



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JOSÉ RÁURIUM BACALHAU

**SIMULAÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA E OPERAÇÃO DE
RESERVATÓRIOS DE ABASTECIMENTO EM RELAÇÃO À VARIABILIDADE
CLIMÁTICA: BACIA DO RIO PIRAPAMA EM PERNAMBUCO**

RECIFE
2015

JOSÉ RÁURIUM BACALHAU

**SIMULAÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA E OPERAÇÃO DE
RESERVATÓRIOS DE ABASTECIMENTO EM RELAÇÃO À VARIABILIDADE
CLIMÁTICA: BACIA DO RIO PIRAPAMA EM PERNAMBUCO**

Dissertação de Mestrado submetida ao Centro de Tecnologia e Geociências – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia civil, área de concentração Recursos Hídricos.

Orientador: Prof^o Alfredo Ribeiro Neto, D.Sc.
Coorientadora: Prof^a Suzana Maria Gico Lima Montenegro, D.Sc.

RECIFE
2015

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

- B116s Bacalhau, José Ráurium.
Simulação da disponibilidade hídrica e operação de reservatórios de abastecimento em relação à variabilidade Climática: bacia do rio Pirapama em Pernambuco. - Recife: A Autora, 2015.
164folhas, Il. e Tab.
- Orientador: Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto.
Coorientadora: Profª Dr.ª Suzana Maria Gico Lima Montenegro.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2015.
Inclui Referências e Apêndices.
1. Engenharia Civil. 2. Modelagem hidrológica. 3. AcquaNet. 5. Curvas-guia.
6. Curvas de aversão a risco. I. Ribeiro Neto, Alfredo. (Orientador). II. Montenegro, Suzana Maria Gico Lima. (Coorientador).
- UFPE
- 624 CDD (22. ed.) BCTG/2015-302



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**SIMULAÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA E OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS
DE ABASTECIMENTO EM RELAÇÃO À VARIABILIDADE CLIMÁTICA:
BACIA DO RIO PIRAPAMA EM PERNAMBUCO**

defendida por

José Ráurium Bacalhau

Considera o candidato APROVADO

Recife, 26 de outubro de 2015

Orientadores:

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto - UFPE
(orientador)

Prof.^a Dr.^a Suzana Maria Gico Lima Montenegro - UFPE
(coorientadora)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto - UFPE
(orientador)

Prof.^a Dr.^a Simone Rosa da Silva - UPE
(examinadora externa)

Prof. Dr. José Almir Cirilo – UFPE
(examinador interno)

A Deus, fonte da vida;

Aos meus amados pais, Marieta e
Pascoal Bacalhau;

À minha valiosa esposa Susi e ao
meu amado filho Vitor, dedico.

Ao Estado de Pernambuco, entrego
minha contribuição, com a
esperança de poder melhorar o
abastecimento hídrico da Região
Metropolitana do Recife.

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, Pai de infinito Amor, “inteligência suprema e causa primária de todas as coisas”¹.

Aos meus anjos encarnados, intitulados de pais, **José Pascoal Bacalhau** e **Maria Deocleciano Bacalhau “Marieta”**, aos quais devo minha existência e o exemplo dignificante de cada dia.

A minha joia rara, companheira e esposa, **Susi Mendes Bacalhau**, que coordenou com maestria o nosso lar frente ao tempo subtraído por esta jornada, sem poupar incentivos e apoiou em todos os momentos.

Ao arco-íris da nossa vida, nosso amado filho **José Vitor Mendes Bacalhau**, que com compreensão e carinho, perguntava frequentemente: - Isso vai acabar quando Papai?

Ao meu irmão **José Rauriano Bacalhau**, que juntamente com sua esposa **Aline Rebeca** e meus sobrinhos **Matheus e Melissa** formam uma extensão do nosso lar, vibrando a todo instante cada passo desta realização.

Ao **Prof. Manoel Sylvio Campello** pelas lições de amor à engenharia e paciência em iniciar um sonhador inquieto.

Ao meu orientador **Prof. Alfredo Ribeiro Neto** pela sua confiança e amizade, sempre prestativo, dedicado e paciente na orientação deste trabalho.

À minha coorientadora **Profa. Suzana Maria Gico Lima Montenegro** por ter me aceito como orientando e ter disponibilizado parte do seu precioso tempo na transmissão dos seus valiosos conhecimentos durante todo o trajeto.

Aos **Professores do Grupo de Recursos Hídricos da UFPE (GRH/UFPE)**, pela amizade e conhecimentos transmitidos, em especial ao **Prof. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral** e ao **Prof. José Roberto Gonçalves de Azevedo**.

¹ KARDEC, Allan - O Livro dos Espíritos - FEB, Rio de Janeiro, 1994 – Questão Nº 1.

À **Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC)**, em nome da Ex-gerente de Planos e Sistemas de Informações (GPSI) **Maria Evelina Menezes de Sá**, a quem devo todo incentivo e apoio em minha especialização profissional, do Gerente de Monitoramento e Fiscalização (GRMF) **Clênio Torres Filho** pelo aprendizado do convívio profissional e do Diretor de Regulação e Monitoramento (DRM) **Marconi de Azevedo Soares** pela sua colaboração na coleta de informações junto à Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA).

Aos **Colegas da GPSI/APAC**, pelo agradável convívio e por todas as palavras de incentivo e apoio.

À **equipe da COMPESA**, em nome do Assessor da Presidência **Sergio Torres**, do Auxiliar de Saneamento **José Francisco dos Santos Neto**, da Técnica Operacional em Química **Ana Paula Rocha**, do Operador de Sistema **Ivson Lucas da Mota** e do Assistente Técnico Operacional **Reginaldo Pereira de Melo**, pela atenção, ajuda, disponibilização dos dados e paciência.

Ao meu irmão por escolha **Jesiel Marques da Silva**, que dividiu comigo por 17 anos medos, alegrias, vitórias, derrotas, planos e sonhos, quando até então eu não imaginava sequer exercer a engenharia.

À **Secretaria do PPGEC/UFPE**, em nome da coordenadora **Andréa Negromonte Vieira Matoso**, pela disponibilidade, atenção e apoio nos caminhos administrativos.

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, bem como aqueles que simplesmente acreditaram em mim.

“Agradeço todas as dificuldades que enfrentei;
não fosse por elas, eu não teria saído do lugar.
As facilidades nos impedem de caminhar.
Mesmo as críticas nos auxiliam muito”.

