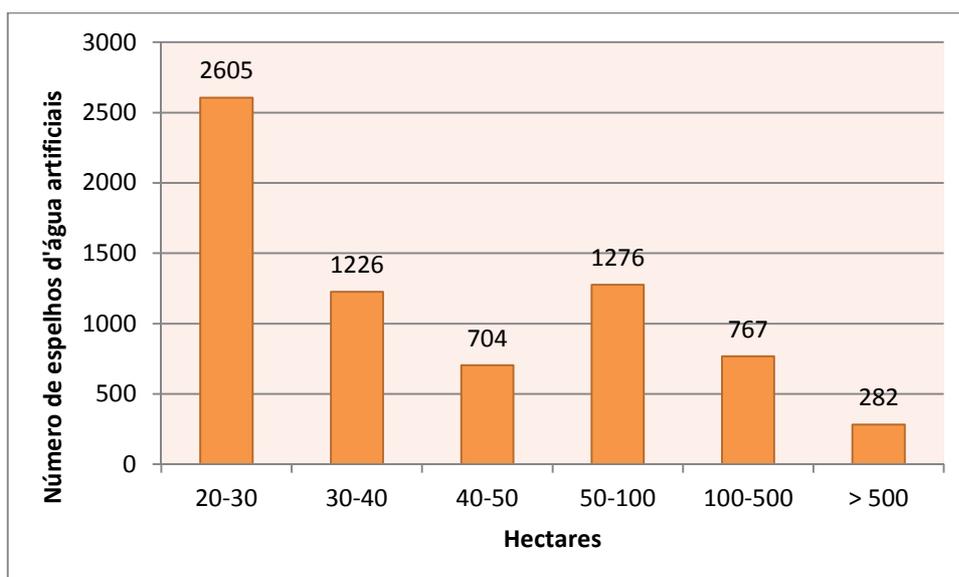


Figura 2.1 - Distribuição do número de espelhos d'água artificiais no país de acordo com a área.

A Figura 2.2 apresenta um gráfico da distribuição dos espelhos d'água de até 50 hectares em relação aos estados brasileiros. O Rio Grande do Sul é expressivamente o estado com a maior quantidade de reservatórios de pequeno porte em seu território, perfazendo mais de 35% do total de espelhos d'água. Justifica-se esse fato pelo uso intensivo da terra para a agricultura irrigada na região, especialmente em relação à cultura do arroz. Os estados do nordeste também possuem uma grande quantidade de pequenos reservatórios (40% do total de espelhos d'água de até 50 ha), evidenciando a política de construção de açudes que visa o armazenamento da água para suprir os meses de estiagem.

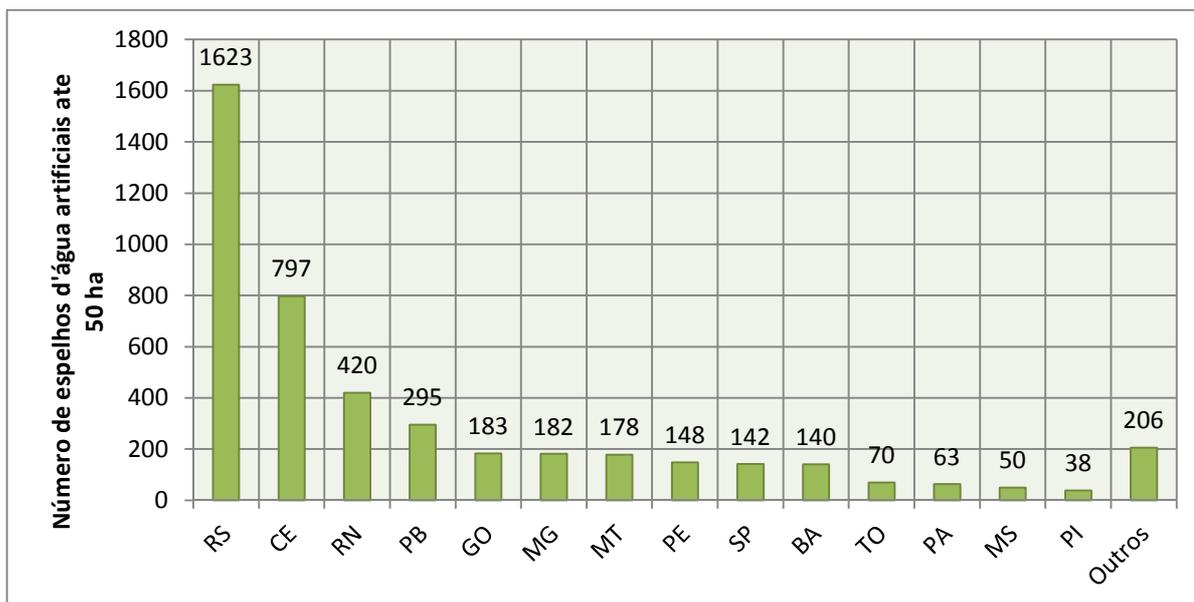


Figura 2.2 – Distribuição dos pequenos espelhos d'água no país de acordo com os estados.

2.1.2. Aspectos legais envolvendo a utilização de vazões regularizadas

No Brasil, a criação da lei nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997, a qual instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos foi um marco na legislação, pois enfatizou a importância da água e assegurou a proteção desse recurso. Tendo em vista que a água é um bem de domínio público e um recurso natural limitado, a Política Nacional de Recursos Hídricos objetiva assegurar, à atual e às futuras gerações, a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos; a utilização racional e integrada dos recursos hídricos visando o desenvolvimento sustentável; e a proteção e defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrente do uso inadequado dos recursos naturais.

Os objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos são atingidos através de seus instrumentos de gestão, conforme o artigo 5º da mesma lei:

- os Planos de Recursos Hídricos;

- o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água;
- a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos;
- a cobrança pelo uso de recursos hídricos;
- o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

Dentre os instrumentos previstos na Política Nacional pode-se destacar a outorga de direito de uso da água como importante ferramenta de suporte à gestão e ao gerenciamento de recursos hídricos. Estão sujeitos à outorga todos os usos que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água existente em um corpo d'água. A concessão da outorga está vinculada à dominialidade das águas, sendo as de domínio estadual de responsabilidade dos Estados e do Distrito Federal.

Uma questão central na formulação de um sistema de outorga refere-se a definição da vazão outorgável. Segundo RODRIGUES et al. (2011), a aplicação do critério de vazão de referência é o procedimento adequado para a proteção dos rios, pois as alocações para derivações são geralmente feitas a partir de uma vazão de base de pequeno risco. A vantagem de usar vazões de estiagem está na obtenção de maiores garantias para a não ocorrência de falhas de atendimento.

De acordo com o Manual de Procedimentos Técnicos e Administrativos de Outorga de Direitos de Uso de Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas (ANA, 2013), duas abordagens têm sido usadas nacionalmente como critério para definição de vazões mínimas de referência: vazões mínimas com determinado tempo de recorrência e vazões de curva de permanência. A primeira abordagem tem origem no setor de saneamento é usada como critério em vários estados, como São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais, usualmente por meio da vazão mínima de 10 anos e 7 dias de duração ($Q_{7,10}$), em que a estatística de vazão mínima é obtida por meio do ajuste de uma distribuição estatística (Gumbel, Weibull ou outra).

Já a segunda abordagem consiste em ordenar as vazões da maior para menor e identificar a vazão que é superada em uma porcentagem grande do tempo. Esta porcentagem do tempo é usualmente denominada garantia. O valor complementar à garantia, ou seja, o tempo em que esta não é satisfeita, é usualmente denominado de risco para a emissão de outorgas preventivas e de direito de uso de recursos hídricos, é preciso conhecer e/ou estimar as disponibilidades hídricas em determinada bacia hidrográfica e, por meio de critérios técnicos, verificar a possibilidade de atender às demandas dos diversos usuários da água.

As vazões de referência recebem a crítica de serem muito reduzidas. Assim, o que ocorre na prática são vazões bem maiores às de referência durante alguns meses do ano o que ocasiona um prejuízo à sociedade, pois os volumes não utilizados escoarão para o oceano, seja a partir do próprio curso d'água, seja a partir do rio principal do qual é afluente. Entretanto, para que essa vazão excedente possa ser Outorgada é necessário conhecer as suas garantias de ocorrência e estabelecer um esquema de racionamento de água (LEÃO, 2008).

Em reservatórios de regularização de vazões, o conceito de vazão de referência associado a uma vazão mínima perde o significado, uma vez que as infraestruturas de armazenamento são construídas justamente para aumentar a disponibilidade hídrica que o rio teria naturalmente. Sendo assim, a ANA considera a vazão regularizada como um valor mais representativo para a disponibilidade hídrica de reservatórios (exceto os reservatórios do setor elétrico). A vazão regularizada é a vazão que o reservatório pode fornecer a longo prazo, sem que o volume mínimo ou volume morto seja atingido. Como já mencionado, a maior vazão que pode ser regularizada é a vazão média de longo termo. No entanto, este é um teto teórico, visto que sempre ocorrem perdas por evaporação e vertimento. TUCCI (2000) estima que, na região sudeste do Brasil, os reservatórios conseguem regularizar 60% da vazão média de longo termo, se corretamente dimensionados. Já no semiárido nordestino, não é incomum a ocorrência de reservatórios que regularizam apenas 5% da vazão média de longo período, em função da alta evaporação e da alta variabilidade interanual das vazões. De qualquer forma, as porcentagens mencionadas são apenas indicadoras, uma vez que a vazão regularizada varia muito de acordo com a área de drenagem e hidrologia da bacia, volume armazenado total e curva cota-área-volume do reservatório, clima local, entre outros.

A disponibilidade hídrica de reservatórios superficiais é comumente expressa por meio de sua capacidade de regularização de vazão associada a uma garantia de abastecimento ou garantia de oferta hídrica. A garantia de abastecimento, por sua vez, representa o percentual de tempo de simulação no qual certa vazão regularizada é atendida sem falhas (REIS, 2002) .

O nível de garantia adotado usualmente em estudos hidrológicos para fins hidroagrícolas no Brasil é de 90%, sendo de 95% para fins energéticos, e de 99 – 100% para fins de abastecimento humano e industrial (CEARÁ, 1992). A garantia de atendimento de uma vazão regularizada préfixada é determinada através da utilização de modelos físicos baseados na equação do balanço hídrico do reservatório, a qual considera todos os aportes e retiradas de

água daquele sistema. Este cálculo é, geralmente, realizado através de simulação mensal da operação do reservatório.

Muitos órgãos reguladores do Nordeste adotam, como critério de outorga, a disponibilidade de referência associada a uma confiabilidade, normalmente a vazão regularizada com 90% de garantia. A Tabela 2.1 apresenta alguns critérios adotados em diferentes Estados para quantificação do máximo outorgável em relação à vazão regularizada. Usualmente, deixa-se uma determinada reserva de vazão regularizada a ser considerada fora de outorga. REIS (2002) indica como possíveis fatores que podem justificar este critério a incerteza nas disponibilidades, manter as demandas sempre abaixo da oferta, entre outros.

Tabela 2.1 - Exemplos de critérios adotados como limites para concessão de outorgas, com base na regularização de vazões (fonte: REIS, 2002).

Estado	Critério	Decreto
Bahia	O somatório das vazões outorgadas deve ter o limite de 80% das vazões regularizadas com 90% de garantia (reservações em mananciais perenes) ou 95% das vazões regularizadas (reservações em mananciais intermitentes)	D.E. 6296/97
Ceará	A soma dos volumes outorgados em uma determinada bacia não poderá exceder 9/10 da vazão regularizada com 90% de garantia.	D.E. 23067/94
Paraíba		D.E. 19260/97
Rio Grande do Norte		D.E. 13283/97
Alagoas		D.E. 006/01
Pernambuco	Não define nenhum valor. O órgão gestor definirá os volumes máximos com base nos estudos dos recursos hídricos existentes.	D.E. 20269/97

No Rio Grande do Sul não há uma definição em relação ao critério utilizado como vazão de referência para concessão de outorga. Os critérios são definidos individualmente em cada

bacia hidrográfica à medida em que estão sendo desenvolvidos os Planos de Recursos Hídricos, sendo normalmente adotados os valores de vazão com 90% ou 95% de permanência, em relação às vazões sazonais. Em relação às vazões regularizadas, os critérios são ainda mais incipientes, não havendo nenhuma definição em relação aos limites outorgáveis nestes casos.

Em algumas bacias com uso intenso de recursos hídricos e demanda superior à disponibilidade hídrica, estão sendo adotados critérios práticos para regulação da água em momentos de escassez. De acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos, a bacia do rio Quaraí se encontra numa situação crítica em relação ao balanço entre disponibilidades e demandas hídricas, em especial confrontando-se os valores de demanda no verão e a disponibilidade mínima no mesmo período, onde o comprometimento chega a 585% da disponibilidade (RIO GRANDE DO SUL, 2007). Para atender a todos os usuários de irrigação de forma isonômica, foi estabelecido o Marco Regulatório do Uso da Água do rio Quaraí, formalizado através da Resolução ANA nº 607, de 9 de novembro de 2010. Esta resolução outorgou o direito de uso de água a 39 irrigantes, prevendo a possibilidade de redução do tempo de captação diário, de acordo com o nível d'água do rio, medido em uma estação de monitoramento de referência.

Ainda com relação aos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, tem-se os Planos de Recursos Hídricos (PRH) como fator fundamental para que se possa realizar um processo de gestão adequado dos recursos hídricos. As intervenções, sejam elas na forma de medidas estruturais e não-estruturais, devem estar relacionadas à implantação de um PRH, que se constitui em estudos que visam adequar o uso, o controle e o grau de proteção dos recursos hídricos às aspirações sociais e governamentais expressas na Política de Águas.

O processo de planejamento é fundamentado em um modelo de gerenciamento das águas que constata a separação entre as atribuições de oferta e as atividades de uso da água. Os planos podem estar fundamentados em estudos específicos para cada setor ou atividade, ou então abranger vários usos num plano multisetorial. Como exemplos de planos setoriais de recursos hídricos, podemos citar (SETTI, 2001):

- Planos de Abastecimento e Saneamento Básico, reunindo os usos relativos ao abastecimento e à assimilação de rejeitos;
- Planos Agropecuários, relativos ao uso da água na agropecuária;
- Planos Energéticos, relativos ao uso da água para geração de energia;
- Planos Viários, relacionados ao uso da água para promoção do transporte hidroviário;

A existência de um plano multisetorial é de fundamental importância, pois estabelece diretrizes para a abordagem de potenciais conflitos intersetoriais. Esse plano deve considerar todos os usos, controles e medidas de proteção afetos às águas visando as suas articulações e compatibilizações. O planejamento setorial se dirige a um setor ou a uma função de dado setor econômico, sendo este o mais comum. A separação do planejamento em níveis setoriais é resultado da organização político-administrativa inerente, não deixando de ser importante, porém havendo a necessidade de planos que englobem todos os aspectos relacionados aos recursos hídricos.

A Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) nº17 de 2001 estabelece diretrizes complementares para a elaboração dos Planos de Recursos Hídricos (PRH), a qual fundamenta a função deste instrumento de orientar a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, tomando-se a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e estudo. O artigo 8º da referida resolução dispõe do conteúdo mínimo dos PRH, os quais devem ser constituídos por diagnósticos e prognósticos, alternativas de compatibilização, metas, estratégias, programas e projetos, contemplando os recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

A elaboração de um PRH exige que sejam tomadas uma série de decisões, devendo ser considerados obrigatoriamente aspectos hidrológicos, ambientais, econômicos, políticos e sociais, mutáveis no tempo e associados a incertezas de difícil quantificação (PORTO, *et al.*, 2002) Tomadas de decisão sobre outorga, eventuais racionamentos, enquadramento de cursos de água por classes de uso, controle de cheias, tratamento e diluição de efluentes, adoção de medidas de contingência e outras não podem prescindir de bases de informações sistematicamente organizadas e atualizadas. O produto final destes trabalhos está associado geralmente a investimentos de pequeno a grande porte, prazos longos e políticas cuidadosas de operação e manutenção. Tais características impõem a necessidade de planejamentos estratégicos que conciliem eficiência econômica, sustentabilidade, flexibilidade e equidade.

A implementação de um reservatório em uma bacia deve estar na pauta de estudos e discussões de um PRH, sobretudo quando trata-se de um reservatório cuja meta é o atendimento de objetivos múltiplos. Após as etapas de diagnóstico e prognóstico, onde são realizadas projeções futuras de aumento da demanda hídrica e são verificados os conflitos potenciais, são feitas as indicações da necessidade de alternativas de prevenção ou mitigação das situações críticas identificadas. Estas opções envolvem principalmente a questão do incremento das

disponibilidades através da proposição de estruturas de armazenamento, além de medidas de redução das demandas e cargas poluidoras.

Uma das questões que podem ser discutidas em um PRH é a possibilidade de realização de grandes ou pequenas reservações, de modo que seja otimizada a eficiência da estrutura. Esta questão é levantada por CAMPOS, *et al.* (2003), onde é analisada a eficiência de pequenos e grandes reservatórios em uma bacia do Estado do Ceará. No caso, observou-se que a combinação dos parâmetros da forma do reservatório, do deflúvio médio afluente anual e da lâmina evaporada durante a estação seca pode ser um indicativo dos locais ótimos para implementação de açudes.

2.1.3. O papel dos Sistemas de Suporte à Decisão no gerenciamento de reservatórios

De acordo com PORTO *et al.* (2002), nas últimas décadas viu-se nascer e prosperar metodologias de auxílio à tomada de decisões baseadas na intensa utilização de bases de dados e modelos matemáticos e também na facilidade com que propicia o diálogo entre o usuário e o computador. Essa metodologia, genericamente conhecida por *Sistemas de Suporte à Decisão (SSD)*, vem sendo aplicado nos processos de planejamento e também em diversos campos da atividade humana em que o problema de decisão tem caráter complexo.

Um SSD é composto basicamente por três principais componentes, a saber: base de dados, base de modelos e base de conhecimento, todos eles reunidas num módulo de diálogo com o usuário. A base de dados deve ser capaz de reunir todas as informações importantes sobre o problema e gerenciá-las de forma adequada. A base de modelos contém os instrumentos conceituais necessários para a resolução do problema, sendo basicamente constituídos por modelos de simulação. A base de conhecimentos contém variáveis condicionais de decisão, através do qual é possível estabelecer cenários de acordo com hipóteses formuladas (PORTO, *et al.*, 2002).

Os sistemas de suporte à decisão são peças fundamentais no processo de planejamento dos recursos hídricos, pois estes modelos têm a capacidade de agregar técnicas matemáticas de simulação e otimização, além de organizar e facilitar a entrada de todos os dados relativos às variáveis do problema. A quantificação das demandas hídricas e o confronto destes dados com as disponibilidades, a verificação dos limites outorgáveis em um determinado local, além do estabelecimento de prioridades para o atendimento dos usos e a operacionalização de

reservatórios são exemplos de procedimentos existentes nos instrumentos da PNRH e também exemplos de aplicação destes sistemas de suporte à decisão.

Segundo CURI et al. (2011) não existe uma metodologia consagrada que possa ser utilizada unanimemente em todos os sistemas hídricos principalmente porque cada sistema possui suas próprias particularidades e a escolha de uma metodologia depende, dentre outros fatores, das características da região, sejam essas físicas, econômicas ou sociais.

Os sistemas de suporte à decisão voltados ao gerenciamento de reservatórios possuem em geral uma base de modelos bem estruturada, capaz de resolver diversos aspectos relacionados à operacionalização de reservatórios, sendo baseado na maioria das vezes, por modelos de simulação ou otimização, ou ainda uma combinação das duas metodologias. Um amplo conjunto de sistemas de suporte à decisão está disponível para a geração de informações relativas ao uso e avaliação das capacidades de armazenamento, alocação de água e políticas de liberação de água em reservatórios. Estes modelos podem suportar (WURBS, 1996):

- Dimensionamento da capacidade de armazenamento de reservatórios e estabelecimento das políticas operacionais durante o planejamento de novos projetos;
- Reavaliação das políticas operacionais existentes nos sistemas de reservatórios;
- Administração da alocação de água em sistemas envolvendo direitos de água e acordos entre os fornecedores de água e os usuários;
- Planejamento operacional para o desenvolvimento das estratégias de gestão da estação seguinte;
- Operações em tempo real.

2.2.METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Os modelos de análise de sistemas hídricos são frequentemente categorizados como de simulação, otimização, ou uma combinação híbrida das duas técnicas. Os modelos de simulação procuram atender a questões do tipo “what if”, ou seja, deseja-se saber o que provavelmente vai acontecer ao longo do tempo ao ser implementada uma determinada política operacional. A simulação é um bom método quando há relativamente poucas alternativas a serem avaliadas. A possibilidade da existência de uma infinita combinação de valores viáveis para cada uma das variáveis de decisão inviabilizaria o uso apenas da simulação (LOUCKS e VAN BEEK, 2005).

Ao contrário dos modelos de simulação, os modelos de otimização respondem a questões do tipo “what is best”, ou seja, deseja-se determinar a melhor política operacional. As

soluções dos modelos de otimização são baseadas em funções-objetivo de desconhecidas variáveis de decisão a serem maximizadas ou minimizadas. As restrições de um modelo de otimização contêm variáveis de decisão que são desconhecidas e parâmetros cujos valores são assumidos conhecidos (LOUCKS e VAN BEEK, 2005).

Um procedimento de otimização pode envolver execuções automáticas e iterativas de um modelo de simulação. Os algoritmos de otimização podem estar embutidos dentro de modelos de simulação a fim de fornecer as bases computacionais de um modelo de simulação (KIM e WURBS, 2011)

2.2.1. Modelos de Simulação

Modelos de simulação podem ser estatísticos ou orientados ao processo, ou ainda uma mistura dos dois. Modelos estatísticos puros são baseados unicamente em dados (medições de campo). Por sua vez, modelos puros orientados ao processo são baseados no conhecimento dos processos fundamentais de base física que ocorrem no sistema. Muitos modelos de simulação combinam características de ambos os extremos (LOUCKS e VAN BEEK, 2005).

A simulação de um sistema de rios e reservatórios é baseada no balanço de água através deste sistema. No modo de operação de reservatórios, as vazões naturais fornecem a entrada do sistema. Estas estruturas regulam as vazões através do armazenamento e da liberação de água. Este recurso, por sua vez, é liberado para atender os usos destinados a ele, e também é perdido por evaporação.

O principal componente do modelo de simulação é a equação básica da continuidade ou conservação do volume para um reservatório ou trecho de rio, sendo dada dada por:

$$S_{t+\Delta t} = S_t + I_{vol} - O_{vol} \quad (2.1)$$

Onde S_t e $S_{t+\Delta t}$ denotam o armazenamento do volume no início e ao final do intervalo de tempo Δt , e I_{vol} e O_{vol} denotam a entrada e a saída de volume durante o período. As entradas incluem a vazão dos rios que deságuam ao reservatório, a precipitação direta em função da área do reservatório, fluxos subterrâneos e retornos de água devido ao consumo humano. Como saídas podemos incluir as captações diretas, as perdas por evaporação e os lançamentos de água à jusante, definidos ou não por uma regra de operação.

A escolha do passo de tempo e do período de análise depende do escopo da aplicação, disponibilidade de dados, entre outros fatores. A validação das suposições do modelo e a

escolha do intervalo de tempo está intimamente relacionada. Por exemplo, a atenuação da vazão em um trecho de rio com um tempo de concentração de alguns dias é aproximadamente negligenciável em um passo de tempo mensal, porém as rotinas de propagação de fluxo são necessárias para um passo de tempo diário (WURBS, 1996).

Um plano de operações para um reservatório ou um sistema de reservatórios é definido como um conjunto de regras que determinam a quantidade de água a ser armazenada ou liberada destas estruturas. As decisões de operação envolvem a capacidade de satisfazer objetivos únicos ou mesmo objetivos múltiplos, ainda que estes envolvam estratégias diferentes para o atendimento das demandas, como a produção de energia e o controle de enchentes (WURBS, 1996).

As estruturas de saída dos reservatórios constituem papel importante na definição da operação dos mesmos. Podemos encontrar desde barramentos sem estrutura alguma, comum em pequenas reserwações de água destinadas à irrigação e à dessedentação animal, até estruturas completas, contendo vertedores e descarregadores de fundo. Os vertedores são o principal tipo de estrutura de saída de água. São destinados a liberar o excesso de água que não pode ser aproveitado para a geração de energia elétrica, abastecimento ou irrigação. São também dimensionados para permitir a passagem de uma cheia rara com segurança.

De acordo com o trabalho desenvolvido por GUNTNER, *et al.* (2004), para pequenos e médios reservatórios ($V_{max} < 50 \text{ hm}^3$), destinados a atender um único objetivo como o suprimento das demandas, pode ser assumido que a vazão de saída ocorra somente quando a capacidade de armazenamento é excedida. Essa premissa é válida em regiões como o Nordeste brasileiro, caracterizado pela presença de numerosos distritos de irrigação para pequenas barragens agrícolas, cujas reservas são destinadas para o uso local. Os reservatórios são interconectados entre si através do fluxo de vazão na bacia, influenciando a entrada e o volume de escoamento.

O objetivo da aplicação de um modelo de simulação do gerenciamento de recursos hídricos é quantificar os resultados de uma determinada política ou ação, através de parâmetros como o atendimento às demandas, considerando tanto o aspecto espacial quanto o aspecto temporal. O conceito de um nível aceitável de suprimento de água durante períodos de secas ainda é mal definido e fortemente influenciado por restrições sociais, políticas, econômicas e físicas (MERABTENE, *et al.*, 2002).

Garantia (ou confiabilidade) é a medida do nível de certeza que o suprimento de água, a geração de energia hidrelétrica, a proteção de cheias, além de fatores ambientais e outras necessidades possam ser atingidos. O rendimento é a medida da demanda de água que pode ser suprida pela vazão fluente, por um reservatório, ou por um sistema de múltiplos reservatórios. A confiabilidade pode ser entendida como a medida do nível de confiança à medida em que vários índices de rendimento são supridos (WURBS, 1996).

A *confiabilidade (ou garantia) no volume* é a taxa do volume de água suprida (v) pelo volume demandado (V). Através deste índice pode-se ter uma base da escassez no período avaliado, dado pela demanda menos volume suprido. O índice de confiabilidade no volume é dado pela seguinte equação:

$$g_v = \left(\frac{v}{V} \right) 100\% \quad (2.2)$$

Define-se falha de atendimento para um dado reservatório a condição em que o nível do mesmo atinge seu mínimo, não podendo suprir sua respectiva demanda pré-fixada. Para uma demanda, também podemos definir o conceito de falha de atendimento, onde não é possível atender total ou parcialmente a demanda requerida. A garantia de atendimento no tempo, por sua vez, representa o percentual do tempo em que podemos suprir a demanda sem falhas, o qual é dado pela seguinte relação:

$$g_t = \left(1 - \frac{n_{falha}}{NT} \right) * 100 \quad (2.3)$$

Sendo *nfalha* o número de vezes em que o reservatório atingiu o volume mínimo, NT o número total de passos de tempo do período de simulação, e g_t a garantia de atendimento para um reservatório ou para uma demanda.

A relação entre a capacidade de atendimento às demandas e a capacidade de armazenamento de um reservatório é uma informação fundamental rotineiramente desenvolvida durante estudos de viabilidade. A técnica usualmente utilizada é a execução iterativa dos modelos de simulação a fim de se determinar a demanda com um certo nível de garantia que pode ser provida por uma particular capacidade de armazenamento, ou vice-versa, a capacidade de armazenamento requerida para fornecer o atendimento às demandas com um nível de garantia específico. Modelos de otimização fornecem abordagens computacionais que agilizam o processo de definição dessas variáveis (WURBS, 1996).

Existem ainda outros índices discutidos em HASHIMOTO et. al. (1982), como a resiliência e a vulnerabilidade. A resiliência avalia o quão rapidamente o sistema retorna a um estado satisfatório de atendimento à demanda, uma vez que a falha tenha ocorrido. Um sistema que tenha muitas falhas, mas que tende a se recuperar rapidamente, muitas vezes é preferível a um sistema com poucas falhas, mas com uma recuperação lenta. Já a vulnerabilidade mede a importância da severidade das consequências das falhas do sistema, ou seja, se refere à magnitude da falha, uma vez que ela tenha ocorrido.

Um esquema típico de simulação de um sistema gerenciamento de recursos hídricos é apresentado na Figura 2.3. Este esquema é constituído a partir de um cenário de demandas hídricas e de regras gerenciais, além das séries de vazões afluentes nos locais pertinentes (ITO, XU, et al., 2001).

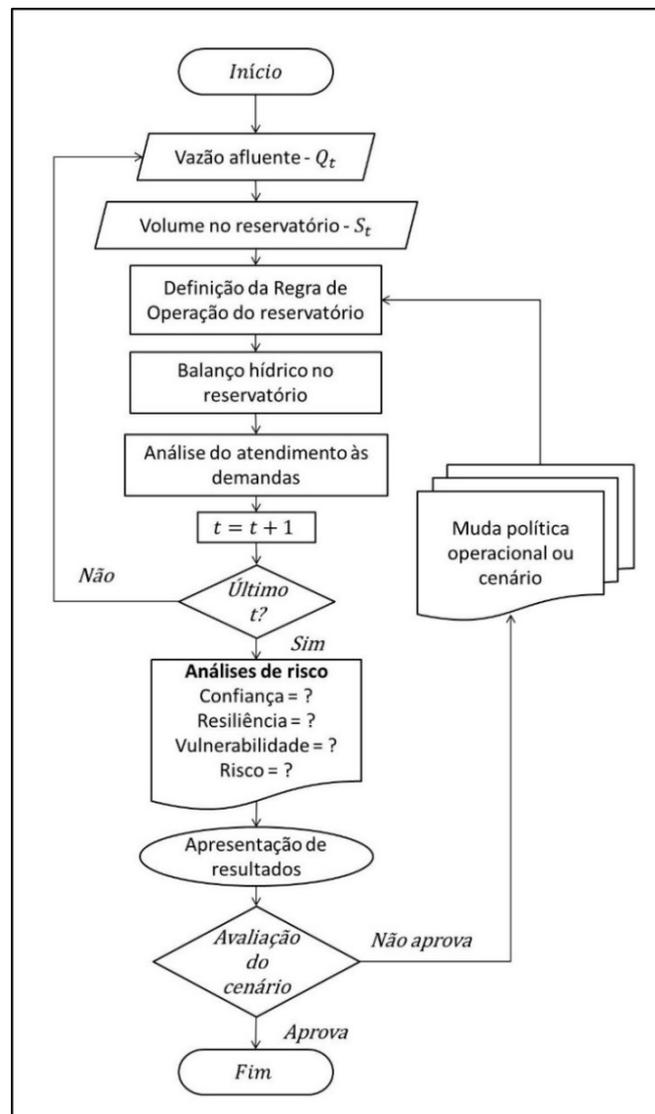


Figura 2.3 – Esquema geral de um algoritmo de simulação de sistemas de rios e reservatórios (Fonte: ITO et al, 2001).

A operação de saída dos reservatórios pode ser simples ou complexa, dependendo do uso, ou dos usos, aos quais se destina a água liberada à jusante da estrutura. O balanço hídrico no reservatório envolve a aplicação da equação de conservação de massa, e também é possível alocar as demandas conforme alguma priorização pré-estabelecida dos usos.

A partir das análises de confiabilidade e outros riscos relacionados, pode-se executar novamente o modelo de simulação, alterando as políticas operacionais, uma vez que os índices alcançados não tenham sido satisfatórios, num processo iterativo até que se atinja um risco aceitável para o gerenciamento do sistema hídrico.

2.2.2. Modelos de Otimização

Existem diversas maneiras de classificar os modelos de otimização. Os modelos podem ser determinísticos ou estocásticos, ou ainda uma mistura dos dois. Também podem ser estáticos ou dinâmicos em relação ao tempo. Com relação às variáveis envolvidas, podem ser lineares ou não lineares. Contudo, seja qual tipo eles forem, eles têm em comum o fato de que elas estão descrevendo situações onde existem múltiplas soluções que satisfazem todas as restrições, e portanto, existe o desejo de encontrar a melhor alternativa, ou ao menos um conjunto de boas soluções (LOUCKS e VAN BEEK, 2005).

Independentemente do tipo de modelo de otimização, todos eles incluem uma função objetivo. Ela pode ser constituída por uma penalidade ou por uma função de utilidade como a abordagem de redes de fluxo, que definem as regras de operação baseadas em prioridades, ou ainda podem ser uma expressão matemática de um plano ou objetivo operacional. Os objetivos listados a seguir refletem os vários modelos de otimização encontrados na literatura (WURBS, 1993):

Tabela 2.2 - Listagem de objetivos aplicados nos modelos de otimização, considerando três diferentes aspectos

Benefícios econômicos e custos	Maximizar o suprimento de água e a produção de energia
	Minimizar o custo de atendimento à demanda de energia
	Minimizar perdas econômicas diante de cenários de escassez
	Minimizar o custo de bombeamento em um sistema de distribuição
	Minimizar os danos associados com um evento de cheias
Disponibilidade de água e	Maximizar a produção firme para confianças específicas, ou confiança para específicas demandas
	Minimizar frequências ou volumes de escassez

índices de confiabilidade	Minimizar índices de escassez
	Maximizar a vazão mínima ecológica
	Maximizar o armazenamento no reservatório no fim do horizonte de otimização
	Minimizar extravasamentos ou perdas por evaporação
Produção de energia elétrica	Maximizar a produção firme
	Maximizar a energia média anual
	Minimizar os cenários de escassez de energia
	Maximizar o potencial de energia da água armazenada em um sistema

Segundo LABADIE (2004), as funções objetivo utilizadas em reservatórios devem ainda incorporar medidas como eficiência (i. e. maximizar o bem-estar atual e futuro), sobrevivência (assegurando que o bem-estar futuro excederá os níveis de subsistência mínimos) e sustentabilidade. Esta última medida pode ser considerada igual a uma soma ponderada da: confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade dos vários critérios que contribuam ao bem-estar do homem (econômico, ambiental ou ecológico).

As operações de sistemas de gerenciamento com reservatórios têm sido vistas por pesquisadores como tendo um grande potencial para aplicação de uma série de técnicas de otimização. Milhares de artigos têm sido publicados desde a década de 1960, encontrando aplicações de programação linear, programação dinâmica, modelos de programação heurística como os algoritmos genéticos, e outras técnicas de otimização não linear. (WURBS, 2005).

Os modelos de otimização podem ser categorizados como sendo determinísticos ou estocásticos. A maioria dos modelos encontrados são determinísticos, com sequências de vazão representando séries históricas como dados de entrada. Por outro lado, um conjunto de métodos tem sido propostos para representar probabilisticamente a natureza estocástica de vazões e outras variáveis. De acordo com LABADIE (2004), os modelos de otimização podem ser enquadrados em três grandes grupos: otimização implícita estocástica, otimização explícita estocástica e otimização por métodos heurísticos.

A otimização implícita estocástica, também referida como Otimização de Monte Carlo, realiza a otimização a partir de uma série histórica de dados de vazão, ou então gerada sinteticamente. São então definidos vários cenários de entrada de vazão devido à incerteza dos dados, e para cada um deles uma diferente política operacional é encontrada. O conjunto de

todas as políticas operacionais é então examinado para a obtenção das regras de operação. Como exemplos de métodos implícitos, podemos citar os modelos de Programação Linear (PL), Programação Não-Linear (PNL) e Programação Dinâmica (PD).

A Programação Linear é conhecida por sua simplicidade na formulação de problemas e é muito popular na modelagem do gerenciamento de recursos hídricos (WURBS, 2005). A técnica consiste em encontrar valores para um conjunto de n variáveis de decisão x_1, x_2, \dots, x_n , que minimizam ou maximizam uma função objetivo x_0 na forma:

$$\max \text{ ou } \min x_0 = \sum_{j=1}^n c_j \cdot x_j \quad (2.4)$$

Sujeito a um conjunto de equações/inequações de restrição na seguinte forma:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j \leq (\text{ou } \geq) b_i \text{ para } i = 1, 2, \dots, m \quad (2.5)$$

Onde a_{ij} , b_i e c_j são constantes. Além disso, existe uma restrição de não negatividade para x_1, x_2, \dots, x_n . A função-objetivo e todas as restrições são funções lineares das variáveis de decisão. O conjunto de valores para as n variáveis são chamadas de políticas decisórias.

A forma mais eficiente de PL que podem ser aplicados estes problemas de otimização é a programação por redes de fluxo (PRF), que será discutida posteriormente neste trabalho. Alguns modelos de gerenciamento de caráter generalizado utilizam a PL e as redes de fluxo, como o MODSIM (LABADIE, 2008) e o HEC-PRM (Prescriptive Reservoir Model).

A grande dificuldade da PL é o fato de lidar com as não linearidades, comuns em problemas de otimização de sistemas e reservatórios, além de variáveis dependentes do tempo, critérios multi-objetivo, descontinuidades, muitas restrições, entre outras questões.

Por outro lado, a otimização explícita estocástica a informação probabilística é incorporada nas séries de entrada, em termos da distribuição de probabilidade, do valor esperado, dentre outros fatores (LABADIE, 2004). Desse modo, as incertezas em relação às vazões afluentes são endereçadas explicitamente através da distribuição de probabilidades. A otimização é realizada sem a presunção do perfeito conhecimento dos eventos futuros, e as políticas operacionais são determinadas diretamente, sem a necessidade de análise estatística dos resultados. Possui a desvantagem de possuir técnicas computacionais muito mais complexas em relação à otimização implícita. A aplicação de modelos estocásticos explícitos

na otimização da operação de múltiplos reservatórios emprega técnicas como a Programação Não-Linear (PNL) e a Programação Dinâmica Estocástica (PDE).

Os modelos heurísticos, ou métodos de busca, em contraste com as demais metodologias apresentadas, são baseados em regras práticas, ou analogias inspiradas na natureza. Ao invés de gerar progressões das soluções individuais, esta metodologia produz grupos ou populações candidatas que evoluem, atingindo níveis crescentes de aptidão, ou seja, os valores da função-objetivo. A grande vantagem dos métodos heurísticos é a possibilidade de conexão direta com modelos de simulação hidrológica e de qualidade da água sem a necessidade de assumir simplificações nos mesmos. Como desvantagem, os algoritmos heurísticos não podem garantir a solução global, havendo a possibilidade de convergência a ótimos locais. Os métodos de busca podem ser classificados em dois grandes tipos:

- *Métodos de busca local:* A busca é realizada iterativamente a partir de um ponto inicial, sempre seguindo uma direção de valores decrescentes da função objetivo (no caso de minimização), sendo rápidos e eficientes na busca de mínimos ou máximos de funções unimodais (com apenas um ponto ótimo). Dois dos métodos de busca local mais conhecidos são o de Rosenbrock (TUCCI, 1998) e o método Simplex de Nelder e Mead (SOROOSHIAN e GUPTA (1995)).
- *Métodos de busca global:* Criado na tentativa de superar limitações encontradas nos métodos de busca local, como a dificuldade de se obter o ótimo global frente a diversos ótimos locais. Entre os métodos de busca global estão os métodos aleatórios, os algoritmos evolucionários e algumas combinações de técnicas que incluem estes dois tipos.

Os algoritmos evolucionários (AE) são considerados uma alternativa eficiente para resolução de problemas complexos de otimização para mono ou multi objetivos. O uso dos AEs é motivado principalmente por sua eficiência em lidar com problemas complexos do mundo real, além de lidar com descontinuidades e também por sua fácil implementação (SCHARDONG, *et. al*, 2013). A computação evolucionária apresenta diversas metodologias, como os algoritmos genéticos (AG), otimização de enxame de partículas (PSO) e otimização de colônia de formigas (ACO).

Os Algoritmos Genéticos (AGs) são uma abordagem de busca baseadas em uma população inspirada no processo evolutivo dos seres vivos, onde os mais aptos sobrevivem (BANZHAF, *et. al*, 1998). Eles têm ganhado grande atenção como método de otimização na

solução de problemas em hidrologia e recursos hídricos, especialmente na calibração de modelos hidrológicos e também na aplicação em problemas de planejamento de recursos hídricos, que será visto mais adiante. Possui a vantagem de fornecer maior flexibilidade matemática em relação à programação linear (WURBS, 2005).

Alternativamente, existem alternativas híbridas que integram tanto técnicas de busca local quanto de busca global. O algoritmo SCE-UA foi inicialmente descrito por DUAN et al. (1992), que criaram um método baseado na combinação de técnicas de busca aleatória, algoritmos genéticos e otimização local, denominado SCE-UA. O nome SCE é derivado das iniciais de Shuffled Complex Evolution, o que pode ser traduzido por “Evolução de Complexos Misturados”. As letras UA provêm de University of Arizona, instituição de origem dos autores do algoritmo. O algoritmo SCE-UA opera com uma população de pontos que “evolui” em direção ao ótimo global através de sucessivas iterações e avaliações da função objetivo. Cada um destes pontos é definido pelos valores dos parâmetros e é um candidato ao ótimo.

2.2.3. Principais sistemas generalizados

Existe na literatura a descrição de centenas de sistemas de suporte à decisão com modelos de gerenciamento de rios e reservatório. Contudo, apenas um pequeno número destes modelos pode ser definido como generalizados. O termo generalizado significa que um modelo é projetado para ser aplicado a diversas bacias de configurações diversas, ao invés de ser um modelo customizado para um sistema em particular.

WURBS (1995) apresenta um inventário de modelos de gerenciamento de recursos hídricos desenvolvidos até então, a maioria deles nos Estados Unidos. Os órgãos responsáveis pelos modelos variam de agências governamentais, universidades, corpo de bombeiros a empresas internacionais de consultoria. Os modelos apresentados são baseados em procedimentos de balanço de água num sistema de reservatórios e trechos de rio.

A formulação de um modelo está intimamente ligada com os objetivos do mesmo. É importante fazer a distinção entre controle de cheias e manutenção de vazões, assim como para a geração de energia elétrica e abastecimento. Análises hidrológicas de cheias são focadas em eventos de chuvas fortes, e as análises de secas são obtidas através da observação de uma série longa de dados. As operações de controle de cheias são tipicamente modeladas usando um passo de tempo diário ou menor. Já as análises de suprimento de água e também de conservação são comumente baseadas em passo de tempo mensal ou semanal.

O Centro Hidrológico de Engenharia (*Hydrologic Engineering Center – HEC*) e os escritórios distritais do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (*Army Corps of Engineers - USACE*) tem uma larga experiência no desenvolvimento de modelos hidrológicos e de planejamento, além de modelos de simulação de reservatórios.

O modelo com enfoque na operação de reservatórios é o HEC -ResSim (KLIPSCH e HURST, 2007), sendo constituído de uma interface gráfica, um programa computacional que executa a simulação, conta com capacidades de gerenciamento e visualização de resultados por meio de gráficos. As decisões são baseadas pela definição de zonas que dividem o reservatório conforme a necessidade, e por um conjunto de regras para cada objeto do sistema. A característica principal do HEC-ResSim é a possibilidade de simular eventos de cheia para definição das operações em reservatórios. Através da adoção de passos de tempo de um dia ou menos, é possível gerar decisões que envolvem o esvaziamento das zonas de controle de enchente, em consonância com as restrições de vazão à jusante e também do atendimento às demandas.

O MODSIM é um Sistema de Suporte à Decisão de caráter genérico originalmente concebido em 1978 na Universidade do Estado do Colorado (*Colorado State University*), sendo continuamente aprimorado desde então (LABADIE, 1988). MODSIM é projetado para definição de estratégias de curto a longo prazo para o planejamento operacional, planos de contingência em períodos de seca, análise de direitos da água e solução de conflitos entre as questões urbana, agrícola e ambiental.

O princípio básico que norteia o MODSIM é a simulação com redes de fluxo de forma capacitada. O termo capacitado se refere à imposição de limites inferiores e superiores de vazão para todos os elementos da rede de drenagem. Os componentes do sistema são representados por uma rede de nós e arcos (ou links). Os nós podem ter função de armazenamento (reservatórios, bacias subterrâneas e direitos de armazenamento de água) ou não (confluências, desvios de curso, demandas, pontos de retorno de vazão, etc). Os arcos (canais, trechos naturais de rio ou direitos de água) realizam a propagação da vazão e também conectam os nós.

Apesar de o MODSIM ser, a priori, um modelo de simulação, a otimização em redes de fluxo fornece uma eficiente maneira de assegurar a alocação de vazão em uma bacia, de acordo com as prioridades de atendimento especificadas. O objetivo da função de otimização consiste na minimização do somatório de todos os links da rede de drenagem multiplicado por um coeficiente de prioridade ou custo. Os coeficientes são fatores definidos pelo usuário que

especificam prioridades de atendimento. Como o modelo deve ser linear, um algoritmo iterativo resolve não-linearidades como a evaporação e a geração de energia. Podem ser adotados passos de tempo mensal, semanal ou diário, para planejamentos de longo, médio e curto prazo.

O WRAP (Water Rights Analysis Package), desenvolvido pela Universidade do Texas, é projetado para simular a gestão e o uso das vazões dos rios e do armazenamento dos reservatórios em uma bacia sob uma apropriação das permissões dos direitos de água no sistema. O modelo é projetado para estudos de simulação envolvendo as prioridades de alocação dos recursos hídricos entre diferentes usuários (WURBS, 2001).

O WRAP fornece basicamente um sistema de cálculo de séries de vazões, sujeitas às capacidades de armazenamento dos reservatórios, além dos requisitos de demandas e vazão ecológica. O balanço de água é realizado a cada intervalo de tempo do período total de simulação. Tipicamente, a simulação é baseada nas premissas de (1) repetição das séries históricas de vazão e (2) as demandas totais de água são retiradas enquanto existe água disponível a partir do rio e/ou de acordo com a capacidade dos reservatórios. O modelo foi projetado para um passo de tempo computacional mensal, porém adaptado para passos de tempo menores.

RiverWare é uma ferramenta generalizada de modelagem de rios e reservatórios para avaliação, diagnóstico, previsão e outras análises operacionais e processos decisórios (ZAGONA, *et al.*, 2001). Riverware tem a capacidade de modelar:

- Processos hidrológicos e hidráulicos de reservatórios, trechos de rio, desvios, distribuição de canais, usos consultivos, interação com o aquífero
- Produção e uso de energia;
- Direitos de água, propriedade de água e transações de contas de água.

O modelo é do tipo orientado a objetos, o qual permite que o modelador represente uma condição local específica com a criação de uma rede de objetos a serem simulados, preenchendo cada um deles com dados, e selecionando o algoritmo dos processos físicos que são apropriados a objeto e na representação de um modo geral.

2.3.COMPARATIVO ENTRE DIFERENTES METODOLOGIAS DE SISTEMAS DE PLANEJAMENTO HÍDRICO

Neste item será apresentado um estudo comparativo envolvendo estes sistemas de caráter generalizado, além de outros modelos específicos encontrados na bibliografia. Dentre

os aspectos a serem avaliados nos sistemas de suporte à decisão estão a representação topológica do sistema hídrico, a aquisição dos dados de vazão, avaliação das principais abordagens computacionais aplicadas, incluindo sistemas híbridos de simulação e otimização. O objetivo desta análise é apontar as principais limitações dos modelos atuais, além de buscar as tendências para o desenvolvimento de pesquisas futuras na área.

2.3.1. Representação topológica e entrada de dados

A aplicação das técnicas de simulação e otimização em sistemas de bacias hidrográficas exige que a mesma seja representada na forma de uma rede, na qual são feitas uma série de abstrações das principais características e elementos que compõem um sistema real. (TROGER, 2002). Uma das maneiras mais simples de se representar um sistema é através da estrutura formada por pontos de controle, adotada no modelo WRAP. Os pontos de controle são estruturados através de arquivos textos criados externamente ao modelo, onde para cada ponto deve ser indicado o ponto de jusante.

Um marco no desenvolvimento da tecnologia da informação ao longo da década de 1990 foi o desenvolvimento da chamada Interface Gráfica do Usuário, ou *Graphical User Interface* (GUI). Esta ferramenta tem como objetivo fornecer ao usuário um mecanismo visual de fácil utilização para o provimento das informações requeridas pelos sistemas de suporte à decisão, em especial com relação à estrutura topológica da bacia.

O modelo MODSIM também lança mão da GUI para construir a rede de fluxos e suas restrições associadas. Esta ferramenta proporciona o desenvolvimento de um banco de dados espacialmente referenciado, permitindo aos usuários a criação dos objetos da rede hidrográfica na tela de trabalho, e em seguida o preenchimento dos dados para cada objeto através da seleção do mesmo com o cursor do mouse. Figuras e camadas do tipo *raster* podem ser importados, servindo como mapas de fundo para a criação da rede vetorial. A entrada dos dados referentes às séries de dados das vazões afluentes naturais é feita a partir da cópia de valores do Excel™ (Microsoft, Inc.), ou então carregando um arquivo texto (LABADIE, 2008)

Os objetos inseridos nos modelos de simulação e otimização não possuem significado se os dados de entrada não representarem a realidade do sistema. As séries de vazão se constituem no principal dado destes modelos de gerenciamento, e podem ser constituídas da seguinte forma (WURBS, 2005):

- séries históricas de vazões ajustadas;

- séries históricas ajustadas durante períodos críticos de seca, eventos de cheia ou outro sub-período;
- séries geradas sinteticamente preservando características estatísticas das séries históricas observadas;
- séries calculadas com um modelo hidrológico a partir de dados observados de precipitação ou chuvas sintéticas

Estudos que envolvem a análise da política de operações de reservatórios são tipicamente baseados em séries históricas ajustadas de vazões. Operações de controle de cheias incluem hidrogramas de cheias usando modelos chuva-vazão calibrando a partir de dados observados. Abordagens estocásticas baseadas tanto em séries de vazões geradas sinteticamente quanto de matrizes de probabilidade têm sido encontrado na literatura, tipicamente em projetos de pesquisas em universidades (WURBS, 2005).

Alguns modelos de planejamento já são integrados à modelos chuva-vazão, de modo que tanto o processo de geração de chuva em escoamento quanto o de balanço hídrico e operação nos reservatórios ocorre na mesma simulação, como o modelo SSARR e o modelo PROPAGAR MOO (VIEGAS FILHO e LANNA, 2003).

O pacote de modelagem do modelo SSARR (Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation) é composto por dois componentes: o módulo bacia, e o módulo do sistema de rios e operação de reservatórios. O módulo de bacia simula processos de chuva-vazão, acumulação de neve e geração de escoamento a partir da neve. O modelo rio/reservatório executa as rotinas de fluxo através dos trechos de rio e através de reservatórios controlados e não controlados (WURBS, 1996).

Existem ainda SSD's que não são acoplados diretamente a nenhum módulo de transformação chuva-vazão, mas apresentam alternativas que facilitam a entrada e a leitura das séries de dados geradas por um modelo ou um módulo externo. Por exemplo, no ResSim as séries afluentes podem ser fornecidas através de sequencias observadas ou simuladas a partir de qualquer fonte disponível. Entretanto, a integração entre o SDD e os dados hidrológicos é facilmente realizada com o modelo HEC-HMS, baseado na modelagem chuva-vazão.

As séries de vazões afluentes naturais são dados de entrada do MODSIM, provenientes de dados observados, modelos chuva-vazão, previsão ou geração estocástica de vazão. A entrada de dados é feita selecionado o objeto de nó criado através das ferramentas de GUI. Os

dados podem ser inseridos manualmente ou automaticamente, importando arquivos de uma planilha, banco de dados ou arquivo ASCII.

2.3.2. Avanços na integração com Sistemas de Informações Geográficas

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) consistem em um conjunto de tecnologias concebidas para armazenar informações sobre a localização, topologia e atributos de objetos espacialmente referenciados. Os SIG também podem fornecer uma análise das propriedades espaciais (como comprimento, área e perímetro) destes objetos geográficos. Estes sistemas também possuem funções especializadas de análise espacial, como sobreposição de camadas e geração de *buffers* em torno de objetos. Além disso, alguns sistemas SIG podem fornecer análises espaciais mais especializadas, como encontrar caminhos mais curtos em uma rede, ou então calcular a extensão de área de uma bacia de drenagem a partir de um ponto em um Modelo Digital de Elevação (MDE) (LEIPNIK et al, 1993).

Cada objeto na estrutura de vetor inclui a descrição das informações topológicas, como as suas propriedades espaciais em relação aos objetos da sua vizinhança, especificando sua conectividade e adjacências. Esta propriedade permite análises automatizadas e interpretação de dados espaciais em ambiente SIG (MARTIN *et al.*, 2005).