Francisco Cândido Xavier

RESUMO

A costa litorânea do Estado de Pernambuco no Nordeste do Brasil é dotada por várias bacias hidrográficas onde pode-se destacar a bacia do rio Pirapama, que abrange sete municípios e é constituída dos principais mananciais de abastecimento da Região Metropolitana do Recife. O presente estudo apresenta a simulação da disponibilidade hídrica da bacia do Pirapama, e propõe regras de operação para os reservatórios de abastecimento hídrico inclusos na bacia, levando-se em conta a variabilidade climática com ênfase a evitar as condições de racionamento e colapso do reservatório Pirapama frente aos eventos de seca. A partir do modelo hidrológico SMAP foi gerada a série de vazões em 7 sub-bacias da bacia do rio Pirapama abrangendo o período de 1933 a 2014. Essa série de dados foi inserida no modelo de simulação AcquaNet que permitiu elaborar a rede de fluxo representativa da bacia e simular a disponibilidade hídrica nas suas sub-bacias e reservatórios estratégicos. Embasadas em metodologias distintas, foram apresentadas duas propostas de regras de operação para o reservatório Pirapama e uma para o reservatório Sicupema. A primeira proposta, as curvas-guia, consistiu no zoneamento do volume útil do reservatório de acordo com o estado de severidade de seca, sendo os eventos de seca quantificados através do índice de escoamento padronizado SRI (Standardized Runoff Index). A segunda proposta foi a simulação das Curvas de Aversão a Risco – CAR através do AcquaNet, que possibilitou analisar o comportamento do reservatório para várias vazões de retiradas, tendo por base as aflúncias no biênio mais crítico da série simulada. Para o reservatório Sicupema, foram realizadas simulações no AcquaNet, estabelecendo regras de operação através do volume meta. Os resultados mostraram um ajuste satisfatório na calibração e validação do modelo hidrológico, assim como, na análise comparativa dos volumes simulados e monitorados do reservatório Pirapama. O comportamento dos 82 anos simulados no reservatório Pirapama demonstrou a necessidade de se alterar as regras de operação atuais, pois o mesmo esteve por 5 anos e meio nas condições de racionamento ou colapso. As regras de operação propostas, quando aplicadas ao reservatório Pirapama, se mostraram eficientes e eficazes, eliminando o risco de colapso, e reduzindo a condição de racionamento de 39 para 4 e 7 meses, nas curvas-guia e CAR, respectivamente, constituindo numa importante ferramenta de tomada de decisão na gestão do maior sistema de abastecimento do Estado de Pernambuco.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem hidrológica. AcquaNet. Curvas-guia. Curvas de aversão a risco.

ABSTRACT

The coastline of the state of Pernambuco in northeastern Brazil is endowed by various river basins where we can highlight the basin of the Pirapama river, covering seven cities and is responsible for most of the supply of the Metropolitan Region of Recife. This study presents the simulation of water availability of Pirapama River basin, located in the coastline of the state of Pernambuco in northeastern Brazil, and proposes operating rules for water supply reservoirs included in the basin, taking into account the variability climate with emphasis on avoiding rationing conditions and collapse of Pirapama reservoir forward to drought events. From the hydrological model was generated series of discharges in 7 sub-basins of Pirapama river basin in period from 1933 to 2014. This data set was inserted into the simulation model AcquaNet which established the network of representative outflow of the basin and simulate water availability in their sub-basins and strategic reservoirs. Based on different methodologies were presented two proposals for operating rules for Pirapama reservoir and one for Sicupema dam. The first proposal, the rules curves, consisted of the zoning of the useful volume of the reservoir according to drought severity state, and drought events quantified by Standardized Runoff Index- SRI. The second proposal was the simulation of Aversion to Risk Curves - CAR through AcquaNet, which made it possible to analyze the reservoir behavior for several withdrawals flows, based on two years of critical inflows simulated series. For Sicupema reservoir simulations were performed in AcquaNet, establishing operating rules by volume goal. The results showed a satisfactory adjustment in the calibration and validation of hydrological model, as well as the comparative analysis of the simulated volumes and monitored the Pirapama reservoir. The behavior of the simulated 82 years in Pirapama reservoir demonstrated the need to change the current operating rules, because it was for 5 years and a half in the rationing conditions or collapse. The rules of operation proposals when applied to Pirapama reservoir, were efficient and effective, eliminating the risk of collapse, and reducing 39 rationing condition for 4 and 7 months, the guide curves and CAR, respectively, constituting an important decision-making tool in managing the largest supply system of the State of Pernambuco.

KEY-WORDS: Hydrologic modeling. AcquaNet. Rules curves. Aversion to risk curves.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-Municípios contidos na bacia do rio Pirapama.....	35
Figura 2-Bacias fronteiriças da GL-2	35
Figura 3-Principais rios e reservatórios da bacia do rio Pirapama	36
Figura 4-Mapa de Isoietas da área de estudo.....	37
Figura 5-Regime de precipitação da bacia do rio Pirapama.....	38
Figura 6-Geologia da bacia do rio Pirapama	39
Figura 7- Geomorfologia da bacia do rio Pirapama	40
Figura 8-Mapa altimétrico da bacia do rio Pirapama	41
Figura 9-Distribuição espacial dos tipos de solo na área de estudo.	42
Figura 10-Imagens da vegetação ciliar do lago do reservatório Gurjaú.....	43
Figura 11-Mapa de uso e ocupação do solo	44
Figura 12-Mapa das estradas que cortam a bacia do rio Pirapama	45
Figura 13-Vista a jusante da barragem de Pirapama (fev./2015)	46
Figura 14-Regiões de Desenvolvimento (RD) do Estado de Pernambuco.....	48
Figura 15-Participação dos sistemas integrados na produção anual (Adaptado de RODELLA, 2014)	49
Figura 16-Reservatórios que compõem o Sistema de Abastecimento urbano da RMR	50
Figura 17-Perfil longitudinal da barragem	52
Figura 18-Tomada de água do reservatório	52
Figura 19-Instalações da estação elevatória	52
Figura 20-Sala de controle da estação elevatória	52
Figura 21-Adutora de água bruta da barragem de Gurjaú.....	53
Figura 22-Esquema de funcionamento do Modelo Chuva-Vazão SMAP.....	57
Figura 23-Fluxograma do Modelo Chuva-Vazão SMAP a Nível Mensal	60
Figura 24-Distribuição espacial das estações pluviométricas	66
Figura 25-Localização das estações fluviométricas	68
Figura 26-Curva Cota x Área x Volume Pirapama	72
Figura 27-Curva Cota x Área x Volume Sicupema.....	73
Figura 28-Mapa das sub-bacias delimitadas.....	76

Figura 29-Grade de pontos sobre a bacia hidrográfica do rio Pirapama para o cálculo da precipitação média.....	77
Figura 30-Bacia hidrográfica da barragem Pirapama.....	79
Figura 31-Rede de fluxo do reservatório Pirapama.....	80
Figura 32-Rede de fluxo simplificada Sicupema	81
Figura 33- Desagregação das Outorgas	83
Figura 34- Rede de fluxo da bacia do rio Pirapama	87
Figura 35-Esquema da sequência temporal dos diversos tipos de seca (adaptado de NDMC, 2006).....	89
Figura 36-Distribuição normal com o SPI tendo uma média de 0 e uma variância de 1.	95
Figura 37-Hidrograma de calibração da estação fluviométrica 39192000.....	100
Figura 38-Hidrograma de validação da estação fluviométrica 39192000.....	101
Figura 39-Hidrograma de calibração da estação fluviométrica 39195000.....	103
Figura 40-Hidrograma de validação da estação fluviométrica 39195000.....	104
Figura 41-Hidrograma de calibração da estação fluviométrica 39200000.....	106
Figura 42-Hidrograma de validação da estação fluviométrica 39200000.....	107
Figura 43-Curva de permanência das vazões regularizadas.....	111
Figura 44-Volumes finais ao longo dos meses do Reservatório Pirapama para Q_{100} e Q_{95}	111
Figura 45-Volume total evaporado por vazão regularizada	112
Figura 46-Volume total vertido por vazão regularizada.....	112
Figura 47-Volume total final por vazão regularizada.....	113
Figura 48- Volume total de retirada do reservatório por vazão regularizada.....	113
Figura 49-Esquema de vazões no AcquaNet.....	114
Figura 50-Curvas de permanência oferta e demanda (Sub-bacia-1)	115
Figura 51- Curvas de permanência oferta e demanda (Sub-bacia-2)	116
Figura 52-Curvas de permanência oferta e demanda reservatório Gurjaú	117
Figura 53-Curvas de permanência do reservatório Pirapama.....	118
Figura 54-Curva de permanência das demandas	119
Figura 55- Volumes finais reservatório Pirapama.....	120
Figura 56- Volumes monitorados e calculados	120

Figura 57-Verificação do modelo.....	122
Figura 58-Gráfico comparativo das precipitações mensais de 2012-2013 com as médias históricas.....	124
Figura 59-Etapas para classificação das vazões afluentes nos níveis de seca.....	126
Figura 60- Volumes de racionamento e colapso	128
Figura 61-Volume mediano e Curvas-guia do reservatório Pirapama	130
Figura 62-Volumes simulados com as curvas-guia.....	130
Figura 63-Tela das definições gerais do módulo CAR do AcquaNet	133
Figura 64-Curvas bianuais de Aversão a Risco do reservatório Pirapama.....	134
Figura 65-Curvas Anuais de Aversão ao Risco e Volumes medianos simulados do Reservatório Pirapama.....	135
Figura 66-Nova família de CAR e Volumes medianos	136
Figura 67-Volumes simulados com as CAR	139
Figura 68-Simulação dos volumes curvas-guia e CAR.....	140
Figura 69-Vazões naturais mensais médias (1933-2014).....	142
Figura 70-Vazões efluentes mensais médias do reservatório Sicupema	142
Figura 71-Variação vazões efluentes Sicupema.....	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Estações inventariadas para estudo	65
Tabela 2-Estações pluviométricas selecionadas.....	67
Tabela 3-Estações fluviométricas selecionadas.....	69
Tabela 4- Evapotranspiração anual média.....	69
Tabela 5-Dados básicos do reservatório Pirapama.....	71
Tabela 6-Dados básicos do reservatório Sicupema	73
Tabela 7-Prioridades adotadas.....	80
Tabela 8-Coefficientes de área municipais da bacia do rio Pirapama	82
Tabela 9-Histórico de retiradas para abastecimento humano do reservatório Pirapama	84
Tabela 10-Resumo das demandas por sub-bacia.....	86
Tabela 11-Prioridades de usos.....	88
Tabela 12- Ordem de prioridades do AcquaNet.....	88
Tabela 13-Classificação do SPI.....	96
Tabela 14-Zoneamento do volume	96
Tabela 15-Estatísticas da calibração na estação fluviométrica 39192000.....	100
Tabela 16-Estatísticas da validação na estação fluviométrica 39192000.....	101
Tabela 17-Estatísticas da calibração na estação fluviométrica 39195000.....	103
Tabela 18-Estatísticas da validação na estação fluviométrica 39195000.....	104
Tabela 19-Estatísticas da calibração na estação fluviométrica 39200000.....	106
Tabela 20-Estatísticas da validação na estação fluviométrica 39200000.....	107
Tabela 21-Calibração utilizada nas sub-bacias estudadas	108
Tabela 22-Resumo da primeira tentativa da Demanda Qreg.....	109
Tabela 23-Resumo da segunda tentativa da Demanda Qreg.....	109
Tabela 24-Vazões regularizadas com 100, 95, 90, e 80% de garantia	110
Tabela 25- Resultado da Simulação Sicupema	113
Tabela 26-Resumo do atendimento às demandas sub-bacia 1	115
Tabela 27-Resumo do atendimento às demandas sub-bacia 2	117
Tabela 28-Resumo do atendimento às demandas reservatório Gurjaú.....	118
Tabela 29-Resumo do atendimento às demandas.....	119

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Objetivos	20
1.1.1	Objetivo Geral.....	20
1.1.2	Objetivos Específicos	20
1.2	Estruturação do estudo	20
2	REVISÃO DE LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	Planejamento e gestão dos recursos hídricos	22
2.2	Modelos de Simulação e Otimização de Reservatórios	23
2.3	Variabilidade climática e operação de reservatório	26
3	ÁREA DE ESTUDO	34
3.1	Localização.....	34
3.2	Características físicas	36
3.2.1	Hidrografia.....	36
3.2.2	Clima.....	36
3.2.3	Geologia e Geomorfologia.....	38
3.2.4	Classificação de solos	42
3.2.5	Uso do solo	43
3.3	Importância da bacia do rio Pirapama para o abastecimento público da RMR	44
3.3.1	Sistema de Abastecimento de Água da Região Metropolitana do Recife	47
3.3.2	Sistema Pirapama.....	51
3.3.3	Sistema Gurjaú.....	52
4	METODOLOGIA.....	54
4.1	Escolha e descrição dos modelos	55
4.1.1	Modelo SMAP	56
4.1.2	Modelo AcquaNet.....	61
4.2	Dados utilizados	64
4.2.1	Dados Pluviométricos	66

4.2.2	Dados Fluviométricos	67
4.2.3	Dados de evapotranspiração	69
4.2.4	Dados altimétricos	69
4.2.5	Dados Reservatórios	70
4.3	Simulação com os modelos	74
4.3.1	Calibração e validação do modelo hidrológico.....	74
4.3.2	Simulação dos reservatórios	78
4.3.3	Demandas e rede de fluxo.....	81
4.4	Índices de quantificação de secas.....	88
4.5	Curvas-guia e curva de aversão a risco	96
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	99
5.1	Modelagem hidrológica.....	99
5.1.1	Calibração e Validação	99
5.1.2	Geração das vazões	108
5.2	Simulação com o AcquaNet.....	108
5.2.1	Vazão regularizada e totalização de volume.....	108
5.2.2	Disponibilidade hídrica.....	113
5.3	Análise do reservatório Pirapama	119
5.3.1	Análise dos volumes simulados	120
5.3.2	Avaliação dos períodos de escassez hídrica	123
5.4	Propostas de regras de operação.....	127
5.4.1	Curvas-guia.....	127
5.4.2	Curva de Aversão a Risco- CAR	131
5.4.3	Análise das propostas.....	137
5.4.1	Regras de operação para o reservatório Sicupema	141
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	144
6.1	Conclusões	144
6.2	Recomendações	145
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	147
	APÊNDICES	156
1.	APÊNDICE A – Mapa de falhas	157
2.	APÊNDICE B – Outorgas de águas superficiais na bacia do rio Pirapama	160

3.	APÊNDICE C – Parâmetros e gráficos da modelagem hidrológica.....	162
4.	APÊNDICE D – Roteiro de Cálculo do SPI no Matlab	164

1 INTRODUÇÃO

A relação da água com o planeta Terra é complexa e está diretamente associada ao crescimento da população humana, ao processo de urbanização dos grandes centros urbanos ao longo dos séculos e aos usos múltiplos da água, que afetam tanto a quantidade como a qualidade da água existente (TUNDISI, 2003).