As técnicas de geoprocessamento têm sido aplicadas extensivamente em modelagem de bacias hidrográficas, tanto para sua delimitação, como também para determinação de informações como a área de contribuição em determinados pontos, obtenção de características como declividade, largura e comprimento de rios, entre outras. As ferramentas de SIG também podem ser importantes na definição da estrutura topológica da bacia, ou seja, na construção de um banco de dados referentes a ela, onde os mesmos estão organizados de acordo com sua posição e onde são estabelecidas ligações entre os dados vizinhos.

A integração entre SIG e modelagem hidrológica vem sendo discutida e aprimorada desde a década de 1960 (SUI e MAGGIO, 1999). Desde então, viu-se o surgimento de muitos trabalhos sobre o assunto, desde a implementação de funções internas em SIG disponíveis comercialmente, no uso de resultado da geração da rede de drenagem como preparação de arquivos de entrada para modelos hidrológicos computacionais (PETERS et. al, 1995; COLLISCHONN, 2009).

Além da abordagem SIG-modelo hidrológico, também é notório o desenvolvimento de trabalhos que relacionam as propriedades SIG com modelos de gerenciamento de bacia, além

do próprio modelo hidrológico. Atualmente, a maioria dos SDD encontrados na literatura possui algum tipo de interação com as ferramentas SIG, seja para compilar dados de entrada, visualizar resultados da simulação ou ambos. ResSim, RiverWare, MODSIM, e WRAP são exemplos destes modelos, os quais são integrados com o software ArcGIS.

O Mike Basin é um modelo hidrológico utilizado como ferramenta para gerenciamento dos recursos hídricos de toda a bacia hidrográfica ou parte dela. Criado na Dinamarca pelo Danish Hydraulic Institute (DHI), necessita de licença para ser utilizado. O modelo é executado internamente ao SIG ArcView GIS, sendo uma extensão do mesmo. Os rios principais e seus tributários são representados no modelo por meio de uma rede de arcos e nós digitalizada no ambiente SIG, permitindo integração com esse sistema de informação geográfica. Todas as informações relativas à configuração da rede são editadas na tela do computador. O modelo aplica balanço de massa em toda a rede de arcos e nós e encontra soluções no estado estacionário para cada intervalo de tempo, diário ou mensal, definido pelo usuário. O modelo ainda permite o desenvolvimento de regras operacionais através da programação de macros (ALBERTIN, 2006).

O modelo MODSIM, como comentado anteriormente, lança mão da utilização de mapas como pano de fundo para a criação dos objetos da interface gráfica do usuário (GUI). Desse modo, não existe a capacidade de georeferenciar os objetos da rede de fluxo para o mundo real, nem a incorporação de capacidades SIG. Assim, a versão GEO-MODSIM, desenvolvida como uma extensão do MODSIM 8.0, possibilita a criação e análise de uma rede hidrográfica georeferenciada internamente ao software ArcGIS (TRIANA e LABADIE, 2007).

Os exemplos até então citados não exploram todo o potencial dos Sistemas Geográficos de Informação, pois a estrutura topológica dos elementos da bacia é baseada em bancos de dados geoespaciais previamente estabelecidos, que no caso estaria disponível somente para uma região específica, ou então a partir da digitalização de mapas e definição manual do fluxo de drenagem. Neste contexto insere-se o conceito de discretização de bacias hidrográficas, também utilizado no processo de modelagem hidrológica, em especial nos modelos distribuídos. A discretização consiste na divisão da bacia em unidades menores e a organização destas unidades menores segundo um ordenamento topológico. Existem vários métodos de discretização de bacias, que podem subdividir a área em unidades regulares, como quadrados e retângulos; ou em unidades irregulares, sendo usadas neste caso tipicamente as sub-bacias.

MAIDMENT (2002) apresenta uma metodologia de discretização e um conjunto de ferramentas denominado ArcHydro, também conhecidas como Hydro-Tools, desenvolvidas em parceria pela Universidade do Texas e pela empresa ESRI, que operam internamente ao programa ArcGIS. O método do ArcHydro define a topologia da bacia através de uma tabela de atributos, em que cada sub-bacia apresenta um código identificador próprio e um código identificador da sub-bacia localizada imediatamente a jusante. Assim, a partir da tabela de atributos das sub-bacias, é possível identificar facilmente a topologia das bacias e da rede de drenagem.

A estrutura de dados ArcHydro é definida utilizando classes de objetos, em que os objetos de uma dada classe possuem propriedades ou atributos em comum, e objetos de classes diferentes podem ser relacionados através de atributos em comum (WHITEAKER *et al.*, 2006). Uma sequência típica de utilização das ferramentas ArcHydro inicia com um Modelo Digital de Elevação (MDE), a partir do qual são obtidas informações como direções de escoamento; área de drenagem; rede de drenagem; definição de trechos de rios; e definição de bacias hidrográficas.

A estrutura de dados ArcHydro é utilizada para automatizar os processos de extração de informação e preparação de dados para modelagem em diversos modelos hidrológicos, e atualmente, para o modelo hidrológico de grandes bacias MGB-IPH (COLLISCHONN, 2009), HEC-HMS (PETERS *et al.*, 1995) e SWAT (ARNOLD *et al.*, 1998). Entretanto, não foram encontrados modelos de gerenciamento que lancem mão das técnicas de discretização iguais ou semelhantes às definidas pelo ArcHydro como ferramenta facilitadora para extração das informações topológicas.

2.3.3. Abordagens utilizadas e objetivos dos modelos

Em geral, todos os modelos são baseados nos processos de balanço de volume através do movimento de água através de um sistema de reservatórios e trechos de rio. O sistema é modelado como um conjunto de nós ou pontos de controle conectados por trechos de rio. Os dados de entrada são o armazenamento inicial e a vazão afluente no sistema, e as saídas são dadas pelos volumes armazenados ao longo do período de análise, atendimento às demandas, valores de vazão nos locais de interesse, etc. Entretanto, algumas abordagens têm sido utilizadas na estruturação destes modelos, como a utilização das técnicas de simulação, otimização e da combinação de ambas as técnicas, dependendo dos objetivos do modelo. A seguir, serão

descritas três técnicas de modelagem de sistemas de rios e reservatórios bastante encontrados nos principais sistemas de suporte à decisão.

2.3.3.1. Simulação simples

Alguns sistemas pesquisados utilizam somente a abordagem de simulação para atingimento dos objetivos propostos. No entanto, diferentes técnicas de processamento são utilizadas, algumas envolvendo a execução do modelo de simulação de forma iterativa de montante para jusante, outras seguindo a prioridade de atendimento das demandas, outras ainda com possibilidade de inserção de regras operacionais por meio de scripts. WURBS (2005) define este tipo de abordagem como sistemas do tipo *ad hoc*. Este termo refere-se à estratégias computacionais desenvolvidas especificamente para um modelo em particular, em contraste por exemplo com a técnica de Programação Linear, um algoritmo genérico incorporado em muitos modelos. Como exemplos de sistemas *ad hoc*, podemos citar o WRAP, HEC-HesSim, RiverWare e MIKE BASIN.

O modelo WRAP realiza a simulação do gerenciamento de recursos hídricos de uma bacia ou de uma região hidrográfica baseado num sistema de prioridades de alocação de água. O modelo facilita o acesso aos já existentes ou novos requerimentos de retiradas, geração de energia elétrica, armazenamento nos reservatórios e vazão ecológica. Na terminologia do modelo WRAP, estes requerimentos são denominados direitos de água (WURBS, 2001). A simulação no WRAP combina informações da hidrologia natural e interferências antrópicas no sistema. A hidrologia é representada por séries de vazões mensais naturalizadas.

A operação dos reservatórios é baseada no balanço de zonas específicas em cada reservatório. O modelo WRAP fornece várias opções de modelagem das políticas operacionais envolvendo múltiplos usuários compartilhando o mesmo reservatório ou sistemas de reservatórios.

Em contrapartida, a metodologia computacional adotada pelo modelo HEC-ResSim (KLIPSCH e HURST, 2007) segue a progressão de montante para jusante, considerando os requerimentos de armazenamento no reservatório, lançamentos, demandas e geração de energia. O cálculo é executado para todos os tributários acima de uma confluência antes de seguir à jusante. As vazões incrementais entram no sistema através dos pontos de controle. A vazão total de entrada dos nós consiste na vazão regulada de montante, mais a vazão incremental. Considerando que os lançamentos dos reservatórios dependem de requerimentos

localizados em pontos à jusante, algoritmos iterativos são construídos dentro do esquema computacional.

No ResSim, as rotinas operacionais são repetidas para os requerimentos individuais de gerenciamento da água. Procedimentos iterativos podem ser requeridos para capturar interconexões entre as demandas de água em diferentes localizações. Por exemplo, lançamentos no reservatório para o controle de cheias dependem dos pontos de controle localizados à jusante dos reservatórios. Da mesma forma, as liberações do reservatório podem ter a finalidade de manter uma vazão mínima ou então para o atendimento de demandas localizadas à jusante.

2.3.3.2. Simulação com otimização (modelos de Rede de Fluxo)

Modelos como o MODSIM utilizam uma rotina de otimização para simular o sistema hídrico. Desse modo, não há como saber se a alocação da vazão é a ideal ou melhor possível, pois depende de como o usuário configura as prioridades, incluindo o volume-meta dos reservatórios. A metodologia utilizada é baseada nos Modelos de Rede de Fluxo (MRF), uma importante variante metodológica para representação de sistemas hídricos. Essa abordagem combina as características típicas de modelos de simulação com algoritmos de otimização linear que visam a minimizar o custo total de operação da rede.

Segundo AZEVEDO et. al. (2002) esse conjunto de atributos faz com que essa classe de modelos seja especialmente adequada para análises de sistemas complexos e de larga escala, uma vez que as técnicas mais convencionais, embora também sejam credenciadas para a solução de tais tipos de problemas, fazem-no com maior dificuldade. De maneira geral, a simulação é realizada de forma seqüencial para cada intervalo de tempo ou, alternativamente, pode ser feita de forma simultânea para todos os intervalos (WURBS, 1996).

MODSIM simula a alocação de água através de uma solução sequencial do problema de otimização para cada passo de tempo $t=1, \dots, T$ (LABADIE, 2008):

$$\min \sum_{k \in A}^N C_k \cdot Q_k \quad (2.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k \in O_i}^N Q_k - \sum_{j \in I_i}^N Q_j = B_{it}(q) \quad \forall i \in N \quad (2.2)$$

$$L_{kt}(q) \leq Q_k \leq U_{kt}(q) \quad \forall k \in N \quad (2.3)$$

Onde A representa o conjunto de todos os arcos do problema; N é o conjunto de todos os nós; O_i o conjunto de todos os arcos com origem no nó i (arcos de defluências); I_i o conjunto de todos os arcos com término no nó i (arcos de afluências); B_{it} representa o ganho (positivo) ou a perda (negativo) do nó i no tempo t ; Q_k é vazão no arco k ; C_k representa o custo, fator de ponderação ou prioridades de uso por unidade de vazão no arco k ; L_{kt} e U_{kt} são, respectivamente, as capacidades mínima e máxima de vazão no arco k , no instante de tempo t .

Os coeficientes são fatores informados pelo usuário do modelo e refletem prioridades das políticas decisórias do governo. Os coeficientes podem ser traduzidos como unidades monetárias, ou mais tipicamente, números sem significado físico, simplesmente refletindo as prioridades da política operacional. As restrições incluem equações que preservam o balanço do volume em cada nó. O algoritmo da otimização minimiza a função-objetivo enquanto atende todas as restrições para cada passo de tempo.

Os modelos de otimização via rede de fluxos possuem uma vasta bibliografia de aplicações desta técnica, em especial através do modelo MODSIM, mas também através de outros sistemas, além de modelos não generalizados. No Brasil, encontram-se algumas aplicações, através do modelo original do MODSIM, ou então a partir da versão AcquaNet, elaborada pelo Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões em Engenharia Ambiental e de Recursos Hídricos (LabSid) da Universidade de São Paulo (PORTO *et al.*, 2003).

A versão brasileira AcquaNet foi aplicada por exemplo na bacia do rio Canindé no Estado do Piauí (LEÃO, 2008). O objetivo da aplicação foi definir critérios de outorga com base na capacidade de regularização dos grandes reservatórios da região, além de otimizar os usos de água na bacia, de forma a distribuir de forma mais eficiente a água entre as diversas demandas, maximizando os benefícios obtidos e respeitando as prioridades de atendimento.

O modelo MODSIM também foi aplicado na bacia hidrográfica do rio Gramame, no Estado da Paraíba, que abastece a capital, João Pessoa (SILVA, SILANS e PEDROSA F., 2002). O objetivo da aplicação foi a obtenção de um diagnóstico de situação dos recursos hídricos, efetuando cenários de uso da água em diversos horizontes, modificações da infraestrutura hidráulica e alternativas de operação do sistema. Entre as questões que procuraram ser dirimidas, destacam-se o levantamento do padrão espacial e temporal das falhas, o impacto resultante da implantação de um novo reservatório, avaliação de cenários de transposição, e a possibilidade de redução das falhas do abastecimento a partir do zoneamento dos reservatórios com vistas à operação dos mesmos.

Dentre as questões avaliadas, chama atenção a possibilidade de criação de zonas nos reservatórios. Nesse caso, definiu-se que os reservatórios teriam duas zonas cada, sendo uma zona superior que liberaria água para todas as demandas, e uma zona inferior que abasteceria exclusivamente a cidade de João Pessoa. A operação diminuiu significativamente o número de falhas na capital, porém aumentaram as falhas para as demais demandas na bacia.

2.3.3.3. Sistemas de simulação e otimização com métodos de busca

A utilização de metodologias de busca em modelos de gerenciamento de caráter generalizado ainda é incipiente, embora exista uma vasta bibliografia relatando estudos de caso envolvendo diversos tipos de metodologias na área. NICKLOW *et al.* (2010) apresenta um estado da arte sobre a aplicação de algoritmos evolucionários em sistemas de gestão de recursos hídricos, englobando aspectos quantitativos e qualitativos. Verificaram-se aplicações nas áreas de sistemas de distribuição de água, drenagem urbana e esgoto, sistemas de abastecimento e tratamento de águas residuais, modelagem hídrica e fluvial e sistemas de águas subterrâneas.

No estudo apresentado por WANG e NYUNT (2010), um sistema de modelagem integrada foi desenvolvido incorporando o sistema de otimização global SCE-UA (Shuffled Complex Evolution – University of Arizona; DUAN *et al.*, (1992)) no modelo hidrológico distribuído WEB-DHM (Water and Energy Budget-Based Distributed Hydrological Model - (WANG *et al.*, 2009), acoplado com um módulo de operação de reservatórios. O sistema foi testado na Bacia do Rio Vermelho, localizado na China e no Vietnã, possuindo um reservatório operado para controle de cheias à jusante, além da geração de energia. Problemas na ineficiente operação de reservatórios no Vietnã tem causado excesso de água durante a estação chuvosa e escassez durante as secas, causando ineficiências na geração de energia hidrelétrica.

A metodologia utiliza a equação da continuidade para o balanço hídrico entre as entradas e saídas no reservatório. A vazão de saída a cada passo de tempo (O_t) é definida pela regra de operação do reservatório. Por simplicidade, os lançamentos são assumidos proporcionais às entradas, de acordo com a equação:

$$O_t = k \cdot I_t \quad (2.4)$$

Onde k é o coeficiente. Se $k = 0$, todas as comportas são fechadas e não haverá saídas para jusante; outrossim, se $k = 1$, toda a vazão afluente simulada será liberada pelo reservatório. A Figura 2.4 apresenta um algoritmo simplificado de operacionalização do sistema integrado de simulação e otimização:

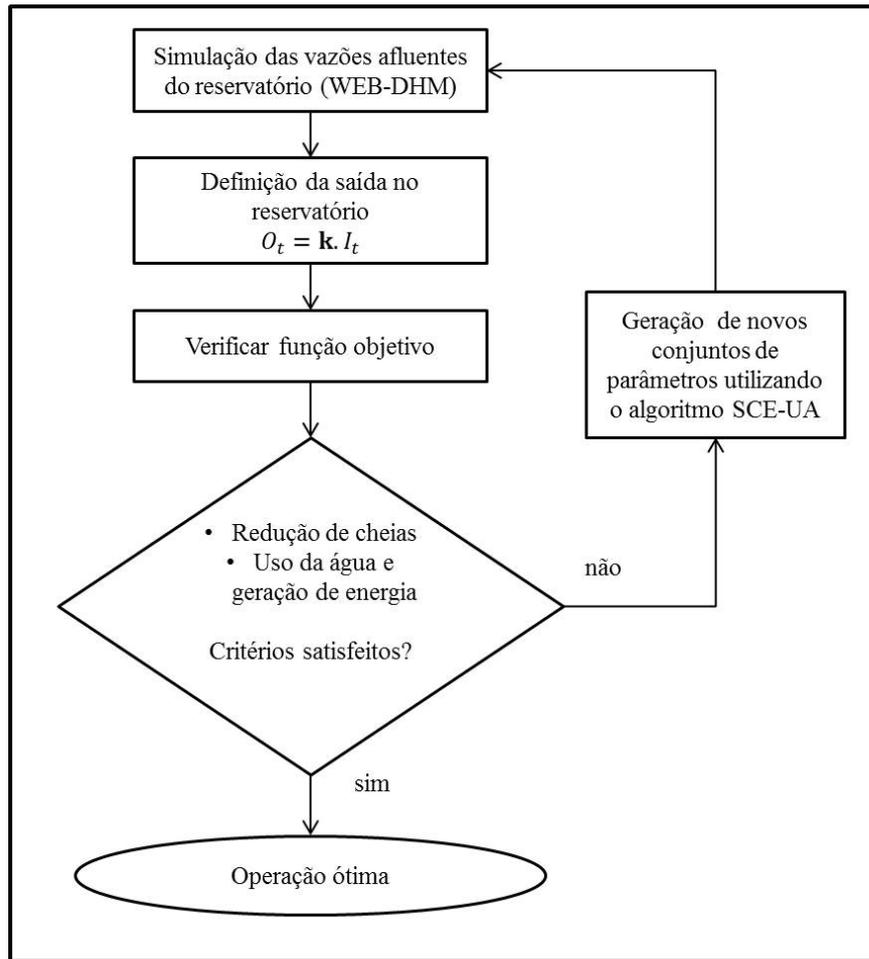


Figura 2.4 – Algoritmo geral da modelagem integrada da operação de reservatórios

Os objetivos do problema são combinados através da utilização de diferentes pesos para a formação de uma função-objetivo agregada. Esta abordagem, ao contrário da aproximação de Pareto, transforma as várias funções objetivos em uma única equação, agregando o controle de cheias e a geração de energia:

$$\text{Min } F = w_1 \cdot \left(\sum_{t=1}^T \frac{1}{T} (H_{sim} - H_{otm})^2 \right) + w_2 \cdot \left(\sum_{t=1}^T \frac{1}{T} (R_{sim} - R_{max})^2 \right) \quad (2.5)$$

Onde H_{sim} é a cota simulada 1 km a jusante do reservatório, H_{otm} é o nível ótimo a jusante para o controle de cheias, R_{sim} é o nível do reservatório e R_{max} é o nível máximo do mesmo, T é número total de passos de tempo e w_1 e w_2 são os pesos de cada membro da função objetivo. O teste foi aplicado num período de dois meses, obtendo-se a saída otimizada do reservatório para o período. O pico de cheia no ponto de controle foi reduzido em relação ao mesmo período o ano anterior, enquanto que o nível de água no reservatório aumentou, garantindo a eficiência da hidrelétrica e também o suprimento de água.

Existem ainda abordagens mais complexas em relação à otimização das regras de operação de reservatórios envolvendo simulação e métodos de busca, como a integração destas técnicas com métodos de parametrização das curvas-guia dos reservatórios. KOUTSOYIANNIS *et al.* (2002) apresenta um esquema de parametrização-simulação-otimização em um Sistema de Suporte à Decisão, possibilitando em uma diminuição radical do número de variáveis de decisão, maximizando o rendimento do sistema. O modelo foi aplicado em uma sistema hídrico da Grécia com quatro reservatórios principais, cujo maior objetivo é garantir o fornecimento de água para a região da capital Atenas, além de manter níveis mínimos de segurança em um reservatório, preservação de uma determinanda vazão ecológica, além de garantir as demandas anuais necessárias para um perímetro de irrigação.

As técnicas exemplificadas até o momento são classificadas como otimizações mono-objetivo, estabelecidas por uma única equação que reflete um ou mais objetivos agregados, resultando num valor ótimo único. Existe ainda a otimização multi-objetivo, estabelecidas pela análise em conjunto de mais de uma função-objetivo, que ao invés de fornecer um único valor otimizado, origina a chamada frente de Pareto, ou soluções não-dominadas, as quais atendem da forma todas as funções-objetivo consideradas (SIMONOVIC, 2009).

SCHARDONG *et al.* (2013) apresenta uma aplicação de um algoritmo multiobjetivo para a operação ótima de um sistema complexo de reservatórios multiobjetivo. O estudo de caso inclui parte do sistema Cantareira, localizado na região sudeste do Brasil, que fornece água para aproximadamente 20 milhões de pessoas na região metropolitana de São Paulo. O objetivo do estudo de caso inclui a minimização da escassez de demanda (diferença entre a demanda e a disponibilidade de água), maximização da qualidade de água (ou minimização do desvio a partir dos padrões de qualidade de água), além da minimização dos custos de bombeamento. As análises multiobjetivo foram feitas a partir da comparação de dois pares de função-objetivo: minimização da escassez de demanda versus minimização do custo de bombeamento e minimização da escassez de demanda versus maximização da qualidade de água.

Os resultados são expressos através de gráficos cujas curvas representam as soluções não dominadas da região de Pareto. Os eixos dos gráficos representam os valores das funções objetivo, a fim de que se possa avaliar a região na qual existe a combinação ótima entre as funções avaliadas. Cada ponto da curva estará associado a uma diferente regra de operação do sistema.

3. METODOLOGIA PROPOSTA

3.1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho, apresenta-se uma metodologia de balanço hídrico de reservatórios e trechos de rio, considerando as retiradas para suprimento das demandas em um sistema. Esta metodologia, denominada SADr-IPH (*Sistema de Suporte à Decisão com inclusão de Reservatórios – IPH*), propõe-se a ser uma versão aprimorada do SAD-IPH, um sistema de suporte à decisão para gerenciamento de recursos hídricos onde são feitos balanços hídricos quantitativos e qualitativos em regime permanente de vazões (KAYSER, 2011). O modelo é baseado na discretização da bacia em pequenas unidades denominadas mini-bacias, mesma estratégia utilizada no modelo hidrológico MGB-IPH (COLLISCHONN *et al.*, 2007). A Figura 3.1 apresenta um esquema geral da metodologia, sendo explicitada nos itens que seguem.

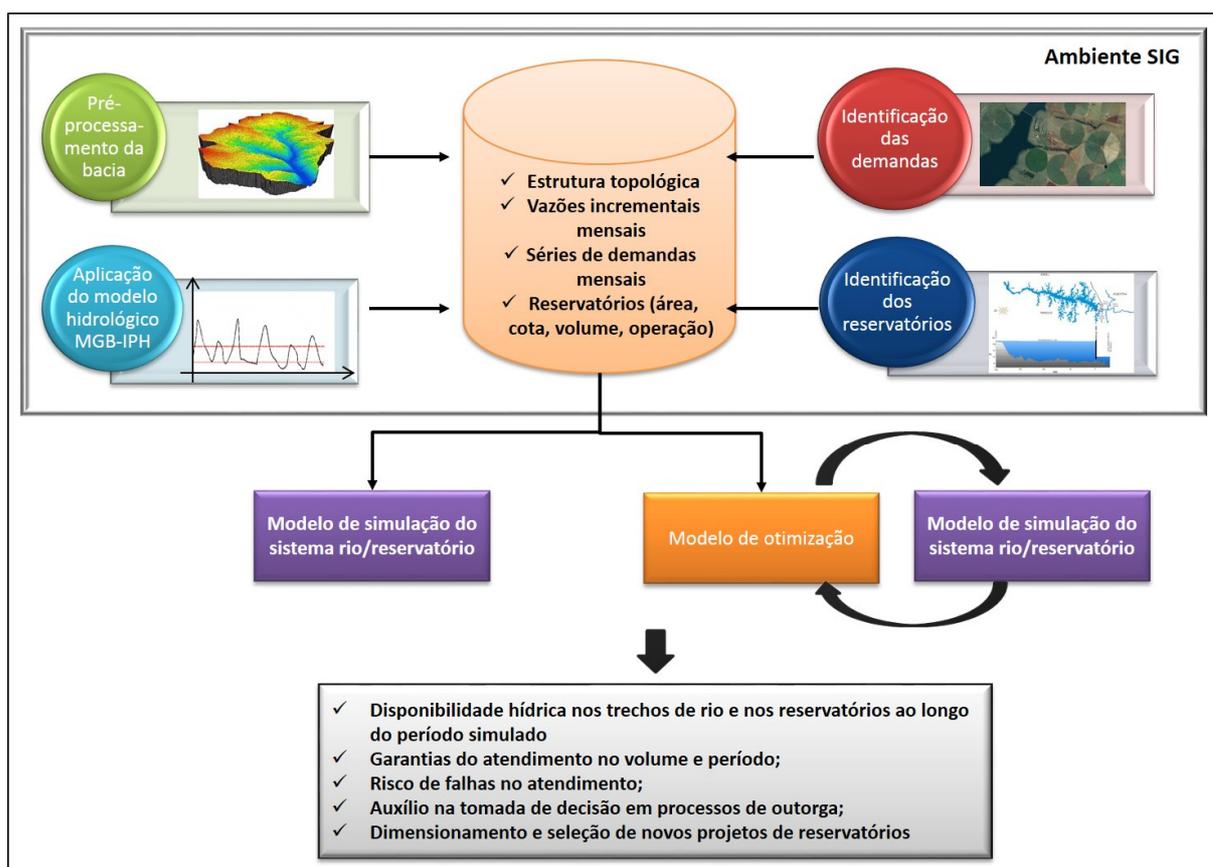


Figura 3.1 - Estrutura geral do sistema de simulação e otimização de rios e reservatórios do SADr-IPH.

3.2. DADOS DE ENTRADA

A versão do modelo SADr-IPH é um programa desenvolvido em linguagem FORTRAN, de modo que todos os dados de entrada são organizados na forma de arquivos de

texto. A seguir, apresenta-se a relação e a descrição dos arquivos necessários para a execução do modelo de simulação.

- **Rede de drenagem:** arquivo contendo a relação das mini-bacias e as relações topológicas entre elas;
- **Vazões incrementais:** arquivo contendo o valor de vazão incremental de cada mini-bacia em passo de tempo mensal;
- **Evaporação e Precipitação:** arquivos contendo os valores mensais de evaporação e precipitação, em cada mini-bacia;
- **Reservatórios:** arquivo contendo a relação dos reservatórios do sistema;
- **Demandas:** arquivo contendo a relação das demandas a serem incluídas no balanço hídrico.

Nos próximos itens, será apresentado como são obtidos os dados de entrada do modelo. A base é o produto do processamento dos Modelos Digitais de Elevação (MDE), a partir do qual é obtida a discretização do sistema hídrico. A partir do processamento do MDE, os arquivos resultantes desta etapa servem tanto como base para aplicação do modelo hidrológico, a partir do qual serão obtidos os arquivos de vazões incrementais, evaporação e precipitação, como também servem para estruturação do arquivo de rede de drenagem. Os elementos que compõem o sistema (*i. e.* demandas e reservatórios), devem ser inseridos de acordo com a codificação das mini-bacias, geradas com o processamento do MDE.

3.2.1. Processamento do Modelo Digital de Elevação

Uma das etapas mais importantes na aplicação desta metodologia é o chamado pré-processamento do sistema hídrico, no qual a partir de um Modelo Digital de Elevação são extraídas todas as informações físicas da bacia, além da definição da estrutura topológica do sistema. Este item descreve a etapa de discretização de uma bacia ou região hidrográfica em unidades chamadas de mini-bacias. Esta etapa é essencial para preparação dos dados de entrada do modelo de simulação e otimização de reservatórios, além de servir como base para aplicação do modelo hidrológico MGB-IPH, metodologia proposta para definição da disponibilidade hídrica na região.

O geoprocessamento tem sido aplicado extensivamente em modelagem de bacias hidrográficas, tanto para sua delimitação, como também para determinação de informações como a área de contribuição em determinados pontos, obtenção de características como

declividade, largura e comprimento de rios, entre outras. As ferramentas de SIG também podem ser importantes na definição da estrutura topológica da bacia, ou seja, na construção de um banco de dados referentes à bacia, onde os mesmos estão organizados de acordo com sua posição e onde são estabelecidas ligações entre os dados vizinhos.

Para isto, lança-se mão do uso de um Modelo Digital de Elevação (MDE), ou Modelo Numérico do Terreno (MNT), que corresponde a uma representação de dados topográficos na forma de uma imagem no formato raster, ou matricial, onde cada pixel dessa imagem tem como atributo o valor de elevação do terreno representado. Um MNT pode ser gerado a partir de informações de curvas de nível em formato vetorial, podendo ser obtido também por sensoriamento remoto. Atualmente, a principal fonte de dados de elevação do terreno em *escala* global é a base de dados obtida pelo projeto *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM).

No processo de preparação dos dados é utilizada a estrutura de dados e o conjunto de ferramentas denominado ArcHydro, também conhecidas como Hydro-Tools, desenvolvidas em parceria pela Universidade do Texas e pela empresa ESRI, que operam internamente ao programa ArcGIS (MAIDMENT, 2002). ArcHydro pode ser entendido tanto como um conjunto de ferramentas como uma estrutura de dados projetada para armazenar e relacionar entre si conjuntos de dados geográficos utilizados na área de recursos hídricos. A estrutura de dados ArcHydro é definida utilizando classes de objetos, em que os objetos de uma dada classe possuem propriedades ou atributos em comum, e objetos de classes diferentes podem ser relacionados através de atributos em comum (WHITEAKER *et al.*, 2006).

Uma sequência típica de utilização das ferramentas ArcHydro inicia com um MDE, a partir do qual são obtidas informações como direções de escoamento; área de drenagem; rede de drenagem; definição de trechos de rios; e definição de bacias hidrográficas. A Figura 3.2 apresenta todas as etapas do pré-processamento aplicado à Bacia do Rio dos Sinos (RS), desde o Modelo Digital de Elevação até a obtenção do arquivo de mini-bacias e rede de drenagem em formato vetorial.

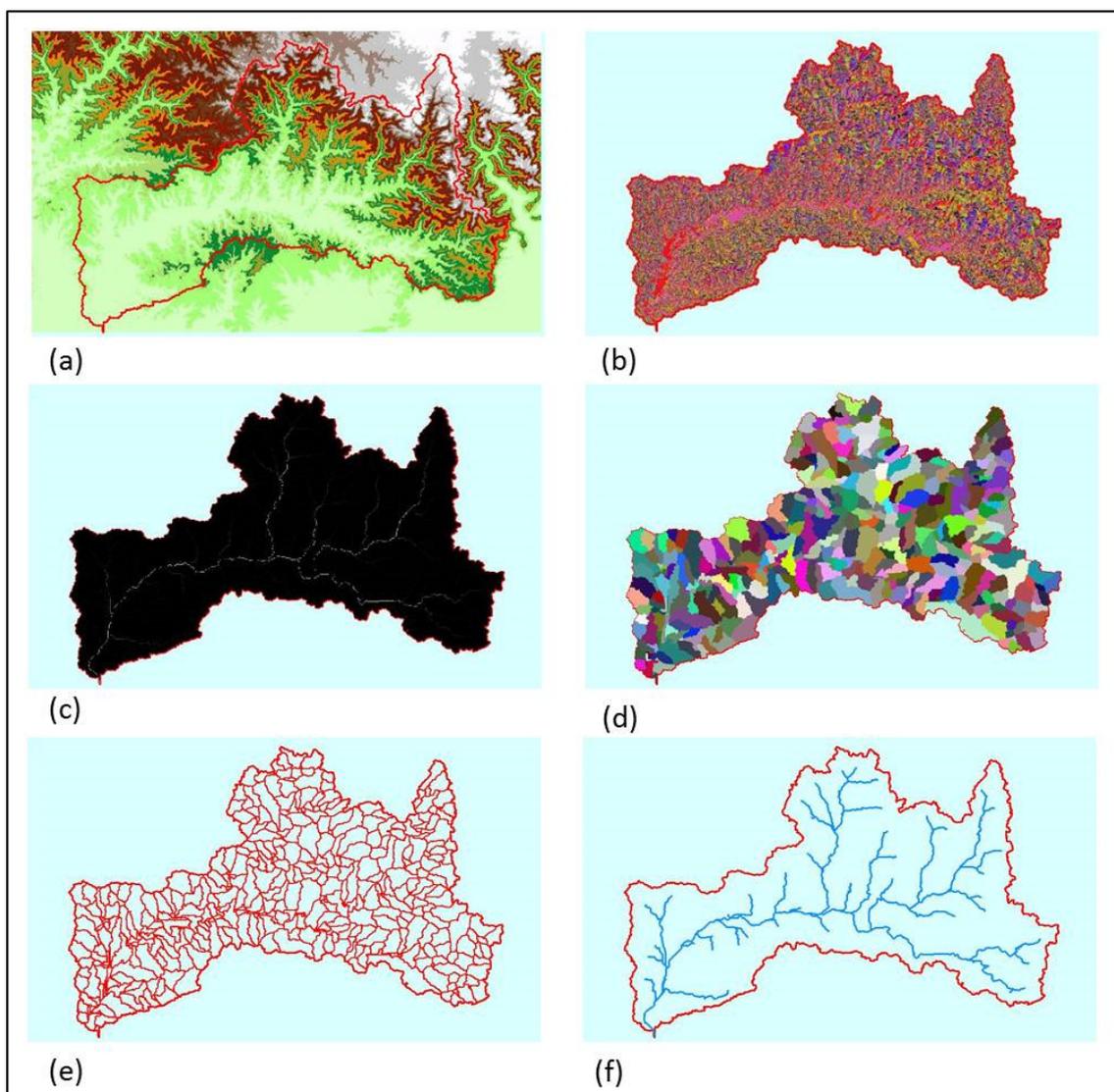


Figura 3.2 - Sequência de passos da discretização no ArcGis usando ferramentas ArcHydro: (a) Modelo digital de elevação; (b) Direções de escoamento; (c) Área de drenagem acumulada; (d) Sub-bacias em formato raster; (e) Sub-bacias em formato vetorial; (f) Rede de drenagem final. Fonte: Fragoso et. al. (2008)

A partir das ferramentas de pré-processamento do modelo hidrológico MGB-IPH (FAN et al., 2010), onde a partir dos dados de entrada (i. e. arquivos raster do Modelo Numérico do Terreno, direções de fluxo, mini-bacias, rede de drenagem, unidades de resposta hidrológica e sub-bacias), é gerado um arquivo texto contendo todas as informações de geometria da bacia em estudo (i. e. código da mini-bacia, código de jusante, área da mini-bacia, área acumulada, comprimento do trecho de rio, declividade, entre outros). Este arquivo será a base para a constituição do arquivo “rede.txt”, arquivo de entrada do modelo de reservatórios. Serão selecionadas apenas os atributos necessários para rodar o modelo, além de acrescentar um atributo indicador de reservatório na mini-bacia, sabendo-se que não é possível ter mais do que um reservatório por mini-bacia.

Com relação à topologia, a mesma é definida através de atributos associados à cada mini-bacia, sendo que cada unidade possui o seu próprio código e carrega consigo a informação do código da mini-bacia de jusante. Os códigos são ordenados de montante para jusante, numerando-se primeiramente todas as mini-bacias de primeira ordem, em seguida as de segunda ordem, até o exutório da bacia

A Figura 3.3 ilustra um esquema de uma rede de drenagem associada a sua tabela de atributos, ilustrando os códigos que estabelecem a topologia da bacia. A estrutura topológica se estabelece de tal forma que à exceção dos trechos de cabeceira, todos os demais recebem a confluência de dois trechos, e encaminham o fluxo para um único trecho de jusante. Observa-se que todos os trechos de cabeceira são numerados primeiramente, em seguida os de primeira ordem, os de segunda, e assim por diante.

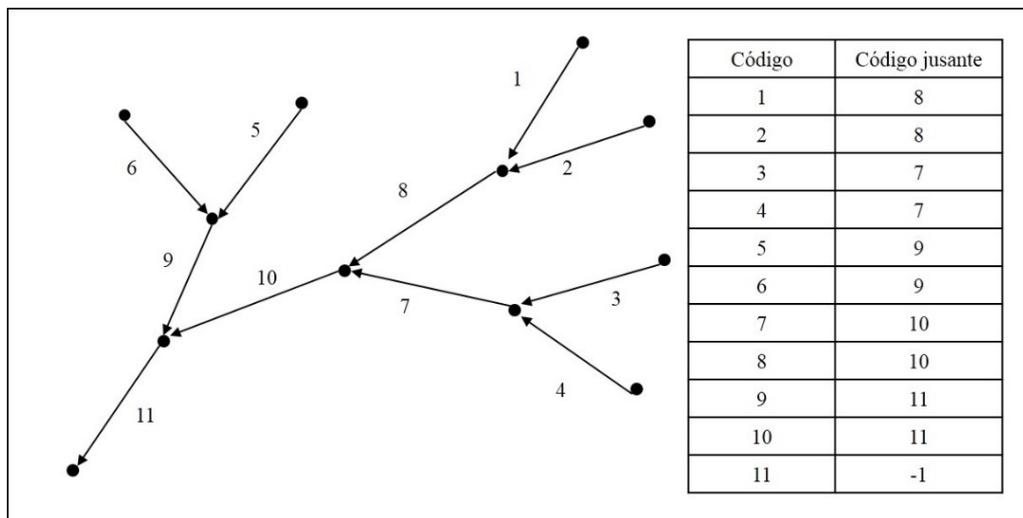


Figura 3.3 - Exemplo de rede de drenagem ilustrando a estrutura topológica da bacia

3.2.2. Disponibilidade hídrica – Modelo MGB-IPH

O modelo hidrológico MGB-IPH é um modelo que representa o processo de transformação de chuva em vazão, e foi desenvolvido para aplicações em grandes bacias (maiores que 10.000 km²) com limitação de dados. O modelo foi desenvolvido no IPH-UFRGS e está descrito em publicações como COLLISCHONN e TUCCI (2001), COLLISCHONN et al., (2011).

O modelo é distribuído no espaço, o que significa que a bacia hidrográfica é subdividida em unidades menores, definidas geomorfologicamente, denominadas mini-bacias. O MGB-IPH é um modelo baseado em processos e simula o ciclo hidrológico através de relações físicas e

conceituais. Dados de tipo e uso do solo, topografia e cobertura vegetal são utilizados como guias para seleccionar os valores dos parâmetros.

O modelo é conformado pelos seguintes algoritmos: Balanço de água no solo; evapotranspiração; escoamento superficial, sub-superficial e subterrâneo na célula; e escoamento na rede de drenagem. A Figura 3.4 apresenta, esquematicamente, o processo de balanço de água, e geração de cada tipo de escoamento, e a propagação do escoamento ao longo do trecho da mini-bacia.

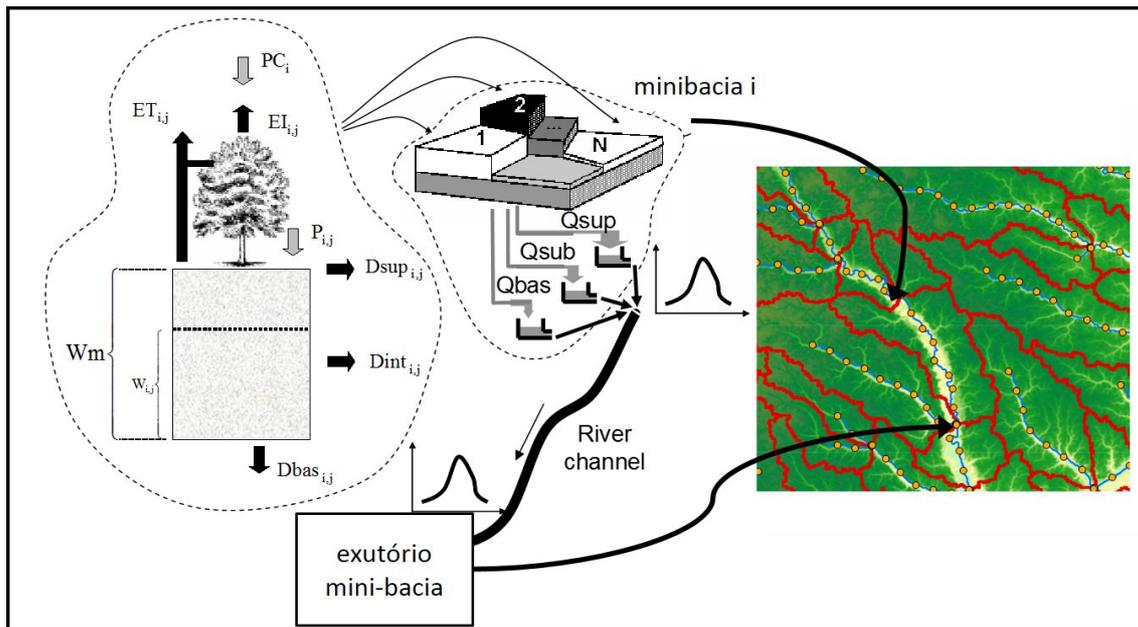


Figura 3.4 - Esquema de geração do escoamento superficial no modelo MGB-IPH.

Cada mini-bacia está dividida em blocos ou unidades de resposta hidrológica, sem considerar a localização dentro da mini-bacia, isto foi feito para reduzir o custo computacional do processo. Essa abordagem permite levar em conta a variabilidade das características físicas da bacia no interior de cada mini-bacia. O número de blocos ou Unidades de Resposta Hidrológica (URH) é escolhido de acordo com o número de grupos resultantes da combinação das características de uso do solo, cobertura vegetal e tipo de solo, de forma que a mini-bacia contenha um limitado número de diferentes URHs. Um bloco é caracterizado por uma série de parâmetros, como o armazenamento máximo de água no solo e o índice de área foliar da vegetação. Assim, o balanço hidrológico é calculado para cada URH de cada mini-bacia, e as vazões estimadas em cada URH são posteriormente somadas e propagadas até a rede de drenagem.

A evaporação e a transpiração são calculadas no modelo MGB-IPH usando a equação de Penman–Monteith, a partir de dados meteorológicos e de características da cobertura vegetal.

Os dois primeiros algoritmos ou módulos do modelo (balanço de água no solo e evapotranspiração) ocorrem em cada bloco de cada mini-bacia, enquanto o terceiro módulo (escoamento na célula) é o processo horizontal de fluxo no interior da mini-bacia até a rede de drenagem e o quarto módulo é o processo horizontal de fluxo ao longo da rede de drenagem.

O escoamento que deixa a camada de solo não atinge instantaneamente a rede de drenagem, mas sofre retardo e amortecimento ainda no interior da mini-bacia. Esses efeitos são representados no modelo pela passagem do escoamento por reservatórios lineares. O escoamento superficial vai para o reservatório superficial, o escoamento sub-superficial vai para o reservatório sub-superficial e o escoamento subterrâneo vai para o reservatório subterrâneo. Nestes reservatórios o escoamento dos diferentes blocos de uso e cobertura vegetal se encontram. Cada um dos três reservatórios da mini-bacia é representado matematicamente por uma equação de reservatório linear simples. A soma dos valores de saída destes reservatórios é o escoamento incremental da mini-bacia, que deve ser somado ao escoamento propagado através da rede de drenagem principal, e escoar para a mini-bacia seguinte.

Os parâmetros para a modelagem da propagação são calculados com base nos dados de comprimento, declividade, rugosidade e largura média dos trechos de rio, obtidos do MDE e de relações geomorfológicas entre área de drenagem e largura do rio. As variáveis de entrada do modelo precipitação, temperatura, umidade relativa, insolação, velocidade do vento e pressão atmosférica em uma célula são obtidas por interpolação dos postos com dados mais próximos.

A simulação de um sistema hidrológico é afetada pelas incertezas nos dados de entrada, simplificações, e técnicas inadequadas para a estimativa dos parâmetros, que, finalmente se refletem na estimativa dos parâmetros do modelo de simulação (HAAN, 1989). É necessário encontrar os valores dos parâmetros de um modelo matemático que resultem em uma boa concordância entre dados observados e calculados.

Uma das principais etapas da utilização de um modelo consiste na sua calibração (ou ajuste), seja pelas considerações físicas, seja pela otimização matemática, onde seus parâmetros são estimados buscando a melhor concordância possível entre os dados observados e os resultados do modelo.

O modelo MGB-IPH possui uma série de parâmetros que são definidos em diferentes etapas de sua aplicação. A maioria dos parâmetros relacionados à topografia (e.g. área de drenagem, declividade) é extraída do MDE utilizando procedimentos de pré-processamento, apresentados mais adiante. Alguns dos parâmetros de pouca sensibilidade são definidos no

próprio código fonte do modelo, como é o caso do coeficiente de rugosidade de Manning e parte dos parâmetros relacionados ao movimento de água no solo. Outros parâmetros são definidos à priori, os chamados parâmetros fixos, enquanto que os parâmetros mais sensíveis do modelo, verificados a partir de análise de sensibilidade realizada por Collischonn (2001)¹, precisam ser calibrados.

Os parâmetros fixos do modelo hidrológico são utilizados no cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith, estando assim associados com a vegetação existente em cada Unidades de Resposta Hidrológica (URH). Eles não são alterados no processo de calibração, e por este motivo são denominados parâmetros fixos, embora tenham valores que possam variar ao longo do ano. Estes parâmetros podem ser estimados com auxílio de dados contidos na literatura (ex. COLLISCHONN, 2001), bem como em aplicações anteriores do modelo. A descrição dos parâmetros fixos que devem ser definidos para o uso do MGB-IPH está apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Parâmetros fixos do modelo MGB-IPH. Adaptado de Fan (2011).

Parâmetro Fixo	Descrição
Índice de Área Foliar (IAF)	O IAF expressa a relação entre a área das folhas de todas as plantas e da área de uma parcela de solo. É um parâmetro adimensional ($m^2.m^{-2}$) e que, em geral, pode ser medido ou estimado a partir de informações na bibliografia.
Albedo	O albedo é a parcela da radiação solar que é refletida ao atingir a superfície do solo, considerando sua cobertura vegetal.
Resistência Superficial	A resistência superficial representa a resistência ao fluxo de umidade do solo, através das plantas, até a atmosfera. Esta resistência é diferente para os diversos tipos de plantas e depende de variáveis ambientais como a umidade do solo, a temperatura do ar e a radiação recebida pela planta.
Altura do Dossel	A altura média da vegetação é utilizada no modelo hidrológico para estimar a resistência aerodinâmica, que atua no controle da evapotranspiração. Quanto maior a resistência aerodinâmica, menor

	é o fluxo de evapotranspiração. A resistência aerodinâmica é considerada menor em florestas, onde a altura média da vegetação é maior e intensifica a turbulência do vento.
--	---

Os parâmetros calibráveis do modelo hidrológico MGB-IPH estão associados às propriedades físicas das URHs, e são aqueles para os quais o modelo é mais sensível. Tais parâmetros podem ser alterados no processo de calibração. A Tabela 3.2 sumariza os parâmetros calibráveis do modelo.

Tabela 3.2 - Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH. Adaptado de Fan (2011).

Parâmetro Calibrável	Descrição
Capacidade de Armazenamento do Solo (Wm)	Capacidade de armazenamento de água no solo.
Forma da relação entre armazenamento e saturação (b)	Parâmetro empírico que define a variabilidade da capacidade de armazenamento do solo em torno de Wm.
Taxa de percolação para aquífero (Kbas)	Parâmetro que controla a taxa de percolação para o aquífero durante a estiagem. Valores mais altos implicam em maior escoamento subterrâneo.
Quantidade de água que esco subsuperficialmente (Kint)	Parâmetro controla a quantidade de água da camada de solo que esco subsuperficialmente.
Forma da curva de redução da drenagem intermediária (XL)	Controla a forma da curva de redução da drenagem intermediária ou sub-superficial do solo.
Fluxo do reservatório subterrâneo para a camada superficial (CAP)	Controla a possibilidade de retorno de água subterrânea para a camada de solo.
Armazenamento Residual (Wc)	Limita o armazenamento residual e subterrâneo.
Calibração da propagação superficial (CI)	Parâmetro para calibração da propagação superficial nas minibacias.
Calibração da propagação sub-superficial (CS)	Parâmetro para calibração da propagação subterrânea nas minibacias.
Retardo do reservatório subterrâneo (CB)	Parâmetro que representa o retardo do reservatório subterrâneo.

Vazão de Base (QB)	Parâmetro que representa o fluxo de base da minibacia.
--------------------	--

Como saída do modelo original, são geradas as séries de vazões para cada mini-bacia discretizada, de duração correspondente ao que foi definido em relação aos dados de entrada, com passo de tempo tipicamente diário. Para aplicação no modelo de simulação de reservatórios, o interesse é saber as séries incrementais de cada mini-bacia sem o processo de propagação à jusante, pois este processo será realizado pelo sistema de simulação de reservatórios. Além disso, adota-se um esquema de passo de tempo mensal, a fim de que possa negligenciar os efeitos de propagação de fluxo, considerando bacias com tempo de concentração de alguns dias.

O Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH), cuja versão mais atual adota uma discretização definida em unidades irregulares, ou mini-bacias (FAN e COLLISCHONN, 2014), adota a metodologia de discretização da bacia a partir do MDE, obtendo como saída do modelo uma série de vazões para cada segmento da mesma. A consequência disso é a facilidade de comunicação entre este modelo e um sistema gerenciador de estruturas de controle cujo método de obtenção da rede hidrográfica também é baseado no processamento do MDE.

A preparação dos dados de entrada, os processos e resultados do modelo são resumidos na Figura 3.5 a seguir.

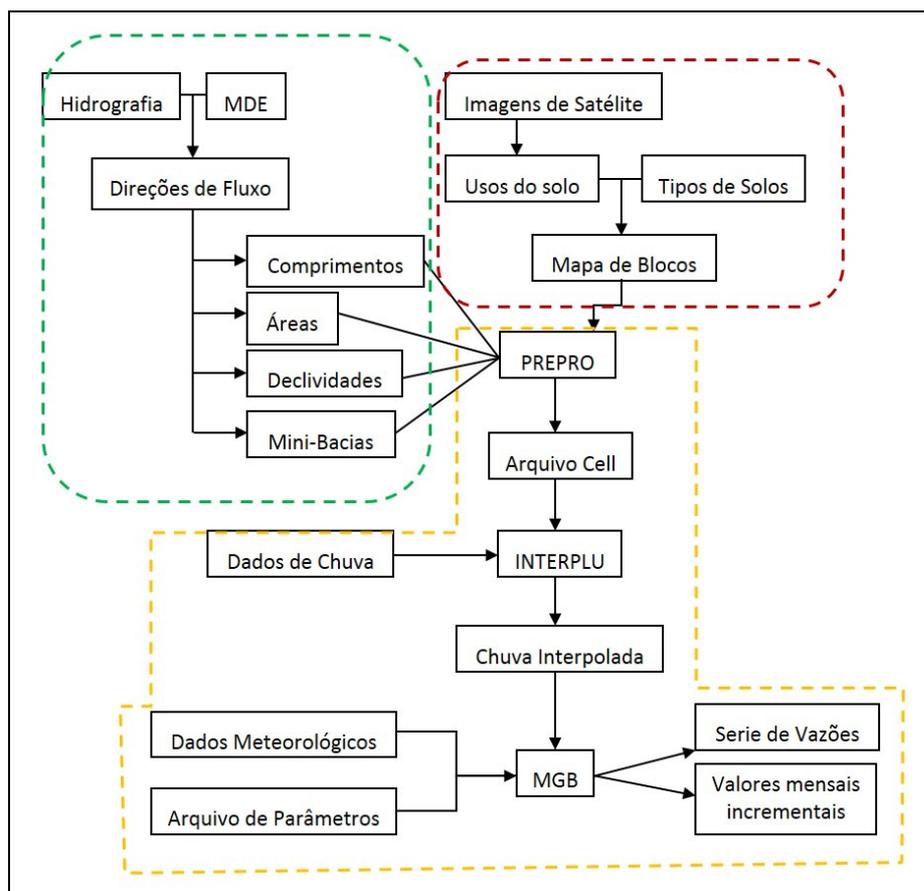


Figura 3.5 – Preparação dos dados, processos e resultados do MGB-IPH (Fonte: Collischonn 2009).

Como dito anteriormente, o passo de tempo adotado no modelo de simulação de reservatórios é o semanal ou o mensal, para que se possa desconsiderar o efeito da propagação de vazão a jusante dos açudes. Este passo de tempo é usual em análises similares de balanço hídrico e capacidade de atendimento dos reservatórios, mas não seria adequado por exemplo a estudos de proteção contra cheias. Além disso, o formato requerido para entrada no modelo é a vazão mensal incremental por bacia, ou seja, a contribuição superficial de cada unidade.

Desse modo, foram feitas algumas adaptações nas rotinas de saída do modelo MGB-IPH, entre elas a implementação de uma rotina capaz de calcular as médias semanais ou mensais para todas as mini-bacias e registrá-las em um arquivo único. O mesmo procedimento foi tomado para a obtenção dos arquivos e precipitação e evaporação em todas as mini-bacias. Em seguida, os dados de vazão passam por um processo de desmembramento, a fim de se obter a vazão de contribuição de cada mini-bacia. Para facilitar a compreensão, a Figura 3.6 apresenta o seguinte esquema:

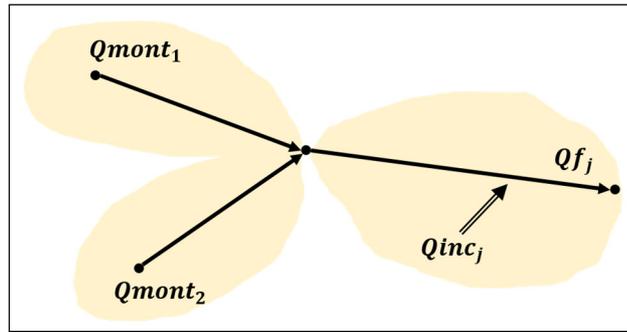


Figura 3.6 - Esquema de desmembramento dos dados de vazão mensal.

Onde Q_{mont_1} e Q_{mont_2} são as vazões de saída das bacias de montante da mini-bacia j , Q_f é a vazão final acumulada da mini-bacia j e Q_{inc} é o escoamento gerado especificamente pela mini-bacia j . Sendo Q_{mont_1} , Q_{mont_2} e Q_f valores conhecidos, Q_{inc} será dado pela seguinte relação:

$$Q_{inc} = Q_f - (Q_{mont_1} + Q_{mont_2}) \quad (3.1)$$

A equação (3.1) é válida para trechos de rio que possuem dois trechos a montante. Nos casos de trechos com um ou três segmentos, todas as parcelas são devidamente somadas. No caso de trechos de cabeceira, onde não há entrada de contribuições a montante, o valor de Q_{inc} é igual ao de Q_f . Obtidos os valores de vazão incremental, ainda é necessário incluir um fator de correção, uma vez que é possível que haja valores negativos, principalmente na ocorrência de picos de cheias em mini-bacias de montante.

3.2.3. Demandas e reservatórios

As informações referentes às demandas hídricas são inseridas no modelo de balanço hídrico da maneira mais espacializada possível, valendo-se das propriedades dos SIG's. Podemos considerar basicamente dois tipos de demandas, as pontuais e as difusas. As demandas pontuais normalmente são representadas por pontos de captação para abastecimento público urbano, por pontos de captação industrial, ou ainda por captações da agricultura irrigada, quando se tem o conhecimento do local da captação. As demandas difusas podem ser definidas como as demandas do abastecimento rural, dessedentação animal, ou ainda nos casos de irrigação, onde considera-se uma demanda específica constante ao longo de toda a área irrigada.

Diferente da maioria dos modelos de simulação encontrados na literatura (*e. g.*, MODSIM, WRAP, Hec-ResSim), onde a estrutura topológica é constituída a partir dos objetos, no modelo proposto a topologia é construída pelas unidades definidas no Modelo Digital de Elevação, havendo a possibilidade de inserção de mais de um objeto de retirada de água por

mini-bacia, porém somente um objeto relacionado à estrutura de reservatório, localizado sempre no exutório da unidade. A Figura 3.7 apresenta um exemplo de associação das mini-bacias com as demandas hídricas e reservatórios. A partir de ambiente SIG, são gerados arquivos de texto com a listagem destes elementos, contendo também os códigos das mini-bacias correspondentes.

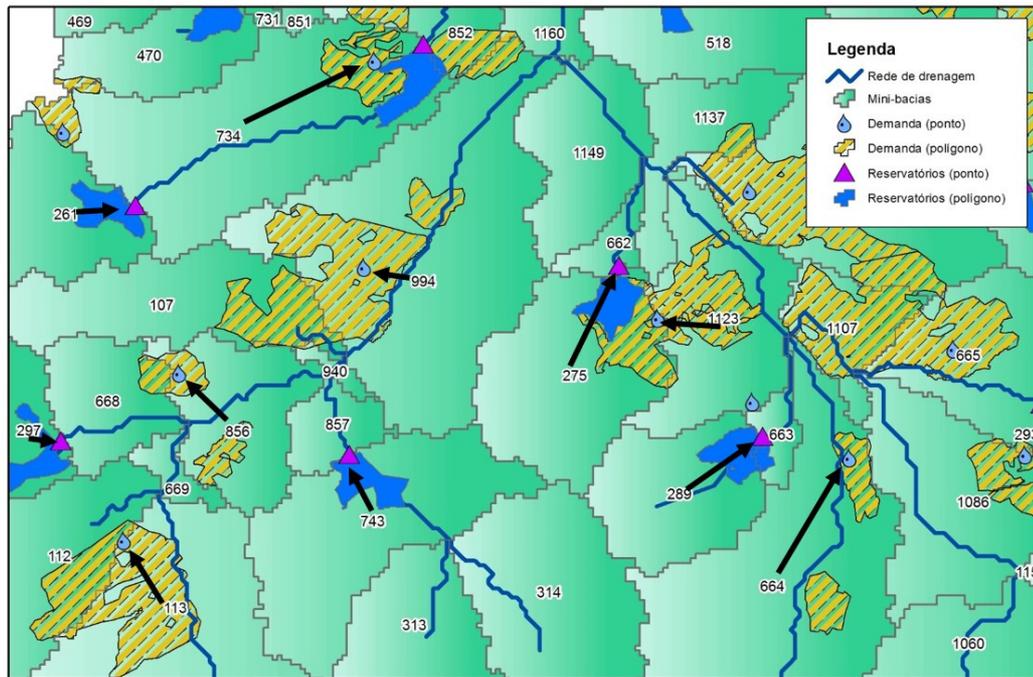


Figura 3.7 - Exemplo de associação de demandas e reservatórios no sistema hídrico.

3.3.DESCRICÃO DO MÓDULO DE SIMULAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

3.3.1. Introdução

O modelo de simulação proposto é baseado na estrutura de discretização em mini-bacias, onde os objetos do sistema hídrico (i. e. demandas, trechos de rio, reservatório) são associados a elas. A Figura 3.8 apresenta um esquema geral da estrutura do modelo de simulação de rios e reservatórios para uma determinada mini-bacia.

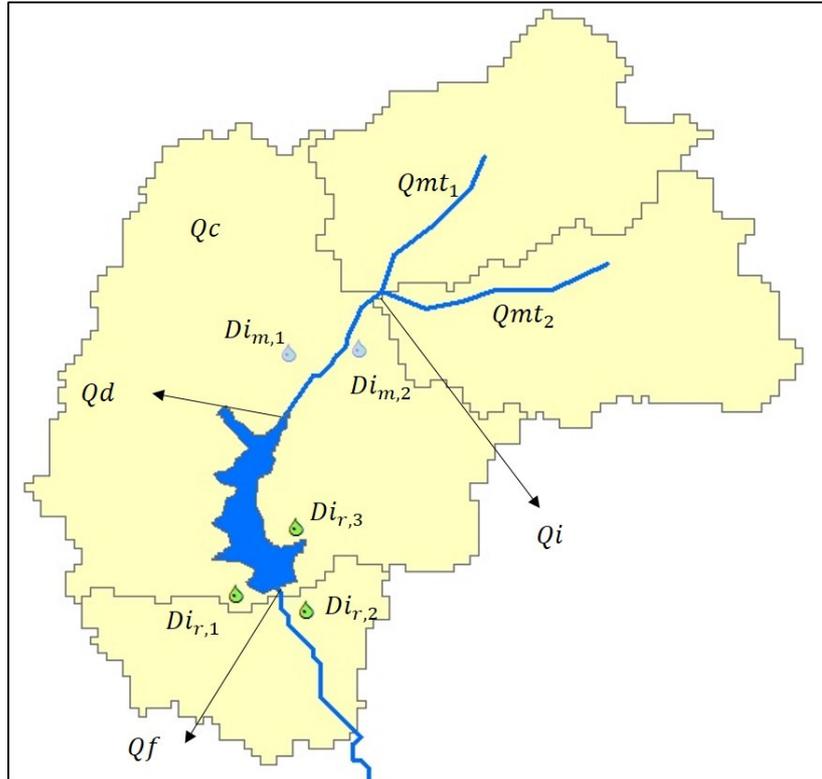


Figura 3.8 - Representação do esquema de balanço hídrico no sistema de rios e reservatórios do SADr-IPH.

Sendo as seguintes variáveis constituídas por vetores de tamanho correspondente ao número de passos de tempo da simulação:

- $Qmt_1, Qmt_2, \dots, Qmt_n$ = vazão de cada mini-bacia à montante da mini-bacia simulada, sendo n o número de mini-bacias à montante;
- Qi = vazão inicial da mini-bacia;
- Qc = vazão incremental da mini-bacia;
- Qd = vazão acumulada na mini-bacia, descontadas as retiradas no próprio trecho;
- $Di_{m,1}, Di_{m,2}, \dots, Di_{m,j}$ = demandas individuais associadas diretamente ao trecho da mini-bacia, sendo j o número de demandas associadas;
- $Di_{r,1}, Di_{r,2}, \dots, Di_{r,k}$ = demandas individuais associadas ao reservatório da mini-bacia, sendo k o número de demandas associadas;
- Qf = vazão na saída da mini-bacia, considerando a liberação de água no reservatório, se houver;

A metodologia computacional adotada no modelo de simulação proposto segue uma ordem de simulação de montante para jusante. Dessa forma, primeiramente são simuladas todas as mini-bacias de cabeceira, em seguida todas de primeira ordem, e assim por diante. Isso é

possível graças à codificação das mini-bacias gerada na etapa de pré-processamento. Existem outros modelos que adotam a mesma metodologia de simulação em cascata, como o HEC-ResSim. Em contrapartida, existem outras metodologias que também poderiam ser adotadas, como a seguida pelo WRAP, onde a simulação segue de acordo com as prioridades de alocação de água (WURBS, 2001).

3.3.2. Vazão afluente por mini-bacia

Inicialmente são definidas as séries afluentes de entrada de cada mini-bacia. Nesse sentido, é importante que se faça a separação entre as mini-bacias de cabeceira e as demais, pois as primeiras não recebem nenhuma contribuição de montante, sendo considerada apenas a entrada correspondente à vazão incremental da unidade. Para as mini-bacias de ordem superiores, são identificados todos os trechos à montante da mesma, podendo ser até três, de acordo com a discretização. Seja Ord a variável que define a ordenamento de cada mini-bacia, sendo de valor 1 para todas as mini-bacias de cabeceira, 2 para as mini-bacias de ordem imediatamente superior, e assim por diante. A vazão inicial da mini-bacia é dada de acordo com a seguinte relação, sendo n o número de trechos à montante da mini-bacia:

$$Q_i = \sum_{i=1}^n Q_{mt_i}, \quad \text{se } Ord > 1 \quad (3.2)$$

$$Q_i = 0, \quad \text{se } Ord = 1$$

3.3.3. Balanço hídrico no trecho

Um atributo importante na inserção de usuários de água em um sistema hídrico é a definição da sua fonte, ou seja, qual o tipo de corpo d'água onde é feita a retirada. O modelo proposto possibilita a inserção de dois tipos de captações: diretamente a partir do trecho de rio ou associada a um açude ou reservatório de abastecimento.

A demanda total a ser atendida por uma mini-bacia é dada pela equação a seguir:

$$Dt_m = \sum_{i=1}^j Di_{m,i} \quad (3.3)$$

Onde $Di_{m,i}$ é demanda individual associada à mini-bacia, j é o número total de demandas associadas à mini-bacia e Dt_m é o somatório das demandas da mini-bacia.

A disponibilidade de água na mini-bacia, considerando a alocação das demandas, é dada pela diferença entre a vazão natural e a demanda total calculada na expressão anterior, de acordo com a seguinte relação:

$$Qd = Qi + Qc - Dt_m \quad (3.4)$$

Uma vez que a disponibilidade tenha atingido um valor mínimo, seja este um valor correspondente à zero ou alguma vazão ambiental, a disponibilidade é convertida a este valor, e o atendimento à demanda é reduzido à vazão restante na mini-bacia. A seguir, apresenta-se a relação estabelecida para o cálculo do atendimento à demanda (Dat_m) considerando a adoção de critérios de vazão ambiental por mini-bacia (Qec).

$$\begin{aligned} Dat_m &= Dt_m, & se \quad Qd > Qec \\ Dat_m &= Qi + Qc - Qec, & se \quad Qd \leq Qec \end{aligned} \quad (3.5)$$

Sabendo-se do percentual de atendimento à demanda por mini-bacia em relação à demanda total em cada intervalo de tempo, o interesse nesse momento é quantificar o atendimento à demanda de cada usuário, ainda que estes usuários estejam localizados na mesma mini-bacia. O critério adotado é que estes usuários estejam sendo atendidos proporcionalmente de acordo com a demanda de cada intervalo de tempo, estabelecendo-se as frações de atendimento para cada usuário localizado na mini-bacia, de acordo com a seguinte relação:

$$Fat_{m,i} = Di_{m,i} / Dt_m \quad (3.6)$$

Sendo $Fat_{m,i}$ a fração da demanda i em relação às demais demandas localizadas na mini-bacia. O atendimento à demanda individual na mini-bacia ($Dai_{m,i}$) é dado pela multiplicação da fração de atendimento pelo atendimento total na mini-bacia, de acordo com a equação abaixo:

$$Dai_{m,i} = Dat_m \cdot Fat_{m,i} \quad (3.7)$$

3.3.4. Balanço hídrico no reservatório

A Figura 3.9 apresenta um esquema específico para o balanço de volume de água no reservatório, indicando as variáveis envolvidas no processo:

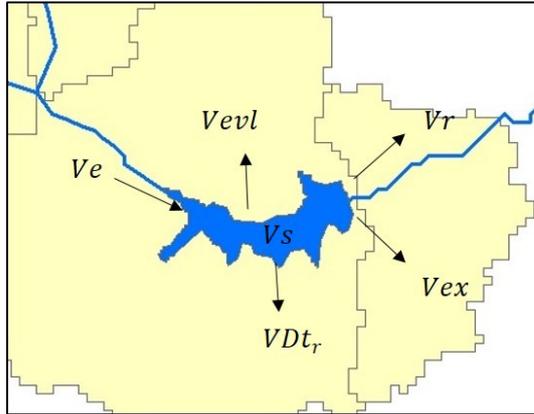


Figura 3.9 - Detalhamento do esquema de balanço hídrico para reservatórios no SADR-IPH.

Sendo:

- V_e = volume de entrada no reservatório;
- V_s = volume armazenado durante o período de tempo no reservatório;
- V_{evl} = volume resultante da diferença entre a lâmina de água evaporada e precipitada na superfície do lago
- V_{Dt_r} = volume reservado para o atendimento das demandas ligadas diretamente ao reservatório j ;
- V_o = volume correspondente à vazão liberada para jusante do reservatório j ;
- V_{ex} = volume de extravasamento, caso o volume do reservatório atinja o seu máximo;

O principal objetivo desta etapa é a aplicação da equação da continuidade ou conservação do volume para um reservatório, sendo simplificada no modelo proposto de acordo com a seguinte relação:

$$V_s(t + 1) = V_s(t) + V_e(t) - V_{evl}(t) - V_{Dt_r}(t) - V_o(t) - V_{ex}(t) \quad (3.8)$$

Onde $V_s(t)$ e $V_s(t + 1)$ são os volumes armazenados no reservatório no passo de tempo atual e no passo de tempo posterior.

Para a realização do balanço hídrico no reservatório, inicialmente verifica-se qual o valor de demanda que o reservatório deve atender diretamente, ou seja, verifica-se se existem captações diretas no espelho d'água. A demanda total a ser atendida é dada pela seguinte equação:

$$Dt_r = \sum_{i=1}^k Di_{r,i} \quad (3.9)$$

Onde Dt_r é a demanda total a ser atendida pelo reservatório, $Di_{r,i}$ é a demanda individual associada ao reservatório, independente se está localizada ou não na mini-bacia, e k é o número de demandas associadas ao reservatório. Define-se também a variável VDt_r como sendo Dt_r convertido em unidades de volume

A seguir, os valores de demanda e de vazão de entrada no reservatório são convertidos em unidades de volume, adotando-se geralmente o passo de tempo semanal ou mensal, e lembrando também que as unidades de vazão são dadas em m^3/s e as de volume em hm^3 . Os volumes de evaporação líquida são calculados a partir dos valores de evaporação e precipitação, dados em mm. Estes dados correspondem ao conjunto de informações de entrada do modelo, as quais podem ser obtidas do modelo chuva-vazão MGB-IPH, que calcula o total precipitado e evaporado em cada mini-bacia e em cada passo de tempo. O volume de evaporação líquido é dado pela seguinte relação:

$$V_{evl} = (E - P) As . c \quad (3.10)$$

Onde E e P são valores mensais (ou diários) de evaporação e precipitação, dados em mm, As é a área do reservatório no início do passo de tempo correspondente em km^2 e c é um fator de conversão de unidades.

Considerando que o armazenamento no tempo inicial seja um percentual da capacidade máxima de armazenamento do reservatório, o volume do reservatório no passo de tempo seguinte será dado pela equação da continuidade, obtido pela equação (3.8). O valor será ajustado, de acordo com os limites máximos e mínimos, assim como os valores de saída.

Caso o volume no passo de tempo posterior tenha atingido a capacidade máxima, haverá extravasamento do volume excedente para jusante, de acordo com a seguinte relação:

$$\begin{aligned} V_{ex}(t) &= V_s(t + 1) - V_{max}(t) \quad , se \quad V_s(t + 1) \geq V_{max} \\ V_{ex}(t) &= 0 \quad , se \quad V_s(t + 1) < V_{max} \end{aligned} \quad (3.11)$$

No caso do volume no passo de tempo posterior ter atingido o volume mínimo, haverá restrições em relação ao abastecimento das demandas do reservatório. A variável $VDat_r$ corresponde ao volume destinado ao atendimento das demandas do reservatório. Considerando o cenário em que não há regularização de vazão, ou seja, considerando somente as saídas diretas das demandas, a mesma é calculada de acordo com a seguinte relação:

$$\begin{aligned}
V\text{Dat}_r(t) &= V\text{Dt}_r(t) && , \text{se } V_s(t+1) > V_{\text{min}} \\
V\text{Dat}_r(t) &= V_s(t) + V_e(t) - V_{\text{evl}}(t) - V_o(t) - V_{\text{min}}, \text{se } V_s(t+1) \leq V_{\text{min}}
\end{aligned} \tag{3.12}$$

Em seguida, são executadas as atualizações das variáveis de volume liberado e volume armazenado, conforme a capacidade de armazenamento de cada reservatório, as quais são dadas pelas seguintes relações:

$$\begin{aligned}
V_s(t+1) &= V_{\text{max}} && , \text{se } V_s(t+1) \geq V_{\text{max}} \\
V_s(t+1) &= V_{\text{min}} && , \text{se } V_s(t+1) < V_{\text{min}}
\end{aligned} \tag{3.13}$$

A partir da definição do atendimento às demandas totais de cada reservatório, deseja-se quantificar o atendimento às demandas individualmente, a fim de que possa diferenciar os tipos de uso e posteriormente poder definir uma priorização de garantia às demandas. O atendimento individual é definido proporcionalmente para cada usuário, de acordo com a demanda, e é dado de acordo com a seguinte equação:

$$\text{Fat}_{r,i} = D\dot{i}_{r,i} / D\dot{t}_r \tag{3.14}$$

Sendo Fat_i a fração da demanda i em relação às demais demandas associadas ao reservatório. O atendimento à demanda individual ($D\dot{a}i_{r,i}$) é dado pela multiplicação da fração de demanda total pelo atendimento total na mini-bacia, de acordo com a seguinte relação:

$$D\dot{a}i_{r,i} = V\text{Dat}_r \cdot \text{Fat}_{r,i} \cdot c \tag{3.15}$$

3.3.5. Verificação da demanda não atendida pelo reservatório

Nesta etapa o objetivo é a verificação se o reservatório consegue suprir as demandas conectadas a ele, e caso contrário, qual seria o valor da demanda não atendida pela estrutura. A seguinte equação apresenta a variável $D\dot{n}a\dot{i}_{r,i}$, correspondente ao déficit não atendido pela captação direta do reservatório:

$$D\dot{n}a\dot{i}_{r,i} = D\dot{i}_{r,i} - D\dot{a}i_{r,i} \tag{3.16}$$

O valor não atendido pode ser disponibilizado novamente para o atendimento a partir dos trechos de rio. Esta abordagem é interessante em casos onde existem demandas associadas a pequenas reseravações e próximas a cursos d'água com grande disponibilidade de água. A

associação entre as captações e as fontes de água é feita manualmente, priorizando a associação da demanda com um reservatório, e caso a demanda não esteja próxima a associação é feita a partir do trecho de rio mais próximo. Entretanto, ao disponibilizarmos a fração não atendida dos reservatórios aos trechos de rio estamos otimizando o uso da água localmente, aumentando o índice de garantia das demandas.

Desse modo, torna-se necessária a alteração da equação (3.3), acrescentando a parcela referente ao déficit dos reservatórios na mini-bacia:

$$Dt_m = \sum_{i=1}^j Di_{m,i} + \sum_{i=1}^k Dnai_{r,i} \quad (3.17)$$

3.4. DESCRIÇÃO DO MÓDULO DE OTIMIZAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

3.4.1. Descrição do esquema de otimização global SCE-UA

Em muitos problemas de gerenciamento de recursos hídricos, é interesse saber qual o benefício obtido com a implementação de um reservatório em uma bacia hidrográfica, e qual a capacidade que os mesmos devem ter para atingir o atendimento esperado considerando um determinado nível de garantia. Define-se neste ponto um problema de otimização do dimensionamento de novos projetos de reservatórios. Por outro lado, uma vez que o reservatório já tenha sido implementado, pode-se definir qual a regra de operação que pode trazer o maior benefício aos objetivos do mesmo, considerando por exemplo que existem épocas do ano com maior ou menor consumo de água, tornando-se interessante a adoção de políticas de armazenamento nos meses de menor consumo.

Estes problemas podem ser resolvidos utilizando o modelo de simulação proposto no item anterior através da execução do mesmo, modificando-se manualmente as condições iniciais de capacidade de armazenamento e regras de operação. Porém, este processo pode-se tornar lento e tedioso dependendo da complexidade do sistema, e não há garantias da obtenção exata do valor ótimo de dimensionamento ou operação. Assim, torna-se interessante a aplicação das técnicas de otimização explicitadas no capítulo anterior, em associação com o modelo de simulação descrito anteriormente.

No presente trabalho, a otimização dos reservatórios foi feita utilizando-se o algoritmo SCE-UA, um método de otimização híbrido que integra tanto técnicas de busca local quanto de busca global. O algoritmo SCE-UA foi inicialmente descrito por DUAN, *et. al* (1992), que

criaram um método baseado na combinação de técnicas de busca aleatória, algoritmos genéticos e otimização local. O nome SCE é derivado das iniciais de Shuffled Complex Evolution, o que pode ser traduzido por “Evolução de Complexos Misturados”. As letras UA provêm de University of Arizona, instituição de origem dos autores do algoritmo. O algoritmo SCE-UA opera com uma população de pontos que “evolui” em direção ao ótimo global através de sucessivas iterações e avaliações da função objetivo. Cada um destes pontos é definido pelos valores dos parâmetros e é um candidato ao ótimo.

Este algoritmo tem apresentado excelentes resultados na calibração automática de modelos hidrológicos (DINIZ, 1999; COLLISCHONN e TUCCI, 2001) e ainda na determinação das regras de operação lineares de operação de sistemas de reservatórios (KOUTSOYIANNIS et. al., 2002; BRAVO et. al., 2008; WANG et. al., 2010). Nesse algoritmo deve ser efetuada a definição dos parâmetros que serão utilizados no processo de otimização. Uma vez definido cada um deles, é necessário definir também seus valores máximos e mínimos, ou seja, o espaço viável para os mesmos. Na linguagem do algoritmo genético, cada parâmetro é denominado de gen, e o conjunto de genes define um indivíduo. Já o conjunto de indivíduos define a população (o conjunto de soluções a serem utilizadas para o processo de otimização). Assim sendo, foram identificados os fluxogramas principais que compõem o algoritmo e estão representados a seguir. O primeiro deles representa o aspecto geral do algoritmo SCE-UA, sendo reproduzido na Figura 3.10 (VIANNA JR., 2007):

Tabela 3.3 – Variáveis presentes no fluxograma da Figura 3.10.

r	Critério de parada do algoritmo: número de evoluções da população
p	Número de complexos no qual a população será dividida
n	Número de parâmetros de cada ponto do espaço de soluções
x_{imin}	Valor mínimo do parâmetro i , com $i=1\dots,n$
x_{imax}	Valor máximo do parâmetro i , com $i=1\dots,n$
m	Número de indivíduos que compõem cada complexo, definido através da relação: $m = 2n + 1$. Cada indivíduo é definido por n parâmetros, cujos valores são definidos através de x_{imin} , x_{imax} e de um número aleatório gerado pelo sistema
s	Número de indivíduos da população, ou seja, o número de pontos que serão utilizados para a otimização mono-objetivo: $s = p \cdot m$
q	Número de indivíduos que compõem cada subcomplexo (pais), definido através da relação: $q = n + 1$
U	Espaço de validade dos parâmetros de cada indivíduo da população, definido pelos valores mínimo e máximo de cada parâmetro
FO_i	Valor da aptidão (função objetivo) de cada um dos indivíduos i da população, com $i=1,\dots,s$
D	Localização de cada indivíduo na população
A^k	Complexos nos quais será dividida a população, com $k=1,\dots,p$

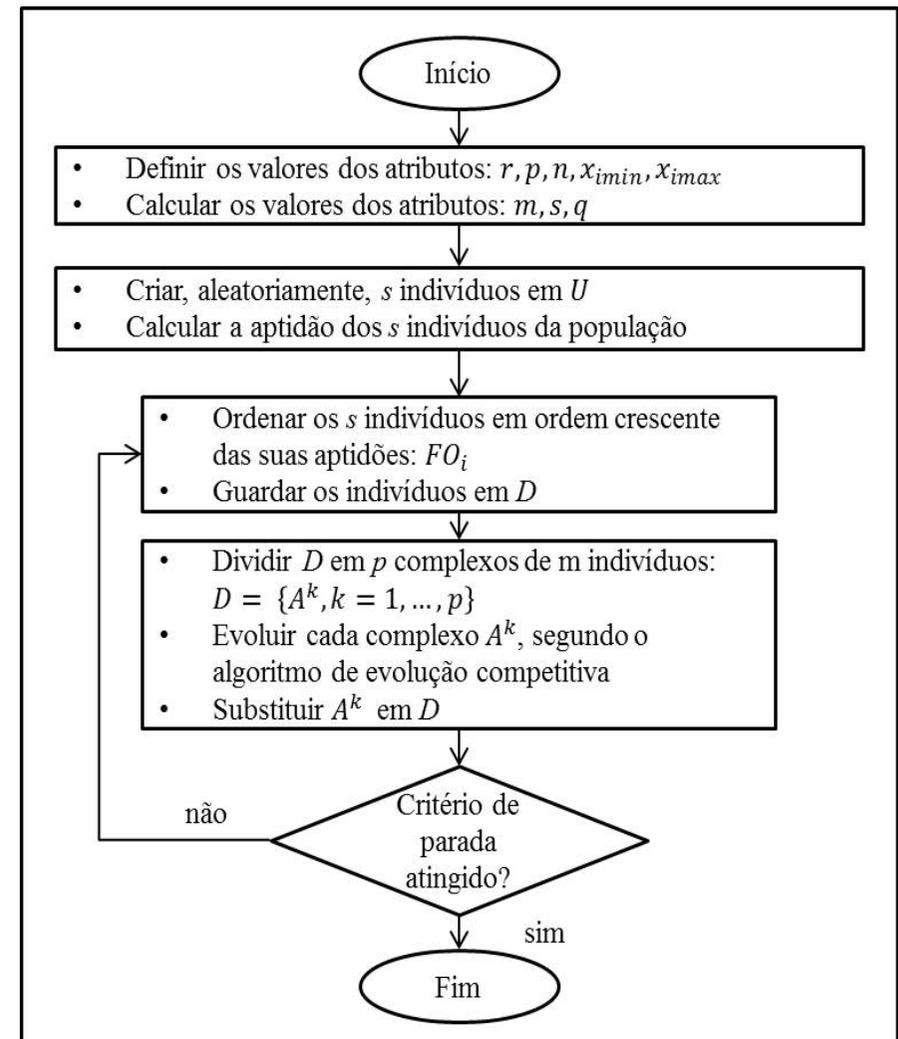


Figura 3.10 - Fluxograma geral do algoritmo SCE-UA

Em seguida, se reproduz o algoritmo de evolução de cada complexo, nos quais serão divididos os indivíduos que formam a população. Esse algoritmo está representado na Tabela 3.4 a seguir:

Tabela 3.4 - Variáveis presentes no fluxograma da Figura 3.11

q	Número de indivíduos que farão parte de cada subcomplexo
β	Número de vezes que cada complexo vai evoluir. Seu valor tem como indicação a relação: $\beta = 2n + 1$
α	Número de vezes que cada subcomplexo vai evoluir: esse atributo define quantos “filhos” cada conjunto de “pais” vai gerar. No presente trabalho, adotou-se $\alpha = 1$, sugerido pelos autores do algoritmo
ρ_i	Valores das probabilidades de escolha de cada indivíduo, dentro do complexo, para compor cada subcomplexo (pais)
FO_i	Aptidão (ou valor da função objetivo) de cada indivíduo do complexo em evolução

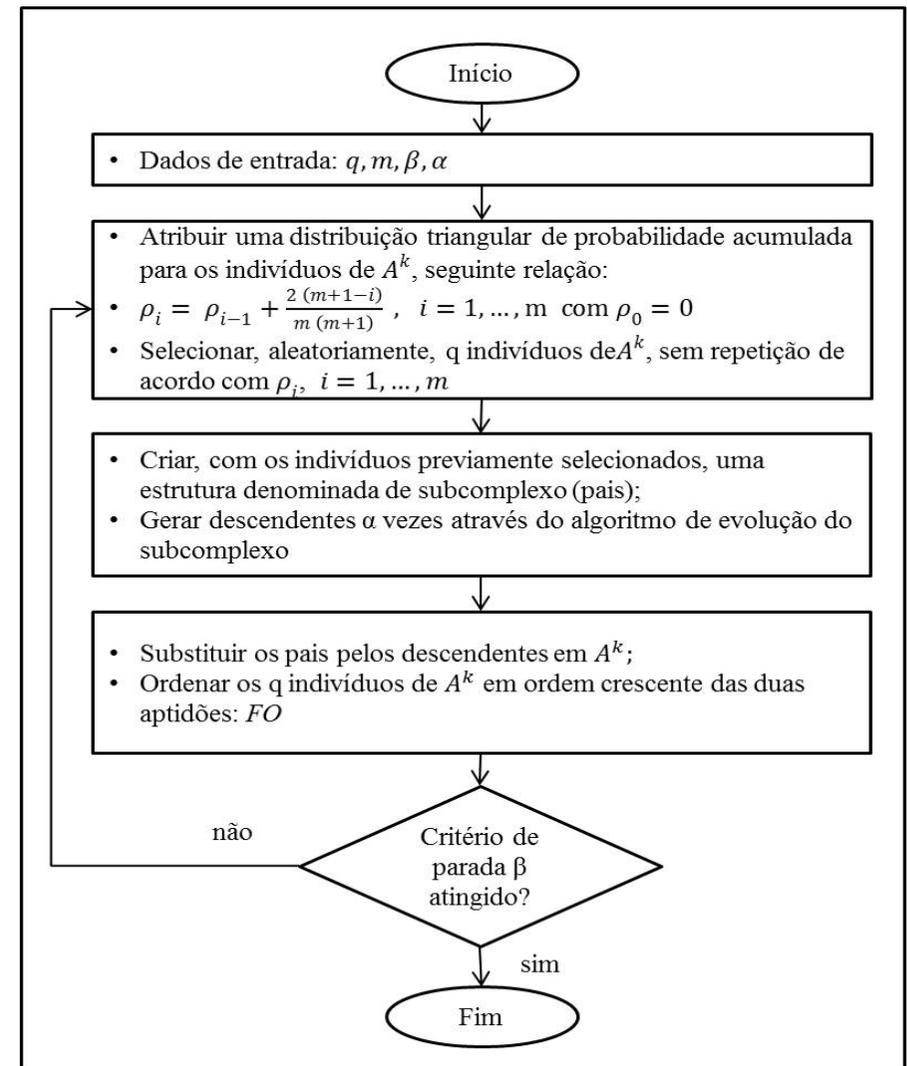


Figura 3.11 – Fluxograma do algoritmo de evolução evolutiva complexa dentro do SCE-UA

O próximo fluxograma representa o processo de evolução de cada subcomplexo, e está representado pela Figura 3.12:

Tabela 3.5 - Variáveis presentes no fluxograma da Figura 3.11

A^k	Complexo que estiver sendo evoluído
n	Cada indivíduo dentro do complexo A^k para compor cada subcomplexo (pais). O mesmo é caracterizado por um ponto de dimensão n
Ind_{cen}	Indivíduo denominado de centroide. O valor de cada um seus gens é a média entre gens dos indivíduos que fazem parte do subcomplexo, excetuando-se o Ind_{pior}
Ind_{pior}	Indivíduo que tem o maior (pior) valor de aptidão dentro do subcomplexo
Ind_{ref}	Indivíduo obtido por reflexão do Ind_{pior} , em relação ao Ind_{cen}
FO_{ref}	Aptidão (valor da função objetivo) do Ind_{ref}
FO_{pior}	Aptidão (valor da função objetivo) do Ind_{pior}
H	Menor hipercubo de dimensão n no qual o complexo A^k esteja contido
Ind_{mut}	Indivíduo obtido por mutação dentro do hipercubo H
FO_{mut}	Aptidão (valor da função objetivo) do Ind_{mut}

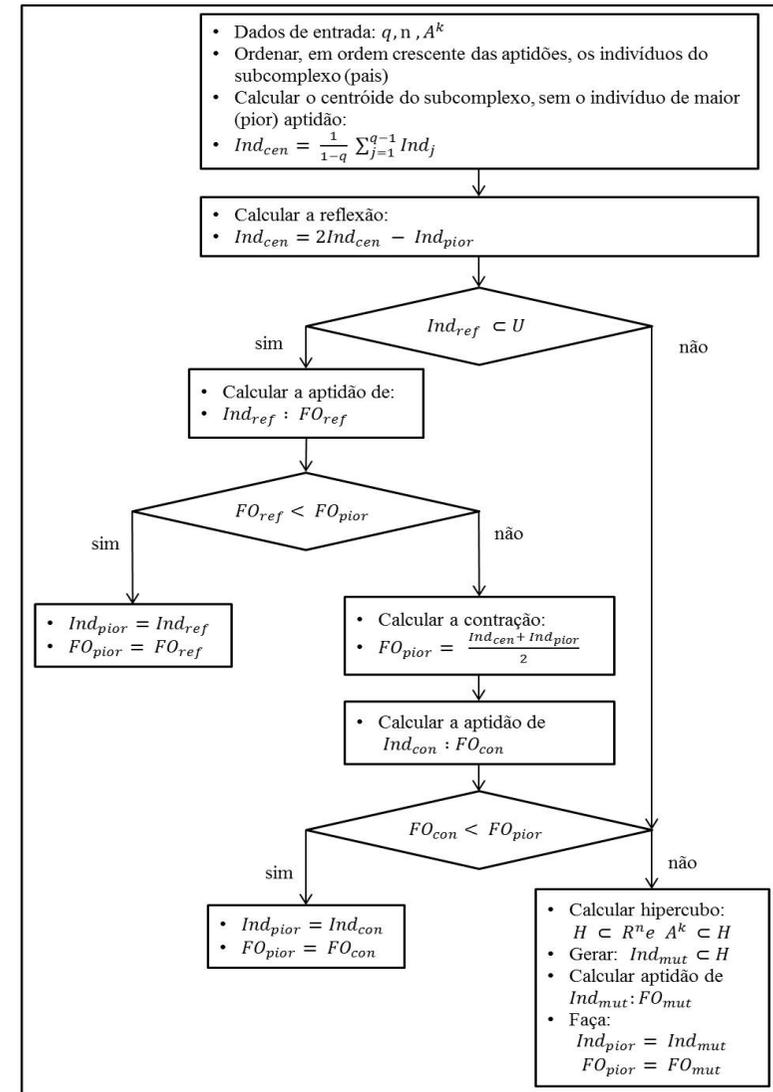


Figura 3.12 - Algoritmo de evolução de cada sub-complexo, dentro do SCE-UA

3.4.2. Descrição da função-objetivo

A aplicação do algoritmo SCE-UA neste trabalho está baseada na formulação de uma função-objetivo que verifique qual a vazão que o reservatório pode fornecer para o suprimento de suas demandas diretas para uma determinada garantia de atendimento. Com isso, poderá ser possível verificar a capacidade de atendimento às demandas destas estruturas, estabelecer limites de outorga, além de projetar novos reservatórios e verificar as alternativas que trarão os melhores benefícios à bacia.

Seja NR o número de reservatórios do sistema, ou o número de reservatórios a serem otimizados. Este número corresponde ao número de parâmetros da função a otimizar, ou o número de soluções. Para cada parâmetro, será gerada uma população inicial de tamanho s , correspondente às soluções candidatas que serão evoluídas no algoritmo. Esta população é gerada aleatoriamente e corresponde a percentuais da vazão média de longo período afluente de cada reservatório.

O número de indivíduos da população deve seguir as recomendações dos autores do algoritmo, sendo proporcional ao número de parâmetros. Por exemplo, para um sistema com 9 reservatórios, foram estabelecidos 4 complexos e 32 indivíduos por complexo, resultando em 128 indivíduos da população inicial para cada parâmetro. Quanto maior o número de parâmetros, maiores serão o número de indivíduos, aumentando o tempo de processamento do algoritmo, uma vez que o modelo de simulação é executado para cada indivíduo.

A vazão regularizada é então definida para cada parâmetro i (reservatório) e cada indivíduo j da população de s elementos, de acordo com a equação:

$$Q_{reg_{i,j}}(t) = k_{i,j}(t) \cdot Q_{mlp} \quad (3.19)$$

Os componentes $x_{i,min}$ e $x_{i,max}$, correspondentes aos valores mínimo e máximo do parâmetro i , devem ser definidos para a geração da população de s elementos de cada parâmetro, sendo igual a 0 no limite inferior e teoricamente igual a 1 no limite superior. Isto ocorre uma vez que o reservatório pode regularizar até 100% da vazão média de longo período, porém dificilmente alcançando este valor, devido por exemplo, às perdas pela evaporação e ao subdimensionamento das estruturas. Contudo, em determinados casos a demanda é requerida em apenas um período do ano, onde no restante do tempo o reservatório atua como uma estrutura armazenadora de água, caso comum nos açudes existentes no Rio Grande do Sul com utilização exclusiva ao atendimento da demanda sazonal da irrigação do arroz. Nestes

casos, a cada nova temporada de irrigação o reservatório teria capacidade de regularizar uma vazão acima de 100% da vazão média de longo período, devendo ser ampliado o nível de $x_{i,max}$ a fim de que esta condição seja comportada.

Após a geração da população inicial de cada parâmetro, será feito o cálculo da função-objetivo através da aplicação do modelo de simulação de reservatórios. A cada conjunto de indivíduos por parâmetro o modelo de simulação será executado, obtendo-se o fim o valor da função-objetivo a cada rodada. O modelo de simulação de reservatórios é modificado, substituindo-se o valor de $VDt_r(t)$ na equação (3.8) pelo valor de $Qreg_{i,j}$ convertido em unidades de volume, dado por $VQreg_{i,j}$:

$$Vs(t + 1) = Vs(t) + Ve(t) - Vevl(t) - VQreg_{i,j}(t) - Vo(t) - Vex(t) \quad (3.20)$$

A função-objetivo do algoritmo de otimização é relacionado ao nível de garantia requerido aos reservatórios, dado por g_{req} . O nível de garantia g_r de cada reservatório, dado pela equação (3.19), é obtido ao fim de cada execução do modelo de simulação. A ideia é que à medida em que os indivíduos são evoluídos, a diferença entre o g_r de todos os reservatórios e o valor g_{req} seja reduzido ao nível mínimo, de acordo com a equação descrita abaixo:

$$\min FO = \sum_{r=1}^{NR} (g_r - g_{req})^2 \quad (3.21)$$

Os valores das funções-objetivo são ordenados conforme sua aptidão, sendo formado complexos de indivíduos que passam por um processo de Evolução Competitiva Complexa, executando-se novamente o modelo de simulação até que se tenha atingido o número de evoluções da população. Ao final do processo, tem-se como resultado a variável $Qreg_i$ para cada reservatório, representado o valor máximo de vazão regularizada para uma dada garantia de atendimento.

A Figura 3.13 apresenta um esquema geral de organização do algoritmo de otimização do valor da vazão regularizada no SCE-UA. Os valores i_1, i_2, \dots, i_p representam a entrada do número de reservatórios ou parâmetros do modelo. Para cada parâmetro são gerados valores $j_{1,p}, j_{2,p}, \dots, j_{s,p}$, referentes aos indivíduos da população de tamanho s . Cada conjunto de valores é então testado em termo da função-objetivo, as soluções passam por um processo de

hierarquização, formação de complexos, pelo algoritmo de evolução competitiva complexa, novos indivíduos são gerados e testados novamente em termo da função-objetivo, num ciclo que se encerra somente quando o critério de convergência é satisfeito.

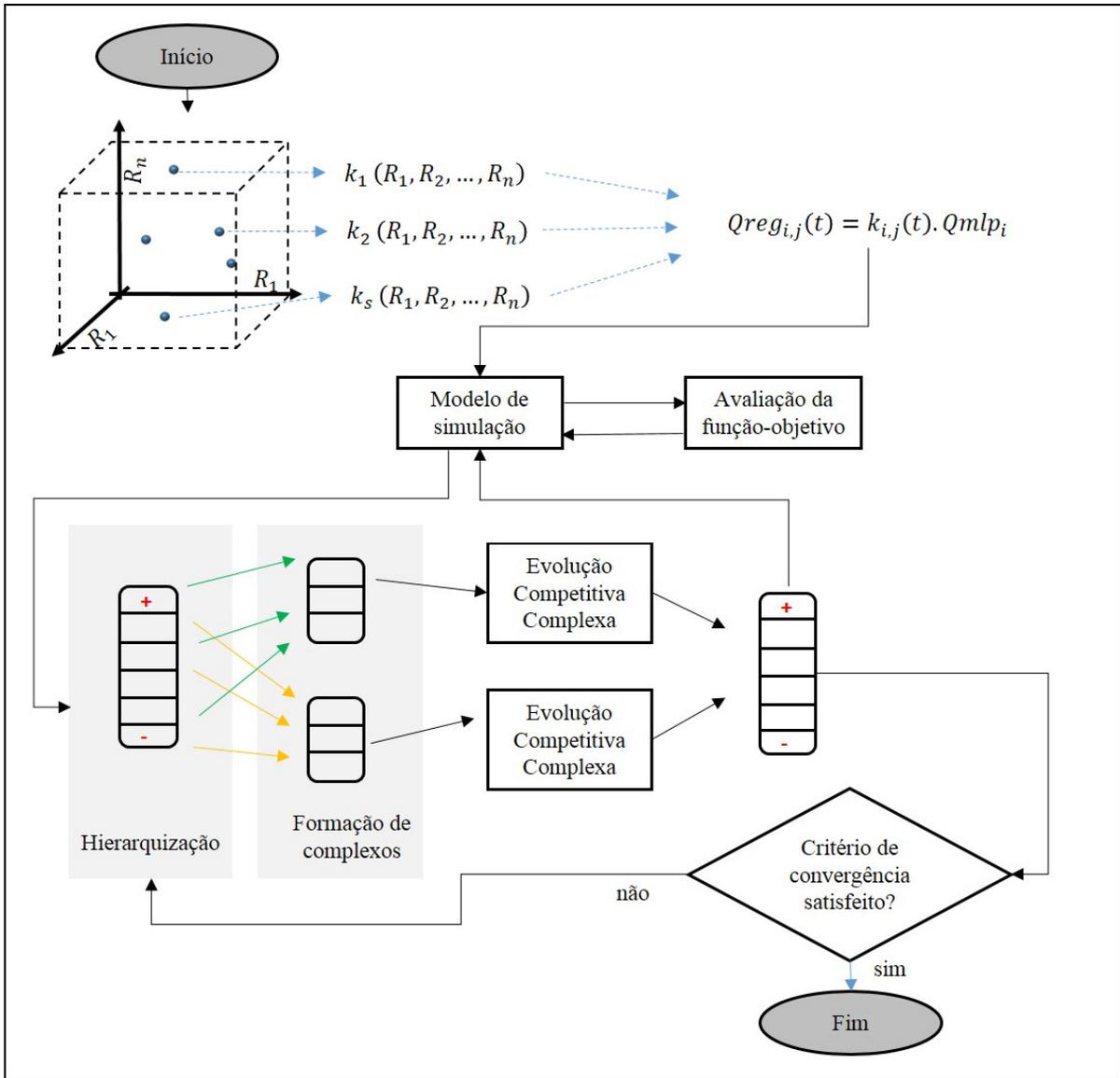


Figura 3.13 - Representação esquemática do algoritmo SCE-UA aplicado ao problema de definição do nível de garantia dos reservatórios.

4. ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO QUARAÍ

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA BACIA

A bacia do rio Quaraí possui cerca de 14.800 km² e localiza-se na fronteira entre o sul do Brasil e a região nordeste do Uruguai. O rio Quaraí é tributário do rio Uruguai e faz parte da bacia do rio da Prata. Limita-se ao norte pela bacia do Rio Ibicuí, e ao sul pela bacia do Rio Arapey Grande, já em território uruguaio. Aproximadamente 6.700 km² (45 %) da bacia se encontra em território brasileiro, e 8.100 km² (55%) no extremo noroeste do Uruguai. A Figura 4.1 apresenta um mapa de localização da bacia hidrográfica do Rio Quaraí, contextualizando com as bacias próximas e à Bacia do Rio da Prata.



Figura 4.1 - Mapa de localização da bacia do Rio Quaraí no contexto da Bacia do Rio da Prata.

O rio Quaraí é formado a partir da junção entre os arroios Espinilho e Invernada, possuindo ao todo cerca de 350 km de extensão. Á margem direita, correspondente à porção brasileira, os principais contribuintes do Quaraí são os arroios Sarandi, Areal, Quaraí-Mirim, Garupá, Camoatim, Caiboaté, Capivari, Guapitangui e Salso. Na margem esquerda, os principais afluentes uruguaios são os arroios Catalán, Tres Cruces, Cuaró e Yucutuja. A Figura 4.2 apresenta um mapa com a identificação dos principais rios e arroios da bacia, juntamente com o delineamento de algumas sub-bacias internas ao Quaraí.

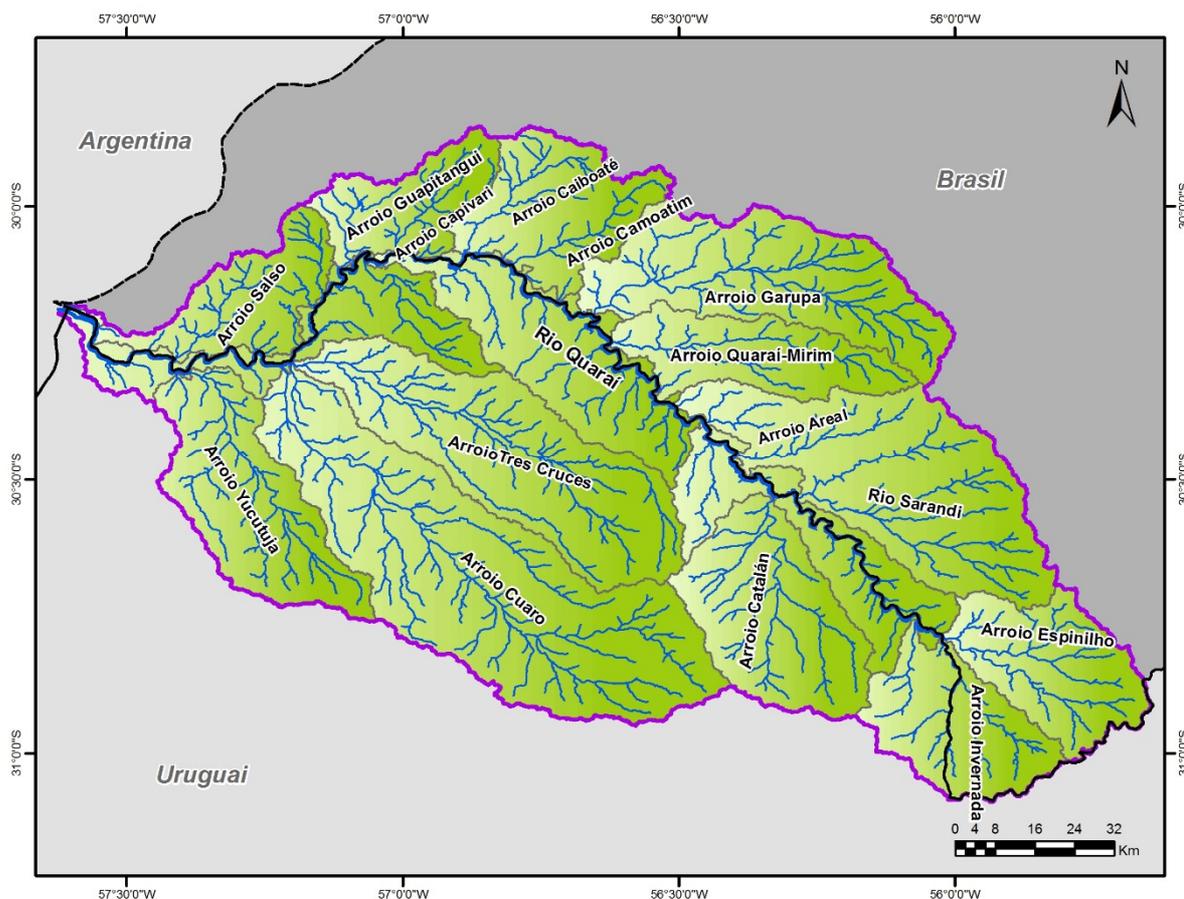


Figura 4.2 - Mapa da bacia do Rio Quaraí indicando os principais recursos hídricos na bacia.

Politicamente, a bacia contempla quatro municípios do Estado do Rio Grande do Sul, além do departamento uruguaio de Artigas. Os municípios de Quaraí e Barra do Quaraí possuem a sede municipal dentro dos limites da bacia, a sede de Santana do Livramento localiza-se na bacia do Rio Santa Maria e a sede de Uruguaiana encontra-se na bacia do Rio Ibicuí. As cidades de Quaraí e Artigas são contíguas e correspondem à região mais povoada da bacia, com cerca de 21.300 habitantes na cidade brasileira (IBGE, 2010) e 40.600 na uruguaia (INE, 2011).