Em várias regiões brasileiras, a escassez hídrica constitui num fator restritivo ao desenvolvimento socioeconômico, levando instituições e planejadores a buscarem de forma permanente, meios de minimizar seus efeitos. As demandas crescentes geram preocupações diversas, principalmente devido aos conflitos e restrições no consumo da água, que afetam diretamente as atividades econômicas e interferem na qualidade de vida das pessoas (GOES, 2012).

Segundo Carrijo et al. (2003), o crescimento desordenado das cidades, aliado à falta de financiamentos para o setor de saneamento básico no Brasil, tornaram os sistemas de abastecimento de água complexos e de difícil operacionalidade. Reconhece-se, no entanto, que a operação eficiente desses sistemas é fundamental para que sua vida útil se prolongue o máximo possível, garantindo o atendimento à população.

Conforme Goes (2012), um dos mais requisitados componentes do sistema de recursos hídricos são os reservatórios, haja vista que são utilizados para uma regularização temporal e espacial da água, suprem as necessidades de atendimento às demandas, em períodos de escassez, e servem, em alguns casos, para contenções de cheias. Mas, para que estes reservatórios cumpram sua finalidade, os elementos que os alimentam (rios, precipitações, nascentes, lençóis subterrâneos e aquíferos) e os que ocasionam perdas de seu volume (evaporação, infiltração e sedimentação) precisam ser monitorados e estudados, dinamicamente.

Atualmente, em grandes centros urbanos, assistimos pela mídia ao monitoramento em tempo real destes sistemas de abastecimento, agravados por secas como as que se abateram sobre o Sudeste, neste ano de 2015, e sobre o semiárido nordestino desde 2012, enfrentando

em 2013 a pior seca dos últimos 50 anos, segundo relatório da Organização Meteorológica Mundial (WMO, na sigla em inglês). A seca, portanto, se constitui num importante indicador para investimentos no gerenciamento e gestão dos recursos hídricos visando mitigar os impactos negativos da variabilidade climática.

A Região Metropolitana do Recife – RMR, um dos maiores aglomerados urbanos do Brasil com mais de três milhões de habitantes não foge desta problemática. Em meados da década de 1990, sofreu com dois períodos de forte estiagem em 1993–1994 e 1998–1999. Entre 1998–1999, o racionamento de água foi ampliado e atingiu o seu nível de alerta mais crítico, levando quase todos os bairros da RMR a conviver com um regime severo de racionamento de água, chegando alguns locais da RMR a passarem vinte e quatro horas com água e quarenta e oito horas sem água. Ao final de 1999, um regime ainda mais severo foi implantado em alguns bairros da RMR, que chegaram a ter um dia com água e nove dias sem água, devido ao baixo volume de água armazenada nas barragens da região nesse período (NASCIMENTO, 2003).

Uma das medidas encontradas para minimizar a escassez hídrica na RMR foi a concepção do sistema produtor de água na bacia do rio Pirapama, onde a partir da construção do reservatório homônimo, cujos estudos hidrológicos apontavam para uma capacidade de regularização em torno de 5.130 litros por segundo, permitiria um incremento em torno de 50% da disponibilidade hídrica ofertada por todo o sistema de abastecimento na época.

Histórico recente registrou ao final de 2012 e início de 2013, a ocorrência de baixos índices de precipitação no Estado de Pernambuco, levando o reservatório Pirapama a enfrentar nos meses de março a maio de 2013 um racionamento de suas águas, no esquema de 20 horas com água e 28 horas sem o produto, afetando 74 dos 94 bairros da capital.

Devido à importância deste sistema produtor de água para toda a RMR, o presente trabalho se propôs a estudar a bacia hidrográfica do rio Pirapama e suas sub-bacias que envolvem os sistemas de abastecimento Pirapama e Gurjaú, visando realizar uma análise da vulnerabilidade hídrica destes sistemas em relação à variabilidade climática, sobretudo em períodos secos.

Face ao exposto, embasado na literatura consultada, conceituação metodológica e premissas técnicas foram delimitados os objetivos, elencados na sequência, para consecução do presente estudo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Propor estratégias de operação para os reservatórios de abastecimento da bacia do rio Pirapama frente à variabilidade climática, como instrumentos de apoio à tomada de decisão, visando minimizar ou mesmo evitar as condições de racionamento e colapso do reservatório Pirapama.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o Sistema Pirapama/Gurjaú pela ótica dos recursos hídricos através da estimativa da oferta, da demanda atual e da definição de uma regra de operação;
- Avaliar o comportamento dos volumes simulado e monitorado do reservatório Pirapama sob a perspectiva de quantificar as condições de racionamento e colapso no mesmo;
- Utilizar modelo matemático para avaliar diferentes cenários de secas e propor regras de operação que podem atenuar estes eventos.

1.2 Estruturação do estudo

Além desta introdução, o presente trabalho está dividido em mais cinco capítulos.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre planejamento e gestão de recursos hídricos, modelos de simulação e otimização de reservatórios, e uma abordagem sobre variabilidade climática e operação de reservatórios.

No capítulo seguinte é apresentada a área de estudo, bem como uma descrição simplificada da complexa rede de abastecimento de água da Região Metropolitana do Recife.

Em seguida, no capítulo 4, é descrita a metodologia e realizada a modelagem hidrológica, na sequência, apresentados e discutidos os resultados obtidos com a simulação da rede de fluxo (capítulo 5).

Por fim, no capítulo 6, são destacadas as principais conclusões do estudo e contribuições bem como suas limitações, além de sugeridos trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Planejamento e gestão dos recursos hídricos

Planejamento, no conceito da ciência econômica, é a forma de conciliar recursos escassos e necessidades abundantes. Em recursos hídricos, o planejamento pode ser definido como um conjunto de procedimentos organizados que visam atender às demandas de água, considerada a disponibilidade restrita deste recurso.

A gestão de recursos hídricos é a forma pela qual se pretende equacionar e resolver as questões de escassez relativa dos recursos hídricos. O planejamento visa uma avaliação prospectiva das demandas e das disponibilidades desses recursos e a alocação entre usos múltiplos, de forma a obter os máximos benefícios econômicos e sociais.

Segundo Goes (2012), dentre os objetivos de um planejamento, pontuam a maximização dos benefícios e a minimização de custos. Estas questões somente poderão ser abordadas com a quantificação e qualificação das informações disponíveis, avalizadas por uma gestão responsável.