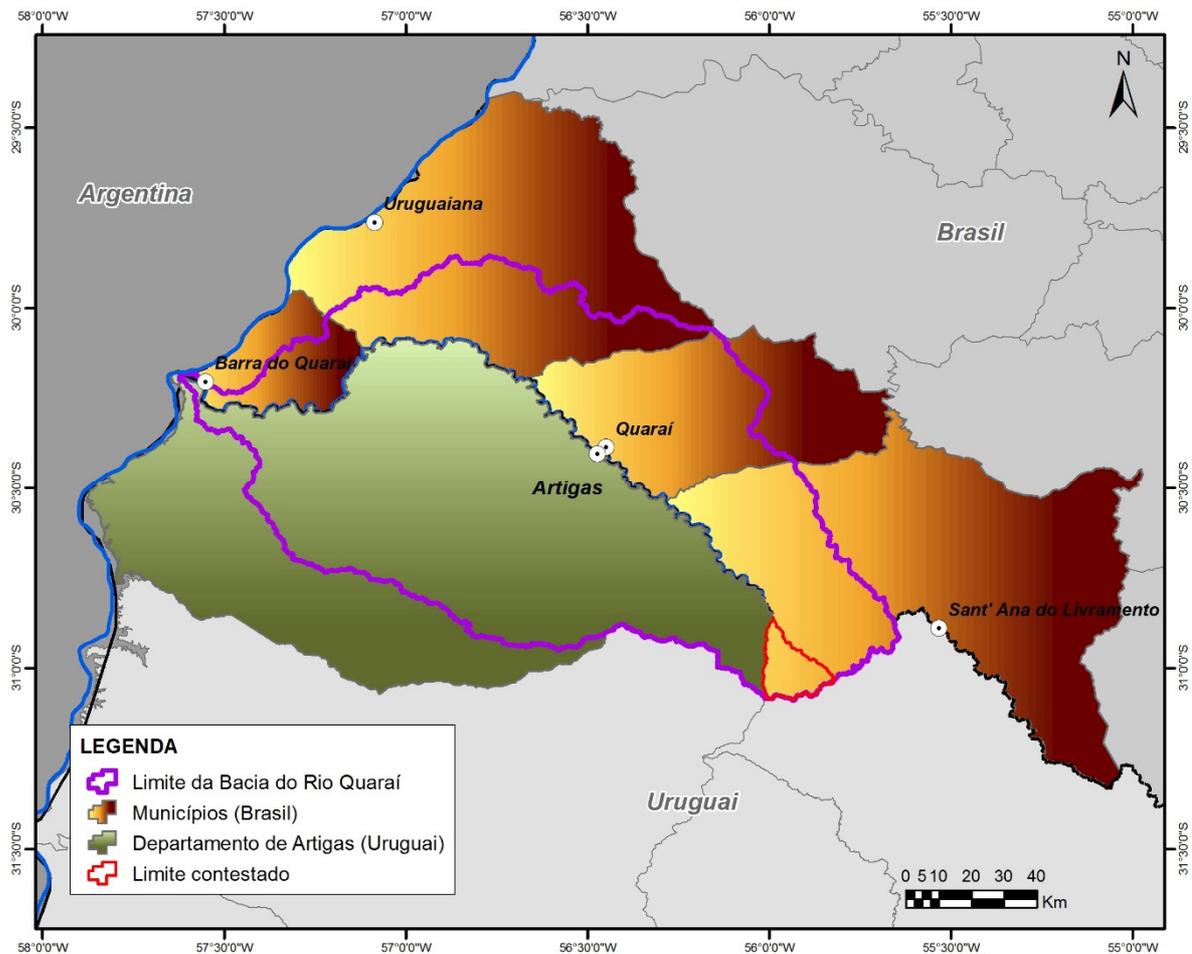


Figura 4.3 – Mapa com a divisão política da bacia do Rio Quaraí, identificando os municípios brasileiros e o departamento uruguaio.

4.2. DISPONIBILIDADES HÍDRICAS SUPERFICIAIS: APLICAÇÃO DO MODELO MGB-IPH

4.2.1. Dados hidrometeorológicos

Os dados hidrológicos e meteorológicos utilizados são fornecidos em intervalo de tempo diário de vazão, chuva e clima. Os dados foram obtidos através do Sistema Hidroweb da Agência Nacional de Águas (<http://hidroweb.ana.gov.br/>) no lado brasileiro da bacia, e no lado uruguaio as informações pluviométricas foram obtidas a partir dos dados do Instituto Uruguaio de Meteorología (INUMET) ou da Dirección Nacional de Meteorología (DNM).

- *Relação do postos pluviométricos e descrição do regime de chuvas na bacia*

Para obtenção dos dados de chuva, foi definido um raio de 50 km além do contorno dos limites da bacia para busca de postos pluviométricos, tanto no lado brasileiro como no uruguaio. As informações correspondentes aos postos do Brasil são livres e de fácil acesso, a

partir do sistema da Agência Nacional de Águas. No Uruguai, entretanto, as informações não estão disponíveis na rede, havendo a necessidade de obtenção dos dados a partir de terceiros. A Figura 4.4 apresenta a relação dos postos pluviométricos utilizados, cujos códigos são descritos na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2 apresentadas em seguida.

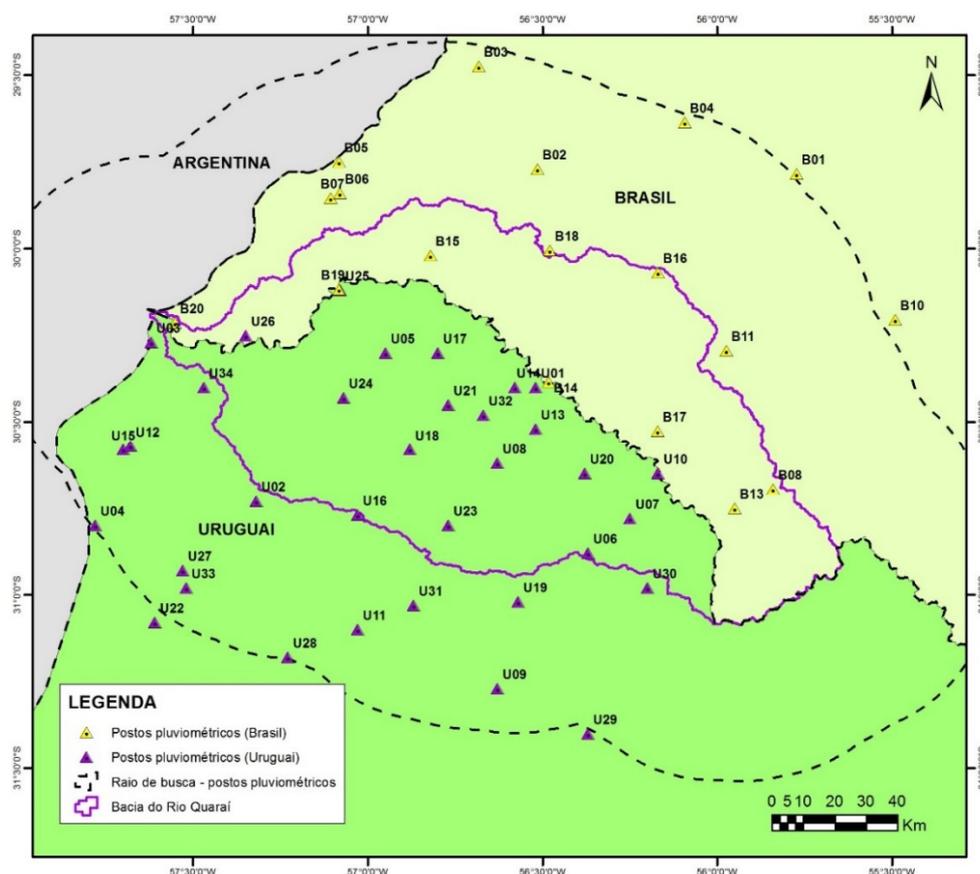


Figura 4.4 – Relação dos postos pluviométricos utilizados no modelo hidrológico.

Tabela 4.1 - Relação dos postos pluviométricos localizados no Brasil

Código Mapa	Latitude	Longitude	Nome	Codigo	Ativo	Resp.	Oper.	Dispo. dados
B01	-29,7844	-55,7739	ALEGRETE	2955013	sim	ANA	CPRM	1976-2013
B02	-29,7653	-56,5214	PLANO ALTO	2956007	sim	ANA	CPRM	1943-2013
B03	-29,4711	-56,6678	JOÃO ARREGUI	2956008	sim	ANA	CPRM	1976-2013
B04	-29,6358	-56,0947	FAZENDA TRÊS CAPÕES	2956009	sim	ANA	CPRM	1986-2013
B05	-29,75	-57,0833	URUGUAIANA	2957001	não	INMET	INMET	1912-1998
B06	-29,8394	-57,0811	URUGUAIANA - DNER	2957005	não	ANA	CPRM	1986-1996
B07	-29,8533	-57,1072	CABANHA ALCEU NEVES	2957008	sim	ANA	CPRM	2004-2013
B08	-30,6956	-55,9744	FAZENDA ENCERRA	3055003	sim	ANA	CPRM	1976-2013
B09	-30,5164	-55,1267	SANTA RITA	3055005	sim	ANA	CPRM	1976-2013
B10	-30,2042	-55,4906	SÃO CARLOS	3055007	sim	ANA	CPRM	1986-2013

B11	-30,2939	-55,9756	PASSO DA GUARDA	3055008	sim	ANA	CPRM	1988-2013
B12	-30,7917	-55,1792	BR-293	3055009	sim	ANA	CPRM	2000-2013
B13	-30,7503	-55,9514	ALTO QUARAÍ	3055011	sim	ANA	CPRM	2000-2013
B14	-30,3833	-56,4833	QUARAÍ	3056003	sim	ANA	CPRM	1943-2008
B15	-30,0189	-56,8214	FAZENDA JUNCO	3056004	sim	ANA	CPRM	1976-2013
B16	-30,0686	-56,1703	HARMONIA	3056006	sim	ANA	CPRM	1978-2013
B17	-30,5256	-56,1722	CATY	3056007	sim	ANA	CPRM	1983-2013
B18	-30,0039	-56,4797	OLHO D'ÁGUA	3056010	sim	ANA	CPRM	2004-2013
B19	-30,1167	-57,0833	PASSO DO LEÃO	3057001	não	ANA	CPRM	1960-1986
B20	-30,2133	-57,5533	BARRA DO QUARAÍ	3057002	sim	ANA	CPRM	1976-2013

Tabela 4.2 - Relação dos postos pluviométricos localizados no Uruguai

Código	Nome	Long.	Lat.	Responsável	Dispo. dados
U01	Artigas (Ciudad)	-56,52	-30,4	DNM / INUMET	1981-2013
U02	Baltasar Brum	-57,32	-30,73	DNM / INUMET	1981-2013
U03	Bella Unión	-57,62	-30,27	DNM / INUMET	1981-2013
U04	Belén	-57,78	-30,8	DNM / INUMET	1981-2013
U05	Bernabe Rivera	-56,95	-30,3	DNM / INUMET	1981-2013
U06	Catalán Chico	-56,37	-30,88	DNM / INUMET	1981-2013
U07	Catalán Grande	-56,25	-30,78	DNM / INUMET	1981-2013
U08	Cerro Amarillo	-56,63	-30,62	DNM / INUMET	1981-2013
U09	Cerro Chato	-56,63	-31,27	DNM / INUMET	1981-2013
U10	Charqueada	-56,17	-30,65	DNM / INUMET	1981-2013
U11	Colonia Lavalleja	-57,03	-31,1	DNM / INUMET	1981-2013
U12	Colonia Palma	-57,68	-30,57	DNM / INUMET	1981-2013
U13	Colonia Pintado	-56,52	-30,52	DNM / INUMET	1981-2013
U14	Colonia Rivera	-56,58	-30,4	DNM / INUMET	1981-2013
U15	Cuchilla de Guaviyú	-57,7	-30,58	DNM / INUMET	1981-2013
U16	Diego Lamas	-57,03	-30,77	DNM / INUMET	1981-2013
U17	El Topador	-56,8	-30,3	DNM / INUMET	1981-2013
U18	Estación Cuaró	-56,88	-30,58	DNM / INUMET	1981-2013
U19	Guaviyú de Arapey	-56,57	-31,02	DNM / INUMET	1981-2013
U20	Guayubira	-56,38	-30,65	DNM / INUMET	1981-2013
U21	Javier de Viana	-56,77	-30,45	DNM / INUMET	1981-2013
U22	Palomas	-57,61	-31,08	DNM / INUMET	1981-2013
U23	Paso Campamento	-56,77	-30,8	DNM / INUMET	1981-2013
U24	Paso Farías	-57,07	-30,43	DNM / INUMET	1981-2013
U25	Paso de León	-57,08	-30,12	DNM / INUMET	1981-2013

U26	Paso de la Cruz	-57,35	-30,25	DNM / INUMET	1981-2013
U27	Pda. María	-57,53	-30,93	DNM / INUMET	1981-2013
U28	Puntas de Valentín	-57,23	-31,18	DNM / INUMET	1981-2013
U29	Quintana	-56,37	-31,4	DNM / INUMET	1981-2013
U30	Sarandí de Arapey	-56,2	-30,98	DNM / INUMET	1981-2013
U31	Sequeira	-56,87	-31,03	DNM / INUMET	1981-2013
U32	Taruman	-56,67	-30,48	DNM / INUMET	1981-2013
U33	Termas del Arapey	-57,52	-30,98	DNM / INUMET	1981-2013
U34	Tomás Gomensoro	-57,47	-30,4	DNM / INUMET	1981-2013

Os postos uruguaios apresentam uma boa distribuição espacial, além de um baixo índice de falhas, dentro do período analisado. Entre 1981 e 2013, a maioria dos postos uruguaios apresentou ausência de dados entre 5 e 10% do tempo. Já nos postos brasileiros, a disponibilidade de dados é mais esparsa, apresentando alguns postos desativados com monitoramento interrompido.

A média anual pluviométrica é em torno de 1500 mm, não havendo grandes variações espaciais na bacia e no entorno da região. A Figura 4.5 apresenta as precipitações médias mensais ocorridas durante o período de 1981 a 2012. Em geral, os meses de maio a setembro tendem a ser um pouco mais secos, período no qual os reservatórios estão em processo de recarga do seu volume.

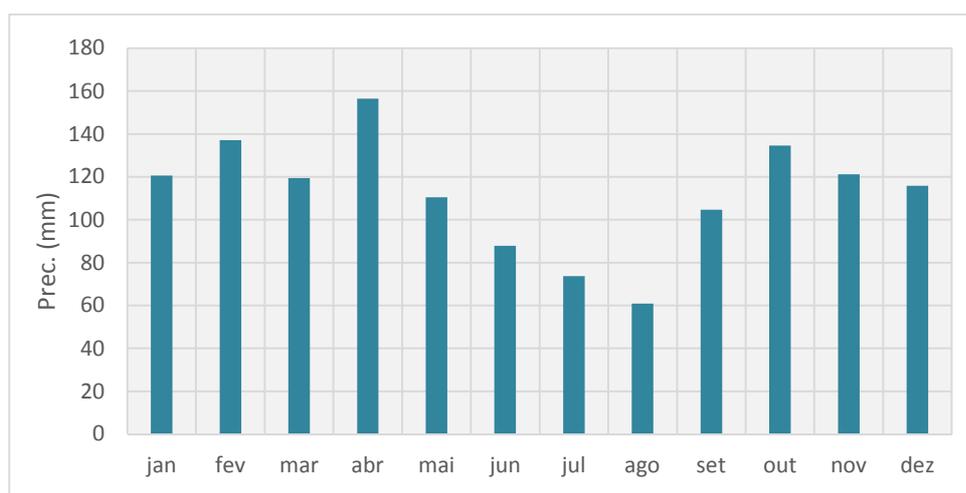


Figura 4.5 - Precipitação média mensal na bacia do rio Quaraí no período 1981-2012.

A Figura 4.6 apresenta um mapa de isoietas na bacia, onde não é possível notar uma tendência clara de zonas com maior ou menor concentração de chuvas, embora na porção central da bacia hajam postos com média acima de 1600 mm.

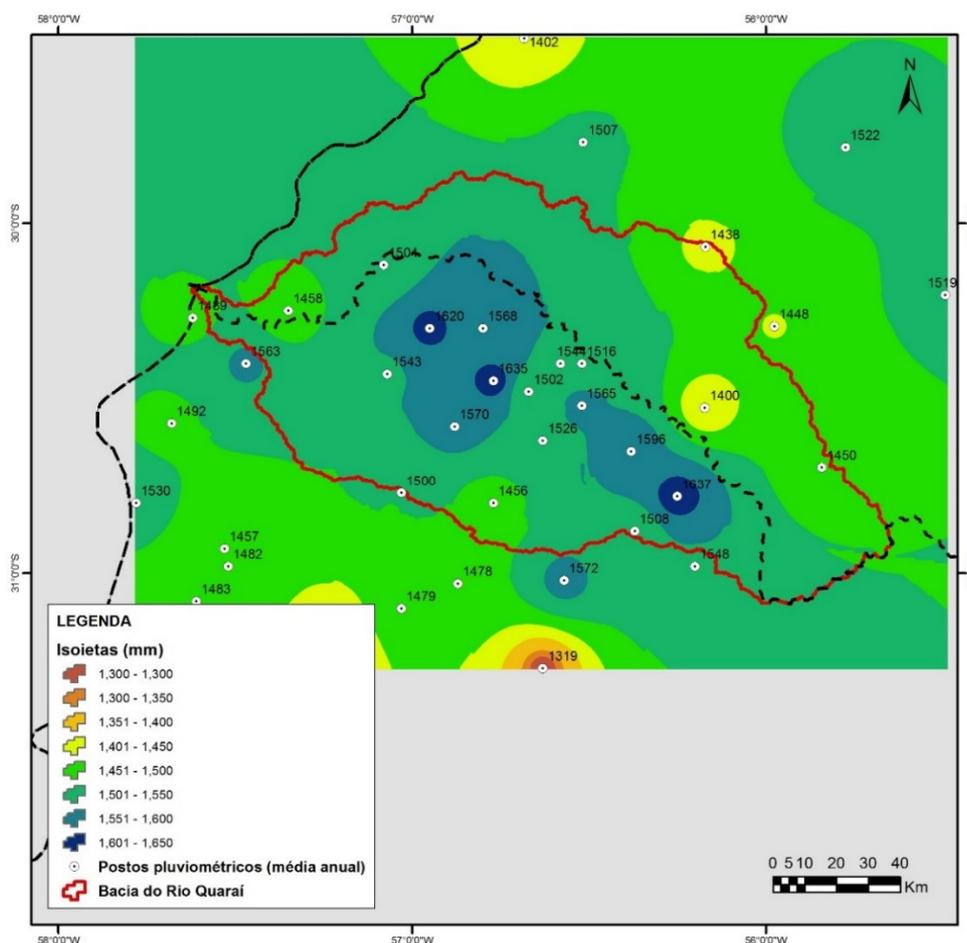


Figura 4.6 – Distribuição das médias anuais pluviométricas na bacia do rio Quaraí e seu entorno.

- **Relação dos postos fluviométricos e caracterização do regime hidrológico**

O banco de dados da ANA dispõe de poucas informações em relação à existência de postos fluviométricos na bacia. Dos três postos existentes, somente um possui série de dados com tamanho razoável, localizado junto ao município de Quaraí. Existem postos localizados na foz do rio Quaraí, porém possuem uma curta disponibilidade de dados, e a utilização destes não é recomendada devido ao efeito de remanso causado pelo Rio Uruguai. Desse modo, a partir do banco de dados da ANA foi utilizado somente o posto 77500000 (Posto Quaraí).

A partir do projeto Twinlatin, foi possível recuperar alguns dados referentes a dois postos fluviométricos uruguaios. Os postos estão localizados no rio Quaraí, próximo ao posto administrado pela ANA, e também no Arroio Tres Cruces, afluente do Rio Quaraí. A Figura 4.7 apresenta a localização dos três postos fluviométricos utilizados na avaliação da

disponibilidade hídrica na bacia, e a Tabela 4.3 apresenta a descrição dos postos, a partir da codificação utilizada na figura.



Figura 4.7 - Mapa de localização dos postos fluviométricos utilizados na modelagem hidrológica.

Tabela 4.3 - Relação dos postos fluviométricos utilizados no estudo de disponibilidade hídrica.

Cód. Mapa	Lat.	Long.	Nome	Código (ANA)	Resp.	Rio	Município	Área (km ²)	Dispo · Dados
F01	-30,384	-56,466	QUARAÍ	77500000	ANA	Rio Quaraí	Quaraí	4572	1985-2005
F02	-30,393	-56,492	ARTIGAS (Projeto Twinlatin)	-	DH-URU	Rio Quaraí	Artigas (URU)	4619	1980-2002
F03	-30,429	-56,805	JAVIER DE VIANA (Projeto Twinlatin)	-	DH-URU	Arroio Tres Cruces	Javier de Viana (URU)	576	1982-2002

- **Relação dos postos de monitoramento do clima**

As estações de monitoramento diário do clima mais próximas à bacia estão indicadas na Figura 4.8, na qual todas são operacionalizadas pelo INMET e suas séries de dados são dados de entrada de ambos os modelos hidrológicos.

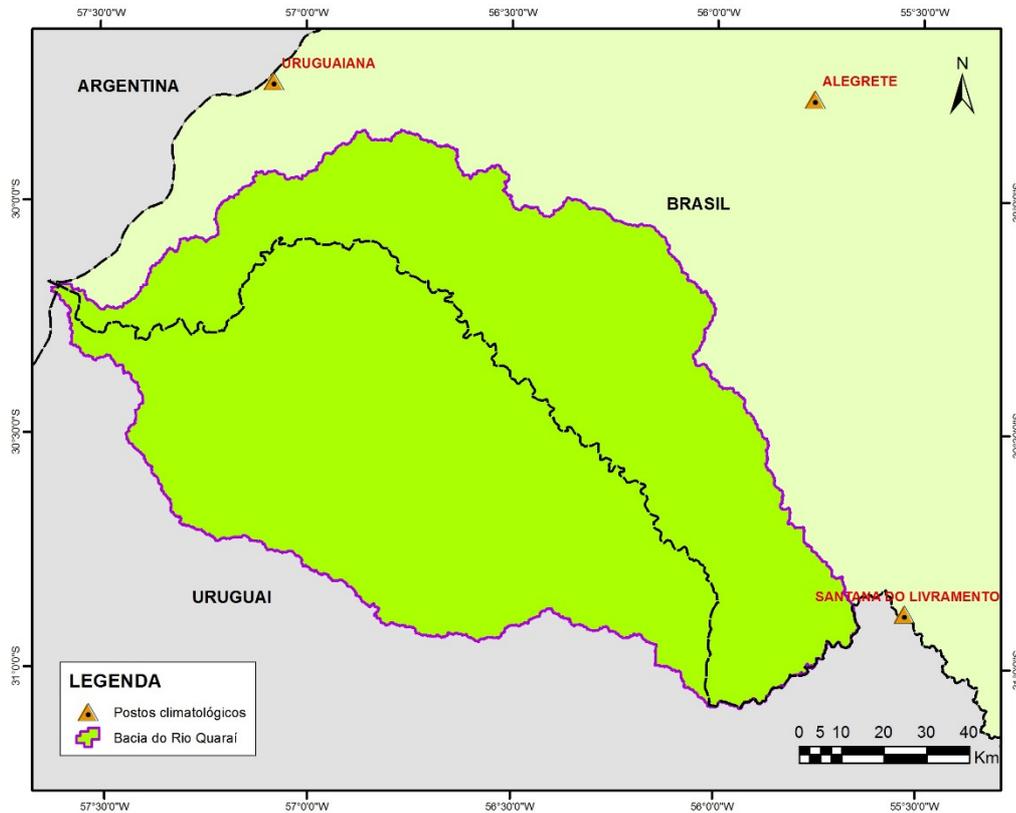


Figura 4.8 – Mapa de localização dos postos climatológicos utilizados na simulação hidrológica.

4.2.2. Dados de uso e tipo de solo e definição das Unidades de Resposta Hidrológica

O mapeamento da vegetação e uso do solo foi realizado a partir do processo de classificação de imagens de satélite LANDSAT. Foram definidas quatro classes distintas de ocupação, a saber: água, floresta, campo/pastagem e lavouras de arroz. Uma descrição mais detalhada do processo de classificação de imagens é apresentada no item 4.4.1, na qual é focada a delimitação das lavouras de arroz. A Figura 4.9 apresenta o resultado final do processo de classificação de imagens, incluindo a definição das áreas de cultivo de arroz, e a Tabela 4.4 apresenta a área total ocupada em cada classe e sua distribuição percentual na bacia.

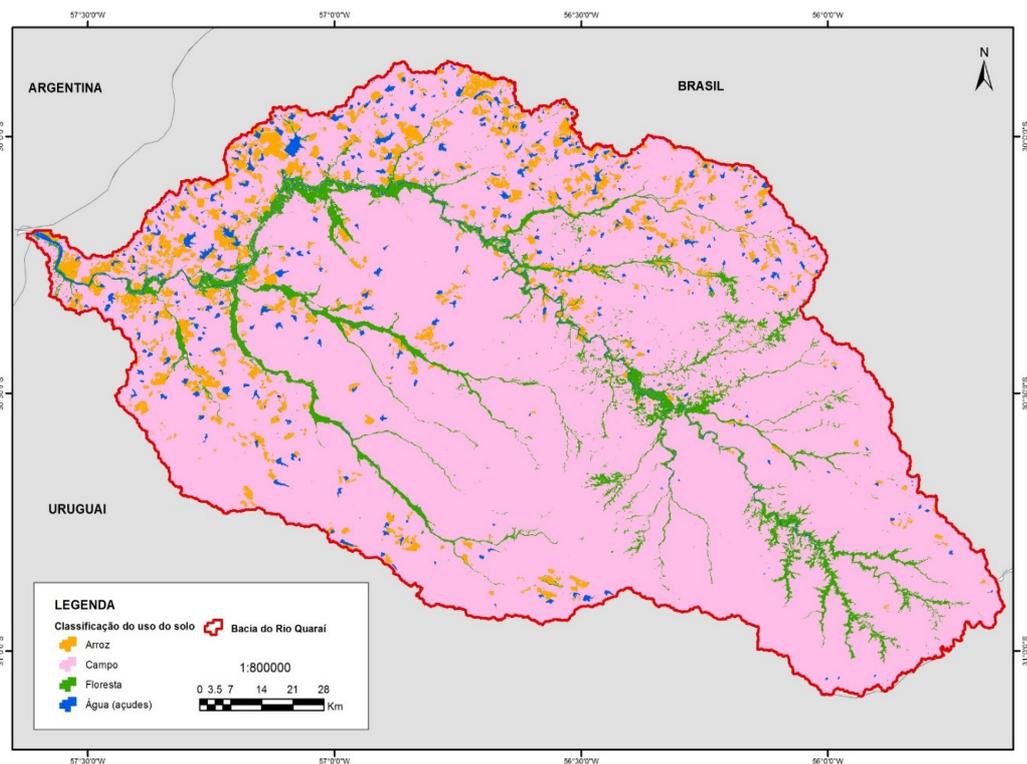


Figura 4.9 – Mapa de vegetação e uso do solo da bacia do Rio Quaraí.

Tabela 4.4 – Distribuição das classes de ocupação do solo na bacia.

Tipo	Área (km ²)	Percentual (%)
Arroz	847	5,8%
Campo	12.673	86,7%
Floresta	895	6,1%
Água (açudes)	207	1,4%
Total	14.623	100,0%

Os tipos de solos da porção brasileira da bacia foram identificados através do trabalho *Solos do Rio Grande do Sul* (STRECK *et. al*, 2002). Já na parte uruguaia, utilizou-se um mapa com o levantamento de todos os tipos de solo do território uruguaio, produzido pelo *Ministerio de Ganaderia, Agricultura y Pesca*. (MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, 1976). Os mapas de cada país foram cruzados, mantendo-se a nomenclatura do tipo de solo em cada país, e o resultado deste cruzamento pode ser visto na Figura 4.10.

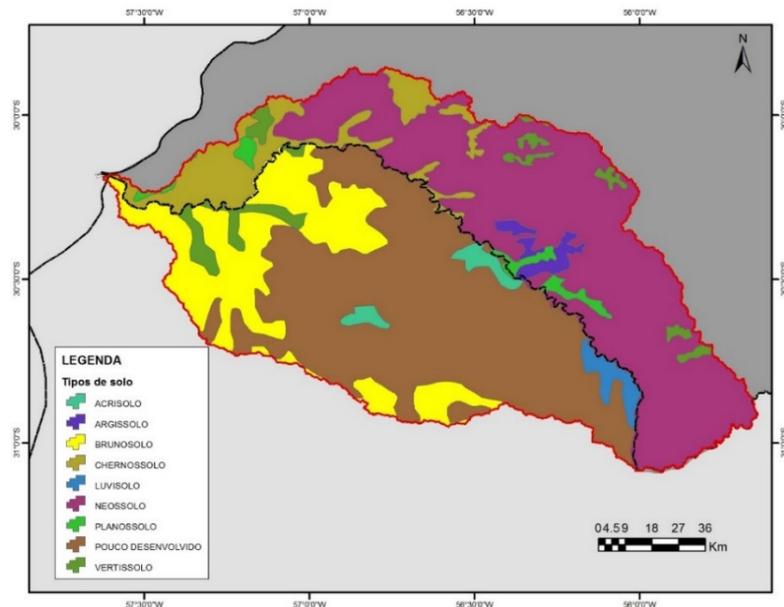


Figura 4.10 - Mapa com a classificação de tipo de solo nas porções brasileira e uruguaia da bacia.

O mapa de tipos de solo é utilizado na elaboração do modelo hidrológico MGB-IPH, num cruzamento com os dados de uso e ocupação da terra. Para a aplicação no modelo os tipos de solos foram reagrupados em 3 classes, de acordo com o comportamento hidrológico esperado: solos profundos; solos rasos e solos de várzea (Figura 4.11).

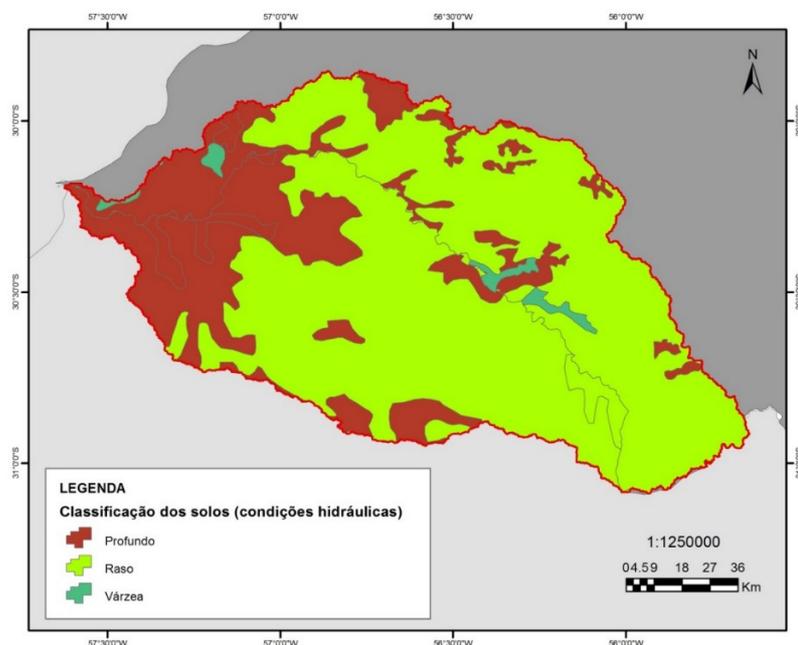


Figura 4.11 – Classificação do tipo de solo a partir das condições hidráulicas.

Por fim, o cruzamento do mapa de uso e ocupação do solo com o mapa de tipos de solo resulta num mapa com as chamadas Unidades de Resposta Hidrológica, correspondente a feições da bacia com características hidrológicas semelhantes. Foram definidos oito unidades, a saber: arroz (solos profundo e raso), campo (solos profundo, raso e várzea),

floresta (solos profundo e raso) e água. Estas classes poderão ser calibradas individualmente no modelo hidrológico. A Figura 4.12 apresenta o mapa de Unidades de Resposta Hidrológica, sendo um dos dados de entrada do modelo MGB-IPH.

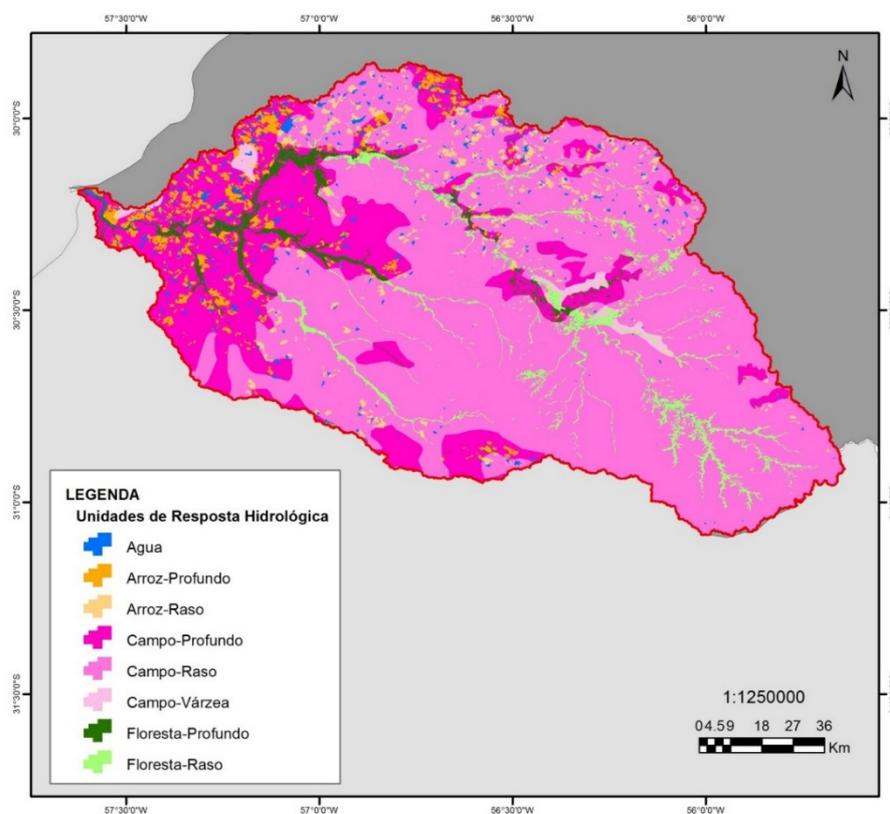


Figura 4.12 - Mapa de classes de comportamento hidrológico na bacia do rio Quaraí, obtido a partir da combinação dos tipos de solos e dos tipos de vegetação e uso da terra.

4.2.3. Discretização da bacia considerando os reservatórios a serem simulados

A discretização espacial da bacia do rio Quaraí a ser aplicada no modelo MGB-IPH e também no modelo de simulação de reservatórios é realizada utilizando como ponto de partida o modelo digital de elevação (MDE), que representa o relevo da região em que está a bacia hidrográfica analisada. A discretização da bacia consiste na divisão da bacia hidrográfica em unidades menores, denominadas de mini-bacias. As mini-bacias são bacias hidrográficas independentes e são delimitadas com base no relevo (MDE), utilizando as ferramentas do ArcHydro, que é um módulo de análise hidrológica do software ArcGIS.

No presente trabalho foi utilizado o MDE do Rio Grande do Sul, disponibilizado pelo Laboratório de Geoprocessamento do Centro de Ecologia da UFRGS (WEBER, HASENACK e FERREIRA, 2004). Este MDE disponibilizado pelo LabGeo da UFRGS é derivado do levantamento realizado em 2000 pela NASA e pela agência espacial japonesa, denominado SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). A resolução espacial aproximada do MDE do

SRTM tanto na versão original como na versão disponibilizada pelo LabGeo é de cerca de 90 m.

As etapas da discretização são: 1) recondicionar o MDE utilizando a rede de drenagem vetorial; 2) calcular direções de escoamento, área de drenagem, e rede de drenagem; 3) segmentar trechos de rede de drenagem; 4) definir mini-bacias que drenam para os trechos individuais de drenagem; 5) calcular as propriedades das mini-bacias e gerar o arquivo de entrada para o MGB-IPH.

Antes de prosseguir com a discretização, definiu-se o número de açudes a serem incluídos na simulação de reservatórios, pois os exutórios das mini-bacias devem coincidir com a saída dos mesmos. No total, serão simulados 183 reservatórios com área superficial acima de 10 ha. O item 4.3 é reservado para a apresentação dos açudes a serem inseridos no sistema, bem como da estimativa do volume armazenado por eles. Assim, a partir da discretização definida pelo ArcHydro, com a divisão da bacia em 1079 unidades e com área de drenagem sempre inferior a 100 km², realizou-se a fragmentação de algumas mini-bacias, de forma que os exutórios dos açudes coincidissem com elas. As áreas de drenagem dos postos fluviométricos também foram incluídas para que fossem obtidas mini-bacias nos locais. Como resultado final, foram geradas no total 1314 mini-bacias, sendo apresentadas na Figura 4.13, destacando as áreas de drenagem dos açudes incluídos na simulação.

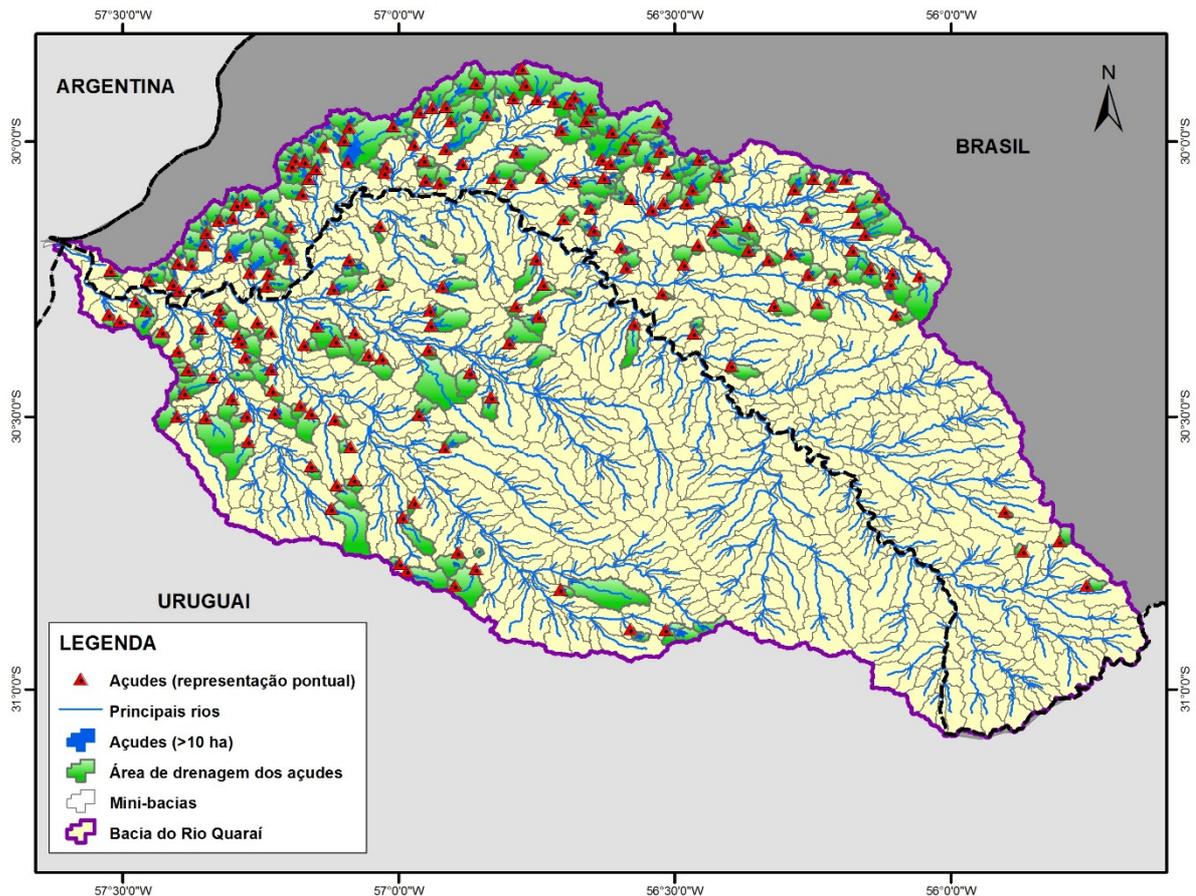


Figura 4.13 - Resultado do processo de discretização da bacia do Rio Quaraí, incluído as áreas de drenagem dos açudes.

4.2.4. Calibração do modelo e resultados

O modelo foi calibrado utilizando o posto fluviométrico de Quaraí (posto 77500000), além do posto de Javier de Viana, na porção uruguaia. O posto de Artigas foi utilizado somente para fins de validação. Desprezou-se os efeitos das retiradas de água das lavouras de arroz devido ao fato de que a maior parte dos polígonos está situada à jusante dos postos. Desse modo, o resultado gerado pelo modelo chuva-vazão corresponde ao cenário natural, sem a interferência humana devido ao efeito da irrigação. O período de calibração corresponde aos anos de 1985 a 2005, levando-se em conta o período com dados observados disponíveis na forma consistida no posto fluviométrico de Quaraí. Na Tabela 4.5 encontram-se os valores calibrados dos parâmetros de propagação nas células, e na Tabela 4.6, os valores dos parâmetros calibrados para cada um dos blocos.

Tabela 4.5 - Valores calibrados dos parâmetros de propagação nas células

Sub-bacias	CS (-)	CI (-)	CB (horas)	QB (m ³ /s.km ²)
todas	17,56	63,54	2972	0,01

Tabela 4.6 - Valores calibrados dos parâmetros associados aos blocos.

Parâmetros Blocos	W _m (mm)	b (-)	K _{bas} (mm.dia ⁻¹)	K _{int} (mm.dia ⁻¹)	XL	CAP	W _c
Floresta - solo raso	236,2	0,07	0,09	26,85	0,67	0	0,1
Floresta - solo profundo	253,0	0,07	0,09	26,85	0,67	0	0,1
Campo/agricultura - solo raso	61,9	0,07	0,09	26,85	0,67	0	0,1
Campo/agricultura - solo profundo	246,8	0,07	0,09	26,85	0,67	0	0,1

A qualidade da calibração do modelo é avaliada comparando as vazões calculadas com as vazões observadas nos postos fluviométricos. Esta comparação pode ser realizada de forma visual, utilizando gráficos com os hidrogramas observados e calculados em diversos locais, ou usando avaliações estatísticas, que normalmente são mais objetivas.

No caso da bacia do rio Quaraí, a calibração foi avaliada num primeiro momento utilizando métodos visuais e análises estatísticas. Os métodos visuais foram aplicados tanto na comparação de hidrogramas como na comparação de curvas de permanência. Em seguida, aplicou-se uma metodologia de calibração automática utilizando o algoritmo MOCOM-UA (*Multi-Objective Complex Evolution Method – University of Arizona*, YAPO et al., 1998). O algoritmo permite a otimização de mais de uma função-objetivo, correspondentes às variáveis estatísticas que visam comparar os valores observados e calculados. As funções objetivo avaliadas foram a minimização do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões, (Eq. 4.1); o erro de volume (Eq. 4.2); e o erro na estimativa da Q₉₀ (Eq. 4.3). O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (Eq. 4.4) foi utilizado de modo qualitativo na análise.

$$e_{log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\ln(QC_i) - \ln(QO_i))^2}{\sum_{i=1}^N (\ln(QO_i) - \overline{\ln(QO_i)})^2} \quad (4.1)$$

$$\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^N QC_i - \sum_{i=1}^N QO_i}{\sum_{i=1}^N QO_i} \quad (4.2)$$

$$\Delta Q_{90} = \frac{QC_{90} - QO_{90}}{QO_{90}} \quad (4.3)$$

$$e = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (QC_i - QO_i)^2}{\sum_{i=1}^N (QO_i - \overline{QO_i})^2} \quad (4.4)$$

Onde i é um dia da série calculada e observada; QC_i é a vazão calculada neste dia; QO_i é a vazão observada neste dia; N é o número total de dias que existe na série de dados; QC_{90} é a Q_{90} calculada e QO_{90} é a Q_{90} observada. A Tabela 4.7 apresenta os valores obtidos a partir da calibração manual utilizando os parâmetros descritos anteriormente

Tabela 4.7 – Valores das análises estatísticas aplicadas em cada posto fluviométrico.

Posto Fluviométrico	e	e_{log}	ΔV (%)	Q_{90} observada (m ³ /s)	Q_{90} calculada (m ³ /s)	ΔQ_{90} (%)
Quaraí	0,510	0,738	-1,217	1,696	1,708	0,71%
Javier de Viana	0,328	0,484	-0,512	0,149	0,150	0,67%

A avaliação visual da calibração foi realizada ainda a partir da comparação das curvas de permanência geradas com os dados observados e com os dados de vazão calculados. As figuras a partir da Figura 4.14 apresentam os resultados da calibração do modelo em termos da representação da curva de permanência das vazões.

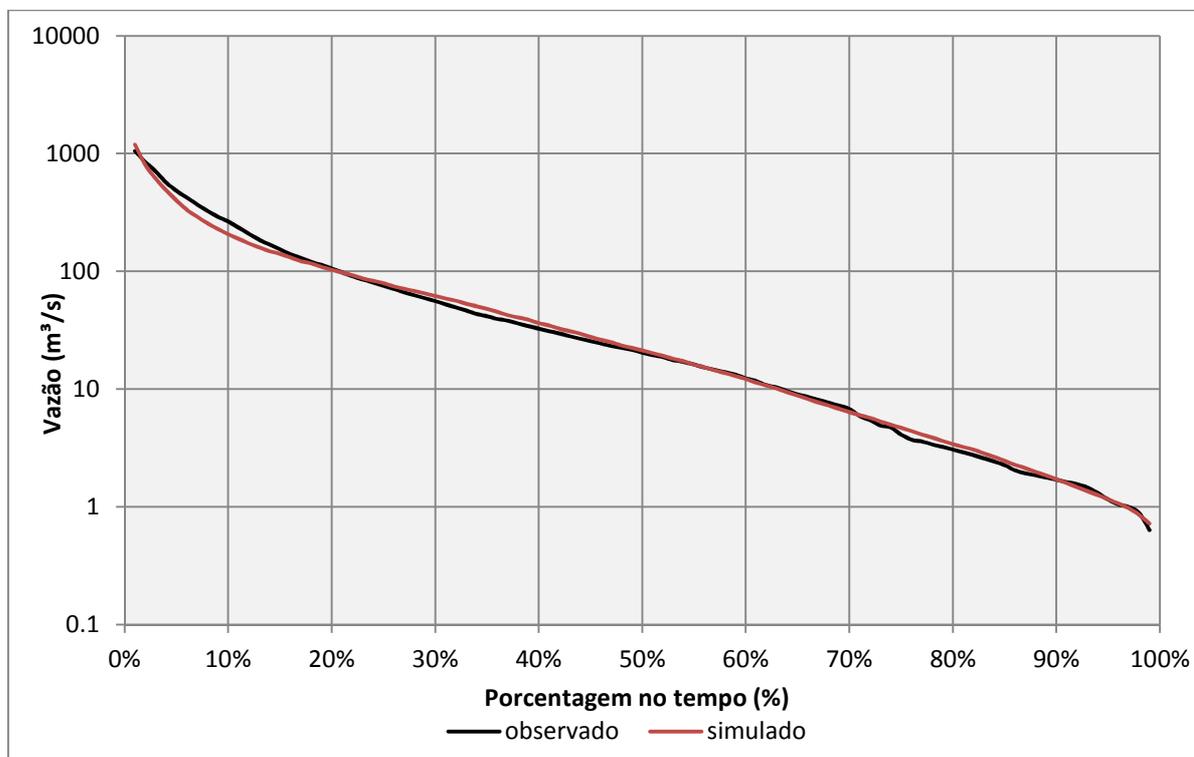


Figura 4.14 - Curva de permanência das vazões observadas e calculadas no rio Quaraí, no posto fluviométrico Quaraí (77500000), no período de 1985 a 2005.

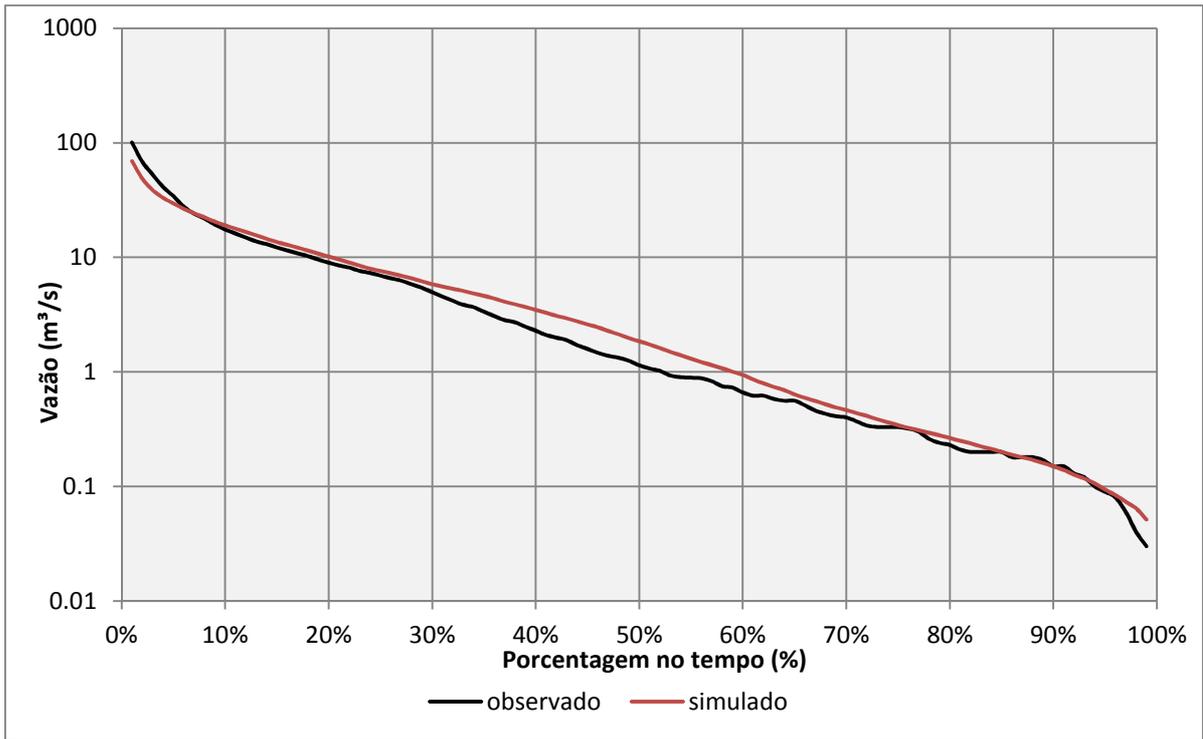


Figura 4.15 - Curva de permanência das vazões observadas e calculadas no Arroio Tres Cruces, no posto fluviométrico Javier de Viana (Uruguai), no período de 1985 a 2005.

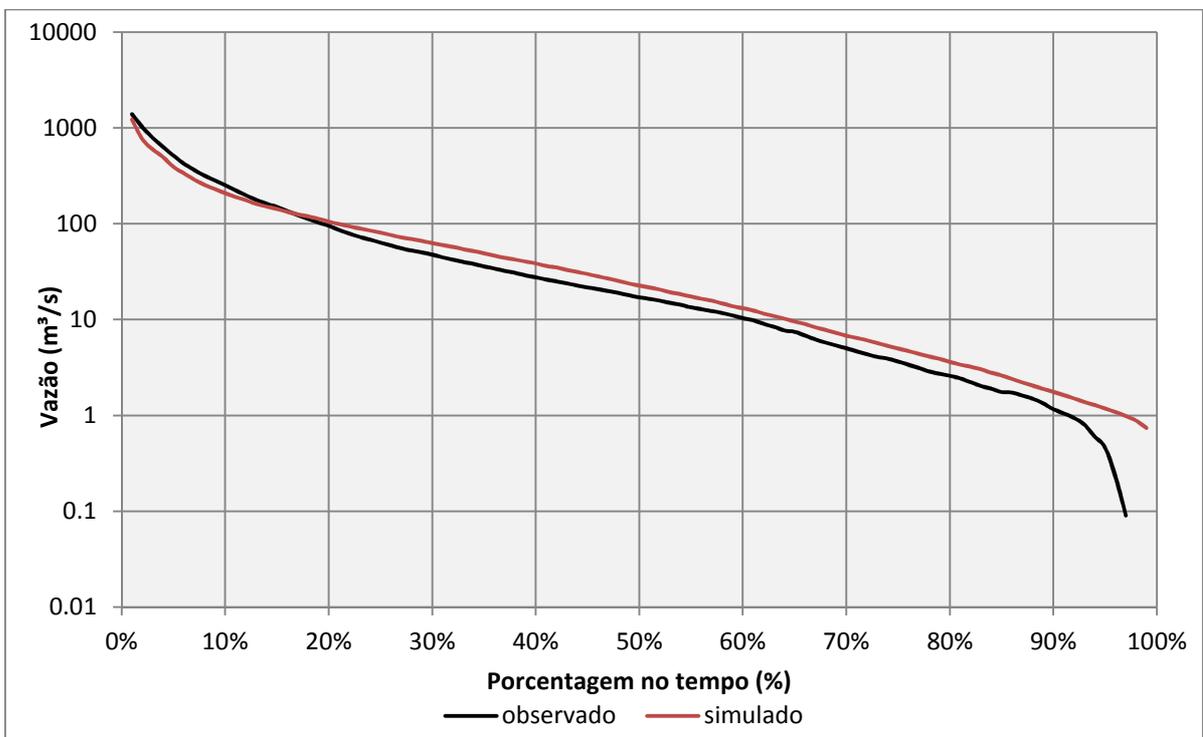


Figura 4.16 - Curva de permanência das vazões observadas e calculadas no Rio Quarai, no posto fluviométrico de Artigas (Uruguai), no período de 1985 a 2005 (validação).

A Figura 4.17 e a Figura 4.18 apresentam hidrogramas observados e calculados num período de dois anos para os postos de Javier de Viana e Quaraí, respectivamente. O gráfico de Javier de Viana está com o eixo vertical em escala logarítmica para destacar as vazões mínimas. Para este gráfico, as vazões calculadas seguem razoavelmente a tendência das vazões simuladas, com uma tendência de superestimar as mínimas no período de inverno e subestimá-las no período de verão. Com relação à Figura 4.18, observa-se um bom ajuste entre os valores observados e calculados, ainda que em alguns picos os valores sejam subestimados e em outros superestimados.

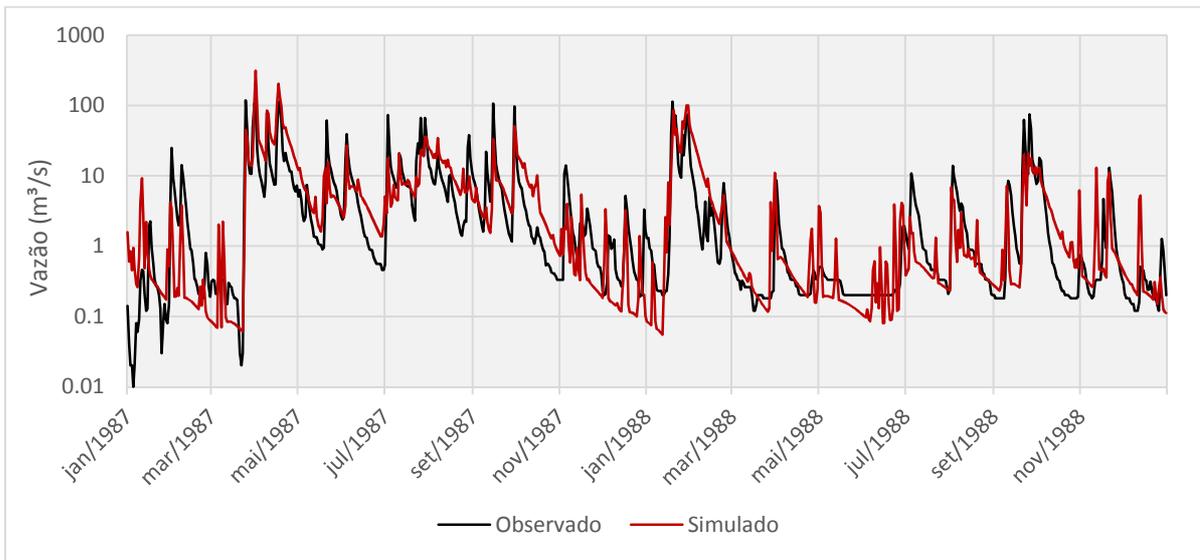


Figura 4.17 - Hidrogramas observado (preto) e calculado (vermelho) no arroio Tres Cruces (posto Javier de Viana) no período de 1987 a 1988 (em escala vertical logarítmica para destacar vazões mínimas).

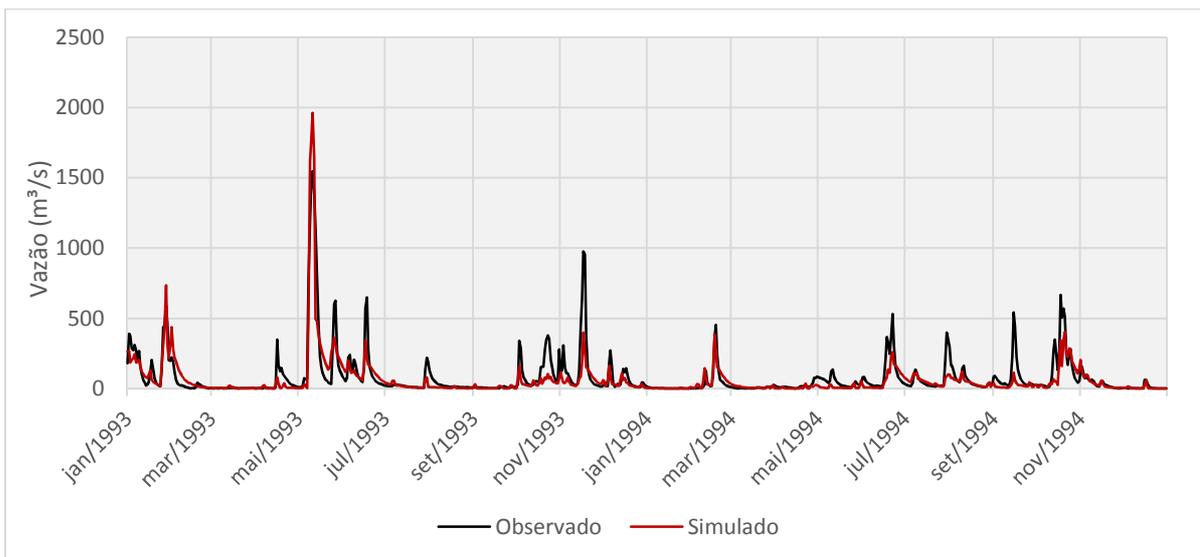


Figura 4.18 - Hidrogramas observado (preto) e calculado (vermelho) do rio Quaraí (posto Quaraí) no período de 1993 a 1994.

A Figura 4.19 apresenta um mapa com a disponibilidade hídrica resultante do processo de simulação hidrológica para o cenário de vazão com 90% de permanência. Observa-se que a grande maioria dos açudes possuem vazões de montante muito baixas, justificando-se a necessidade de reservação de água para atendimento das demandas da irrigação do arroz.

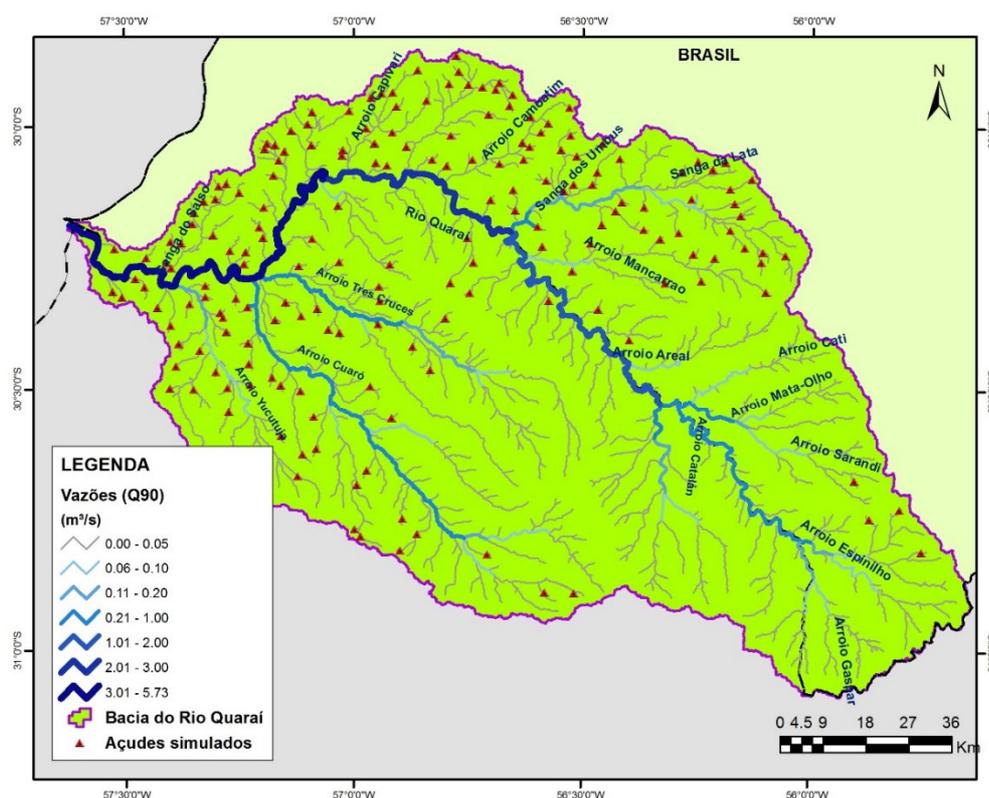
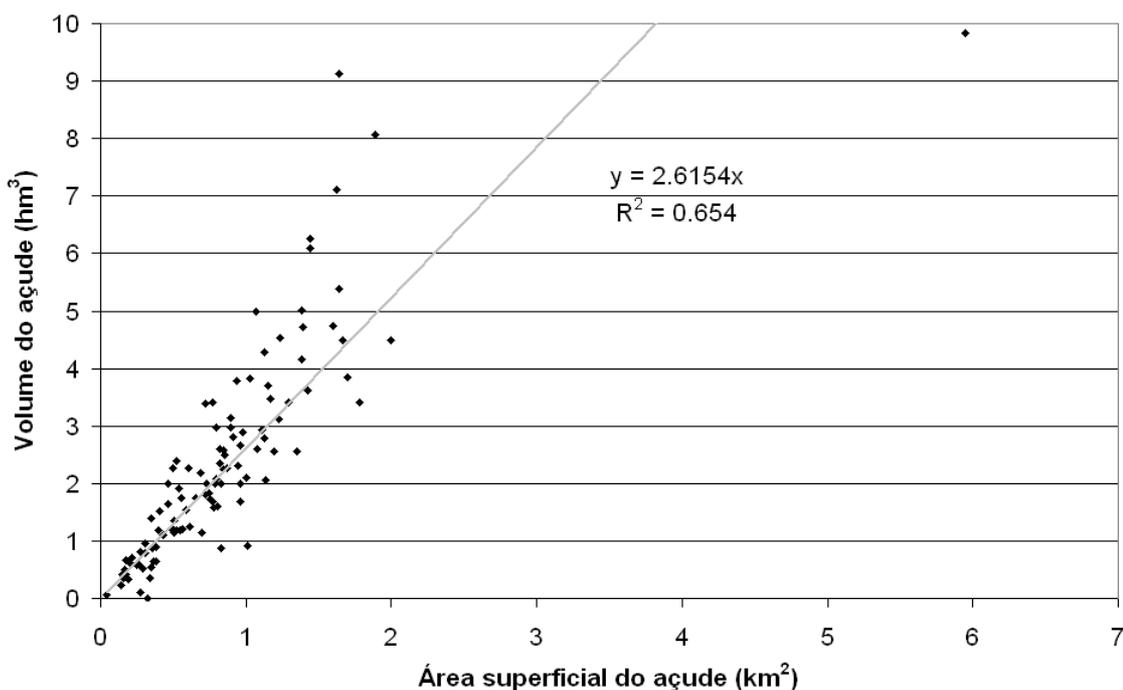


Figura 4.19 - Disponibilidade hídrica na bacia do rio Quaraí: cenário natural e permanência referente à Q90.

4.3.DISPONIBILIDADE HÍDRICA ARMAZENADA NOS AÇUDES

O levantamento das áreas superficiais dos açudes da bacia foi realizado na etapa de classificação das imagens de satélite. Como as imagens datam de setembro e dezembro, ou seja, apenas no início da temporada de irrigação, considerou-se que os açudes estivessem em sua máxima capacidade.

Com relação aos volumes armazenados, praticamente não existem dados relativos aos volumes ou às relações cota-área-volume. COLLISCHONN, *et al.* (2011), através do projeto Twinlatin, desenvolveram uma equação de regressão linear entre os dados de área e de volume máximo dos 108 reservatórios com informações disponíveis, a maior parte delas encontrada na porção uruguaia da bacia, através de um trabalho de cooperação com a Dirección Nacional de Hidrografia (DNH) do Uruguai, sendo apresentada na Figura 4.20.



un

Figura 4.20 - Ajuste linear entre volume e área superficial de açudes cadastrados junto ao DRH-RS e à DNH (fonte: COLLISCHONN et al., 2011).

A partir do levantamento das áreas de espelhos d'água levantadas por satélite, e aplicando a relação apresentada anteriormente, foram obtidas as novas estimativas de volumes armazenados de acordo com a classificação mais atual de imagens. Para inserção no modelo de simulação de reservatórios, foi definido um limite mínimo de 10 ha, restando em 183 reservatórios, ou ainda combinações de pequenos espelhos d'água localizados proximamente. Os reservatórios foram separados por sub-bacia, sendo quantificados os volumes armazenados em cada região (Tabela 4.8 e Figura 4.21).

Tabela 4.8 - Estimativa de volumes máximos armazenados por sub-bacia.

Sub-bacia	Região	Volume (hm³)
Guapitangui / Capivari	Brasil	72,92
Salso / Salsinho	Brasil	68,63
Garupa	Brasil	68,59
Caiboaté / Camoatim	Brasil	43,96
Quaraí-Mirim	Brasil	8,36
Sarandi / Areal	Brasil	2,87
Espinilho	Brasil	2,71
Baixo Quaraí	Misto	20,18
Médio Quaraí	Misto	6,98
Alto Quaraí	Misto	0,00
Invernada	Misto	0,00

Cuaró	Uruguai	49,18
Yucutuja	Uruguai	36,27
Tres Cruces	Uruguai	22,40
Catalán	Uruguai	0,00
Total	-	403,04

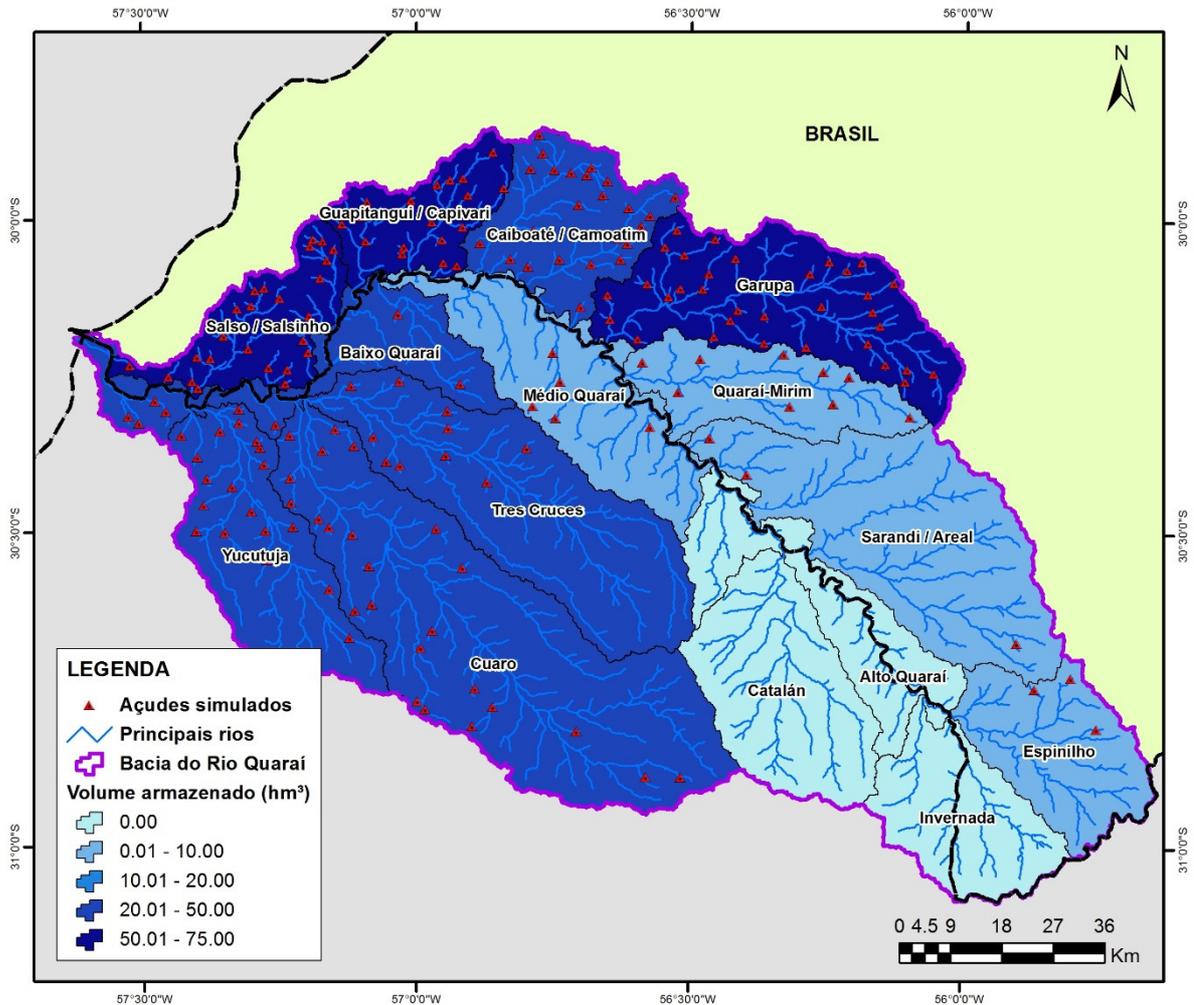


Figura 4.21 - Identificação dos açudes a serem simulados e do volume máximo armazenado em cada sub-bacia.

4.4.DEMANDAS HÍDRICAS E SITUAÇÃO DAS OUTORGAS NA MARGEM DIREITA DA BACIA

4.4.1. Estimativa das demandas da irrigação por imagens de satélite

Para a delimitação dos polígonos das lavouras de arroz sobre a bacia, lançou-se mão das técnicas de sensoriamento remoto, através da classificação de imagens de satélite. A classificação realizada foi feita com base em imagens de satélite LANDSAT sensor TM, com resolução de 30 m para as bandas utilizadas. O sensor TM possui sete bandas, com numeração de 1 a 7, sendo que cada banda representa uma faixa do espectro eletromagnético captada pelo

satélite, ou seja, a resposta do solo em uma certa faixa espectral. A Tabela 4.9 apresenta a relação das bandas espectrais abrangidas pelo sensor:

Tabela 4.9 – Relação das bandas espectrais abrangidas pelo sensor TM (fonte: INPE, 2009)

Banda	Faixa Espectral
1	0,45 a 0,52 μm - azul
2	0,52 a 0,60 μm - verde
3	0,63 a 0,69 μm - vermelho
4	0,76 a 0,90 μm - infravermelho próximo
5	1,55 a 1,75 μm - infravermelho médio
6	10,4 a 12,5 μm - infravermelho termal
7	2,08 a 2,35 μm - infravermelho distante

As imagens obtidas pelos sensores eletrônicos, em diferentes bandas ou canais, são individualmente produzidas em preto e branco. A quantidade de energia refletida pelos objetos vai determinar a sua representação nessas imagens em diferentes tons de cinza, entre o branco (quando reflete toda a energia) e o preto (quando absorve toda a energia). Ao projetar e sobrepor essas imagens, através de um filtro colorido azul, verde e vermelho (cores primárias), é possível gerar imagens coloridas, facilitando a análise e o reconhecimento das feições do solo. Desse modo, foi realizada uma composição de imagens utilizando as bandas 4, 5 e 3, associando respectivamente às cores vermelho (R), verde (G) e azul (B), obtendo-se uma boa discriminação entre as feições de floresta e área irrigada.

Segundo COLLISCHONN e COLLISCHONN (2009) e MOREIRA (2003), a aquisição de imagens em áreas de predominância agrícola deve ser de datas referentes aos diferentes ciclos de plantio, com o intuito de facilitar a diferenciação dos tipos de manejo presentes no local. Caso contrário, a classificação poderia conduzir a uma incerteza muito grande, uma vez que lavouras de arroz são facilmente confundidas com outras superfícies vegetadas, porém uma vez comparado com uma feição de solo de entressafra, se poderia obter uma grande melhora na identificação dos polígonos de plantio.

Dessa forma, uma classificação multitemporal foi realizada, usando-se imagens tanto do período de cultivo (nov-mar), safra 2010/2011, como do período de entressafra (abr-out), correspondente ao inverno, ano de 2010. Foram obtidas imagens com Órbitas-Ponto 224-081 e 225-081 por meio do catálogo do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para a cobertura de 100% da bacia do Quaraí. Desta forma, obteve-se um número efetivo de 6 bandas espectrais. Antes de proceder à classificação de imagens, estas tiveram que ser georreferenciadas, uma vez que as imagens Landsat apresentam um desvio devido a atividade solar intensa. As imagens foram georreferenciadas com base na rede hidrográfica digitalizada

disponível. A Figura 4.22 e a Figura 4.23 apresentam os resultados da união das imagens para cada período considerado.

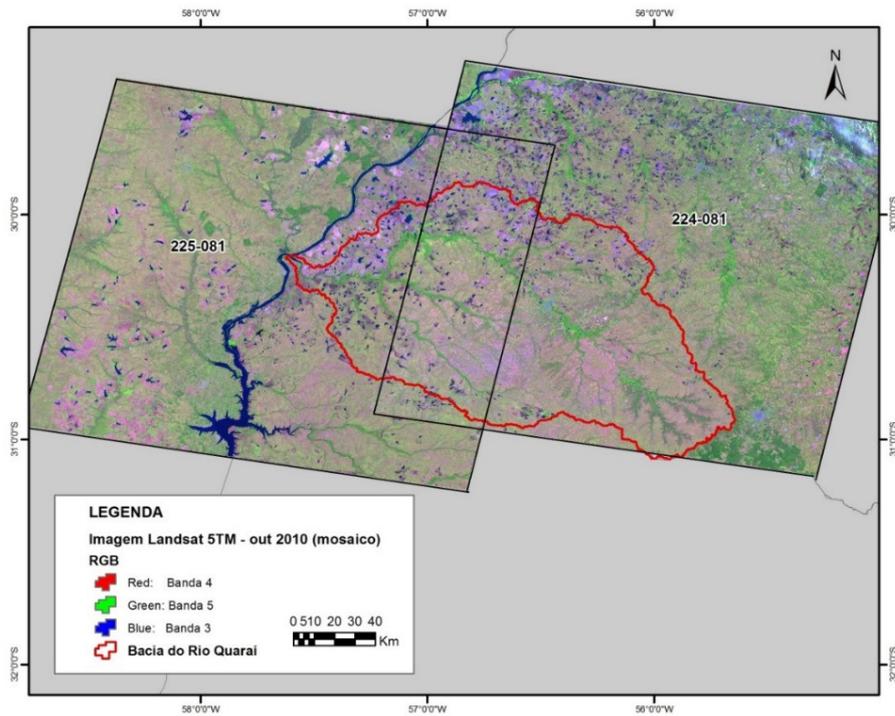


Figura 4.22 - Mosaico formado pelas imagens LANDSAT TM 224-081 e 225-01 no período de outubro de 2010 (entressafra).

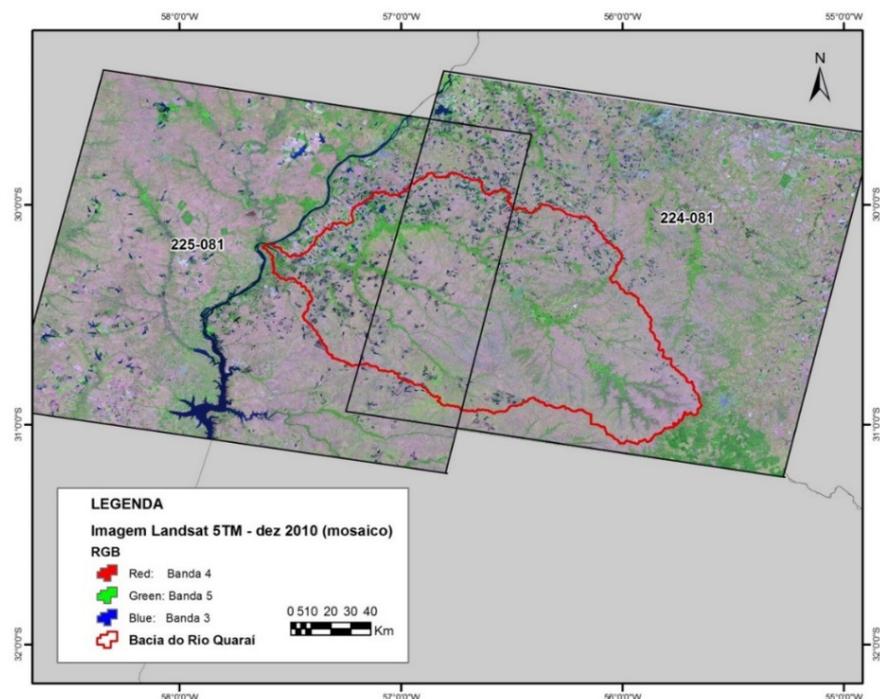


Figura 4.23 - Mosaico formado pelas imagens LANDSAT TM 224-081 e 225-01 no período de dezembro de 2010 (período de cultivo).

Uma vez georreferenciadas, amostras de uso do solo foram tomadas, sendo classificadas em água, pastagem/campo, floresta e lavouras de arroz. As áreas urbanas não

foram classificadas devido à sua pequena participação em termos de área na bacia, e também por ter uma grande variabilidade de padrão de reflectância. As assinaturas espectrais foram então geradas e as imagens foram classificadas através de um procedimento de máxima verossimilhança, através de um ambiente SIG. A área classificada extrapolou os limites da bacia, estendendo-se até os limites dos quatro municípios que fazem parte da mesma. O objetivo desta análise é comparar os valores de área semeada obtida na classificação com os dados obtidos pelo Instituto Rio Grandense de Arroz (IRGA), que publica anualmente um relatório com a produtividade da cultura em cada município do Estado do Rio Grande do Sul.

A Figura 4.24 apresenta o resultado final do processo de identificação das áreas de cultivo da cultura do arroz na bacia do rio Quaraí e nos municípios gaúchos adjacentes. Em seguida, apresenta-se a Tabela 4.10 com o comparativo entre os dados obtidos no IRGA para as safras de 2010/2011 e 2012/2013 para a totalidade dos municípios de Uruguaiana, Quaraí, Barra do Quaraí, Santana do Livramento e do departamento uruguaio de Artigas, além dos valores estimados a partir da classificação de imagens, sabendo-se que as imagens correspondem à safra de 2010/2011.

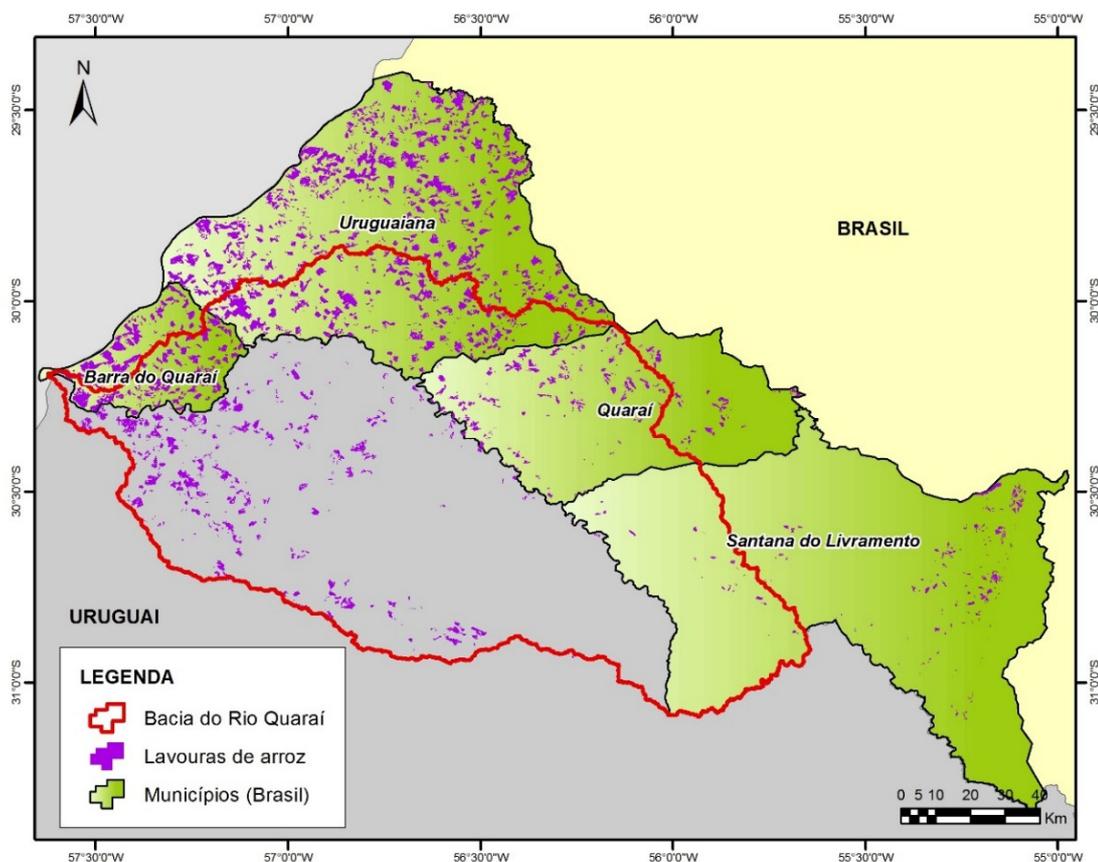


Figura 4.24 - Resultado da classificação das imagens de satélite, obtendo-se a delimitação dos polígonos de arroz para a bacia do Quaraí e municípios da bacia.

Tabela 4.10 - Comparativo entre os valores de área cultivada de arroz fornecidos pelo IRGA e estimados por satélite.

Município	Área semeada/colhida (ha)		Área estimada por satélite (ha) (safra 2010-11)	Área estimada na bacia (2010-11)
	Safra 2010-11	Safra 2012-13		
Barra do Quaraí	22.842	21.560	22.263	13.256
Quaraí	12.705	11.279	11.784	9.323
Santana do Livramento	11.820	8.583	6.021	937
Uruguaiana	85.054	81.414	88.001	26.334
Artigas (Uruguai)	31.491	27.598	23.914	23.914
Total	163.912	150.434	151.983	73.764

* foi considerada a apenas a proporção do departamento dentro do limite da bacia (66% do total)

A Figura 4.25 apresenta a evolução das áreas de cultivo de arroz, considerando os municípios brasileiros e o departamento uruguaio. As informações foram obtidas a partir dos dados do IBGE para a série orizícola dos municípios brasileiros (IBGE, 2014), além do sítio eletrônico da Asociación de Cultivadores de Arroz no Uruguai (ACA, 2014). Observa-se que a partir de 1997 há uma tendência de estabilização do valor de área total cultivada na bacia, girando em torno de 70.000 ha considerando as duas margens da bacia.

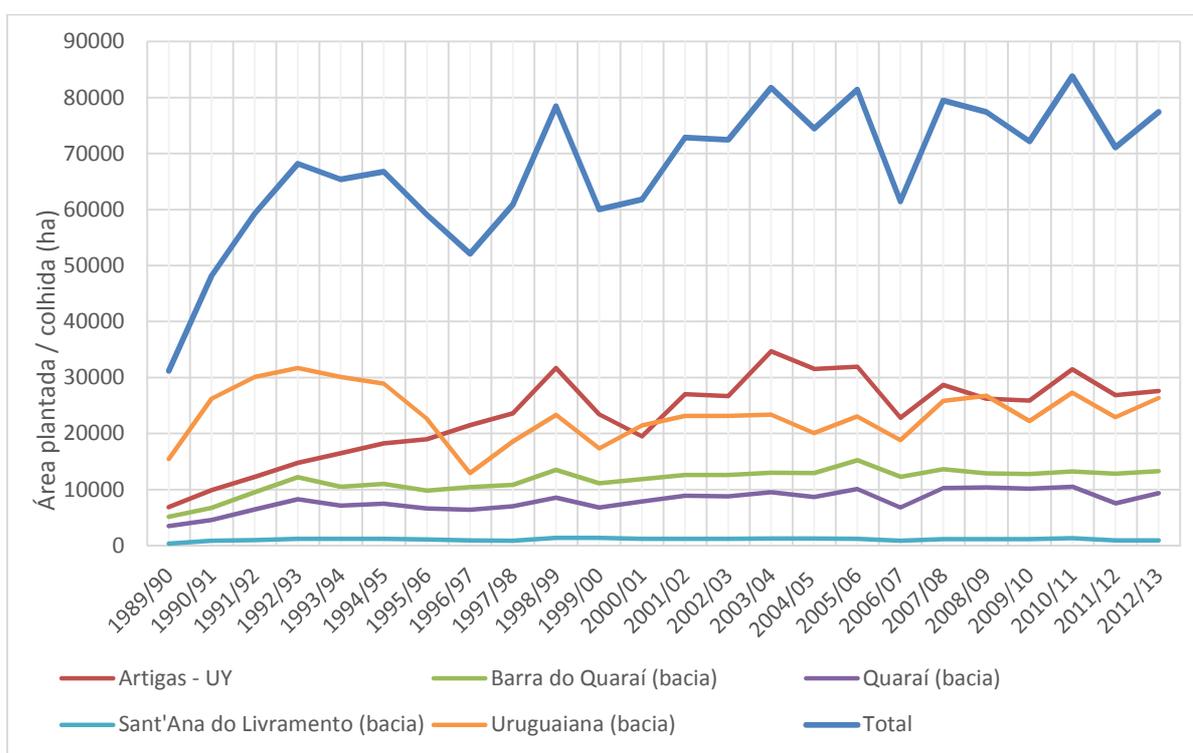


Figura 4.25 - Evolução das áreas orizícolas ao longo das safras de 1990 a 2013 cultivadas na bacia do rio Quaraí.

As estimativas de necessidade hídrica das plantações de arroz irrigado por inundação são muito variáveis, dependendo do tipo de manejo, das perdas por retorno e das características do solo e do clima da região. FORGIARINI *et al.* (2008) sugerem valores de consumo de 8.500 a 10.500 m³/ha.ano para o cultivo de arroz no Rio Grande do Sul, sendo que este valor pode variar de acordo com o tipo de manejo, das perdas por retorno e das características do solo e do clima da região. Neste trabalho adotou-se o valor de 10.000 m³/ha.safra, considerando a safra com uma duração de 100 dias, iniciando-se sempre no início do mês de novembro e terminando em meados de fevereiro. Dessa forma, a vazão demandada máxima em cada lavoura e em cada mês será proporcional ao número de dias irrigados no período.

A distribuição do volume utilizado não é constante devido de que o período de irrigação não ocorre necessariamente ao mesmo tempo em todas as lavouras. Ao invés disso, adota-se uma proporção para cada um dos quatro meses do período de irrigação, correspondendo à probabilidade da captação estar ocorrendo naquele mês. A Tabela 4.11 apresenta a distribuição do volume demandado por mês, além do número de dias irrigados por mês, dado importante para a conversão dos valores de volume em vazão de demanda por mês.

Tabela 4.11 - Distribuição do volume de água demandado durante o período de irrigação

Mês	Perc. Volume demandado	Número de dias irrigados por mês
Novembro	20%	30
Dezembro	40%	31
Janeiro	35%	31
Fevereiro	5%	8
Total	100%	100

A partir dos polígonos de arroz obtidos por imagens de satélite, foram gerados pontos que representam estes polígonos, ou ainda junções de pequenas lavouras, resultando em 300 pontos que representam os usuários de água do sistema hídrico. Realizou-se a estimativa das demandas de cada ponto, a partir dos valores de área e da relação de volume irrigado por hectare. A Figura 4.26 apresenta a localização de cada ponto na bacia, sendo a distribuição dos valores demandados apresentados tanto em cada ponto, quanto o seu somatório nas sub-bacias. Os 300 pontos de demanda abrangem uma área irrigada de 70635.36 hectares, correspondendo a uma demanda total de 81.67 m³/s no mês de maior consumo. As sub-bacias do arroio Salso, Salsinho, Guapitangui, Capivari, Caiboaté, Camoatim e Garupá, todas na

margem direita do Quaraí, concentram a maior parte da demanda na bacia, correspondendo a 47,30 m³/s, ou 57% do total, ainda que o somatório de suas áreas corresponda a cerca de 20% do total de sub-bacias.

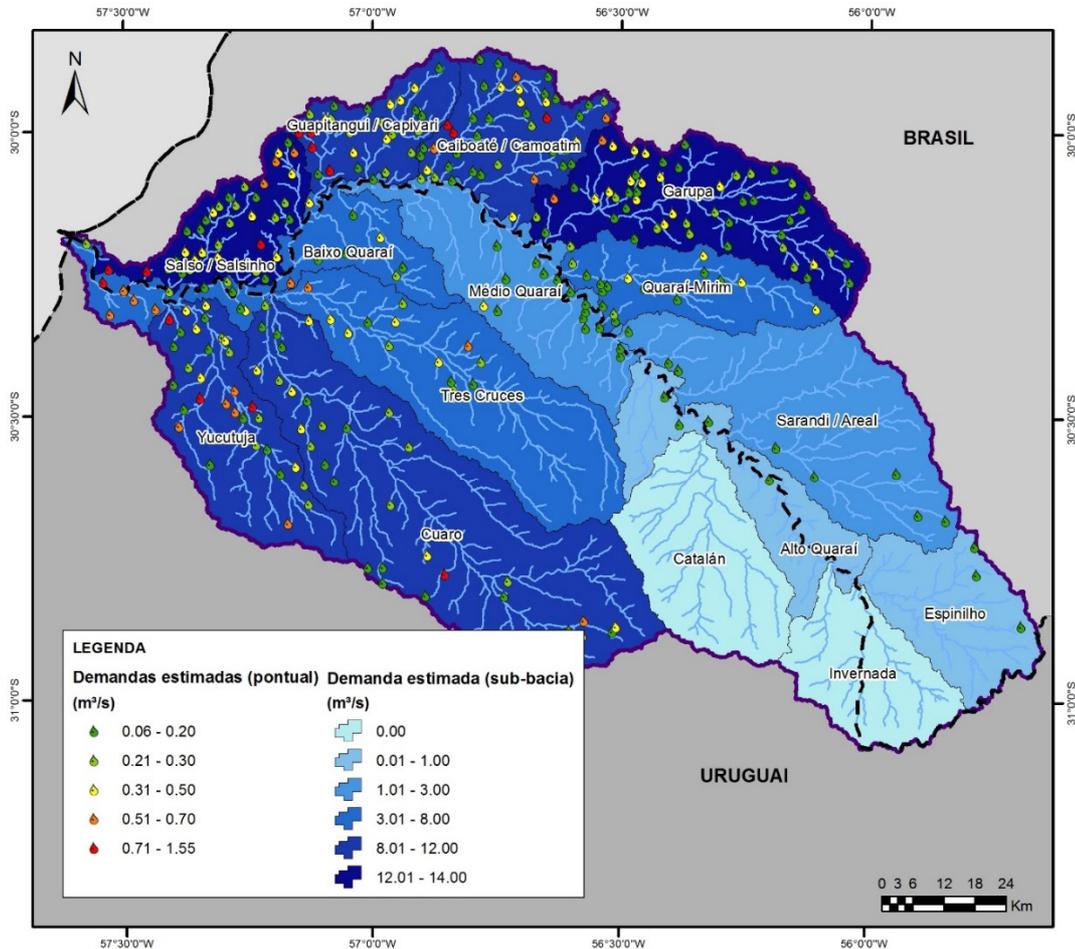


Figura 4.26 – Definição e distribuição dos pontos de demanda de irrigação na bacia do Quaraí, a partir das imagens de satélite.

Para cada um dos 300 pontos de demanda, representado os polígonos de irrigação ou uma associação deles, foram identificadas qual a fonte de água mais provável que poderia abastecê-lo, sendo esta fonte um açude ou um trecho de rio. O critério definido para a associação das demandas aos corpos d’água foi a proximidade, estabelecendo-se inicialmente um critério de associação automática em ambiente SIG, passando posteriormente por uma revisão manual de cada demanda analisada. Procedimento similar foi adotado em (COLLISCHONN *et al.*, 2011), onde se permitiu também que fossem consideradas combinações de diferentes de açudes e trechos de rio a serem disponibilizados por demanda, uma vez que uma determinada fonte secasse a retirada ocorreria na fonte determinada de acordo com uma ordem hierárquica. No presente trabalho, cada demanda pode-se conectar a um único açude, ou então a um trecho de rio e sua respectiva mini-bacia, quando não há

nenhum açude próximo à demanda. Também será analisada a possibilidade de retirada em trecho de rio mais próximo, caso os açudes sequem. Nesse caso, seria necessária a emissão de duas outorgas, uma para o reservatório e outra para o trecho de rio. A Figura 4.27 apresenta a associação das demandas aos açudes e trechos de rio da sub-bacia dos arroios Salso e Salsinho, ocorrendo processo semelhante em toda a bacia. Os polígonos de cultivo normalmente estão localizados ao lado de açudes, sendo bastante provável que estas lavouras se abasteçam destes corpos d'água.

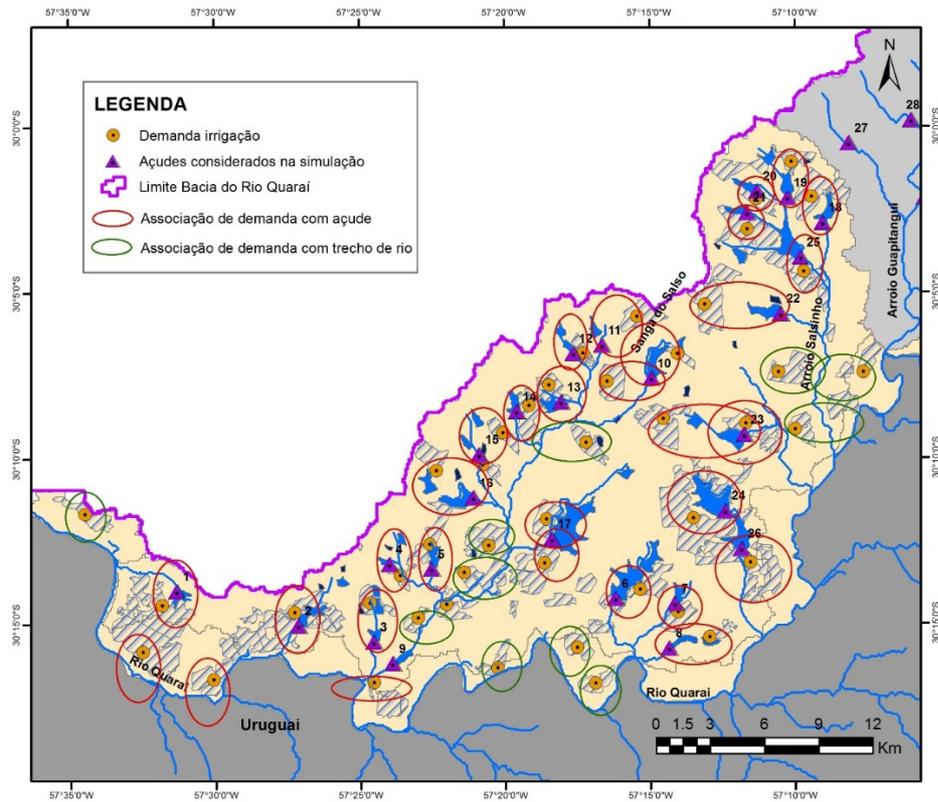


Figura 4.27 – Associação das demandas com os corpos d'água da sub-bacia dos arroios Salso e Salsinho.

4.4.2. Situação das outorgas na bacia e comparação com os valores estimados

Obeve-se junto à Divisão de Outorga do Departamento de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Sul o cadastro das outorgas superficiais deferidas e em análise localizadas na bacia. No cadastro constam informações como número de outorga, número do processo, nome do outorgante, tipo (superficial ou subterrânea), status (deferido ou “em análise”), datas de entrada e saída do processo, vazão requerida, coordenadas, finalidade de uso, nome do corpo hídrico e nome do município. Praticamente 100% dos pedidos referem-se a usos com a finalidade de irrigação. A entrada de pedido mais antiga na bacia conforme o cadastro é de 1999, e a mais recente é de 2014.

A tabela com os dados de todas os processos relacionados à bacia contém 541 registros, destes, 416 com informações de coordenadas geográficas. Deste total, 168 são referentes a pedidos de águas subterrâneas, cujo uso predominante é o consumo humano e o abastecimento público. Dos 248 registros correspondentes às águas superficiais, verificou-se que apenas 178 estavam realmente localizados dentro dos limites da bacia do Quaraí, sendo estes pontos apresentados na Figura 4.28, juntamente com a discriminação do tipo de fonte utilizada.

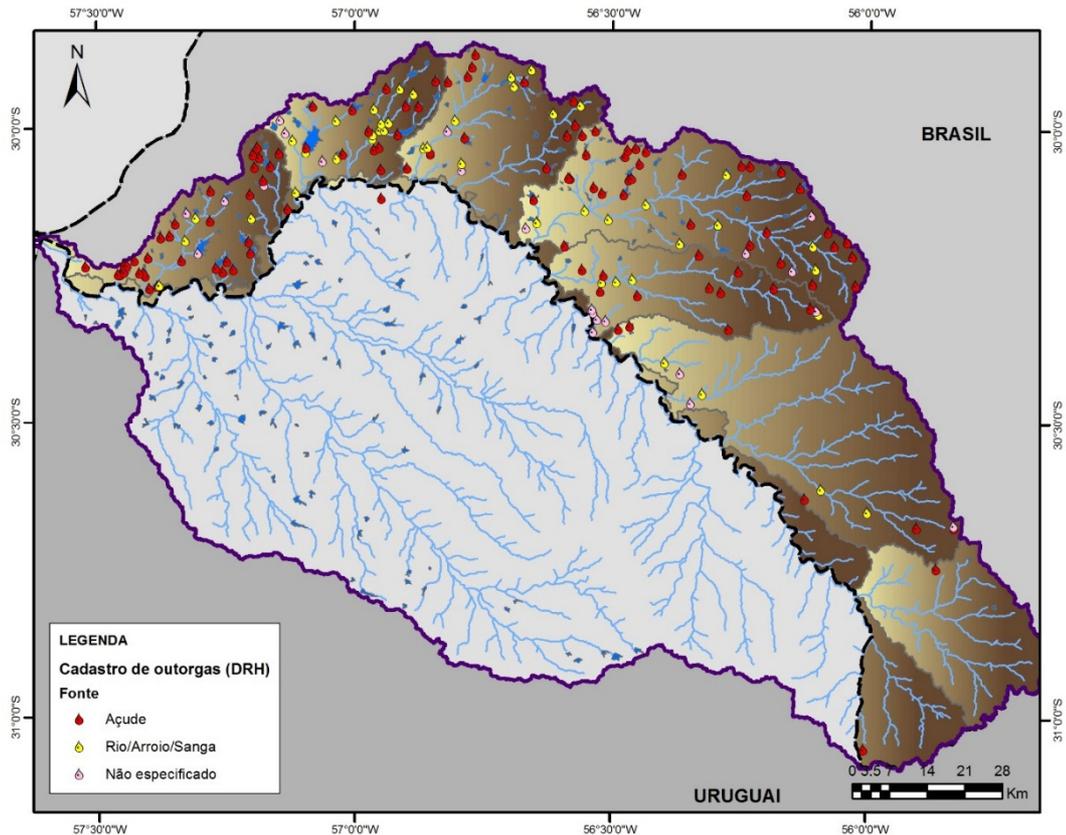


Figura 4.28 - Distribuição dos pontos de outorga de água superficial na bacia do rio Quaraí.

A partir deste ponto, torna-se interessante a comparação entre os valores estimados a partir das imagens de satélite e os valores outorgados, tanto em níveis gerais quanto em relação à associação estabelecida entre as demandas e as fontes utilizadas. A Figura 4.29 apresenta um comparativo entre as demandas obtidas a partir dos polígonos estimados por satélite e também através do cadastro de outorgas do DRH. Em cada sub-bacia é apresentado o somatório das demandas obtidas em ambas as fontes, podendo-se observar uma equivalência bastante razoável entre elas.

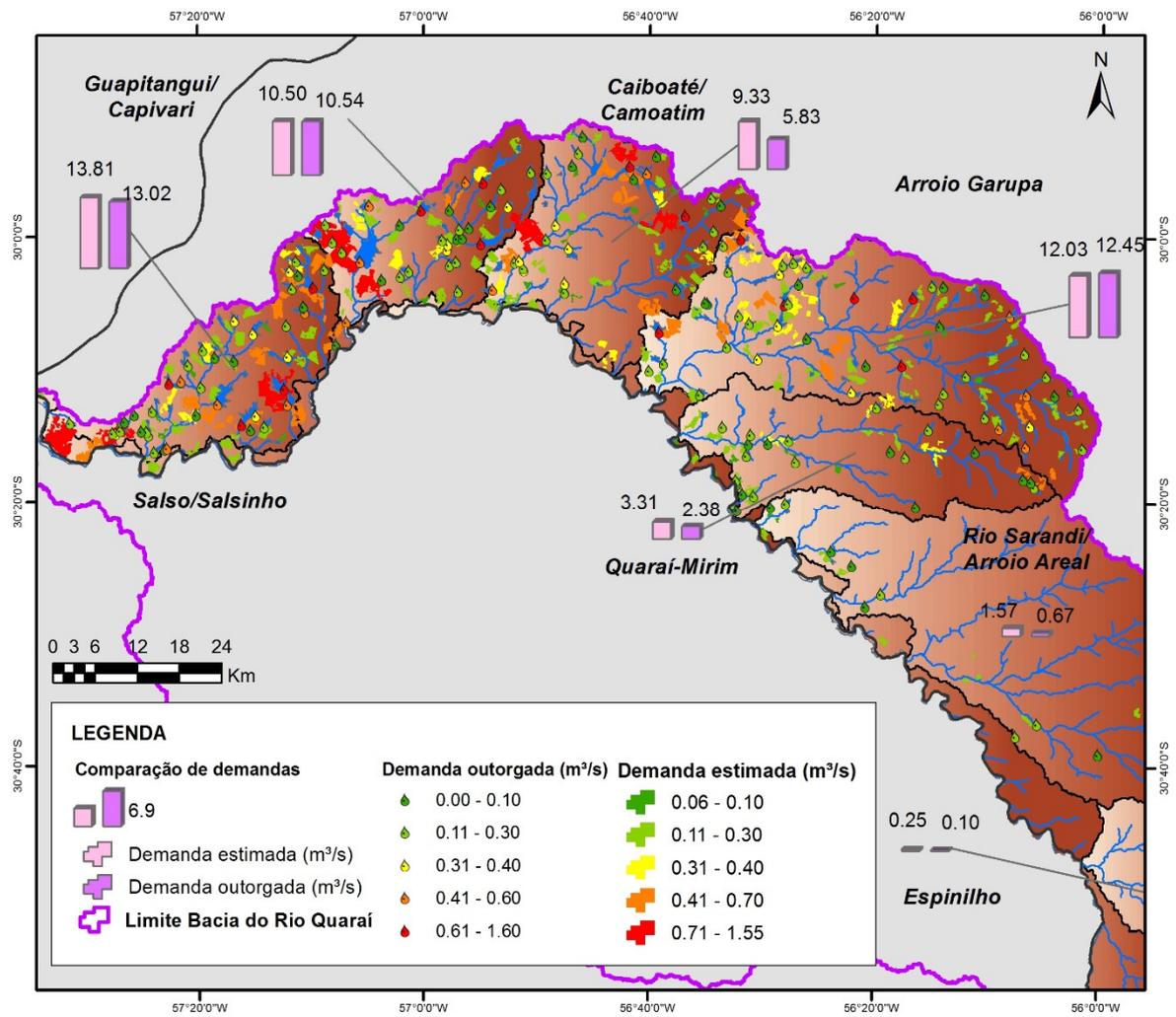


Figura 4.29 - Comparativo entre as demandas estimadas por imagem de satélite e obtidas pelo cadastro de outorgas.