Conforme Porto e Azevedo (2002), a tomada de decisões a respeito de sistemas de recursos hídricos, deve considerar os aspectos hidrológicos, ambientais, econômicos, políticos e sociais, mutáveis no tempo e associados a incertezas, de difícil quantificação. À medida que as demandas de água crescem, acirram-se os conflitos e disputas por esse recurso, enquanto os sistemas de recursos hídricos tendem a se tornar maiores e complexos. Assim, a construção e gerenciamento desses sistemas estão associados geralmente a investimentos de grande porte, longos prazos e políticas cuidadosas de operação e manutenção. Tais características impõem a necessidade de planejamentos estratégicos que conciliem eficiência econômica, sustentabilidade, flexibilidade e equidade.

Segundo Porto e Azevedo (2002), presencia-se, no Brasil, notável evolução nas áreas gerenciais e institucionais, relativa ao aproveitamento integrado dos recursos hídricos, atestada pela promulgação de uma série de leis estaduais, seguidas de providências efetivas para implantação dos sistemas de gerenciamento.

Segundo Braga et al. (1998), a análise de sistemas de recursos hídricos é um enfoque através do qual os componentes do sistema de recursos hídricos e suas interações são descritas em termos quantitativos, por meio de equações matemáticas e funções lógicas. Em geral, procura-se a combinação de elementos do sistema que possa produzir o melhor resultado, preferencialmente o ótimo de uma função objetivo. Modelos típicos incluem os chamados modelos de processos, ou seja, modelos matemáticos que descrevem os processos físicos, simbolizados pelos elementos do sistema; e modelos de entrada e saída para quantidade e qualidade da água superficial e subterrânea, e para sistemas de distribuição.

De acordo com Goes (2012), a necessidade de representação de fenômenos naturais complexos, através dos diversos modelos existentes, é fundamental para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos. É através deles que se procura o entendimento dos processos naturais e que se analisa a resposta do sistema para cenários diferentes, onde são coletados elementos necessários às tomadas de decisão.

2.2 Modelos de Simulação e Otimização de Reservatórios

A simulação é uma técnica de modelagem que é usada para aproximar o comportamento de um sistema no computador, representando todas as principais características de um sistema por uma descrição matemática.

Os modelos de simulação, segundo Braga et al. (1998), são formados por expressões matemáticas estruturadas em sequência lógica, que descrevem a operação do sistema no espaço e no tempo. Seu objetivo é representar e operar o sistema de forma mais detalhada possível e fornecer informações para avaliar o comportamento do sistema real. A simulação da operação de reservatórios consiste, simplesmente, em fazer a cada intervalo de tempo o balanço de massa dos reservatórios. Para tanto, são especificadas as afluições nos locais de interesse, as características físicas do sistema e as regras de operação. A vantagem da técnica de simulação está no fato de ser aplicável a sistemas complexos e aceitar quaisquer equações de restrições. Ao contrário dos modelos otimizantes, os modelos de simulação não determinam a política ótima de operação. A solução é encontrada iterativamente processando-se diversas simulações alternativas e comparando seus desempenhos. Sua obtenção depende, geralmente, da experiência e sensibilidade do usuário.

A otimização é similar à simulação, exceto que um procedimento matemático é utilizado para ajustar as variáveis de decisão até que esse procedimento encontre a melhor solução para o objetivo e as restrições impostas (MELO,2010).

No contexto de Allen et al.(1991), o problema de operação de reservatórios pode ser exposto com a questão: “que volume de água deve-se armazenar em determinado reservatório, para prover determinada demanda, a um nível aceitável de confiança, e que vazão regularizar, obedecendo aos limites físicos e políticos existentes?”

Quando o problema é formulado em um longo intervalo de tempo (uma semana ou mais), é chamado de planejamento de operações a longo prazo; caso seja formulado dentro de um curto espaço de tempo (um dia ou menos), o problema é chamado de operação de reservatórios em tempo real (GOES,2012).

Em termos aplicativos, a operação de reservatórios, ainda segundo Allen et al. (1991), visa identificar quais as formas ideais do armazenamento para um reservatório e a de liberação de fluxo efluente do mesmo, minimizando os riscos com escassez de água e inundações, aproveitando, ao máximo, o benefício da água com base em princípios de gerenciamento e desenvolvimento sustentável. O gerenciamento e desenvolvimento sustentável é um subconjunto do gerenciamento sustentável de recursos hídricos, envolvendo conceitos de gerenciamento integrado, múltiplos objetivos, considerações de riscos e incertezas, e aplicações práticas da análise de sistemas.

Um reservatório é dito sustentável, quando é projetado e gerenciado de acordo com os princípios da sustentabilidade, fazendo parte do sistema holístico composto pela sociedade, terra, ar e água. Na operação e manutenção, o gerenciamento sustentável deve observar práticas de conservação da natureza nas áreas de entorno; manutenção da vida biótica normal; controle de sedimentos; gerenciamento da bacia; uso de informações e tecnologias de suporte à decisão; gerenciamento conjunto, envolvendo todos os componentes relacionados ao sistema de recursos hídricos, com vistas às múltiplas finalidades (TAKEUCHI e KUNDZEWICZ, 1998).

Os modelos de otimização podem ser determinísticos ou estocásticos. Os determinísticos utilizam as séries históricas e os dados observados como variáveis de entrada. Estes não podem prover soluções ótimas e confiabilidade das soluções propostas (MELO, 2010).

Já os modelos estocásticos utilizam séries de vazões afluentes sintéticas como dados de entrada. A desvantagem é que os resultados obtidos correspondem à operação dos reservatórios em cada uma das séries geradas. Assim, torna-se necessária uma etapa seguinte na qual são obtidas as regras através de regressões que devem ser verificadas utilizando um modelo de simulação (MELO, op. cit.).

A utilização de sistemas de suporte à decisão em conjunto com os modelos de otimização e administração do sistema trazem muitos benefícios. Um exemplo de modelo de otimização incorporado a um sistema de apoio à decisão é o modelo de rede de fluxo MODSIM (MELO, op. cit.).

Segundo Porto (1997), o modelo MODSIM combina eficientemente a simulação e a otimização, acentuando as vantagens de cada uma e garantindo que as metas, prioridades e limitações operacionais sejam satisfeitas. Pode ser utilizado não apenas como instrumento de gerenciamento, mas também para planejamento e análise do impacto das propostas alternativas para implantação de projetos de aproveitamento de recursos hídricos.

Segundo Porto Junior (2005), o modelo CISDERGO (Cropping and Irrigation System Design with Optimal Reservoir and Groundwater Operation) é um modelo de otimização baseado em programação linear recursiva destinado a maximizar múltiplos objetivos relativos à implantação ou aperfeiçoamento de operação de um ou mais perímetros irrigados.

O modelo CISDERGO fornece apoio no planejamento do uso da água, tanto para pequenas, médias e grandes propriedades rurais quanto para grandes sistemas de recursos hídricos que atendam a múltiplos usos e a grandes extensões de terra. O modelo permite incorporar restrições ou outros requerimentos associados à seleção de culturas, por unidade de produção ou perímetro, em níveis mensais ou anuais (MELO, 2010).