5. RESULTADOS

5.1. SIMULAÇÃO DO MODELO DE RESERVATÓRIOS CONSIDERANDO AS DEMANDAS ATUAIS

5.1.1. Análise da disponibilidade de água por temporada

O modelo de balanço hídrico entre as demandas, trechos de rio e reservatórios foi aplicado na bacia do rio Quaraí considerando o período entre 1985 e 2005. O modelo foi executado com passo de tempo semanal a partir da transformação das séries diárias de vazões calculadas em cada mini-bacia a partir do modelo MGB-IPH. Os resultados serão expressos com base no atendimento às demandas, além da quantidade de água disponível nos rios e reservatórios após as retiradas de água.

Anteriormente à discussão dos resultados, é interessante verificar as características dos períodos simulados, identificando os anos mais secos e mais úmidos, para que então seja possível expressar os resultados em termo destes períodos característicos. Uma vez que as demandas da rizicultura ocorrem somente no período de novembro a fevereiro, analisou-se o tempo de permanência médio mensal destes meses para cada temporada de irrigação, considerando a série de vazões calculada para o posto fluviométrico de Quaraí, apresentando-se os resultados na Figura 5.1.

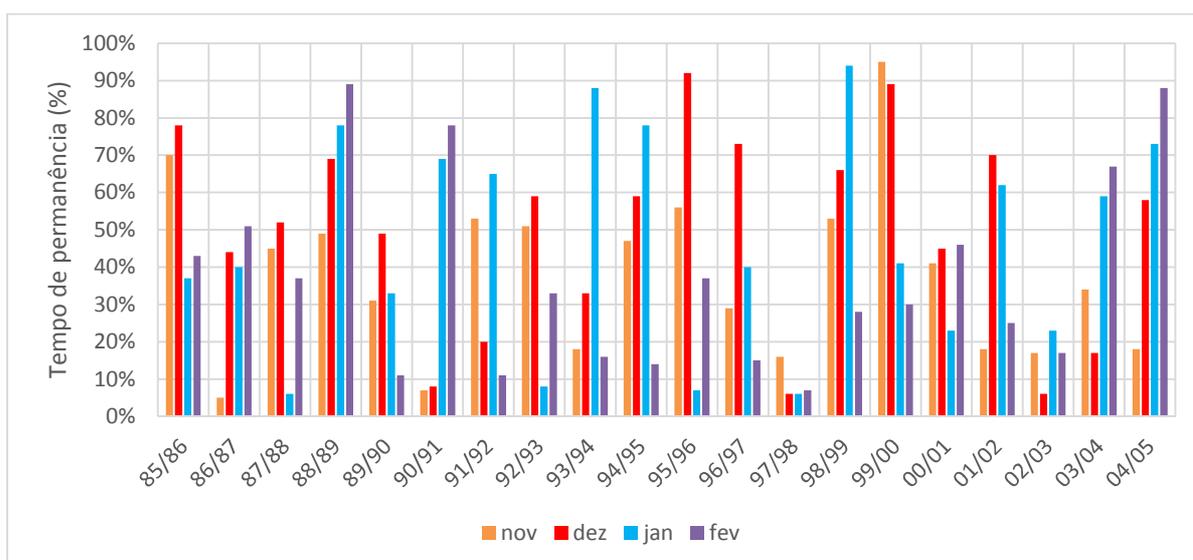


Figura 5.1 – Tempo de permanência médio mensal de cada mês contemplado nas temporadas de irrigação, considerando o período de 1985 a 2005 (série calculada para o posto fluviométrico de Quaraí).

Analisando os valores de tempo de permanência por mês, podemos verificar que os meses de dezembro e janeiro consumam ser mais secos (Q90 mensal de 1,68 e 1,05 m³/s respectivamente), ao passo que os meses de novembro e fevereiro costumam ser um pouco mais úmidos (Q90 de 2,95 e 1,99 m³/s, respectivamente). Aplicando-se a média dos tempos de permanência por temporada de irrigação e ordenando os valores em ordem crescente, podemos identificar as temporadas características, como indicado na Figura 5.2. De acordo com a figura, a temporada de 1997/98 foi a mais úmida do período simulado, com uma média de permanência menor do que 10%. Por outro lado, o período de irrigação de 1988/89 foi o mais crítico, uma vez que a permanência média ficou acima de 70%. Além disso, podemos eleger alguns períodos com características médias em termo de disponibilidade de água, como a temporada de 1990/91.

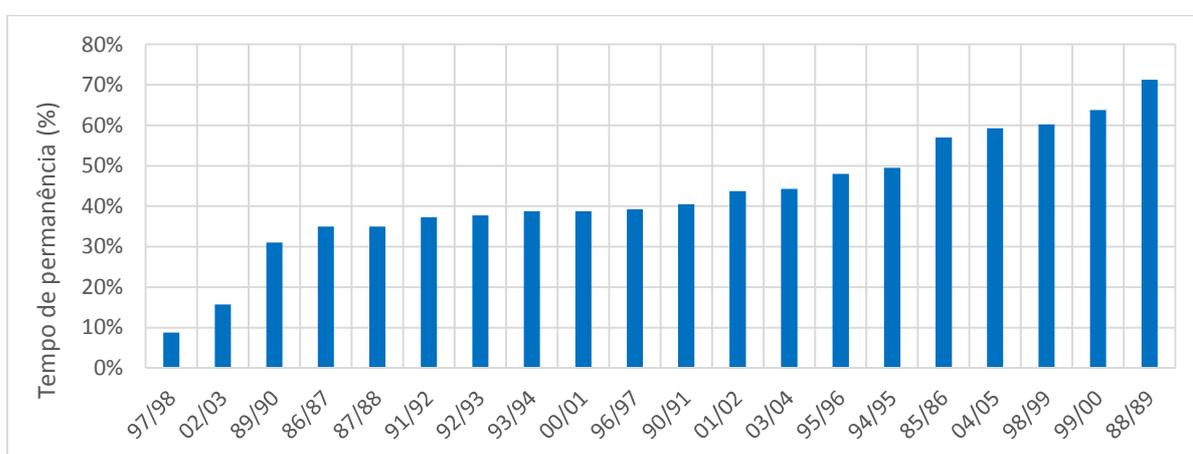


Figura 5.2 – Tempo de permanência médio por temporada de irrigação, indicado em ordem crescente de valores.

Além da análise da disponibilidade de água por temporada de irrigação, ainda sem considerar as retiradas, é importante também caracterizar a precipitação, não somente nos períodos de irrigação, mas também contemplando o período anterior, de março a outubro, caracterizado pelo enchimento dos reservatórios. A Figura 5.3 apresenta a precipitação anual de cada temporada completa (março a fevereiro), colocadas em ordem decrescente. De acordo com a figura, diferentemente da análise de permanência de vazões, o período com maior disponibilidade de água corresponde à temporada de 2002/03, seguido pela temporada de 1997/98. A temporada mais seca, de acordo com esta nova análise continua sendo a de 1988/89.

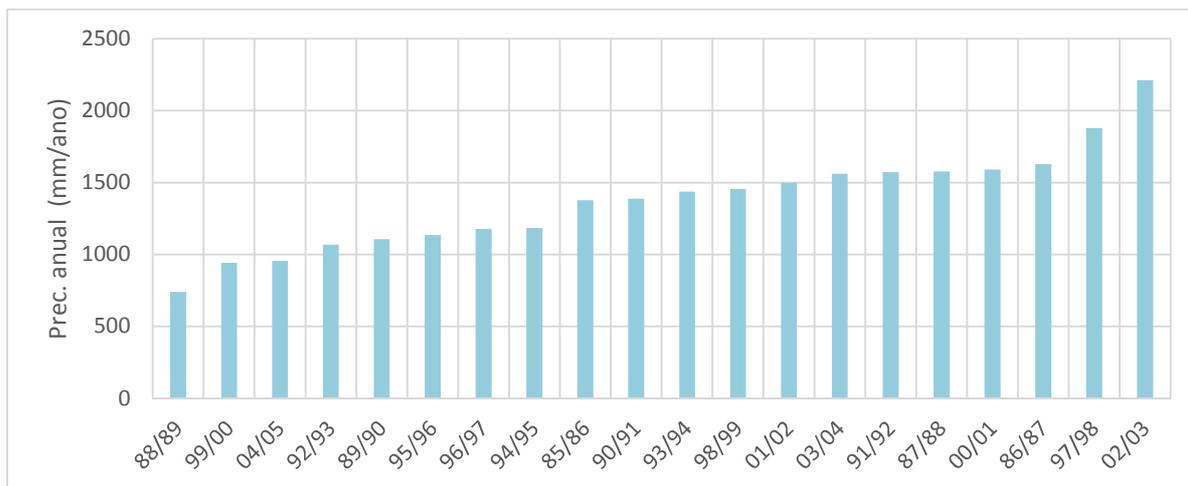


Figura 5.3 – Precipitação anual por temporada completa de irrigação, contemplando o início do enchimento dos reservatórios (março) ao fim do período de irrigação (fevereiro).

5.1.2. Verificação do atendimento às demandas da irrigação

A partir deste item, serão apresentados e discutidos os resultados do modelo de simulação de reservatórios e demandas hídricas, destacando-se as temporadas características discutidas no item anterior. Nesse momento serão apresentadas as garantias de atendimento às demandas em termos volumétricos, ou seja, a razão entre o volume atendido e o volume total demandado. Foram definidos três cenários de simulação, de acordo com o uso ou não de reservatórios e com a inclusão ou não do retorno de água da irrigação. A descrição dos três cenários de simulação encontra-se abaixo:

- Cenário I: desconsidera a existência dos reservatórios;
- Cenário II: considera a existência dos reservatórios e desconsidera o retorno da irrigação;
- Cenário III: considera tanto a existência dos reservatórios quanto o retorno da irrigação

O cenário I, apesar de possuir uma ocorrência improvável, é interessante do ponto de vista de se analisar a importância dos reservatórios frente ao atendimento das demandas, e se seria possível seu atendimento mesmo num ano com grande disponibilidade de água. A Figura 5.4 apresenta as garantias de atendimento de toda a bacia para cada temporada de irrigação, sobrepostas no mesmo período de tempo, destacando-se a temporada mais seca, a mais úmida, além da temporada de características médias. Podemos verificar que nem mesmo no período mais úmido a disponibilidade natural dos trechos de rio seria suficiente para atender a demanda em todo o período de irrigação.

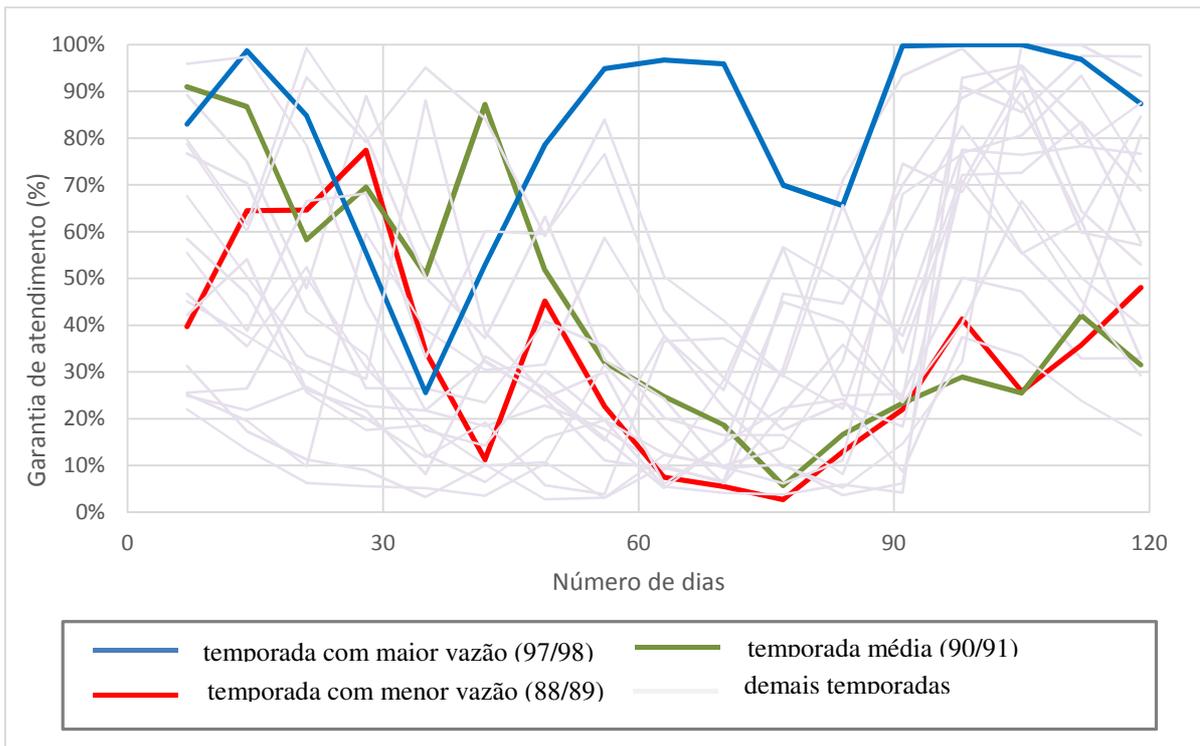


Figura 5.4 - Garantia de atendimento às demandas da bacia ao longo do período de irrigação, destacando os períodos extremos (Cenário I).

A Figura 5.5 apresenta as garantias de atendimento em termos de área de arroz atendida, considerando os termos máximos, médios e mínimos por temporada, além da série histórica de produção de toda a bacia, lembrando que a análise de garantia de atendimento foi realizada considerando as demandas atuais, o que difere das demandas de cada temporada analisada.

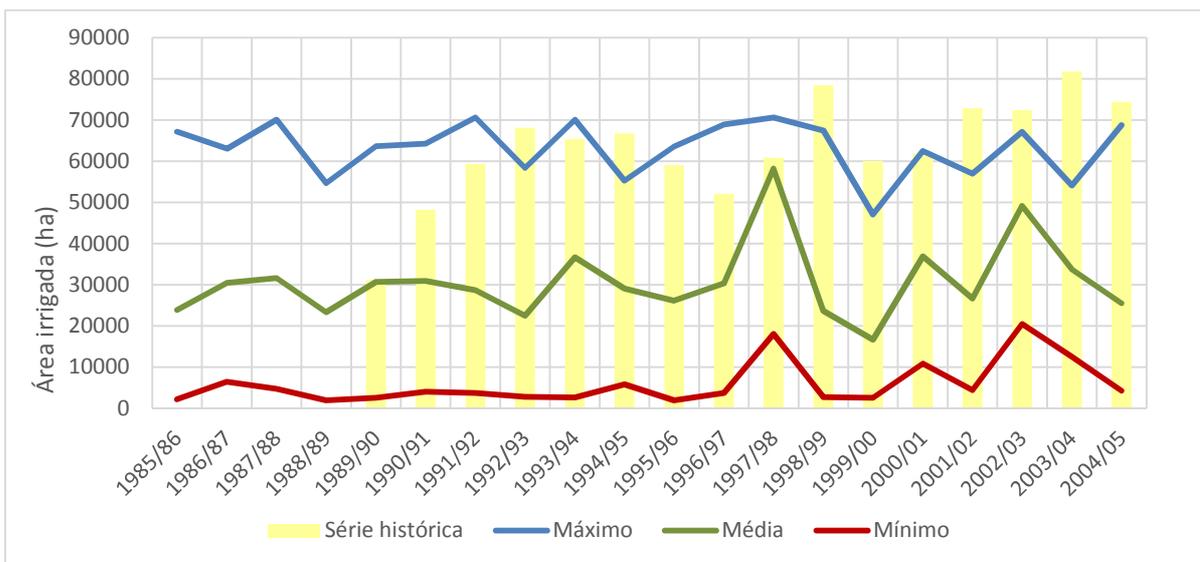


Figura 5.5 - Valores máximos, médios e mínimos de área irrigada por temporada, além do comparativo com a série histórica de produção da rizicultura (Cenário I).

Considerando-se que a produtividade de uma determinada temporada possa ser aproximada pelo atendimento médio, verificamos que em praticamente todos os casos a produção histórica foi bastante superior ao valor médio de área irrigada por temporada, indicando que este cenário não representa a realidade da bacia.

O cenário II inclui a retirada das demandas a partir dos reservatórios, quando houver sua associação à fonte, porém não incluir a possibilidade de retorno da irrigação aos trechos de rio, hipótese que será discutida no Cenário III. Nesse cenário o atendimento às demandas apresenta-se mais condizente com as necessidades da bacia, havendo uma garantia mínima de 40% da área total no período mais crítico, além de garantia acima de 90% para o período com maior disponibilidade de água, como é indicado na Figura 5.6.

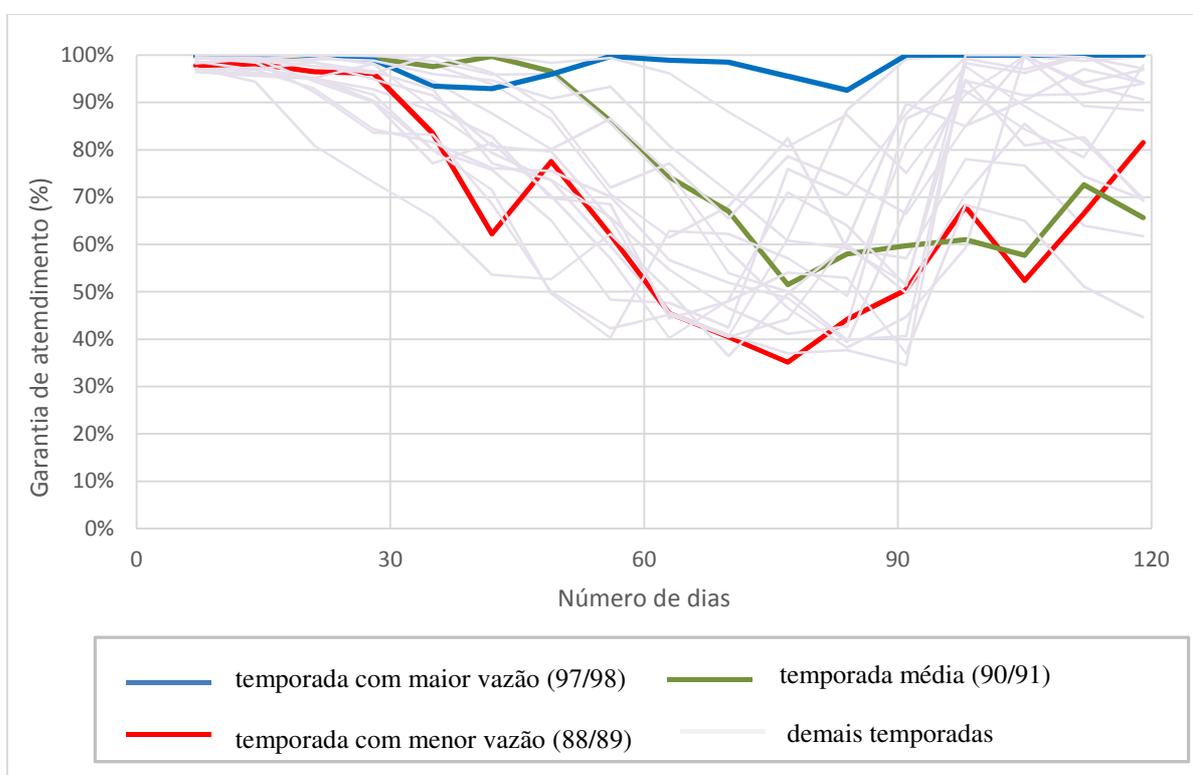


Figura 5.6 - Garantia de atendimento às demandas da bacia ao longo do período de irrigação, destacando os períodos extremos (Cenário II).

A Figura 5.7 apresenta o mesmo esquema da Figura 5.5, aplicado agora ao cenário II. Podemos verificar que a curva de atendimento médio está em geral um pouco abaixo dos valores da série histórica de produção de arroz, principalmente após a temporada de 1992, onde há uma tendência de estabilização dos valores de área cultivada, tanto na porção brasileira quanto na uruguaia.

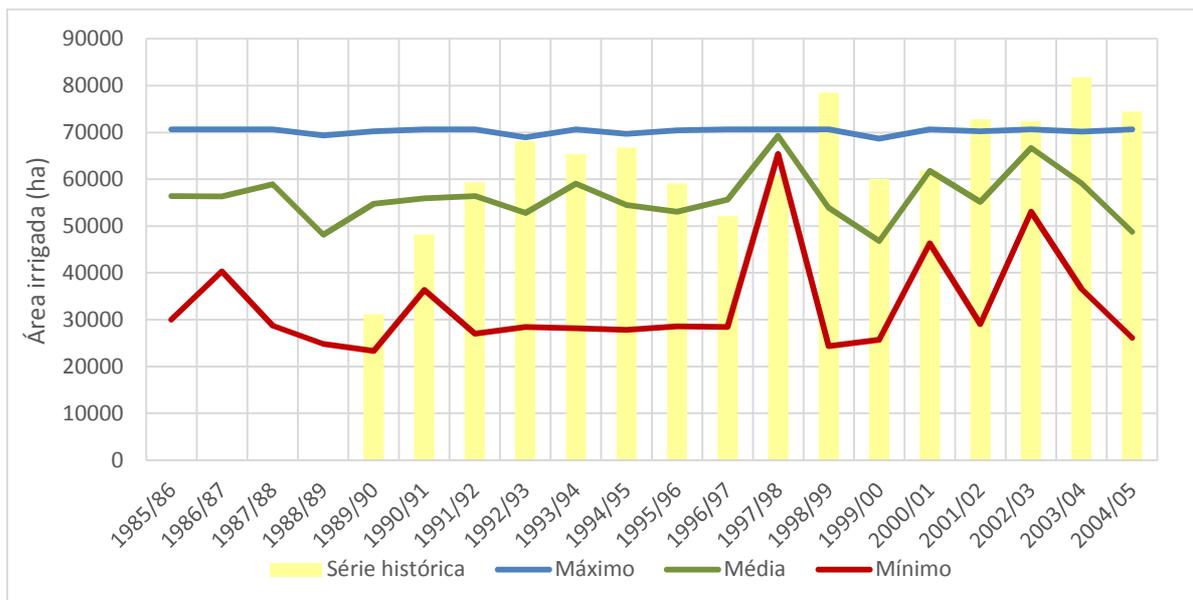


Figura 5.7 - Valores máximos, médios e mínimos de área irrigada por temporada, além do comparativo com a série histórica de produção da rizicultura (Cenário II).

O Cenário III é relativo à inclusão da possibilidade do retorno de água a partir das lavouras de irrigação. No presente trabalho, definiu-se um retorno de 30% do total da demanda. No entanto, ARNEZ (2002) recomenda que estes índices sejam utilizados com cautela, pois o retorno para o rio não é feito imediatamente após o instante em que o uso é demandado, sendo complexa a determinação do local e do instante em que essa fração de água estará disponível nos pontos de jusante. Desse modo, é definida uma defasagem de 4 semanas entre o intervalo em que ocorreu a demanda e o instante em que a quantidade de água está disponível, sendo a metodologia igualmente adotada neste trabalho.

A Figura 5.8 apresenta a distribuição de garantias de atendimento ao longo das temporadas aplicadas ao Cenário III. Observa-se uma sensível melhoria em termos de atendimento às demandas, uma vez que no pior período conseguiu-se um aumento de 10% em termos de área atendida.

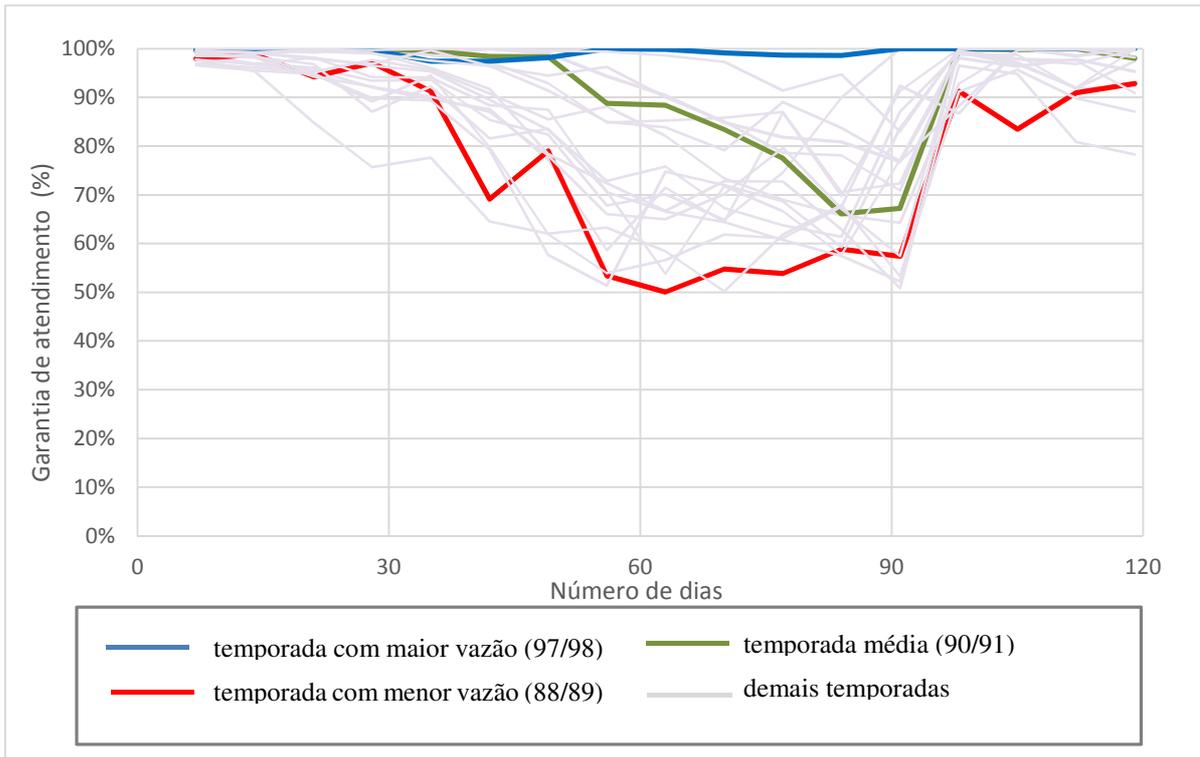


Figura 5.8 - Garantia de atendimento às demandas da bacia ao longo do período de irrigação, destacando os períodos extremos (Cenário III).

A Figura 5.9 apresenta o mesmo esquema da Figura 5.5, aplicado ao Cenário III. Analisando-se qualitativamente o gráfico pode-se verificar-se que em geral os valores médios de atendimento aproximam-se da série histórica de produção de arroz, indicando que possivelmente este é o cenário que melhor representa o atendimento às demandas pelos reservatórios, trechos de rio e pelo retorno da irrigação.

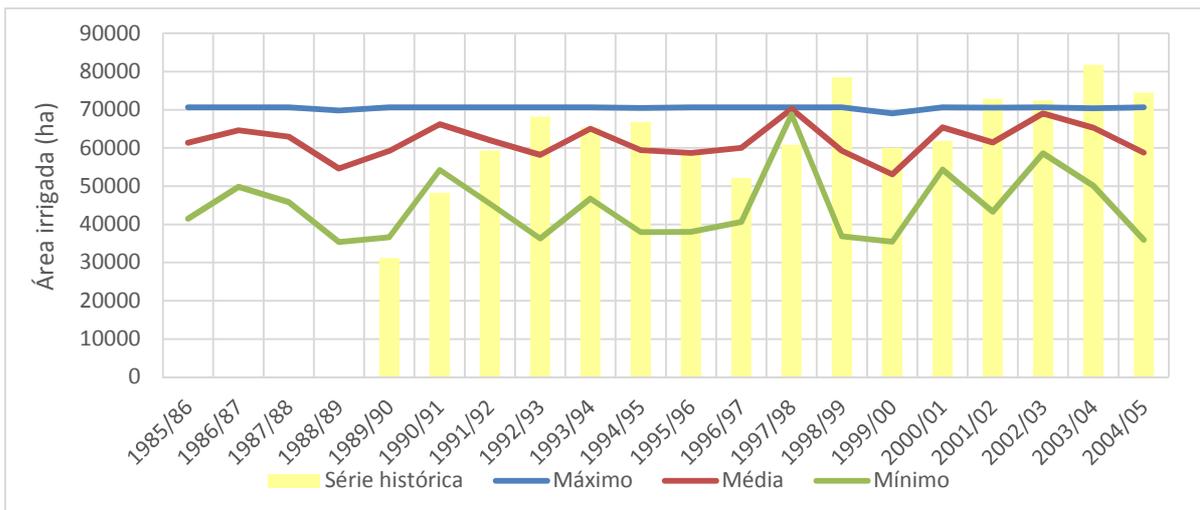


Figura 5.9 - Valores máximos, médios e mínimos de área irrigada por temporada, além do comparativo com a série histórica de produção da rizicultura (Cenário III).

Considerando que existem 70.635 ha de arroz a serem irrigados em toda a bacia, e que a cada temporada existe uma demanda de 10.000 m³/ha a ser suprida, sabemos que o volume

total de água a ser suprido a cada safra é de 706,35 hm³. Este valor, como visto anteriormente, é distribuído ao longo dos meses de irrigação de forma variada, havendo também uma tendência de uso dos açudes até seu esgotamento completo, e uma vez cessado recurso armazenado, parte-se para o complemento a partir das captações diretas por trecho de rio.

A Figura 5.10 apresenta o percentual total de volume suprido por temporada, dividido conforme a fonte utilizada. É possível notar que em apenas uma temporada excepcionalmente úmida a demanda atual poderia ser atendida plenamente, sendo que na média, cerca de 74% do volume é atendido, considerando também o cenário com o retorno da irrigação. Destes, 71% é provido a partir dos reservatórios e o restante é complementado a partir dos trechos de rio.

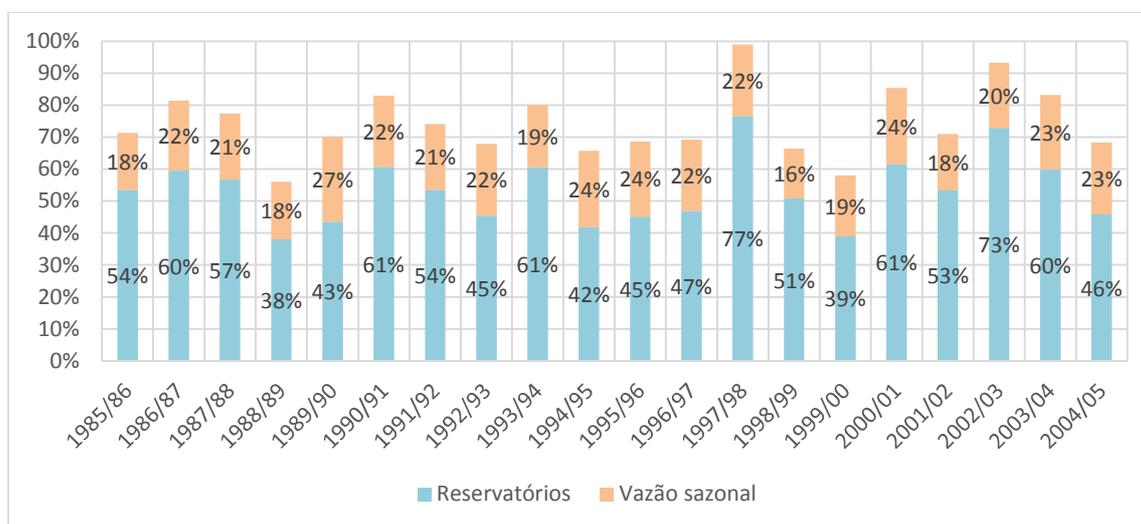


Figura 5.10 - Percentual do volume atendido por safra, considerando as fontes disponíveis e o cenário com o retorno da irrigação.

Na sequência, a Figura 5.11, Figura 5.12 e Figura 5.13 apresentam, respectivamente, a distribuição espacial das garantias médias de atendimento em termos de volume para as temporadas de menor disponibilidade (1988/89), disponibilidade média (1990/91) e de maior disponibilidade (1997/98). As áreas mais sensíveis à variação da disponibilidade de água estão localizadas na porção baixa da bacia, junto às sub-bacias do arroio Salso/Salsinho na margem direita, e também na sub-bacia do rio Yucutujá na margem esquerda. Devido à proximidade com o rio Uruguai, existe a possibilidade destas regiões realizarem captações diretamente deste curso hídrico, o que não foi considerado neste trabalho. Além destas regiões, sub-bacias como a do arroio Caiboaté, Camoatim e Garupá também possuem alguns pontos de baixo atendimento à demanda, mesmo considerando uma temporada com média disponibilidade de água.

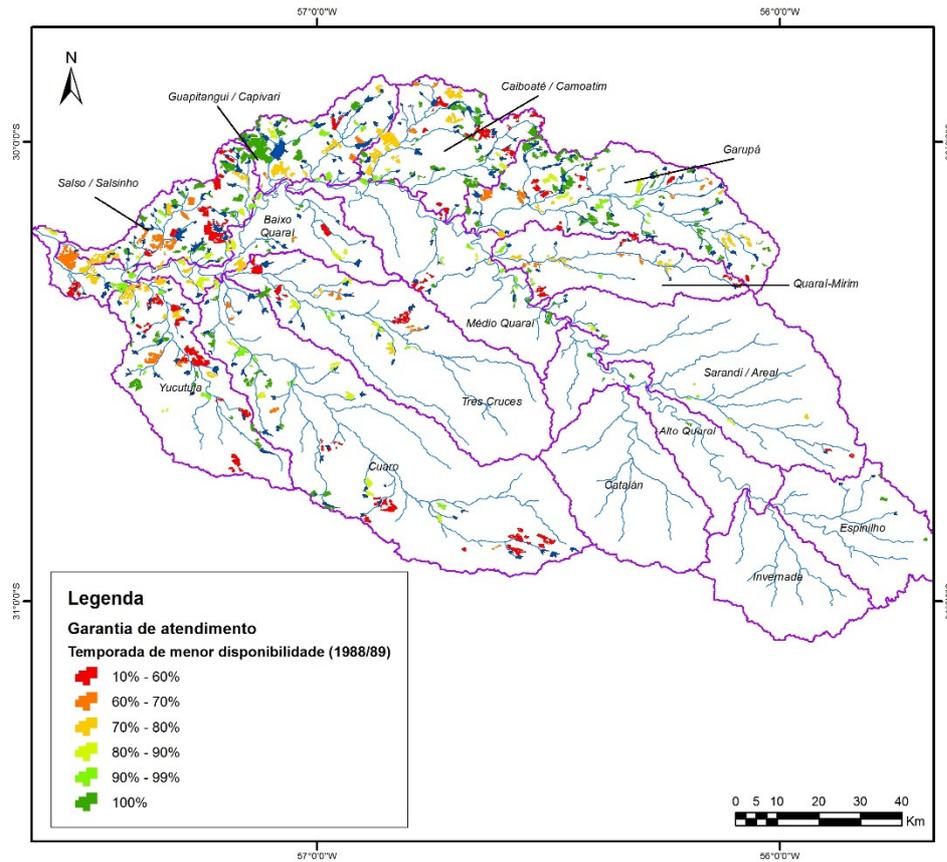


Figura 5.11 - Distribuição espacial dos valores médios de garantia de atendimento das lavouras de arroz, considerando a temporada de menor disponibilidade hídrica (1988/89).

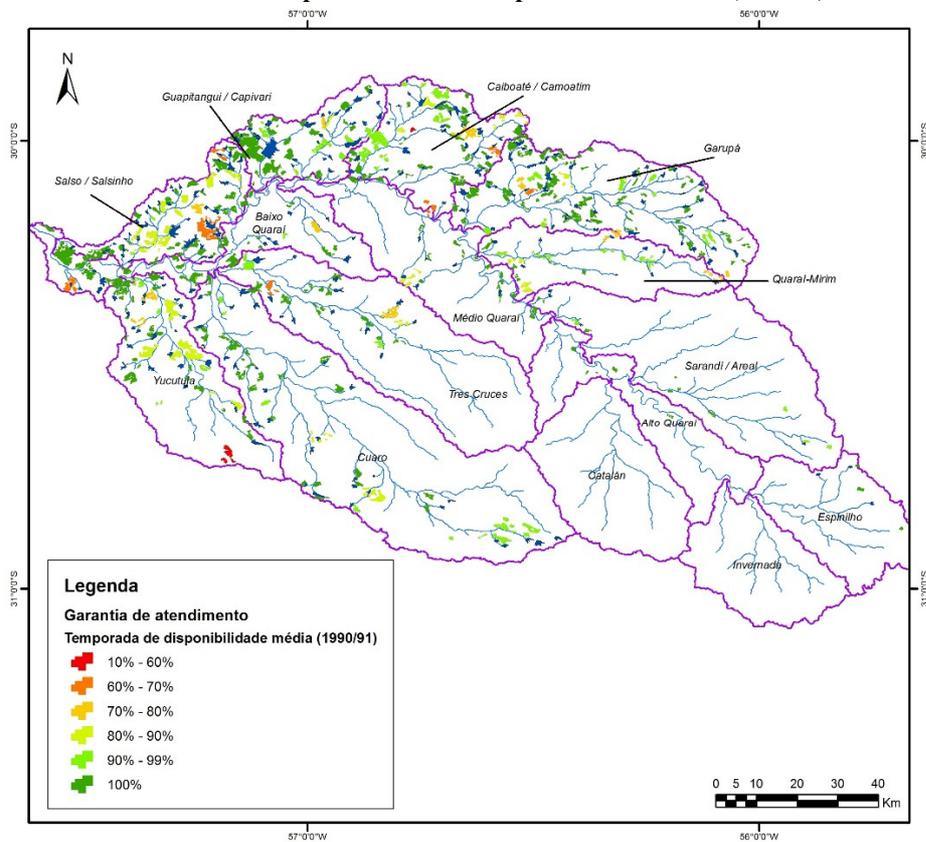


Figura 5.12 - Distribuição espacial dos valores médios de garantia de atendimento das lavouras de arroz, considerando a temporada de disponibilidade hídrica média (1990/91).

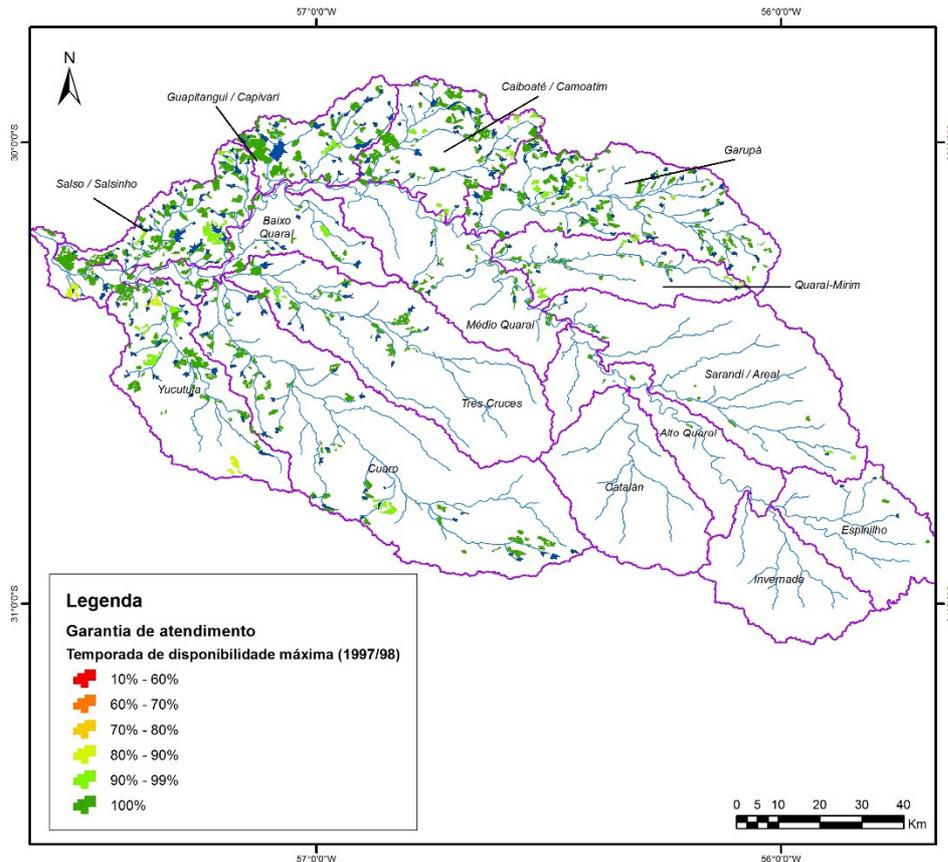


Figura 5.13 - Distribuição espacial dos valores médios de garantia de atendimento das lavouras de arroz, considerando a temporada de maior disponibilidade hídrica (1997/98).

5.1.3. Disponibilidade de água nos trechos de rios

Este item propõe-se a realizar uma avaliação do efeito das retiradas de água e do impacto dos reservatórios frente à disponibilidade de água nos trechos de rio. Primeiramente, foram selecionados alguns pontos ao longo do rio Quaraí e de seus afluentes a fim de que se possa traçar hidrogramas de saída do modelo de simulação, considerando os períodos característicos utilizados no item anterior.

Foram selecionados os seguintes trechos para visualização dos hidrogramas: Rio Quaraí (posto fluviométrico Quaraí), Rio Quaraí (exutório), Arroio Quaraí-Mirim (exutório), Arroio Yucutujá (exutório), Arroio Guapitanguí (jusante do reservatório Buriti). Na sequência, da Figura 5.14 à Figura 5.18 são apresentados os hidrogramas do período de irrigação das temporadas características, considerando a série natural e série com retiradas, ambas em passo semanal, além da Q90 anual (em passo diário).

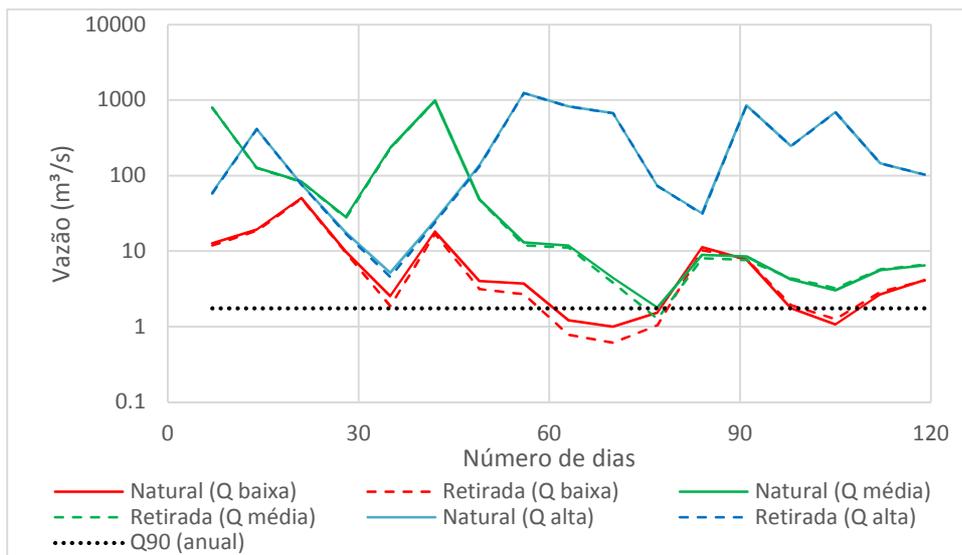


Figura 5.14 - Hidrogramas de períodos de irrigação com vazão baixa (1988/89), vazão média (1990/91) e vazão alta (1997/98), considerando a série natural e a série com retiradas. Localização: Rio Quaraí (posto 77500000).

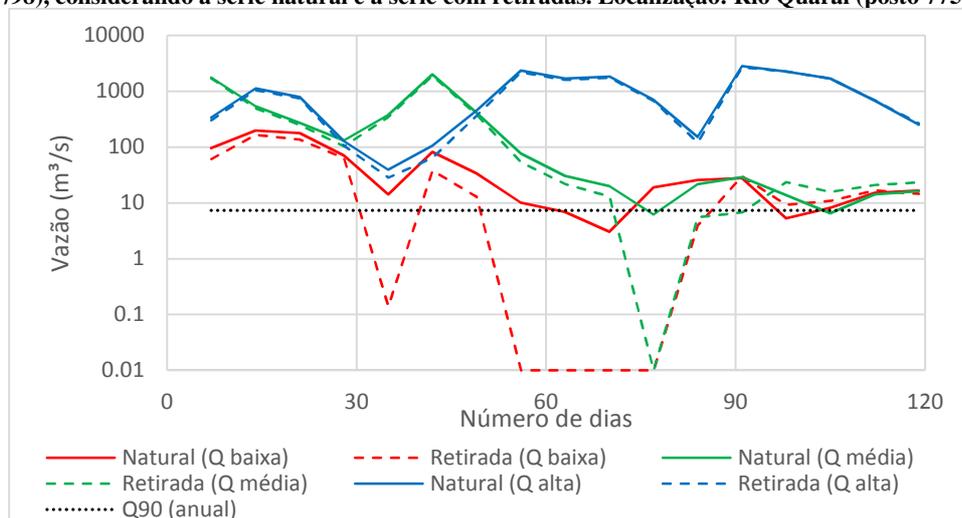


Figura 5.15 - Hidrogramas de períodos de irrigação com vazão baixa (1988/89), vazão média (1990/91) e vazão alta (1997/98), considerando a série natural e a série com retiradas. Localização: Rio Quaraí (exutório).

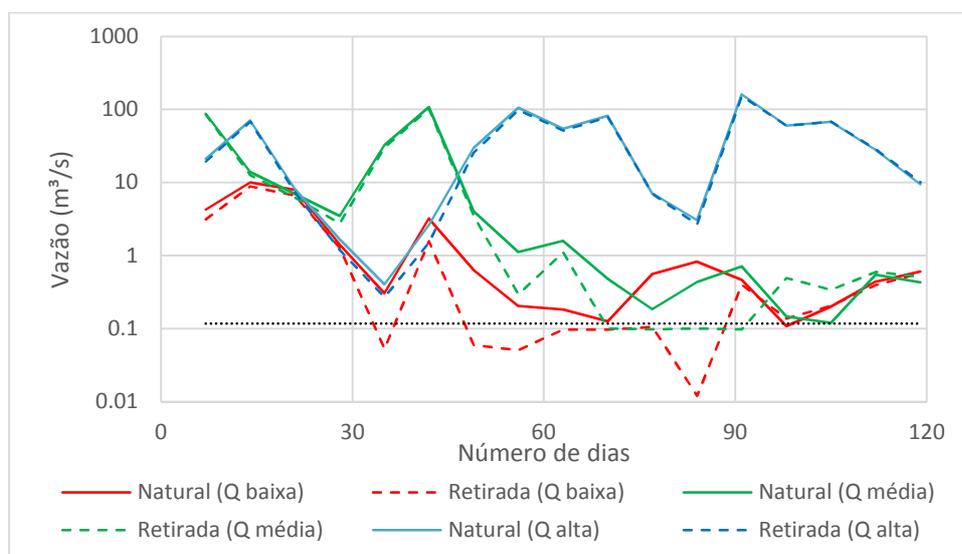


Figura 5.16 - Hidrogramas de períodos de irrigação com vazão baixa (1988/89), vazão média (1990/91) e vazão alta (1997/98), considerando a série natural e a série com retiradas. Localização: Arroio Quaraí-Mirim (exutório).

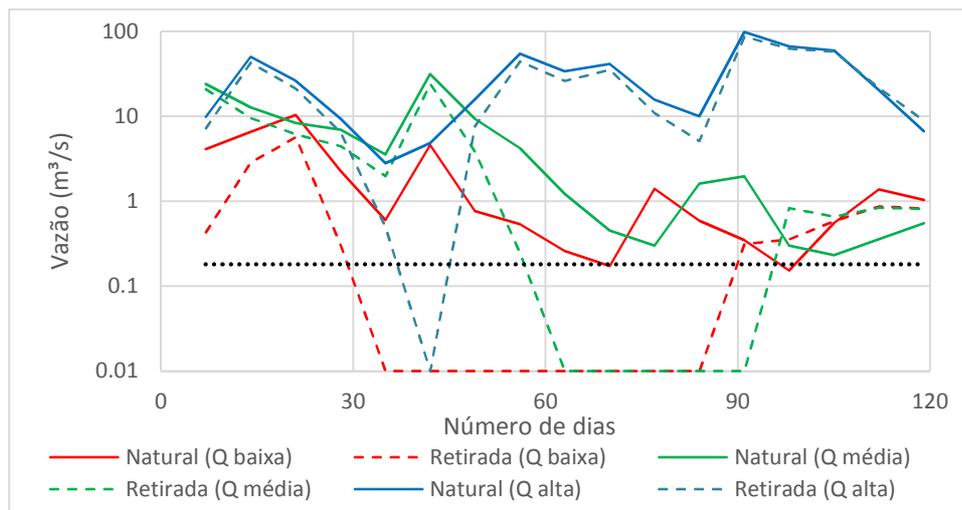


Figura 5.17 - Hidrogramas de períodos de irrigação com vazão baixa (1988/89), vazão média (1990/91) e vazão alta (1997/98), considerando a série natural e a série com retiradas. Localização: Arroio Yucutujá (exutório).

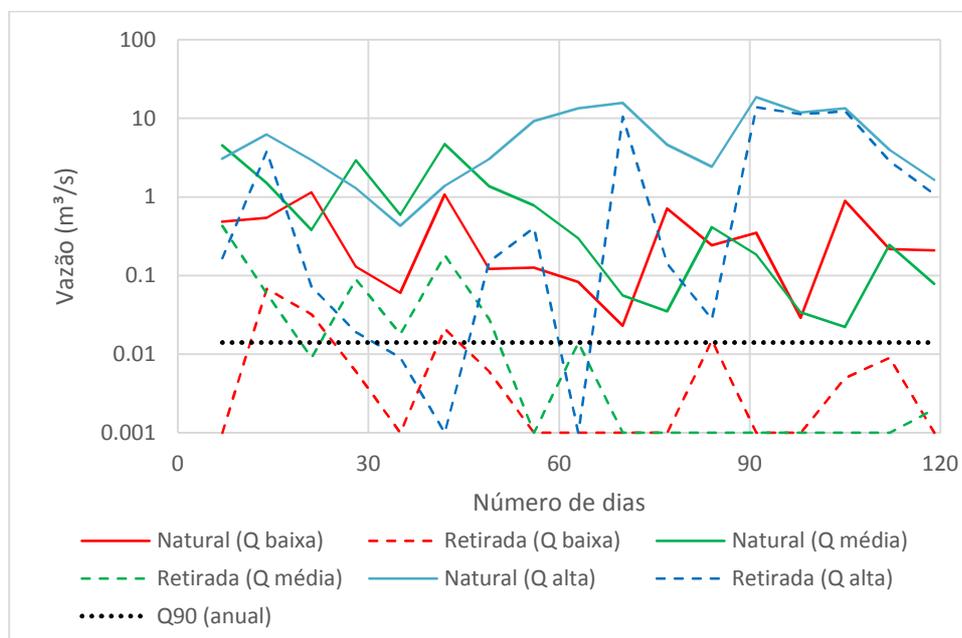


Figura 5.18 - Hidrogramas de períodos de irrigação com vazão baixa (1988/89), vazão média (1990/91) e vazão alta (1997/98), considerando a série natural e a série com retiradas. Localização: Arroio Guapitangui (jusante do reservatório Buriti).

Observando a sequência de figuras, podemos verificar algumas conclusões importantes. Em primeiro lugar, de acordo com Figura 5.14, o efeito das retiradas no rio Quaraí junto ao posto fluviométrico é pouco visível, não havendo comprometimento da disponibilidade hídrica, mesmo nos períodos de menor disponibilidade hídrica. Seguindo à jusante, a demanda aumenta consideravelmente, ocasionando na redução significativa da disponibilidade, inclusive atingindo seu esgotamento completo nos períodos mais críticos, lembrando também que existe o efeito do remanso do rio Uruguai sobre o Quaraí, não considerado na análise.