A gestão de recursos hídricos vem ganhando expansão crescente, com o desenvolvimento das técnicas de análise de sistemas. Configura-se atualmente, um interesse real, a procura de abordagens e desenvolvimento de modelos mais simples e completos, quanto à representação matemática do seu comportamento físico e que incluam, também, parâmetros e variáveis de natureza operacionais, socioeconômicas, políticas etc, além de sua aplicação a situações concretas de determinação das relações funcionais operativas de sistemas de reservatórios (GOES, 2012).

Para maximizar os benefícios oferecidos pelos reservatórios através de sua disponibilidade hídrica, é muito importante melhorar a eficácia operacional e a eficiência do sistema. A modelagem computacional pode oferecer benefícios para a gestão racional e as decisões operacionais (MELO,2010).

2.3 Variabilidade climática e operação de reservatório

Na perspectiva de estabelecer regras de operação para reservatórios em sistema complexos de recursos hídricos é importante levar em conta a variabilidade climática, sobretudo em eventos de seca, quando os impactos relacionados à escassez hídrica ganham a dimensão de problemas socioeconômicos regidos pelas incertezas da hidrometeorologia.

Diante da necessidade de quantificar os eventos de seca e avaliar em que medida uma mudança no regime fluvial, devido à construção de uma barragem de regularização, afeta o número e a intensidade de eventos de seca a jusante de um barramento, Serra (2014) avaliou a aplicação do índice de caracterização de seca em séries de precipitação - SPI (Standardized Precipitation Index) às séries de escoamento, haja vista que após a construção de um aproveitamento hidráulico, o regime de vazões, a jusante da infraestrutura, advêm das vazões liberadas pela barragem e não das condições de precipitação ocorrentes na bacia hidrográfica. Tendo por base o caso de uma barragem real (barragem de Vilarinho das Furnas, no rio Homem), Serra (2014) caracterizou os eventos de seca em regime natural (sem barragem) e em regime modificado (com barragem) no mesmo período de tempo, por aplicação do índice SPI às correspondentes séries de escoamento. Comparando os resultados obtidos decorrentes

de um e outro regime concluiu-se que, de fato, ocorre um agravamento na intensidade do evento de seca a jusante da infraestrutura e evidenciou-se a vantagem em aplicar o índice SPI a séries de escoamento, para medir secas decorrentes de variabilidade hidrológica natural ou induzida pela atividade do homem.

Procurando identificar mudanças climáticas regionais, Hastenrath e Greischar (1993) examinaram séries históricas de precipitação em uma rede de estações bem distribuídas espacialmente sobre o Nordeste do Brasil (NEB). Os autores não encontraram tendências significativas para condições mais úmidas ou secas na região. No entanto, Haylock et al. (2006) recentemente analisaram a precipitação sobre a América do Sul e observaram uma tendência de aumento do total anual de chuva sobre o NEB. O estudo realizado por Santos e Brito (2007), utilizando a metodologia adotada por Haylock et al. (2006), também mostra tendência de aumento da precipitação total anual na região Nordeste, especificamente para os Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba, conforme revisão realizada por Nóbrega et al. (2015).

Baseado em índices de extremos climáticos e a técnica dos quantis, Nóbrega et al. (2015) realizaram uma análise de tendência espacial e temporal da precipitação pluviométrica do Estado de Pernambuco, onde constataram em seus resultados, a predominância de tendência de aumento no volume de chuva anual em grande parte do Estado, com exceção do setor central da Região Metropolitana do Recife e parte leste da Zona da Mata, que apresentaram tendência negativa. Os autores consideraram ainda, que por décadas, muitos dos estudos de variabilidade e mudanças climáticas da precipitação estiveram focados em mudanças nos valores médios. Entretanto, há uma necessidade de se verificar mudanças não só em totais pluviométricos, mas também no comportamento médio deste elemento climático, como por exemplo, ocorrência de eventos extremos de seca e/ou de chuva, pois os mesmos alteram consideravelmente as características habituais de uma dada região, podendo causar grandes transtornos para população, seja nos grandes centros urbanos, com inundações, como também estiagens prolongadas no Sertão.

Gestores públicos e pesquisadores têm aplicado várias ferramentas na tentativa de mitigar esses impactos. Um exemplo são as previsões de tempo e clima; as previsões de chuva são

usadas como entrada para o gerenciamento de modelos aplicados por usuários finais para fins específicos. No entanto, a utilização dessas ferramentas para a gestão de recursos hídricos requer um entendimento correto da estrutura em que esta informação é gerada, bem como os erros que as previsões podem conter e que possam influenciar no seu uso (BRAGA et al., 2013).

Fazendo uso destas ferramentas, Braga et al. (2013) analisaram um modelo de previsão hidrossedimentológica concebido a partir do acoplamento de modelos climáticos e hidrológicos, e aplicado na bacia do rio Pirapama para mencionar a deposição de sedimentos no reservatório de mesmo nome. A utilização do modelo climático Regional (Regional Spectral Model-RSM) aninhado ao modelo global de circulação atmosférica (MCGA) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos -CPTEC permitiu a análise das previsões de chuva e mostrou que: (i) a redução de escala dinâmica realizada pelo modelo regional, aproxima-se da distribuição de frequência dos dados diários observados, apesar de o conjunto de erros detectados estarem na magnitude e distribuição de escala diária; (ii) uma previsão de precipitação imparcial parece ser essencial para o uso dos resultados em modelos hidrológicos e (iii) a informação extraída diretamente do modelo global também pode ser útil. E concluiu que na bacia analisada, a produção de sedimentos foi consistente com a chuva prevista, e a vazão gerada e os volumes armazenados do reservatório estão fortemente ligados à chuva, sendo a sua precisão melhorada significativamente nas simulações mensais.

Considerando o contexto da mudança climática, Georgakakos et al. (2012) avaliaram o valor da gestão adaptativa de reservatórios em relação às práticas de operação tradicionais no sistema de recursos hídricos do vale central da Califórnia do norte nos Estados Unidos. A avaliação utilizou o modelo de decisão adaptativa existente, juntamente com downscaling dinâmico e um sistema de modelagem hidrológica. O processo de avaliação compara a resposta do sistema em quatro cenários simulados, pertencentes a duas políticas de gestão (tradicionais e adaptativa) e dois conjuntos de dados hidrológicos (série-histórica e cenário futuro). As avaliações mostraram que a política atual, que está sintonizada com o regime hidrológico da série-histórica, é incapaz de lidar eficazmente com a variabilidade futura. Como resultado, o abastecimento humano, energia e usos ambientais da água não podem ser eficazmente satisfeitos durante as secas futuras, expondo o sistema para vulnerabilidades e

riscos mais elevados. Por outro lado, a política de adaptação manteve desempenho semelhante em ambos os cenários hidrológicos, sugerindo que a gestão adaptativa constitui uma medida de mitigação eficaz às alterações climáticas.