Entre os afluentes do Quaraí, existem diferenças significativas quanto à alteração do regime hidrológico, reflexo da quantidade de demandas e reservatórios em cada sub-bacia. A Figura 5.16 apresenta os hidrogramas para a saída do Quaraí-Mirim, onde houve pouca alteração no regime, e em seguida a Figura 5.17 os hidrogramas para a saída do Arroio Yucutujá na margem uruguaia, onde há uma grande dependência da disponibilidade proveniente dos trechos de rio e onde existem as piores alterações, afetando inclusive os anos com disponibilidade hídrica maior.

A Figura 5.18 apresenta os hidrogramas para o Arroio Guapitangui, a jusante do maior reservatório da bacia, o reservatório Buriti, com 816,8 km². A partir desta figura podemos analisar o efeito da regra adotada para liberação de água à jusante, onde ao considerar a hipótese de que nenhum açude possua descarregadores de fundo, isto está fazendo com que a liberação ocorra somente nos períodos de extravasamento dos reservatórios. Esta condição por si só diminui a disponibilidade hídrica dos trechos de rio, como já apontado em COLLISHONN (2011), fazendo com que o trecho selecionado na figura tenha valores abaixo da Q90 em praticamente todo o período de irrigação, e também no restante do ano, uma vez que os reservatórios possuem características de enchimento durante a entressafra e de captações diretas durante o período de irrigação.

Na sequência, a Figura 5.19 e a Figura 5.20 apresentam uma análise da redução do valor de vazão nos trechos de rio em função das retiradas de água e dos reservatórios, considerando respectivamente os cenários sem o retorno de irrigação e considerando esta hipótese. As figuras indicam o percentual de ocorrências de vazões menores que a Q90, sendo esperado um percentual de 10% para os trechos não influenciados pelas retiradas ou reservatórios, e maiores para os trechos influenciados por estes fatores.

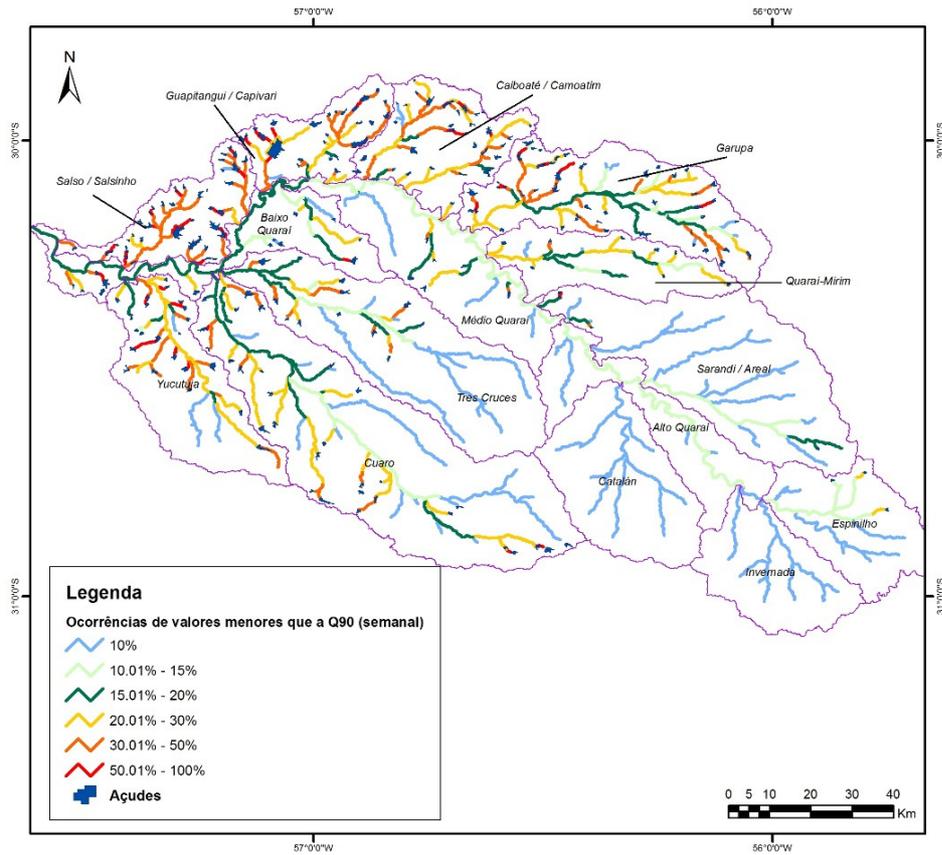


Figura 5.19 - Ocorrência de vazões menores que a Q90 (semanal) de cada trecho após as retiradas (Cenário sem retorno)

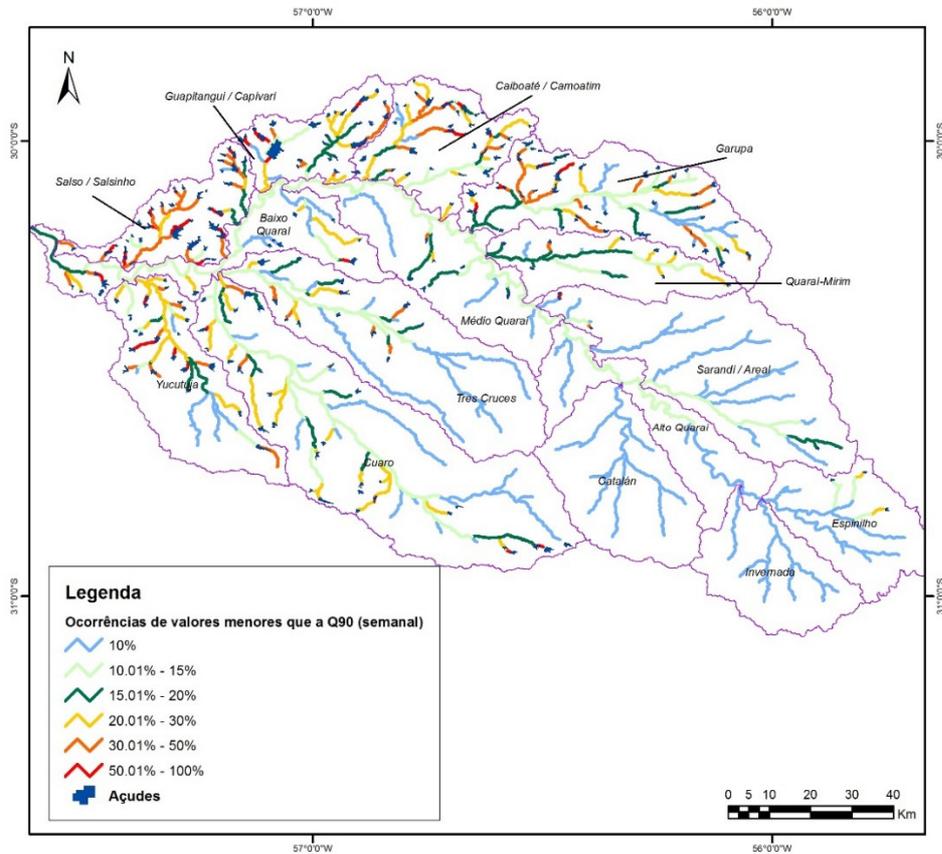


Figura 5.20 – Ocorrência de vazões menores que a Q90 (semanal) de cada trecho após as retiradas (Cenário com retorno).

No exutório do rio Quaraí, o percentual de ocorrência de valores menores que a Q90 chega a 18% para a hipótese de não haver retorno da irrigação, e de 15% considerando a hipótese. Nos principais afluentes, pode-se observar uma sensível melhoria em termos da diminuição de valores críticos de vazão com a entrada do retorno da irrigação. Nos trechos imediatamente à jusante dos reservatórios, podemos observar percentuais bastante elevados de ocorrências de valores abaixo do patamar da Q90, justificado pelo fato de que foi considerada a hipótese de que os açudes armazenam a água e liberam somente quando há extravasamento das estruturas, o que de fato ocorre na maioria dos reservatórios.

5.1.4. Disponibilidade de água nos reservatórios

Neste item será feita a análise da quantidade água disponível em função da variação do nível dos reservatórios e da demanda atendida exclusivamente por estas estruturas. A Figura 5.21 apresenta a variação do nível dos reservatórios para todas as temporadas de irrigação, desde o período de enchimento dos reservatórios (março), até o final do período de irrigação (fevereiro). Diferentemente da análise exclusiva do período de novembro a março, ao considerarmos também o período de março a outubro o ano mais úmido corresponde à temporada de 2002/03, no qual foi verificada uma precipitação total de 2212 mm. Verifica-se o enchimento completo dos reservatórios antes do início da irrigação neste período, assim como também ocorreu em outras cinco temporadas.

Na temporada mais seca, os açudes atingem no máximo a 57% do nível total, atingindo os níveis mínimos no período de irrigação. Em um ano onde ocorreu uma precipitação média na bacia como na temporada de 1990/91 (1388 mm), o armazenamento máximo em outubro ficou em 92% do volume máximo. Este percentual depende também do volume disponível no ano anterior, como no caso da temporada de 2003/04, onde o armazenamento atingiu o nível máximo, ainda que o nível de chuvas tenha sido dentro da normalidade (1561 mm), porém como o ano anterior foi o mais úmido, no início da temporada os reservatórios já estavam com 50% de sua capacidade.

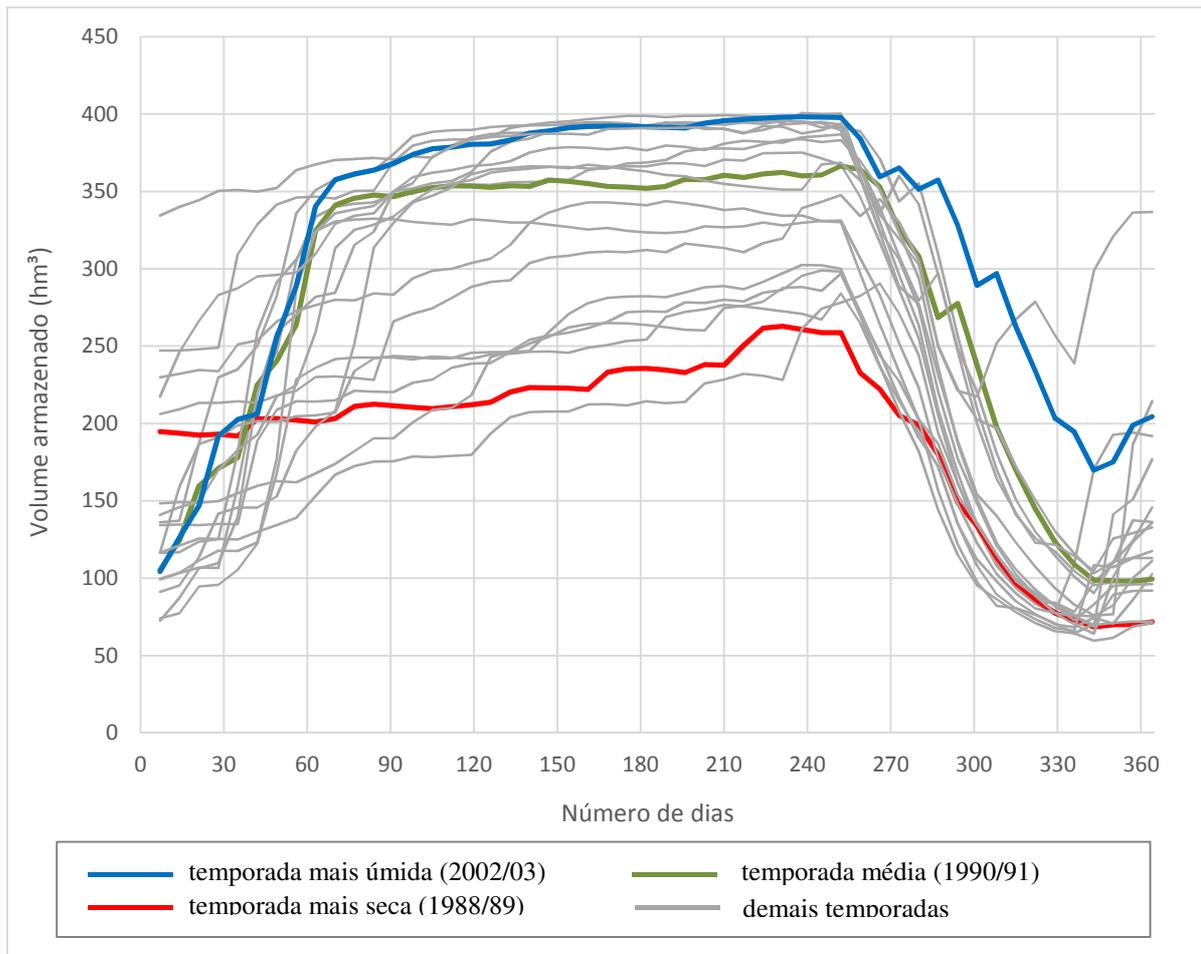


Figura 5.21 – Variação do volume do reservatório equivalente de toda a bacia em cada ano, iniciando no período de enchimento (março) e terminando no final do período de irrigação (fevereiro).

Devido ao fato de que foi considerada a hipótese de que a demanda é variável ao longo do período de irrigação, existe um patamar de demanda máxima para cada mês do intervalo. A Figura 5.22 apresenta a variação da vazão atendida em cada temporada a partir dos reservatórios. Observa-se que nem mesmo nos períodos mais úmidos a água reservada nos açudes é suficiente para o suprimento de toda a demanda, havendo necessariamente o complemento a partir dos trechos de rio.

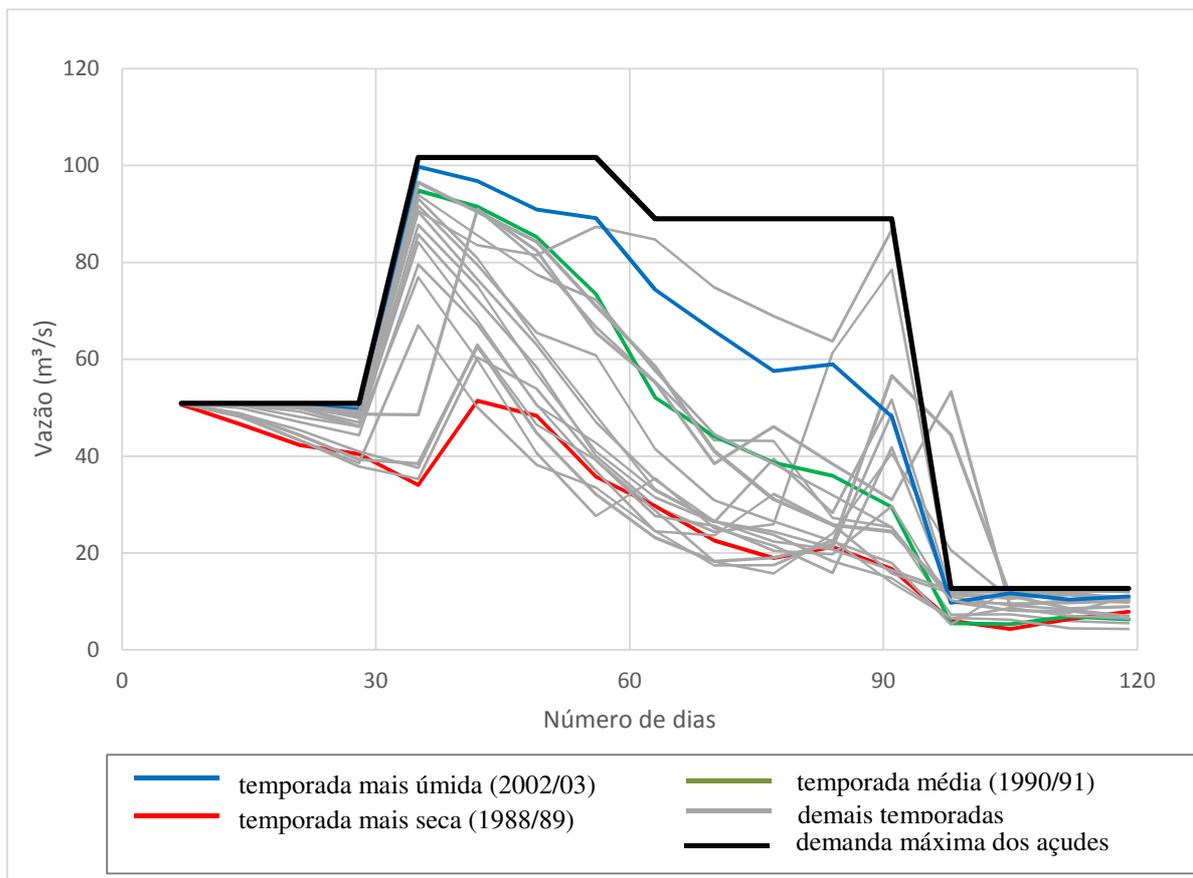


Figura 5.22 – Variação da demanda atendida exclusivamente pelos reservatórios em cada temporada de irrigação.

5.2.PROPOSIÇÃO DE NOVOS CRITÉRIOS DE OUTORGA A PARTIR DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO

5.2.1. Determinação da vazão regularizável nos açudes

A partir deste item serão apresentados os resultados do modelo de otimização de reservatórios, cujo objetivo é a proposição de melhorias na gestão da água na bacia, conforme os instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos. Neste item será abordada a questão dos critérios de outorga, cujas peculiaridades não só desta bacia, mas de toda a região da Campanha no sul do estado do Rio Grande do Sul, fazem com que mereça atenção especial.

O critério normalmente adotado no Estado, referente a alguma vazão mínima como a Q90 ou a Q95 não é adequado para a realização do balanço hídrico de demandas que utilizam os açudes como fonte de abastecimento, devendo-se adotar algum outro critério para regulamentação destes casos. Observando-se que a maior parte dos açudes nesta região são particulares e estão instalados no interior de suas propriedades, esta situação típica entra em

desconformidade com a Lei das Águas de 1997, a qual afirma que a água é um bem público e sujeito à gestão de seu uso.

Propõe-se como critérios de outorga para reservatórios na bacia do rio Quaraí, que seja adotada a vazão regularizada com algum percentual de garantia de atendimento. Quanto menor a garantia adotada, maior será a vazão disponível para regularização, contudo maiores também serão os riscos de falha no sistema. Em casos como o da bacia do rio Quaraí, e também de outras bacias da região, onde praticamente existe um único uso d'água preponderante, não haveria necessidade de regularizar a vazão em 100% do tempo, mas sim nos meses correspondentes à safra do arroz, sendo que no restante do tempo o reservatório atuaria somente armazenando água, liberando o volume que extravasa ou ainda também algum critério de vazão ambiental.

Desse modo foram definidos quatro cenários de simulação e otimização: o primeiro regularizando 100% do tempo e com 99% de garantia, e o restante regularizando somente os meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro, variando a garantia de atendimento em 99%, 95% e 90% respectivamente, observando-se que o estudo contemplou apenas os reservatórios da margem direita do rio Quaraí, ou seja, a porção pertencente ao Brasil. Tabela 5.1 apresenta a descrição dos cenários a serem adotados no estudo de regularização dos açudes.

Tabela 5.1 – Descrição dos cenários de regularização a serem considerados

Cenário	Garantia de atendimento (%)	Período de regularização
Cenário I	99%	Integral
Cenário II	99%	Período de irrigação (100 dias)
Cenário III	95%	Período de irrigação (100 dias)
Cenário IV	90%	Período de irrigação (100 dias)

O modelo de otimização de reservatórios foi aplicado nos 116 açudes considerados na margem direita da bacia. No entanto, devido ao fato de que cada reservatório corresponde a um parâmetro do algoritmo SCE-UA, a execução do mesmo acarretaria um aumento no número de complexos necessários, e conseqüentemente no número de pontos da amostra inicial, aumentando excessivamente o tempo de processamento até a conversão de todas as soluções. A alternativa adotada foi aplicar o modelo de otimização em grupos de sub-bacias, de forma que numa mesma rodada estivesse incluído os reservatórios à jusante deste grupo. Como a maioria dos açudes encontrados na bacia são de cabeceira, foi possível aplicar a

simplificação, de forma que os grupos nos quais o modelo de otimização foi executado tinham em média 10 açudes, correspondendo a 10 parâmetros do modelo SCE-UA.

Como descrito anteriormente, o algoritmo SCE-UA foi aplicado para resolver a equação (3.20), referente a minimização da diferença entre a garantia requerida e a garantia resultante em cada reservatório. A população de indivíduos do algoritmo é representada por percentuais de regularização em relação à vazão média de longo período à montante de cada estrutura. Num primeiro momento, a população inicial é gerada aleatoriamente, dentro de um intervalo de 0 a 100%. À medida em que as novas gerações de soluções são obtidas, o algoritmo tende a convergir os valores de percentuais de regularização, consonante com a minimização da função objetivo. A Figura 5.23 apresenta uma exemplificação do processo de geração de soluções para três reservatórios otimizados. Num total de 25600 gerações, observa-se a conversão dos valores das soluções, correspondentes aos percentuais de vazão regularizada por reservatório, indicando que o primeiro poderia regularizar até 84%, o segundo 60% e o terceiro apenas 10% da vazão média de longo período, considerando uma garantia de 99%.

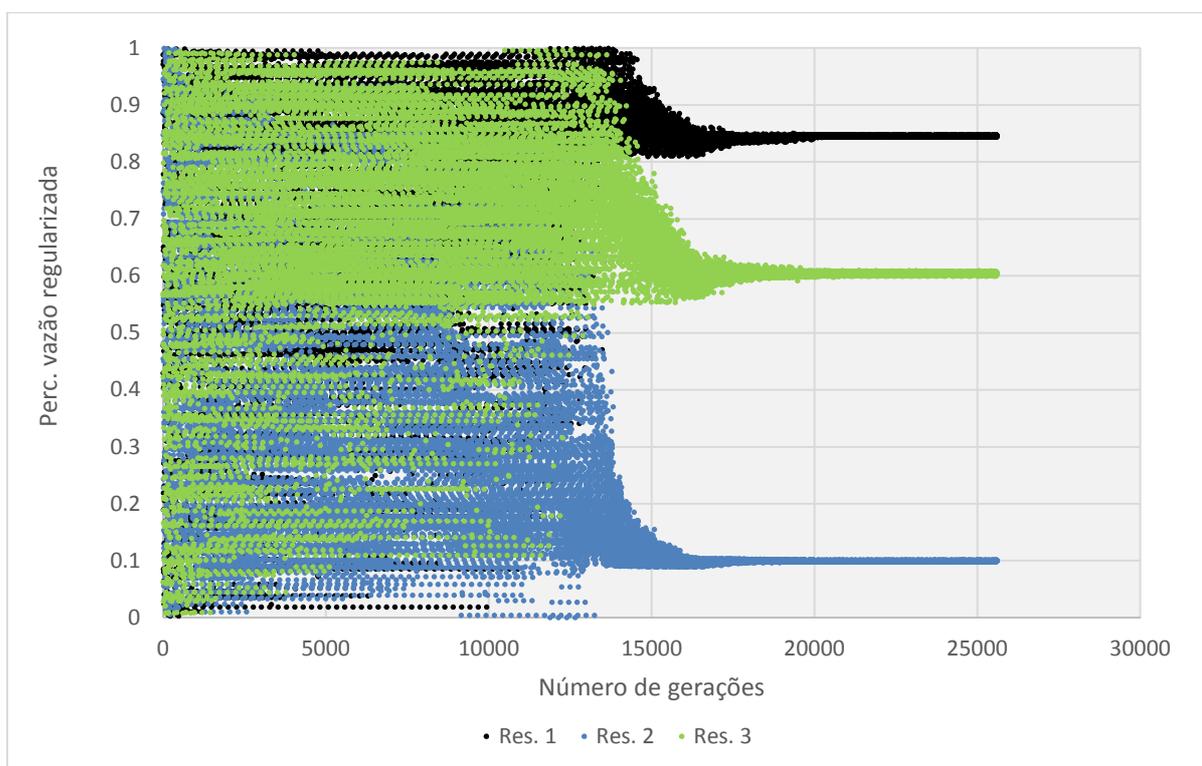


Figura 5.23 - Exemplo de evolução das soluções do problema da vazão regularizada para três reservatórios.

Em seguida, a Figura 5.24 corresponde à conversão dos valores da função objetivo ao longo do número de gerações. Os degraus que ocorrem ao longo do processo correspondem

aos pesos impostos àquelas soluções que não atingiam a garantia de 99%, de forma que na medida que mais reservatórios atingiam o nível desejado, a tendência de minimização da função-objetivo é atingida.

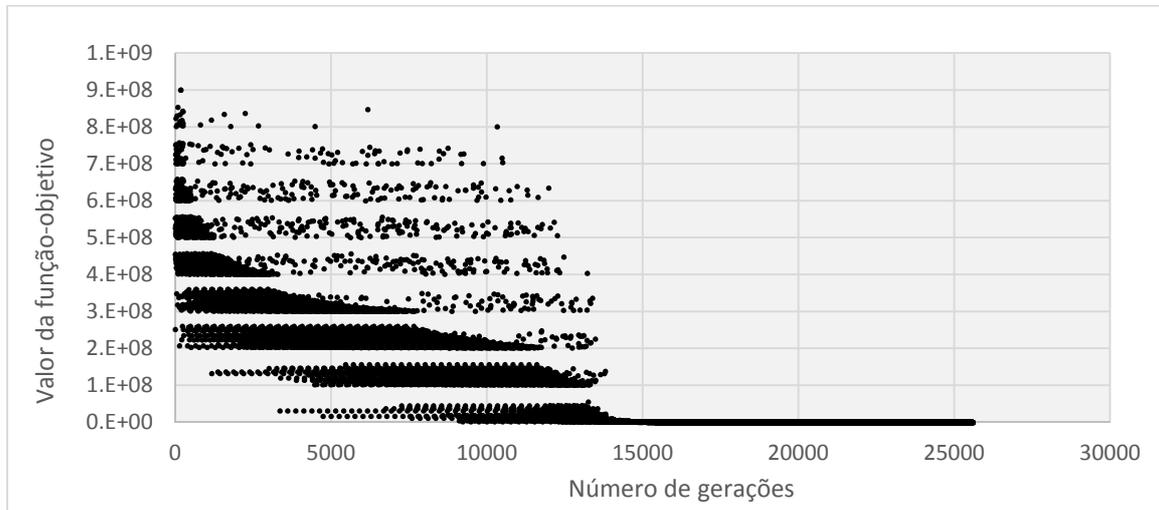


Figura 5.24 - Evolução das soluções da função-objetivo para um determinado grupo de reservatórios otimizados.

A Figura 5.25 apresenta os somatórios das vazões regularizadas nos reservatórios de cada sub-bacia da margem direita da bacia e em cada cenário de regularização. Também são apresentados os valores outorgados em cada região, considerando somente aqueles cuja retirada provém de captações diretas dos açudes.

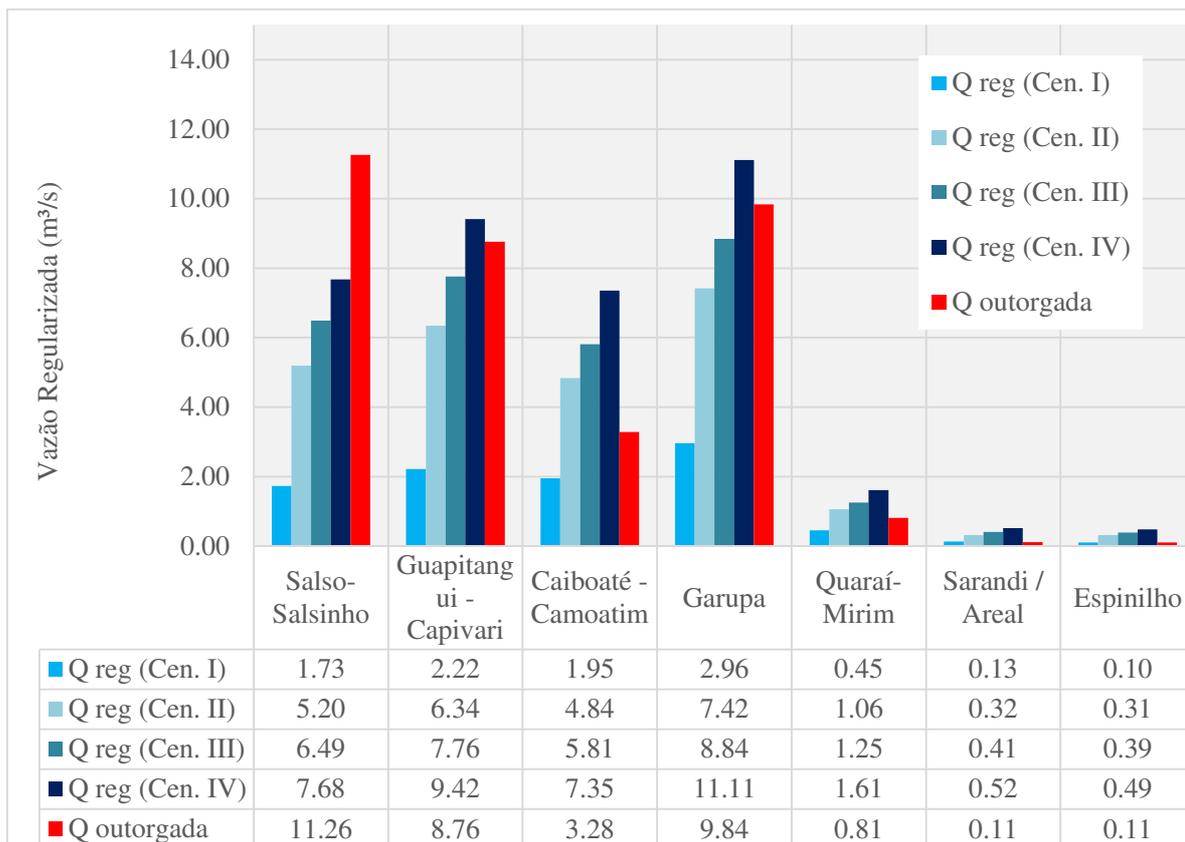


Figura 5.25- Vazões regularizadas por sub-bacia e por cenário, além da vazão outorgada em açudes.

De acordo com o cadastro de outorgas da bacia, fornecido pelo Departamento de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Sul, o somatório dos processos em caráter deferido chega a 45,72 m³/s, considerando as seguintes especificações de fonte: açude, rio/arroio/sanga, e não especificado. Deste total, foram associados 34,17 m³/s como sendo outorgas de açudes, considerando tanto o que já estava especificado no cadastro, quanto aquelas que não foram especificadas mas que puderam ser associadas de acordo com o posicionamento no local. A Figura 5.26 apresenta um gráfico com os níveis de outorga atendidos de acordo com o cenário adotado, uma vez que todas as outorgas estão associadas a um reservatório simulado, simplificando o balanço hídrico.

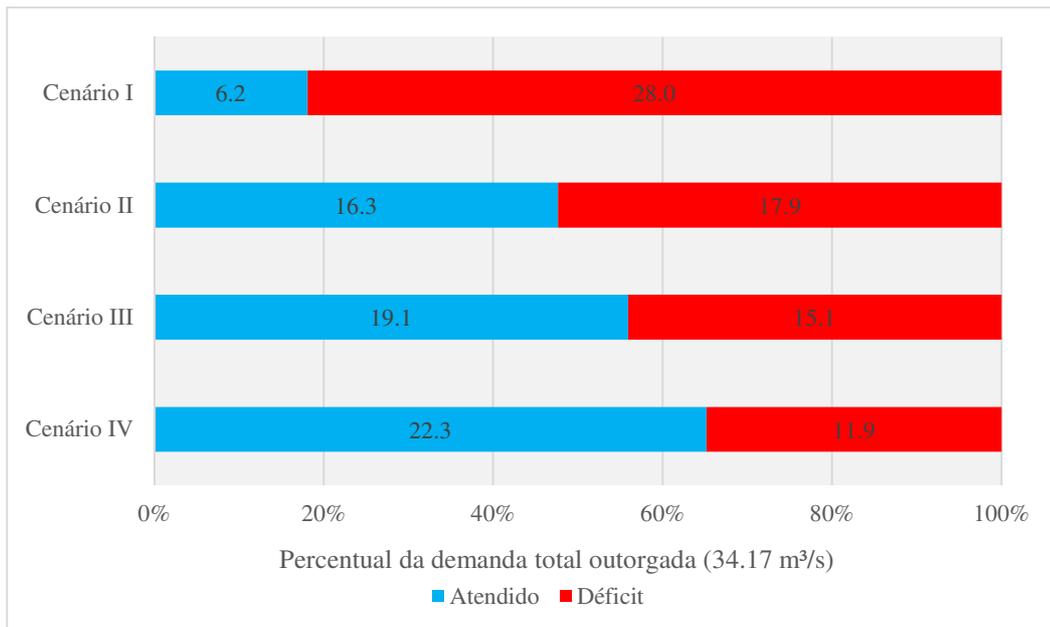


Figura 5.26 - Níveis de vazão outorgada atendida em cada cenário de simulação.

A Figura 5.27 apresenta um gráfico indicando a correlação entre o percentual máximo regularizável e a razão entre a área superficial e a área de drenagem dos açudes para todos os cenários avaliados. Considerando a regularização em 100% do tempo (Cenário I), os açudes conseguem regularizar em torno de 50% da vazão máxima regularizável, ou seja, a vazão afluente média de longo período. As razões para que os açudes não consigam regularizar toda a vazão possível podem ser explicadas com as perdas de água por evaporação e também pelo sub-dimensionamento das estruturas, embora a segunda alternativa pareça mais plausível, visto que as perdas de água por evaporação são pouco expressivas, como visto anteriormente.

Para os demais cenários, a função de geração da população inicial de soluções candidatas teve de ser ajustada, uma vez a regularização apenas no período da irrigação do arroz pode proporcionar vazões de regularização maiores que a vazão média de longo período, pois na maior parte do ano os açudes funcionam somente como estruturas acumuladoras de água. Nesse caso, permitiu-se que o campo de geração de soluções candidatas se expandisse de 0 a 500% da vazão média de longo período. A correlação entre as variáveis envolvidas variou entre 0,82 a 0,87, podendo ser apontado como uma alternativa para obtenção dos valores de vazão regularizada em açudes não simulados, ou ainda em outras bacias com características semelhantes, uma vez que as variáveis envolvidas são de fácil obtenção, como a área superficial do açude e a área de drenagem,

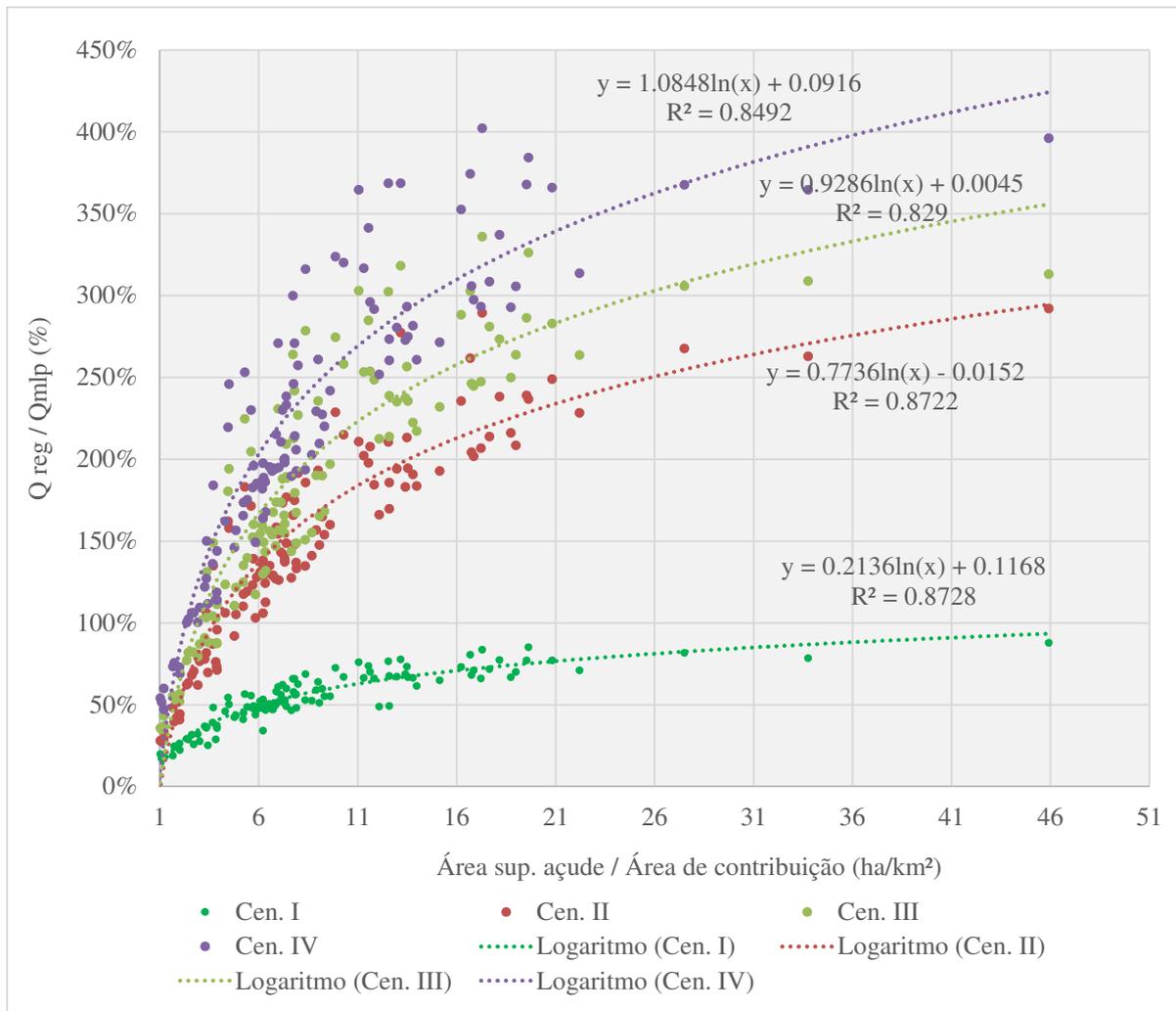


Figura 5.27 - Correlação entre o percentual de vazão máxima regularizável e a razão entre a área superficial do açude e sua área de drenagem, em todos os cenários.

A título de exemplificação, foi escolhido um reservatório para ilustrar o comportamento da série volumétrica ao longo do período simulado e também da sua série de vazão regularizada. Figura 5.28 apresenta a série de volumes armazenados do açude escolhido, podendo-se observar a diferença entre o número de vezes em que o nível atinge o mínimo em cada caso. Com exceção do cenário I, em praticamente todos os anos houve um decréscimo significativo dos níveis de água nos meses de fevereiro, por vezes secando totalmente o corpo hídrico, conforme a garantia adotada. No cenário I, correspondente à regularização em 100% do tempo, é possível identificar os períodos interanuais com menor volume de chuvas na bacia, confirmado pelo gráfico de precipitação mensal no eixo acima. Os períodos que compreendem os anos de 1988 e 1991 e também entre 2005 e 2010 são os mais críticos, onde o açude demorou esse período para recuperar sua capacidade de armazenamento máxima, ocorrendo falha de atendimento durante estas fases.

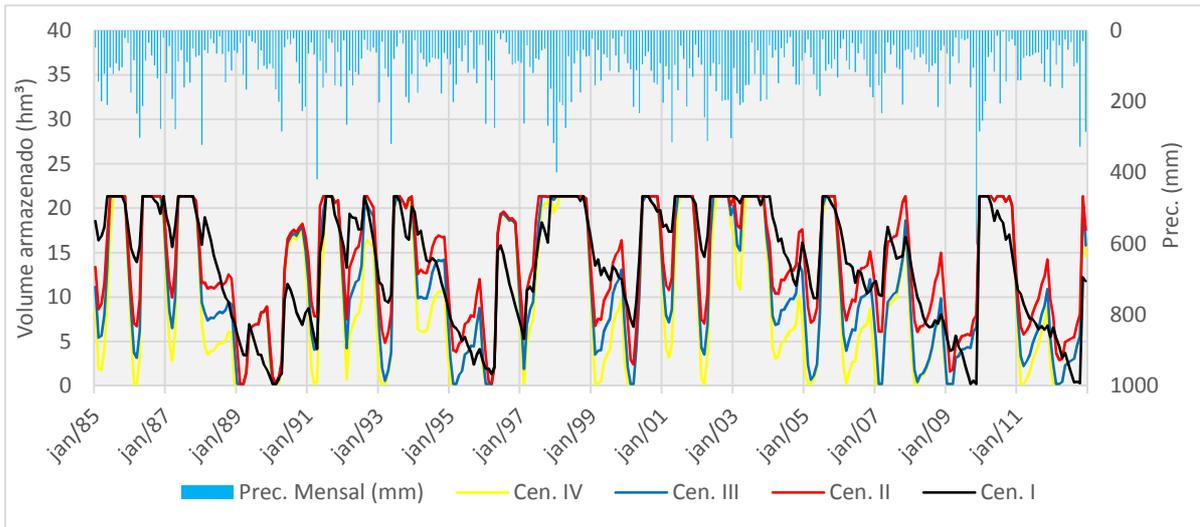


Figura 5.28 - Série volumétrica de um dos açudes simulados, considerando todos os cenários avaliados.

A Figura 5.29 apresenta a série de vazões regularizáveis do mesmo açude, considerando os quatro cenários analisados. Pode-se observar o salto na disponibilidade hídrica ao definirmos a regularização sazonal ao invés da regularização total, além do incremento, embora não tão expressivo, dos cenários com uma menor garantia de atendimento. Em todos os cenários de regularização sazonal, havia água suficiente para abastecimento em todas as safras, embora ao fim de algumas delas houvesse a ocorrência de falhas.

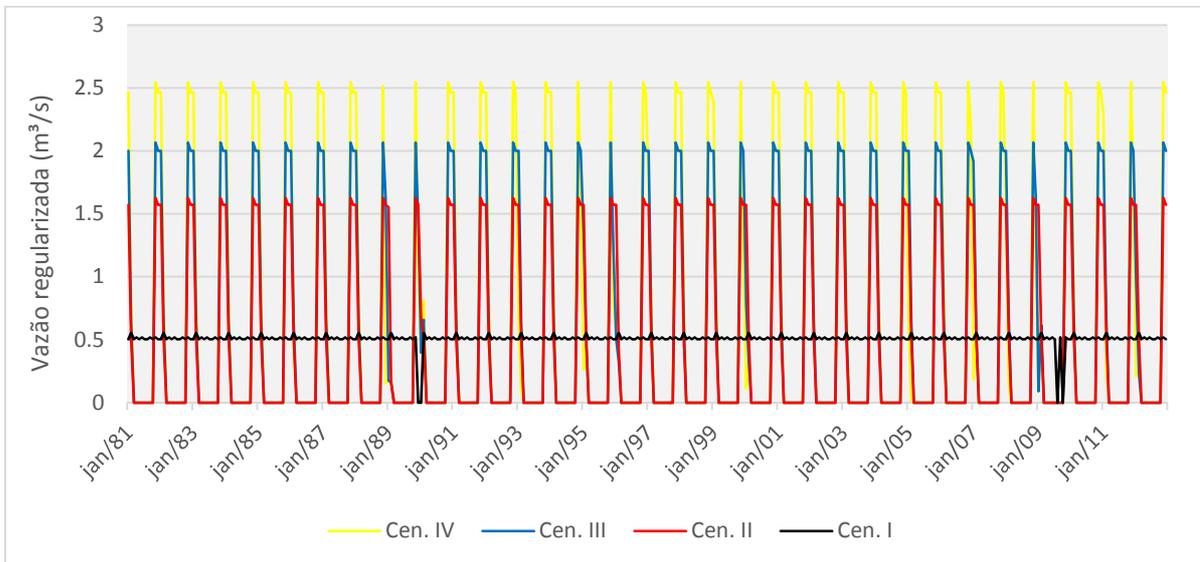


Figura 5.29 - Série de vazões regularizadas ao longo do período simulado, para todos os cenários avaliados.

5.2.2. Estudo comparativo utilizando o modelo Acquanet

Realizou-se um teste para fins de comparação dos resultados obtidos com a metodologia desenvolvida, a partir da utilização do modelo Acquanet (PORTO, *et al.*, 2003),

uma versão do modelo MODSIM desenvolvida pelo Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões em Engenharia Ambiental e de Recursos Hídricos (LabSid) da Universidade de São Paulo. O teste foi realizado na sub-bacia do Arroio Camoatim, com área de 270 km² e com a inclusão de nove reservatórios na modelagem. A Figura 5.30 apresenta um mapa da sub-bacia, juntamente com o esquema estruturado no modelo Acquanet. A Tabela 5.2 contém o significado dos elementos representados na figura.

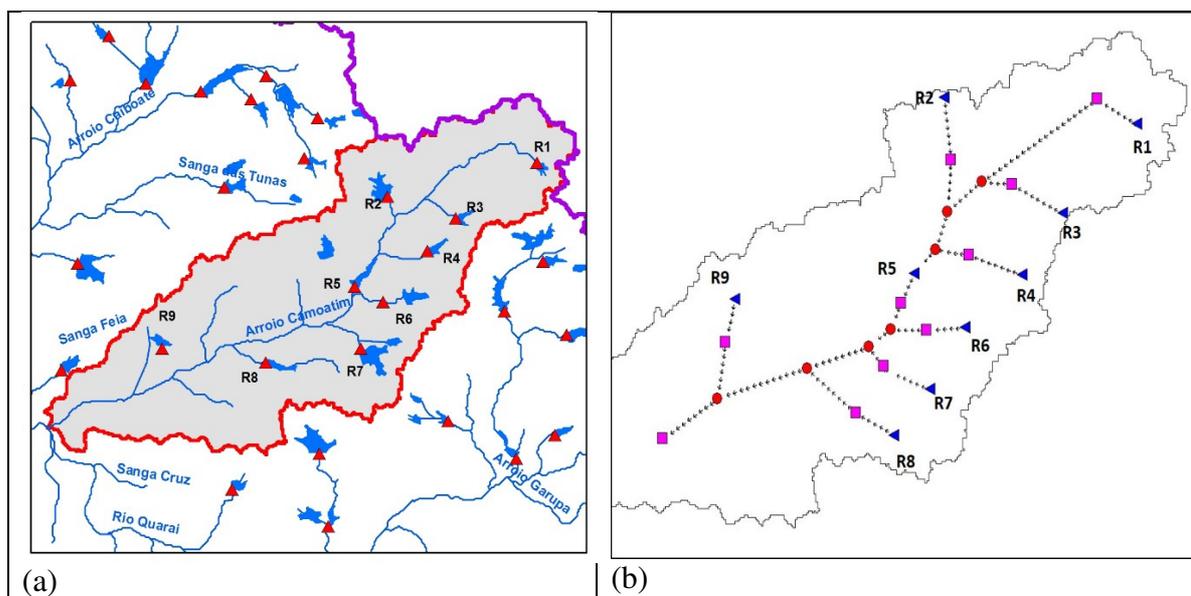


Figura 5.30 - Sub-bacia do Arroio Camoatim: (a) representação real, (b) esquema estruturado no modelo Acquanet.

Tabela 5.2 - Descrição dos elementos utilizados no modelo Acquanet

◀	Reservatórios
■	Demandas (representa a vazão regularizada para cada reservatório)
●	Ponto de passagem

A metodologia para o cálculo das vazões regularizadas por reservatório seguiu a descrição apresentada em LEÃO (2008), onde foi associada uma demanda para para reservatório, representando a vazão regularizada pelas estruturas. Foi estabelecido que cada açude teria como volume meta o valor de 100% de sua capacidade, ou seja, sempre que houver excesso hídrico ele será totalmente armazenado, garantindo uma situação mais favorável aos períodos seguintes. Esse tipo de regra de operação, segundo o autor, maximiza a disponibilização da água mas exclui como possível uso o controle de cheias.

A situação representada na sub-bacia do Arroio Camoatim é bastante típica em toda a bacia do rio Quarai, onde a maior parte dos açudes possuem uma área de drenagem relativamente pequena, havendo poucos casos em que ocorram sistemas de reservatórios em série. No caso da sub-bacia, somente o açude R5 representa este tipo de situação, onde a

operação dos reservatórios de jusante poderia fazer com que a demanda neste reservatório pudesse ser atendida pelas estruturas de montante. No modelo Acquanet, representou-se o sistema de forma isolada, de forma a maximizar a utilização no entorno dos reservatórios. Isto é feito através da adoção de diferentes prioridades, um peso para cada elemento do sistema hídrico. A adoção de uma prioridade menor para o açude R5 em relação aos açudes de montante foi a alternativa adotada para que o modelo pudesse operar desta forma.

Dentre os dados de entrada do Acquanet, foi necessário informar a série de vazões naturais afluentes de cada açude, seus volumes característicos (máximo, mínimo e inicial), as relações cota-área-volume e as lâminas médias evaporadas. O volume inicial de todos os açudes foi adotado como sendo igual à capacidade máxima, assim como na metodologia proposta.

O método proposto por LEÃO (2008) para o cálculo das garantias de atendimento dos reservatórios foi primeiramente definir um percentual da vazão média afluente de cada estrutura como demanda a ser atendida. Realizada a simulação, verifica-se o grau de atendimento de cada demanda, aumentando o percentual da vazão média afluente até que se atingam os valores limites de demandas em que são verificadas falhas ao nível de garantia requerido, constituindo-se portanto numa metodologia de ajuste manual para obtenção das capacidades de regularização dos reservatórios. Devido a este fato, não foi possível obter o valor exato de garantia como ocorre no SADr-IPH, mas sim uma aproximação por meio de tentativas e erros. Para a comparação do cenário I, onde se propõe uma regularização com 99% de garantia e em 100% do tempo, a Figura 5.31 apresenta a saída do modelo Acquanet, com o grau de atendimento e os valores finais de demanda após sucessivas simulações.

Resumo					
Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (mês(es))	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm ³)	Demanda média necessária (m ³ /s)	Vazão média fornecida (m ³ /s)
Z↓ A↓	Z↓ A↓	Z↓ A↓	Z↓ A↓	Z↓ A↓	Z↓ A↓
R1	2	1.56	0.129	0.028	0.028
R9	3	1.04	0.039	0.034	0.034
R2	2	1.56	0.922	0.131	0.130
R3	2	1.04	0.247	0.052	0.052
R4	3	0.78	0.139	0.043	0.043
R5	2	0.52	1.306	0.301	0.300
R6	3	0.78	0.350	0.087	0.087
R7	4	1.56	0.452	0.068	0.068
R8	3	1.04	0.578	0.082	0.081
	0	0.00	0.000	0.000	1.682

Figura 5.31 – Tela de saída do modelo Acquanet com os resultados dos valores de demandas e respectivos graus de atendimento para a simulação do Cenário I (99% de garantia em 100% do tempo).

O modelo apresenta também como dados de saída uma série de outros valores, como as séries volumétricas, séries de vazões efluentes, etc. As séries volumétricas dos açudes foram comparadas com as séries obtidas pela metodologia proposta, através do cálculo do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, considerando que a série obtida pelo Acquanet fosse a série observada e a do SADr-IPH a série calculada, numa analogia com a calibração de modelos hidrológicos. Na verdade, a intenção nesse momento é apenas a comparação entre as duas séries, uma vez que não foi possível obter o valor exato de garantia de atendimento no Acquanet, além de uma limitação no mesmo referente à impossibilidade de fornecer como dado a entrada a série completa de evaporação líquida, somente as taxas médias mensais de evaporação. O estudo comparativo de valores está apresentado na Tabela 5.3, onde são informadas as vazões regularizadas e as respectivas garantias obtidas nos dois modelos, a diferença percentual entre os dois valores e o valor do coeficiente de Nash-Sutcliffe para as séries volumétricas dos reservatórios.

Tabela 5.3 - Estudo comparativo entre a metodologia proposta e o modelo Acquanet, indicando as vazões regularizadas para o cenário I.