Visando reduzir as incertezas relacionadas à oferta hídrica e também fazendo uso de técnicas de análise sistêmica, como simulação e otimização, combinadas com o uso de previsão de afluências a reservatórios, Cardoso et al. (2006) propuseram incorporar a previsão/informação climática no processo de alocação de água no Estado do Ceará, objetivando determinar políticas ótimas na operação tática dos reservatórios do Sistema Jaguaribe-Metropolitano. Foram estabelecidos níveis de meta para operação dos reservatórios do sistema com base na climatologia (série histórica) e na informação climática (previsão). Nesta última, a previsão de afluências se deu através de índices climáticos tais como El Niño e Dipolo do Atlântico. A metodologia utilizou o método dos Vizinhos para a previsão de afluências e programação não linear com o algoritmo simplex Nelder-Mead como técnica de otimização. Os resultados obtidos foram comparados com operação adotada pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos – COGERH-CE, onde a proposta se mostrou adequada, atendendo aos objetivos pretendidos.

Pode-se perceber que a variabilidade climática é muito importante no momento em que se deseja estabelecer as regras de operação para um dado reservatório, haja vista que anos com déficit de precipitação acarretam em deflúvios abaixo da média, comprometendo o armazenamento dos reservatórios. Desta forma, lidar com as incertezas associadas ao clima requer mecanismos que quantifique estes extremos e possibilite, através de métodos e técnicas, estabelecer regras de operação que contemplem estas possibilidades. As técnicas de inteligência artificial, por exemplo, possuem uma notável capacidade para lidar com sistemas complexos não lineares e têm sido bastante utilizadas na otimização operacional de sistemas complexos de reservatórios.

Neste sentido, Chang e Wang (2013) propuseram um esquema de alocação sistemático de água, que integrou a análise de sistema com técnicas de inteligência artificial, subsidiando os tomadores de decisão na mitigação das ameaças da seca. Baseada em avaliações interativas das séries históricas de dados hidrológicos obtiveram-se diagramas de avaliação, visando uma

percepção clara de todas as condições dos estágios de seca possíveis, e, em seguida, configuraram as redes neurais fuzzy para estabelecer as associações entre os eventos e os resultados, estimando os níveis de déficit hídrico considerando várias condições hidrológicas. O sistema denominado ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) foi aplicado na alocação de água na bacia hidrográfica do reservatório de Shihmen ao norte de Taiwan, onde seus resultados sugeriram que os níveis de seca no volume de reservatório no início das primeiras lavouras de arroz podem ser recomendados como: Q_{50} , Q_{60} , Q_{70} e Q_{90} para as condições de seca nos estados de alerta, inicial, moderada e grave, respectivamente. O sistema demonstrou ainda que o volume do reservatório analisado é identificado como a variável mais significativa das condições de escassez hídrica.

As regras de operação de reservatório estabelecem a quantidade proporcional de água liberada baseada nas informações disponíveis, tais como, a afluência atual do armazenamento e a prevista (ZHANG et al.,2015). Em termos simples, política de operação é um conjunto de regras que determinam o armazenamento e a retirada de água do sistema nos diversos períodos de tempo. Encontrar a regra ótima é uma questão complexa na gestão de recursos hídricos (GUO et al., 2012; LI et al., 2010).

Uma técnica comum usada para definir regras de operação ótimas é baseada em simulações interativas de modelos de gestão de água. Neste caso, o objetivo é encontrar uma regra para aperfeiçoar a gestão do sistema. Portanto, o processo iterativo para encontrar as regras de operação ótimas podem ser controladas por um algoritmo de otimização que é responsável pela variação dos parâmetros com base nos resultados obtidos a partir da simulação do reservatório (LERMA et al.,2015). Alguns algoritmos de otimização novos, tais como o algoritmo genético (OLIVEIRA e LOUCKS, 1997; WARDLAW e SHARIF, 1999; CHANG et al., 2005; CHEN et al., 2007a,b; CHENG et al., 2008; HINÇAL et al., 2011; LIU et al., 2011a,b) e otimização por enxame de partículas (REDDY e KUMAR, 2007; OSTADRAHIMI et al., 2012) têm sido utilizados para otimizar regras de operação de reservatório (ZHOU e GUO ,2013).

Ao longo das duas últimas décadas, Algoritmos Evolucionários (AEs) têm sido aplicados para várias áreas de recursos hídricos, tais como sistemas de distribuição de água

(GOLDBERG e KUO, 1987; SAVIC E WALTERS, 1997), drenagem urbana e sistemas de esgoto (GUO et al., 2008), abastecimento de água e sistemas de tratamento de esgoto (MURTHY e VENGAL, 2006), modelos hidrológicos e fluviais (MULETA e NICKLOW, 2005) e sistemas subterrâneos (DOUGHERTY e MARRYOTT, 1991), conforme destacado em uma revisão realizada por Nicklow et al. (2009).

Os Algoritmos Evolucionários-AEs proporcionam vários benefícios em comparação com a otimização clássica porque eles podem ser implementados, a priori, sem as maiores exigências do modelo, e graças a sua capacidade de gerir as variáveis menos representativas, os procedimentos de otimização dos AEs podem direcionar alternativas quando aplicados na otimização das regras de operação (LERMA et al., 2015).

Nesta direção, Lerma et al. (2015) realizaram a avaliação de dois Algoritmos Evolucionários-AEs para concepção de regras de operação ótima em sistemas de recursos hídricos reais. Os AEs utilizados foram os algoritmos SCE-UA [Shuffled Complex Evolution - University of Arizona; DUAN et al. (1992)] e o Scatter Search (GLOVER, 1977) que combinados com modelo de simulação em rede de fluxo SIMGES concebeu regras de operação ideais. Através da análise de parâmetros de ambos os algoritmos em um caso teórico aplicou-se em um caso complexo, real. Essas duas aplicações permitiram analisar as propriedades e o desempenho dos algoritmos nas definições das regras de operação, avaliando como os critérios de terminação e convergência dos mesmos afetaram os resultados e a importância da participação dos tomadores de decisão no processo de otimização.

Propondo minimizar as incertezas e o caráter subjetivo das tomadas de decisão, Zhang et al. (2015) realizaram uma análise das regras de operação em reservatórios utilizando o método de cálculo da média do modelo Bayesiano (Bayesian Model Averaging -BMA). Três modelos determinísticos de operação individuais bastante utilizados foram avaliados: (i) regressão linear por partes (Piecewise linear regression PL-REG); (ii) Bidimensionais de superfície (two-dimensional surface models -SURF) e (iii) mínimos quadrados com máquinas de vetores suporte (least-squares SVM -LS-SVM). Através do estudo de caso do reservatório de Baise na China foi constatado que o BMA integrado com os demais modelos

proporcionou a otimização das regras de operação com redução das incertezas e aumento no intervalo de confiança na tomada de decisão.

Uma das regras de operação mais utilizadas inclui a divisão do volume útil do reservatório em diferentes “zonas” que possuem políticas de descargas específicas (WURBS, 1996). A distribuição do volume útil do reservatório nessas zonas pode ser constante ao longo do ano ou pode variar de forma sazonal. Essas regras de operação são chamadas de curvas-guia e são usadas para indicar volumes (ou níveis da água) alvos ou ideais do reservatório visando determinados objetivos (BRAVO et. al., 2006).