Açude	Área (km ²)	SADr-IPH		Acquanet		Diferença	Nash
		Q reg. (m ³ /s)	Garantia	Q reg. (m ³ /s)	Garantia		
R1	21,91	0,027	99,0%	0,028	98,4%	-4%	0,99
R2	104,57	0,123	99,0%	0,130	98,4%	-5%	0,94
R3	36,78	0,050	99,0%	0,052	99,0%	-4%	0,99

R4	34,37	0,042	99,0%	0,043	99,2%	-1%	0,99
R5	121,54	0,242	99,0%	0,300	99,5%	-19%	0,73
R6	66,58	0,083	99,0%	0,087	99,2%	-5%	0,98
R7	158,93	0,067	99,0%	0,068	98,4%	-2%	0,90
R8	44,77	0,080	99,0%	0,081	99,0%	-1%	0,99
R9	36,58	0,033	99,0%	0,034	99,0%	-2%	0,98

A seguir, a Figura 5.32 apresenta um comparativo entre as séries volumétricas do açude R1, cujo coeficiente de Nash-Sutcliffe obtido foi de 0.99

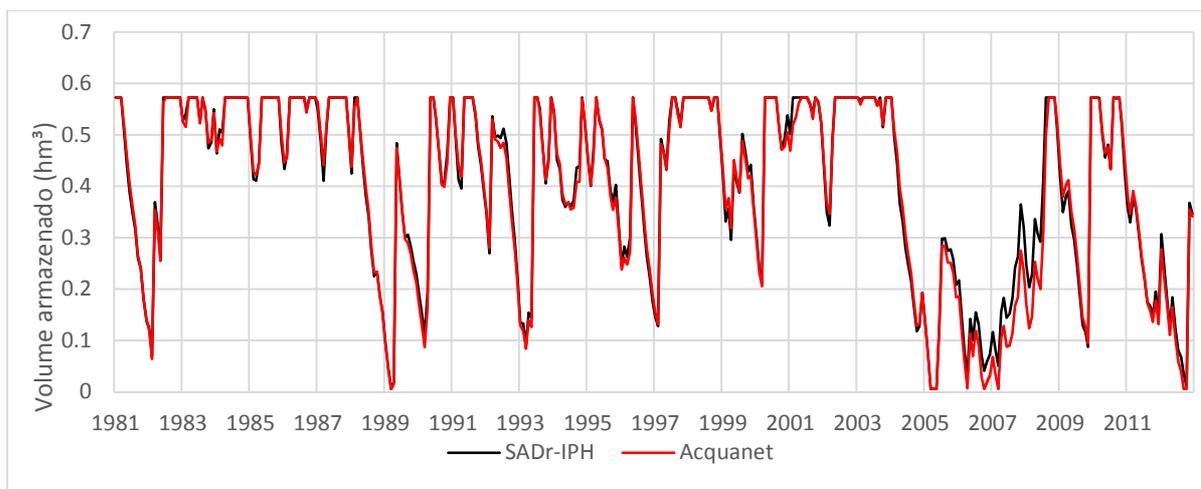


Figura 5.32 - Comparativo entre as séries volumétricas obtidas entre os dois modelos para o açude R1 (Cenário I).

Realizou-se um segundo teste, comparando os resultados da regularização com 99% de garantia somente durante o período de irrigação entre os dois modelos (Cenário II). A Tabela 5.4 apresenta os resultados, observando-se novamente a boa correlação entre as duas metodologias, e em seguida a Figura 5.33 apresenta um comparativo entre as séries volumétricas obtidas nas duas metodologias para o açude R1.

Tabela 5.4 - Estudo comparativo entre a metodologia proposta e o modelo Acquanet, indicando as vazões regularizadas para o cenário II.

Açude	Área (km ²)	SADR-IPH		Acquanet		Diferença	Nash
		Q reg. (m ³ /s)	Garantia	Q reg. (m ³ /s)	Garantia		
R1	21,91	0,07	99,0%	0,074	98,4%	-5%	0,996
R2	104,57	0,3	99,0%	0,306	97,9%	-2%	0,987
R3	36,78	0,121	99,0%	0,127	99,5%	-5%	0,996
R4	34,37	0,108	99,0%	0,119	99,0%	-9%	0,984
R5	121,54	0,452	99,0%	0,602	99,2%	-25%	0,953

R6	66,58	0,215	99,0%	0,234	97,9%	-8%	0,989
R7	158,93	0,222	99,0%	0,231	99,0%	-4%	0,965
R8	44,77	0,17	99,0%	0,178	98,4%	-4%	0,997
R9	36,58	0,091	99,0%	0,098	99,0%	-7%	0,990

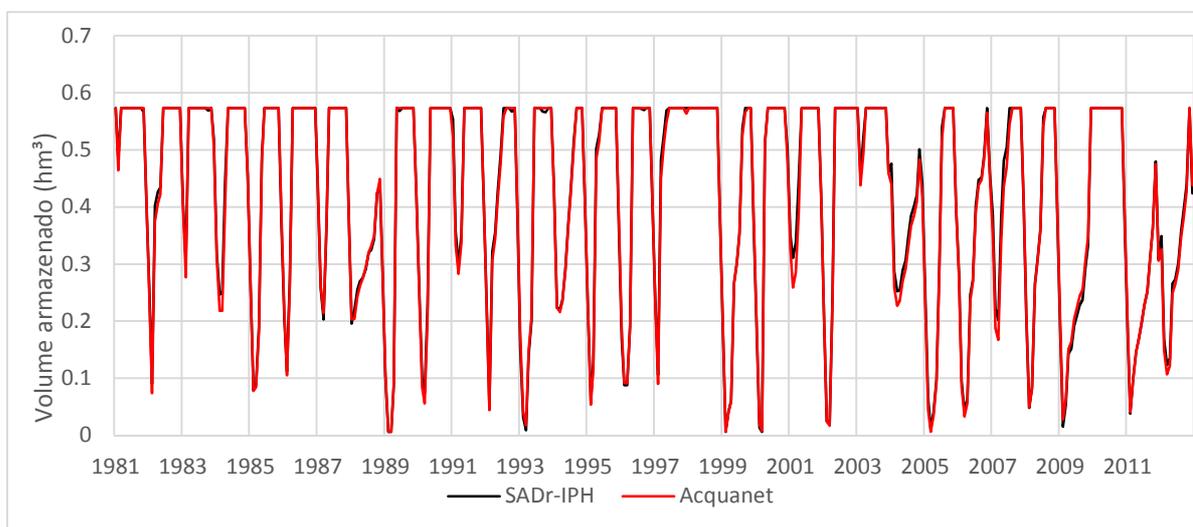


Figura 5.33 - Comparativo entre as séries volumétricas obtidas entre os dois modelos para o açude R1 (Cenário II).

5.3. ESTUDO DE ALTERNATIVAS DE INCREMENTO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA NA BACIA

Neste item será feita uma avaliação de alternativas de incremento da disponibilidade hídrica na bacia através da implementação de novas estruturas de regularização, lançando mão do modelo de otimização de reservatórios.

No final da década de 1980 foram realizados uma série de estudos na bacia relativos ao Plano Diretor de Irrigação da Bacia Hidrográfica da margem direita do rio Quaraí, decorrente de um convênio firmado entre o governo do Estado do Rio Grande do Sul e o Programa Nacional de Irrigação (PRONI). A elaboração do estudo abrange o cadastramento de locais passíveis de aproveitamento hidroagrícola, de regularização e de geração hidrelétrica, além de pontos de interligação do sistema viário vicinal (RIO GRANDE DO SUL, 1990).

Para a identificação dos possíveis pontos de barramento, foram considerados os aspectos topográficos, como a forma do vale, altura de ombreiras e diferença de cotas a jusante do eixo da barragem, a fim de se obter o beneficiamento por gravidade. Procurou-se também evitar que o reservatório inunde zonas densamente povoadas, pequenas propriedades e obras permanentes, além de terem sido analisados os aspectos geológicos da região. A partir da

definição dos pontos, partiu-se para o dimensionamento de cada um dos reservatórios propriamente dito, determinando-se, numa primeira fase, curvas de *cota x área x volume*, além da área de contribuição de cada local, a partir das cartas do exército.

O estudo também definiu a capacidade de regularização em cada local inventariado, a partir da determinação das Curvas de Probabilidade de Atendimento de Demanda de 120 dias, a partir da série hidrológica do então posto fluviométrico Estação Passo Osório, no Arroio Caverá, cuja área de drenagem é de 1163 km². Estas curvas de regularização foram geradas por simulação de regularização obtida na série histórica, variando tanto as demandas (vazões regularizadas) como os valores de armazenamento disponíveis no local.

Ao todo, foram verificados em torno de 35 locais passíveis de implementação de reservatórios. Destes, foram selecionadas 10 alternativas para aplicação no modelo de simulação e otimização desenvolvido neste trabalho. O objetivo da análise é verificar qual o volume necessário para atender uma determinada área irrigada considerando três níveis de garantia: 99%, 95% e 90%. A Figura 5.34 apresenta a localização das alternativas de implementação de açudes na margem direita do Quaraí, além das alternativas selecionadas para aplicação no modelo de simulação e otimização.

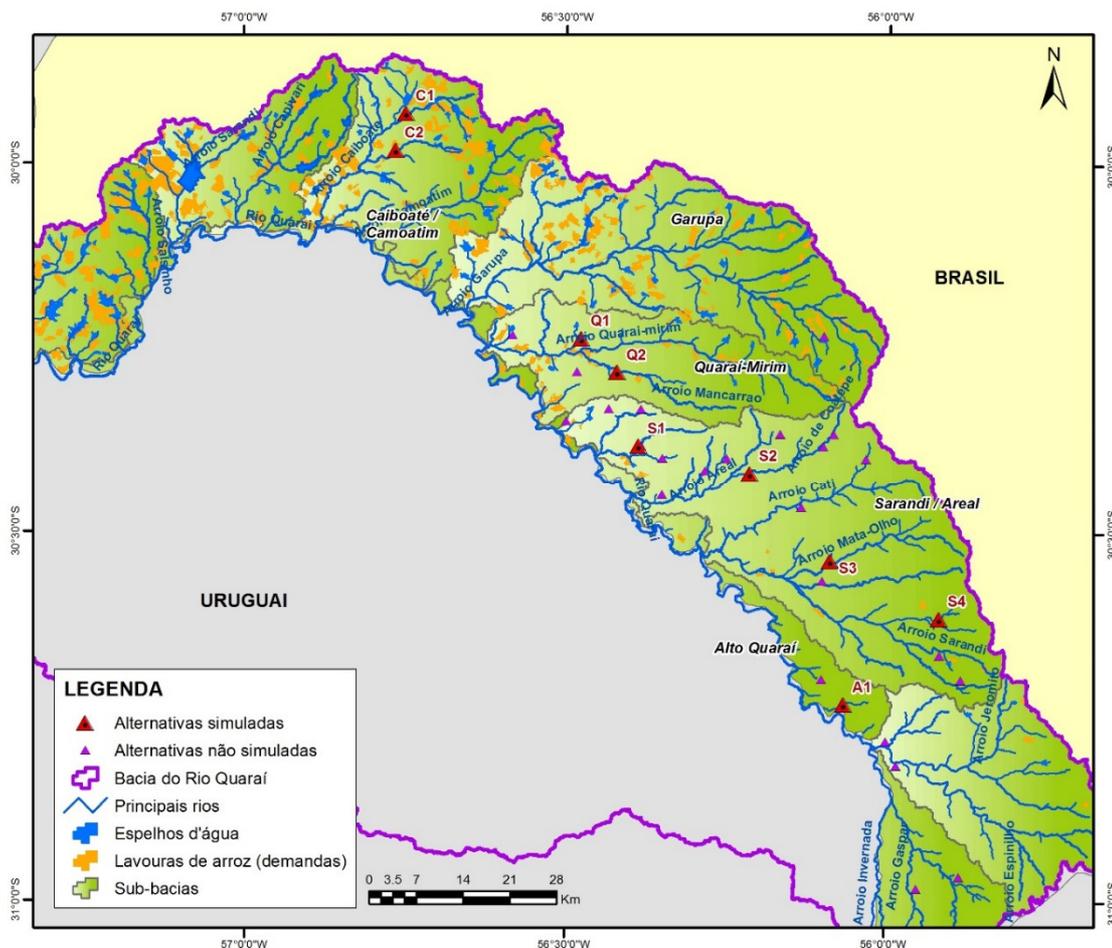
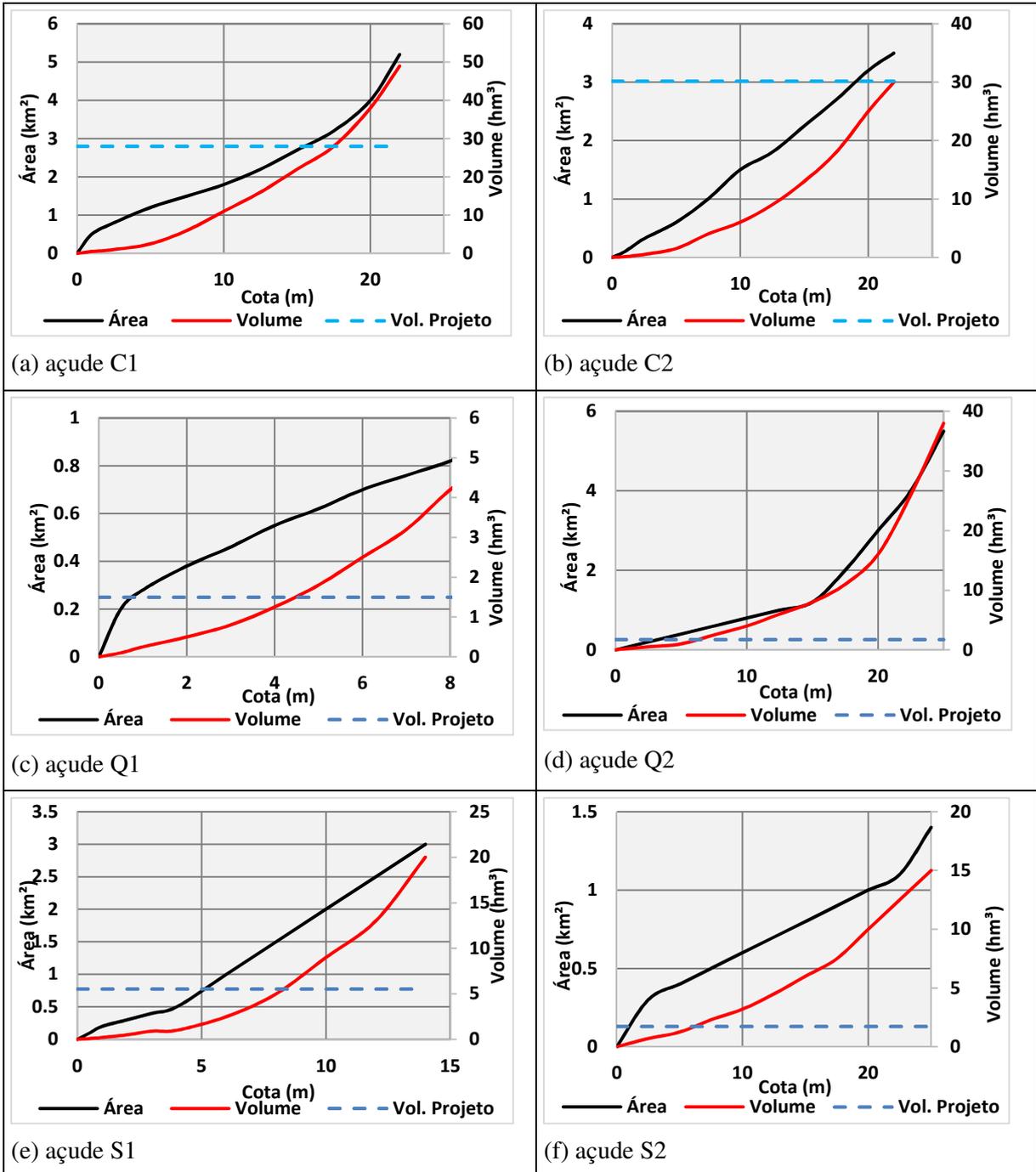


Figura 5.34 - Relação das alternativas de incremento da disponibilidade hídrica do Plano de Irrigação.

Tabela 5.5 - Relação das informações relativas aos reservatórios selecionados (fonte: RIO GRANDE DO SUL, 1990).

Cód.	Corpo Hídrico	Altura (m)	Vol. (hm ³)	Vazão reg. (m ³ /s)	Área alagada (ha)	Demanda atendida (ha)	Área à montante (km ²)
C1	Arroio Caiboaté	17	28,02	3,21	307	1854	95,46
C2	Contribuinte Arroio Caiboaté	17,71	30,19	2,91	355	2011	34,07
Q1	Contribuinte Arroio Quaraí-Mirim	4,18	1,50	0,20	55	100	13,67
Q2	Arroio Mancarrão	5,24	1,74	0,68	50	101	108,57
S1	Sanga do Lageado	8	5,54	0,81	159	159	40,99
S2	Arroio de Coatepe	5,81	1,73	0,41	43	101	33,940
S3	Arroio de Coatepe	18,94	34,07	3,78	397	2002	114,12
S4	Arroio Mata-Olho	10,86	8,63	1,83	236	503	10,47
S5	Contribuinte Arroio Sarandi	9,63	5,12	0,66	98	300	28,19
A1	Contribuinte direto do Rio Quaraí.	10	1,72	0,35	27	101	31,86

A Figura 5.35 apresenta as curvas cota x área x volume de cada projeto de implementação de açude ou reservatório. Observa-se que se tratam de barragens de pequeno porte, com volume máximo variando entre 5 e 50 hm³. Os pontos que formam as curvas dos açudes foram inseridos no modelo, diferente da metodologia até então adotada, relativo a uma equação em função da área superficial.



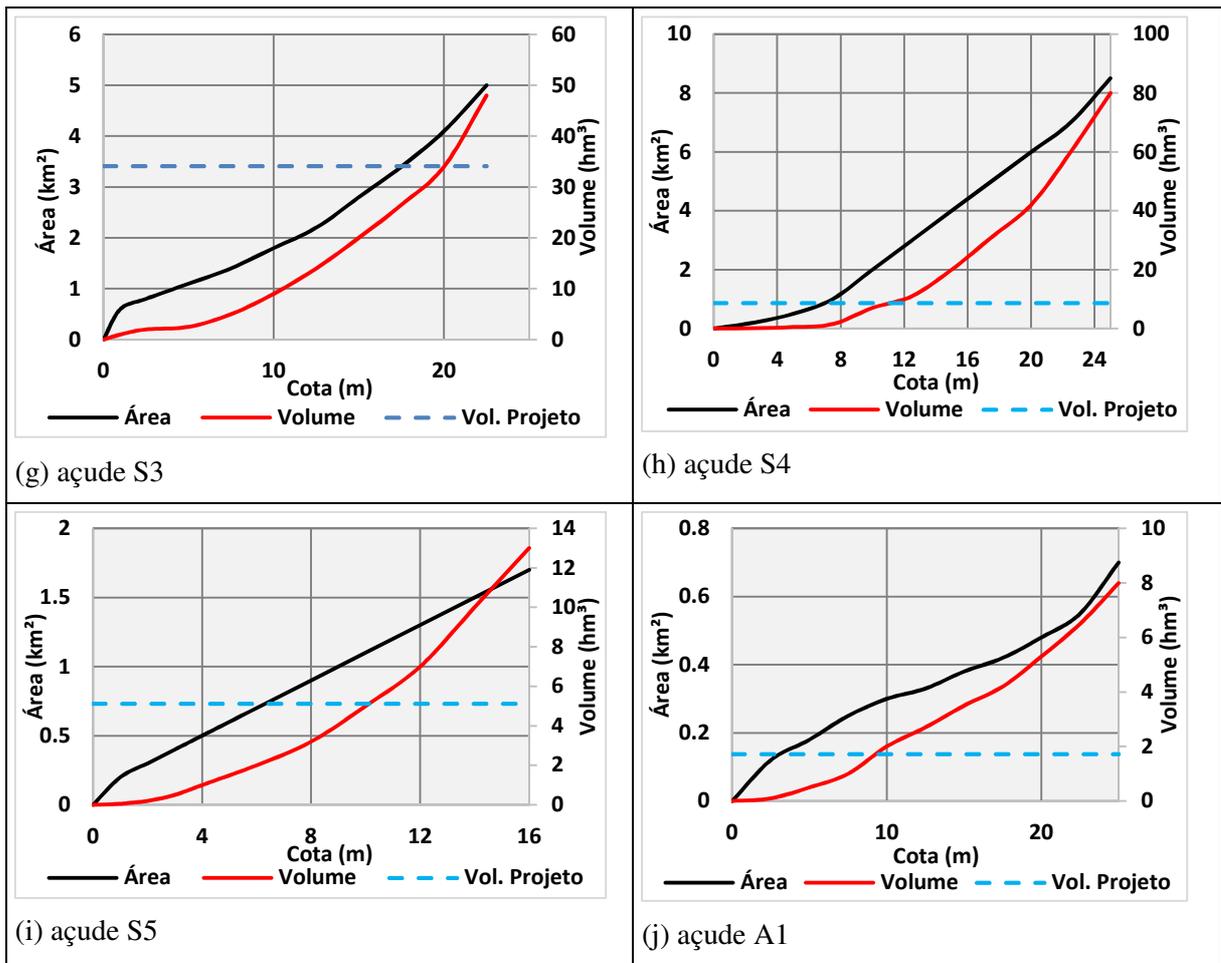


Figura 5.35 – Relação cota x área x volume dos projetos de implementação de açudes testados no modelo.

A metodologia utilizada é inspirada em ROBERTO (2002), no qual é feita uma descrição do modelo Acquanet, além de algumas aplicações do mesmo, dentre elas a definição do volume máximo de um reservatório em função da garantia de atendimento à uma região a ser irrigada. ROBERTO (2002) faz uma aplicação do modelo Acquanet em um único reservatório, no qual são utilizados seis valores possíveis de volume máximo, em combinação com seis valores possíveis de áreas a serem irrigadas, a fim de que se verifiquem as probabilidades de atendimento em cada um dos cenários estabelecidos.

No presente trabalho, a proposta é aplicar o algoritmo SCE-UA na resolução da função objetivo estabelecida na equação (3.22), para os níveis de garantia de 99%, 95% e 90%. Serão testados cinco níveis de volume para cada reservatório, correspondendo a 20%, 40%, 60%, 80% e 100% da capacidade máxima das estruturas. A partir da vazão regularizada em cada cenário, será possível obter a correspondente área irrigada, e então, para uma dada área de irrigação, será possível analisar quais açudes teriam a capacidade de abastecer esta área, e qual o volume máximo que a estrutura deve ter.

A Figura 5.36 apresenta os valores de vazão regularizada no período de irrigação para os açudes simulados, considerando a cota máxima das curvas cota x área x volume informadas na Figura 5.35 e os três níveis de garantia propostos, além dos valores de volume máximo requerido. Como já era esperado, à medida em que diminuímos a garantia de atendimento, aumentamos a vazão a ser regularizada. Em média, de nível para outro de garantia a diferença é em torno de 10% da regularização. A comparação com volume máximo é um indicativo da eficiência das estruturas, uma vez que alguns açudes conseguem regularizar uma vazão muito maior considerando um mesmo volume armazenado. Dessa forma, podemos considerar o açude Q2 o mais eficiente, e o açude S4 o mais inviável, uma vez que o mesmo necessita de um volume muito grande para regularizar uma vazão baixa comparado aos outros açudes.

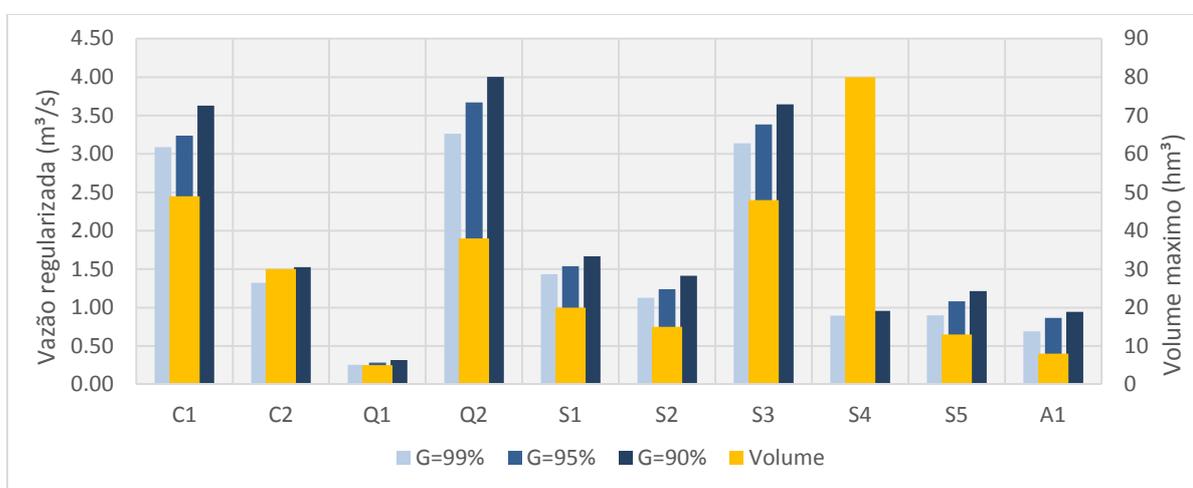


Figura 5.36 – Vazões regularizadas em cada açude e para cada nível de garantia, além do volume máximo requerido.

A Figura 5.37 apresenta uma síntese dos cenários de variação de volume e regularização de vazões. Para uma dada área irrigada requerida, deseja-se saber quais açudes poderiam suprir esta demanda, para um dado nível de garantia. Por exemplo, para que seja possível irrigar 1500 hectares de arroz, verifica-se que somente os açudes C1, S3 e Q2 teriam condições de fazê-lo, considerando um nível de garantia de 99%. Entretanto, o volume máximo requerido não é o mesmo para as três estruturas: enquanto que no açude Q2 o volume requerido é de 16.7 hm³, para o açude C1 este nível sobe para 18.7 hm³. Para complementar o estudo faltou incluir algum tipo de análise econômica, como por exemplo o custo de construção dos açudes em função o tamanho do mesmo.

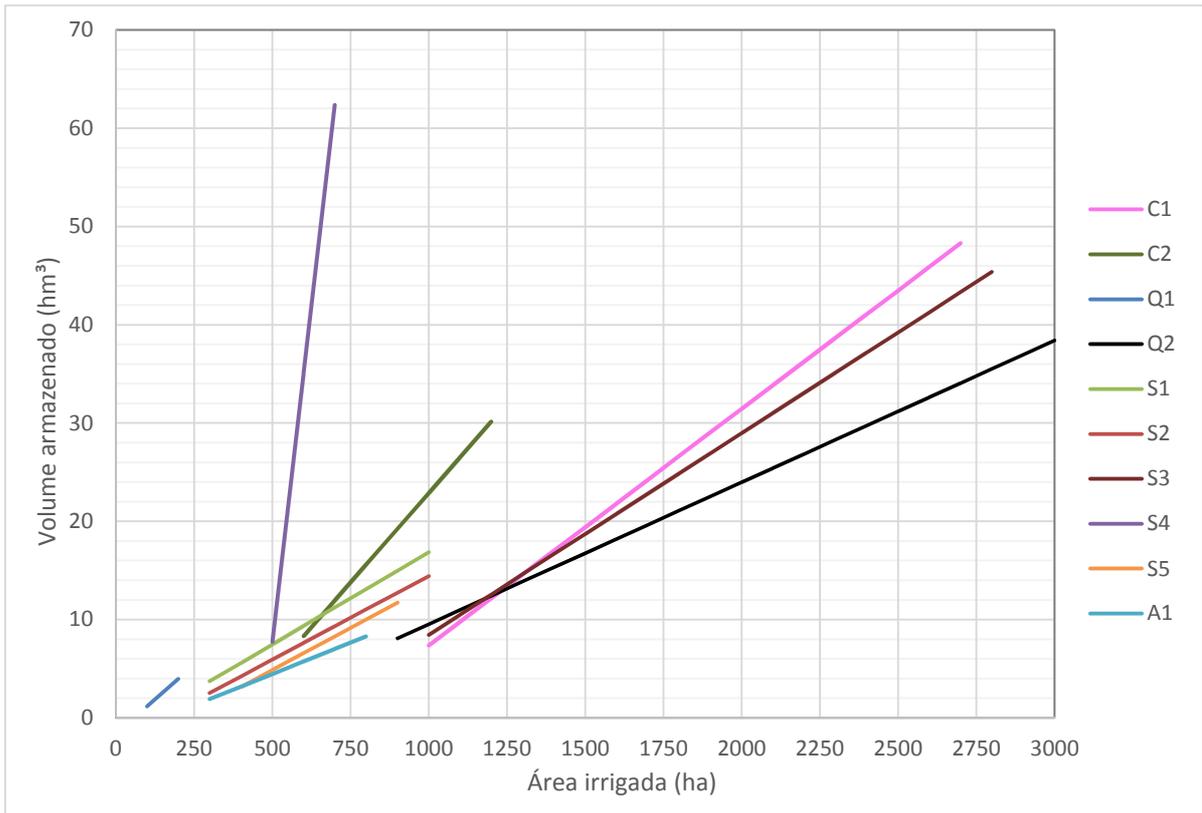


Figura 5.37 – Volume máximo a ser armazenado em função da área irrigada considerando um nível de garantia de 99%.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho avaliou de que forma se poderia contribuir para o aprimoramento da gestão de bacias com presença de um grande número de pequenas estruturas de regularização destinadas ao atendimento das demandas da rizicultura, através da aplicação de um sistema de apoio à decisão. Este cenário é bastante típico em bacias do interior do Estado do Rio Grande do Sul, principalmente para as bacias do rio Santa Maria, Ibicuí, Camaquã, além da bacia do Quaraí.

A partir dos resultados do modelo de simulação de balanço hídrico nos reservatórios, é possível concluir que não há água suficiente para o atendimento das demandas em 100% do tempo. Em média, cerca de 75% do volume total da demanda é suprida, considerando os valores atuais de área irrigada (safra 2011/12) perante a disponibilidade hídrica verificada entre os anos de 1985 e 2005. A fonte predominante utilizada são os açudes, no entanto as retiradas diretas dos trechos de rio são significativas, uma vez que na medida em que há esgotamento dos reservatórios em uma determinada temporada, é comum que se retire água do trecho mais próximo, como foi representado no modelo. Isto significa também que cerca de 70% da demanda atendida é em relação às captações diretas de açudes, e o restante complementado pelas captações em trechos de rio.

Durante o período analisado, algumas safras apresentaram déficits hídricos bastante críticos, em especial nos anos de 1988/89 e também na temporada de 1999/00. Nestas temporadas, apenas a metade de toda a demanda atual poderia ser atendida, e ainda constatou-se o esgotamento do trecho baixo do rio Quaraí durante os meses de dezembro e janeiro. Ainda com relação à disponibilidade nos trechos de rio, verificou-se o efeito dos açudes quanto à hipótese da não existência de descarregadores de fundo e conseqüentemente de não haver a manutenção de uma vazão mínima nos trechos de jusante. Esta condição faz com que os trechos após os reservatórios tenham sua disponibilidade bastante reduzida, com vazões abaixo da Q90 na maior parte do período.

Diante de tal cenário, é imprescindível que os critérios de outorga na bacia estejam claros, uma vez que a Lei das Águas determina que este recurso é um bem de domínio público, devendo-se sempre proporcionar seu uso múltiplo entre todos os usuários. Já existem iniciativas específicas na tentativa de regular o uso das águas na região, como o Marco

Regulatório de 2009 elaborado pela Agência Nacional de Águas, no qual regulamenta um total de 36 outorgas localizadas no próprio curso do Quaraí. A ferramenta apresentada neste trabalho visa regulamentar o uso de água em todas as estruturas de regularização de vazão existentes, sejam elas públicas ou privadas.

Também se faz necessário, como medida de gestão, a implementação dos instrumentos de outorga relativos à manutenção de vazão mínima à jusante dos reservatórios. Em ANA (2013), define-se que um reservatório deve manter uma vazão equivalente à Q90, ainda que em alguns casos a aplicação deste instrumento seja de difícil implementação, principalmente nos reservatórios de cabeceira, onde a Q90 é muito baixa. Com relação a este aspecto, existe também um acordo binacional entre Brasil e Uruguai onde se estabelece uma vazão ambiental mínima de 2 l/s.km² a fim de se promover a manutenção da disponibilidade nos trechos de rio.

O conceito de vazão regularizável com algum percentual de garantia, aplicado frequentemente em algumas legislações de Estados do Nordeste, é interessante no sentido de proporcionar uma discussão em torno dos riscos a serem admitidos ao escolher um determinado valor de garantia. Nos açudes existentes na bacia do Quaraí, ainda que não haja propriamente uma regularização, pois não há presença de estruturas de controle da vazão, considera-se que a vazão retirada em cada temporada seja equivalente à capacidade de regularização de cada açude.

Nesse sentido, foram definidos alguns cenários, regularizando tanto em 100% do tempo como somente no período onde existe a demanda, além de variar os percentuais de garantia de atendimento. Dos 34,17 m³/s outorgados na margem brasileira da bacia, se poderia chegar a um atendimento de 16,30 m³/s para uma garantia de 99%, 19,12 m³/s para uma garantia de 95%, e até 22,27 m³/s para uma garantia de 90%. A decisão sobre o percentual a ser adotado é uma decisão gerencial que deve ser discutida entre os usuários da bacia, a fim de se verificar os riscos que os mesmos estão dispostos a assumir para que se possa obter uma maior disponibilidade de água.

A execução de planos de recursos hídricos, instrumento previsto na PNRH, é um dos caminhos para a resolução de conflitos de uso da água, e através do planejamento poderão ser verificadas propostas como o aumento na disponibilidade hídrica na bacia, através da adoção de medidas estruturais, como a execução de novos reservatórios. É importante que se faça uma priorização das alternativas existentes, contemplando aqueles que apresentarem as melhores relações custo-benefício. A diferença de custo entre alternativas diferentes pode

estar representada numa maior área superficial requerida para regularizar um mesmo valor de vazão, por exemplo.

Nesse sentido, selecionou-se 10 projetos de reservatórios ainda não implementados na bacia, e verificou-se quais deveriam ser suas dimensões para atender uma determinada área irrigável para um dado nível de garantia. Dessa forma, fixando-se um valor de demanda requerida (ou área irrigada), é possível verificar quais reservatórios teriam condições de atender esta demanda, e qual o volume necessário para que tal condição ocorra. Desse modo, é possível priorizar alternativas com um alto potencial de retorno, e excluir aquelas que necessitam de um grande volume de armazenamento para atender uma área menor em relação às outras alternativas.

Com relação à metodologia utilizada, considera-se que a estrutura atual do mesmo é inferior a muitos sistemas genéricos de operacionalização de reservatórios existentes, pois a maioria deles possui funções para a resolução de problemas complexos envolvendo operações multiobjetivo. No entanto, considera-se que a metodologia avançou no sentido de integrar um modelo hidrológico distribuído compatível com a realidade local, além de lançar mão da utilização dos Sistemas de Informação Geográfica para obtenção das informações de entrada do modelo.

A utilização dos algoritmos de otimização foi essencial para a definição dos valores de vazão a serem regularizados por reservatório, através da definição da garantia a ser atingida na própria função-objetivo. Quanto ao emprego dos modelos heurísticos de otimização, mais precisamente quanto à utilização do algoritmo híbrido SCE-UA, observa-se que o algoritmo traz vantagens em relação à usual Programação Linear no sentido de não haver preocupação com as não-linearidades do modelo de simulação, podendo ser associado diretamente a eles, não havendo perda de representatividade da realidade para execução da otimização. No entanto, o excessivo tempo computacional necessário para a resolução de problemas com muitas variáveis pode ser um fator restritivo para o avanço desta técnica nos sistemas de apoio à decisão. A convergência das soluções deve ser observada, sendo por vezes necessária a implementação de pesos para eliminação de candidatos indesejados no processo de otimização.

A relação entre o percentual regularizado e a razão entre a área superficial e a área de drenagem dos reservatórios apresentou uma boa correlação em todos os cenários de garantia ($r^2 \cong 0,85$). Dessa forma, verifica-se uma possibilidade de utilização dessa relação em

reservatórios não simulados na bacia, como foi realizado nos açudes localizados na margem esquerda da bacia para definição dos valores outorgáveis nestes locais. No entanto, ainda são necessários novos estudos envolvendo essa questão, incluindo a aplicação do modelo em outras bacias e comparação das equações resultantes, verificação se não há alguma restrição em relação às dimensões do reservatório e da área de drenagem, verificação do número de pontos e das características dos pontos necessários para a construção destas equações, etc.

Existem diversas possibilidades de aprimoramento da metodologia proposta neste trabalho, envolvendo a integração entre o modelo hidrológico MGB-IPH e os sistemas de apoio à decisão para gerenciamento dos recursos hídricos. Algumas aplicações que poderiam ser incluídas na ferramenta atual incluem a definição de regras para priorização de demandas hídricas, baseadas tanto por critério de tipo uso quanto com relação ao critério de direitos de uso, otimização das regras de operação de reservatórios, definição de volumes meta para assegurar o atendimento de determinados usos, definição de curvas-guia de operação, dentre outras funções.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACA. **Asociación de Cultivadores de Arroz - Evolución de área por departamento.** Disponível em: <<http://www.aca.com.uy/>>. Acesso em: 2014.

ALBERTIN, L. L. Utilização de simulação computacional no gerenciamento integrado da água na Bacia do Sapucaí-Grande no Estado de São Paulo. **Minerva - Pesquisa e Tecnologia**, v. 3, n. 2, p. 215-222, 2006.

ANA. **Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos.** Agência Nacional de Águas – ANA. Brasília, p. 237. 2013.

ARNÉZ, F. A. **Análise de Critérios de Outorga do Uso da Água na Bacia do Rio Santa Maria.** Porto Alegre: UFRGS - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (Dissertação de Mestrado), 2002.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R. S. Large area hydrologic modeling and assessment. Part 1: Model development. **J. Am. Water Resources**, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.

AZEVEDO, L. G. T.; PORTO, R. L. L.; ZAHED F., K. Modelos de Simulação e de Rede de Fluxo. In: PORTO, R. L. L. **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos.** 2º. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2002. Cap. 4, p. 165-237.

BANZHAF, W.; NORDIN, P.; KELLER, R. E. & F. F. D. **Genetic Programming: an introduction.** [S.l.]: Morgan Kaufmann, 1998.

BRAVO, M.; WALTER, C.; TUCCI, C. E. M. Otimização de Regras de Operação de Reservatórios com Incorporação da Previsão de Vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 1, p. 181-196, Jan/Mar 2008.

CAMPOS, J. N. et al. Contribuições ao Debate Sobre as Eficiências de Pequenos e Grandes Reservatórios. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 31-38, abr/jun 2003.

CEARÁ. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Ceará.** Secretaria de Recursos Hídricos. Ceará. 1992.

COLLISCHONN, B. et al. Reconstituição das vazões naturais do Rio Caí (RS) a jusante da transposição de vazões do Sistema Salto. **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, São Paulo, 25/29 Novembro 2007.

COLLISCHONN, B. et al. Modelagem Hidrológica de Uma Bacia com Uso Intensivo de Água: Caso do Rio Quaraí-RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 4, p. 119-133, Out/Dez 2011.

COLLISCHONN, B.; COLLISCHONN, W. Classificação multitemporal de uso do solo usando imagens CBERS para fins de simulação e gerenciamento de recursos hídricos na bacia do rio Quaraí. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, 2009. 4687-4692.

COLLISCHONN, W. **Manual de Discretização de Bacias para aplicação do modelo MGB-IPH. Versão 1.2.** Projeto Integrado de Cooperação Amazônica e de Modernização do Monitoramento Hidrológico. Porto Alegre. 2009.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Calibração automática global do modelo IPH2. **Anais do XIV simpósio brasileiro de Recursos Hídricos**, Aracaju SE, nov 2001.

CURI, W. F. et al. Um Modelo de Outorga para Bacias Controladas por Reservatórios: 1 - Desenvolvimento do Modelo que Contempla Demandas Múltiplas e Variáveis Mensalmente. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 4, p. 73-82, out/dez 2011.

DINIZ, L. S. Calibração de Modelos Hidrológicos. In: GALVÃO, C. O. **Sistemas Inteligentes**. Porto Alegre: Editora da Universidade da UFRGS - ABRH, 1999.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research**, v. 28, n. 4, p. 1015-1031, 1992.

FAN, F. M. et al. **Manual do PrePro-MGB para aplicação do modelo MGB-IPH. Projeto Integrado de Cooperação Amazônica e de Modernização do Monitoramento Hidrológico**. FINEP/ANA/IPH-UFRGS. Porto Alegre (RS), p. 17. 2010.

FAN, F. M. et al. **Manual de introdução às ferramentas do archydro - Versão 2.1, Projeto Integrado de Cooperação Amazônica e de Modernização do Monitoramento Hidrológico**. FINEP/ANA/IPH-UFRG. Porto Alegre. 2011.

FAN, M. M.; COLLISHONN, W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 243-254, 2014.

FORGIARINI, F. R.; SILVEIRA, G. L. D.; CRUZ, J. C. Modelagem da Cobrança pelo uso da Água Bruta na Bacia do Rio Santa Maria/RS: I Estratégia Metodológica e Adaptação à Bacia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, p. 65-77, Jan/Mar 2008.

FRAGOSO JR., C. R. et al. Protótipo de Sistema de Controle de Balanço Hídrico para apoio à outorga integrado a um Sistema de Informações Geográficas. **Anais do Simpósio de Recursos Hídricos do Sul e Sudeste**, Rio de Janeiro, 2008.

FUNCEME. **Relatório Técnico - Mapeamento dos espelhos d'água do Brasil**. Ministério da Integração Nacional, Governo do Estado do Ceará. [S.l.], p. 106. 2008.

GUNTNER, A. et al. Simple water balance modelling of surface reservoir systems in a large data-scarce semiarid region. **Hydrological Sciences Journal**, v. 49, n. 5, p. 901-918, Outubro 2004.

HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J.; LOUCKS, D.. Reliability, resiliency, vulnerability criteria for water resources system performance evaluation. **Water Resources Research**, v. 18, n. 1, p. 2917-2924, 1982.

IBGE. Censo Demográfico. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default.shtm>>. Acesso em: dez 2013.

INE. Censos 2011. **Instituto Nacional de Estatística**, 2011. Disponível em: <<http://www.ine.gub.uy/censos2011/resultadosfinales/artigas.html>>. Acesso em: dez 2013.

ITO, B. K. et al. Decision Support System for Surface Water Planning in River Basin. **Journal of Water Resources Planning and Management**, p. 272-276, Jul/Ago 2001.

KAYSER, R. H. B.. **Sistema de Suporte à Decisão para gerenciamento de recursos hídricos integrado a um SIG**: desenvolvimento e aplicação na Bacia do Rio dos Sinos. Porto Alegre: Trabalho de conclusão de curso. (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

KIM, T. J.; WURBS, R. A. Modeling River/Reservoir System Management with the Expanded WRAP. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 15, n. 8, p. 1457-1467, Novembro 2011.

- KLIPSCH, J. D.; HURST, M. B. **HEC-ResSim Reservoir System Simulation User's Manual**. Davis, CA: Relatório Técnico, USACE, 2007.
- KOUTSOYIANNIS, D.; EFSTRATIADIS, A.; KARAVOKIROS, G. A Decision Support Tool for the Management of Multi-Reservoir Systems. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 38, n. 4, p. 945-958, Agosto 2002.
- LABADIE, J. W. **MODSIM**: River basin network flow model for conjunctive stream-aquifer management. Fort Collins: Department of Civil Engineering, Colorado State University, 1988.
- LABADIE, J. W. Optimal Operation of Multi-reservoir Systems: State-of-the-Art Review. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 130, n. 2, p. 93-111, Abril 2004.
- LABADIE, J. W. MODSIM: Decision Support System for Integrated River Basin Management. In: JAKEMAN, A.; VOINOV, A.; RIZZOLI, A. **State-of-the-Art and Futures in Environmental Modelling and Software**. [S.l.]: IDEA Book Series, 2008.
- LABADIE, J. W. **MODSIM 8.1 River Basin Management Decision Support System - User Manual and Documentation**. Ft. Collins, CO: Relatório Técnico, 2010.
- LEÃO, J. C. **Metodologia para outorga de uso das águas reservadas em regiões semi-áridas aplicadas à bacia do Canindé-PI**. Teresina: Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) da Universidade Federal do Piauí. Dissertação (Mestrado)., 2008.
- LEIPNIK, M. R.; KENP, K. K.; LOAICIGA, H. A. Implementation of GIS for Water Resources Planning and Management. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 119, n. 2, p. 184-205, Abril 1993.
- LOUCKS, D. P. **Water Resource Systems Planning and Analysis**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Inc., v. I, 1981.
- LOUCKS, D. P.; VAN BEEK, E. **Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications**. Holanda: UNESCO, v. I, 2005.
- MAIDMENT, D. R. **Arc Hydro: GIS for Water Resources**. Redlands, CA: ESRI Press, 2002.

- MAINARDI, F. F. et al. **Manual ArcHydro para aplicação do modelo MGB-IPH. Versão 1.2.** Projeto Integrado de Cooperação Amazônica e de Modernização do Monitoramento Hidrológico. Porto Alegre. 2009.
- MARTIN, P. H. et al. Interfacing GIS with Water Resource Models: A State-of-the-Art Review. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 41, n. 6, p. 1471-1487, Dezembro 2005.
- MARTINS, E. S. et al. Utilização de imagens CBERS para mapeamento dos espelhos d'água do Brasil. **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, 2007.
- MEIRELLES, F. S. C. **Cobrança por Volume em Sistemas Coletivos de Irrigação como Instrumentos de Gestão da Água.** Porto Alegre: UFRGS - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (Tese de Doutorado), 2009.
- MERABTENE, T. et al. Risk assessment for optimal drought management of an integrated water resources system using a genetic algorithm. **Hydrological Processes**, v. 16, p. 2189–2208, Dezembro 2002.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA. **Cartas de Suelos**, 1976. Disponível em: <<http://www.cebra.com.uy/renare/mapa/cartas-de-suelos/>>. Acesso em: Out 2013.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicações.** 2º. ed. Viçosa: UFV, 2003.
- NICKLOW, J. et al. State of the Art for Genetic Algorithms and Beyond in Water Resources Planning and Management. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 136, n. 4, p. 412-432, Julho/Agosto 2010.
- PETERS, J.; CHARLEY, W.; PABST, A. **The hydrologic modeling system (HEC-HMS): Design and development issues - Paper No. 149.** Hydrologic Engrg. Ctr., U.S. Army Corps of Engineers. Davis, Calif. 1995.
- PORTO, R. L. L. et al. **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos.** 2º. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2002.
- PORTO, R. L. L. et al. Sistema de suporte a decisão para análise de sistemas de recursos hídricos. In: SILVA, R. C. V. **Métodos numéricos em recursos hídricos.** Porto Alegre: ABRH, 2003. Cap. 2, p. 93-240.

- REBOUCAS, A. D. C. Água na região Nordeste: desperdício e escassez. **Estud. av. [online]**, v. 11, n. 29, p. 127-154, 1997. ISSN ISSN 0103-4014.
- REIS, L. G. **Avaliação de critérios de outorga associados a políticas de operação de reservatórios na bacia do rio Moxotó, semiárido brasileiro**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado), 2002.
- RIO GRANDE DO SUL. **Plano Diretor de Irrigação para a Bacia do Rio Quaraí**. Governo do Estado do Rio Grande do Sul / Programa Nacional de Irrigação - PRONI. Porto Alegre. 1990.
- RIO GRANDE DO SUL. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul - Relatório Síntese do Diagnóstico e Prognóstico Hídrico das Bacias Hidrográficas do Estado**. DRH/SEMA. Porto Alegre. 2007.
- ROBERTO, A. N. **Modelos de Rede de Fluxo para Alocação de Água entre Múltiplos Usos em Uma Bacia Hidrográfica**. São Paulo: Escola Politécnica Universidade de São Paulo (Dissertação de Mestrado), 2002.
- RODRIGUES, A. C. L. et al. Um Modelo de Outorga para Bacias Controladas por Reservatórios: Aplicação do Modelo na Bacia Hidrográfica do Rio Piancó — PB. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 4, p. 83-94, Out/Dez 2011.
- SCHARDONG, A.; SIMONOVIC, S.; VASAN, A. Multiobjective Evolutionary Approach to Optimal Reservoir Operation. **JOURNAL OF COMPUTING IN CIVIL ENGINEERING**, v. 27, p. 139-147., 2013.
- SETTI, A. A. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Agência Nacional de Águas, 2001.
- SILVA, T. C.; SILANS, A. P.; PEDROSA F., L. A. Planejamento dos Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Gramame, Uma Bacia Litorânea do Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 4, p. 121-134, Out/Dez 2002.
- SIMONOVIC, S. P. **Managing water resources: Methods and tools for a systems approach**. Paris: [s.n.], 2009.
- SÓRDIA, M. A. (ORGANIZADOR). **As barragens e a água no mundo**. Comissão Internacional de Grandes Barragens - ICOLD. [S.l.]. 2008.

- SOROOSHIAN, S.; DUAN, Q.; GUPTA, V. Model calibration. In: SINGH, V. J. **Computer models of watershed hydrology**. [S.l.]: Water Resources Publications, 1995. p. 1130.
- STRECK, V.; KAMPF, N.; KLAMT, E. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 2002.
- SUI, D. Z.; MAGGIO, R. C. Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems, and prospects. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 23, p. 33-51, 1999.
- TRIANA, E.; LABADIE, J. W. **GEO-MODSIM: Spatial Decision Support System for River Basin Management**. 2007 ESRI International User Conference. San Diego, CA: [s.n.]. 2007.
- TRIANA, E.; LABADIE, J. W. GIS-Based Decision Support System for Improved Operations and Efficiency Conservation in Large-Scale Irrigation Systems. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 138, p. 857-867, outubro 2012.
- TROGER, F. H. **Instrumentalização do PROPAGAR-MOO com ferramentas de planejamento do uso da água e de análise da simulação através da linguagem Pascal Script**. Porto Alegre: Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.
- TUCCI, C. E. **Regionalização de vazões**. Porto Alegre: ANEEL/UFRGS/IPH, 2000.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: ABRH - Editora da UFRGS, 1998.
- VAZ, A.; COLLISCHONN, W. River reach length and slope estimates for large-scale hydrological models based on a relatively high-resolution digital elevation model. **Journal of Hydrology**, v. 343, p. 127-139, 2007.
- VIANNA JR., P. **Operação Ótima de Sistemas de Reservatórios: Implementação de Ferramentas Baseadas em Técnicas de Modelagem Orientada a Objetos em Sistemas de Apoio à Decisão**. Porto Alegre: Tese (doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.
- VIEGAS FILHO, J. S.; LANNA, A. E. L. O Paradigma da Modelagem Orientada a Objetos Aplicada a Sistemas de Recursos Hídricos (I): Modelo Básico de Objetos para uma Rede Hidrográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 8, p. 79-89, Setembro 2003.

- WANG, L. et al. Assessment of a distributed biosphere hydrological model against streamflow and MODIS land surface temperature in the upper Tone River Basin. **Journal of Hydrology**, v. 377, p. 21-34, 2009.
- WANG, L.; NYUNT, C. T.; SAP, T. V. Development of an integrated modeling system for improved multi-objective reservoir operation. **Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China** , v. 4, n. 1, p. 47-55, Março 2010.
- WEBER, E.; HASENACK, H.; FERREIRA, C. J. S. Adaptação do modelo digital de elevação do SRTM para o sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação., Porto Alegre, 2004. ISSN ISBN 978-85-63843-02-9. Disponível em: <<http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo>>. Acesso em: agosto 2013.
- WHITEAKER, T. L. et al. Integrating Arc Hydro Features with a schematic Network. **Transactions in GIS**, v. 10, n. 2, p. 219–237, 2006.
- WURBS, R. A. Reservoir-System Simulation and Optimization Models. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 119, n. 4, p. 455-472, Agosto 1993.
- WURBS, R. A. **Modeling and Analysis of Reservoir System Operations**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 1996.
- WURBS, R. A. **Reference and Users Manual for the Water Rights Analysis Package (WRAP)**. College Station, TX: Relatório Técnico 180, Texas Water Resources Institute, v. 3, 2001.
- WURBS, R. A. **Comparative Evaluation of Generalized River/Reservoir System Models**. College Station, Texas: Relatório Técnico 282, Texas Water Resources Institute, 2005.
- WURBS, R. A. Reservoir/River System Management Models. **Texas Water Journal**, v. 3, n. 1, p. 26-41, Agosto 2012.
- YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Multi-objective global optimization for hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v. 204, p. 83-97, 1998.
- ZAGONA, E. A. et al. RiverWare: A Generalized Tool for Complex Reservoir System Modeling. **Journal of The American Water Resources Association**, v. 37, n. 4, p. 913-929, Agosto 2001.