As curvas-guia são capazes de expressar a estratégia de operação do reservatório de uma forma visual (CHANG et al., 2005), facilitando suas execuções na prática . Um método que envolve a otimização, o ajuste e o refinamento foi adotado para obter as regras ótimas de operação para uma finalidade de uso (LIU et al., 2006) e para múltiplos usos (LIU et al., 2011c) no reservatório de Três Gargantas na China (ZHOU e GUO, 2013).

Bravo et al. (2006) utilizaram em algoritmo evolutivo na otimização de curvas-guia através de um modelo de simulação acoplado ao algoritmo SCE-UA no reservatório de Três Marias, no Rio São Francisco. Nesse trabalho foi proposta uma metodologia para a otimização de regras de operação (curvas-guia) no reservatório baseada numa técnica de parametrização, simulação e otimização. Por meio dessa técnica, uma curva-guia é representada por segmentos de reta, sendo as coordenadas dos extremos desses segmentos as variáveis de decisão. A aplicabilidade do algoritmo na resolução do problema de otimização foi considerada eficaz e eficiente, mostrando que a utilização de seis ou mais segmentos de reta é suficiente para obter uma boa descrição da curva-guia no caso estudado.

Sob a perspectiva dos usos múltiplos da água, Zhou e Guo (2013) desenvolveram um modelo de otimização integrado adaptativo (Integrated Adaptive Optimization Model - IAOM) que contemplou regras de operação de reservatório através de curvas-guia para múltiplos propósitos com ênfase à curva ecológica prevendo cenários de mudanças climáticas futuras. O IAOM incluem os módulos de: (i) previsão climática, (ii) geração de vazões e (iii) determinação da operação ótima do reservatório para múltiplos usos. O modelo foi aplicado no reservatório de Danjiangkou na bacia do rio Han na China, onde os resultados

demonstraram que o IAOM forneceu as curvas-guia ótimas de operação para múltiplos usos que refletiram as características hidrológicas decorrentes das mudanças climáticas dos cenários. A operação da curva-ecológica mostrou que a vazão ecológica liberada aliviará o efeito negativo da represa no ecossistema do rio sem reduzir os benefícios da conservação e do controle de cheias, devendo ser considerada pelos gestores na operação do reservatório.

Outra forma de definir regras de operação em sistemas de reservatório são as Curvas de Aversão a Risco – CAR, bastante utilizadas no planejamento da operação energética brasileira através do Sistema Interligado Nacional (SIN). Silva (2012) analisou os impactos das curvas de aversão a risco num horizonte de médio prazo, e constatou que a implantação das CAR elevou a expectativa de armazenamento do SIN como um todo, reduzindo porém, a geração de energia hidráulica, aumentando a utilização das usinas térmicas, e conseqüentemente, a elevação dos custos do sistema. Em contrapartida, as CAR ofereceram mais segurança no atendimento energético e menos violação dos usos múltiplos da água, que apesar de não serem voltados para a geração de energia têm um grande impacto para a sociedade, seja para o abastecimento de cidades, para a dessedentação de animais ou irrigação para produção de alimentos.

Freitas e Filho (2007) utilizaram as CAR como subsídio para alocação negociada de água, visando à operação dos reservatórios Armando Ribeiro Gonçalves e Coremas-Mãe D'água na bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu. Entre as conclusões dos autores, a técnica de operação baseada nas CAR possui atributos desejados, quais sejam: (i) é de fácil entendimento, determinação, implementação e acompanhamento; (ii) permite incorporar componentes probabilísticas ao processo decisório; (iii) permite antever o comportamento do sistema ao longo de um horizonte de operação e (iv) permite adotar medidas adaptativas ou corretivas com antecedência suficiente para evitar crises agudas e/ou conflitos de administração muito difícil.

3 ÁREA DE ESTUDO

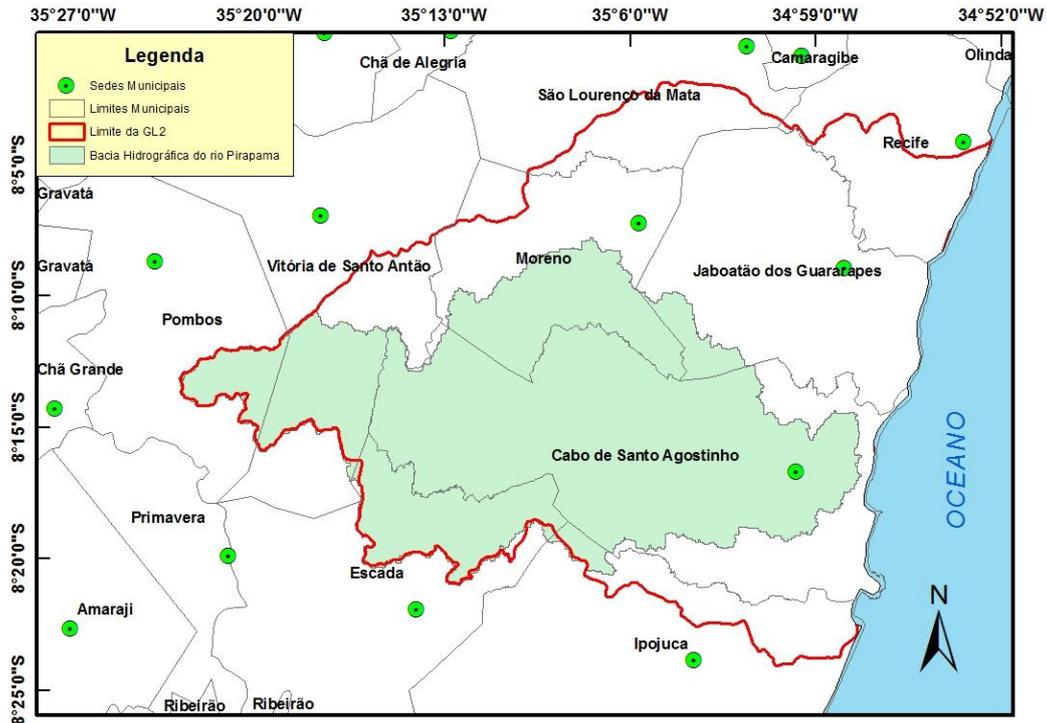
3.1 Localização

A bacia do rio Pirapama situa-se na porção centro-sul da Região Metropolitana do Recife – RMR e da Zona da Mata Pernambucana, entre as latitudes 8° 07' 29" e 8° 21' 00" S e as longitudes 34° 56' 20" e 35° 23' 13" W. Sua nascente está localizada no município de Pombos (Agreste Pernambucano), a aproximadamente 450 m de altitude. O rio Pirapama percorre cerca de 80 km de extensão, desde suas nascentes em Pombos, até desembocar no rio Jaboatão, entre os municípios de Cabo de Santo Agostinho e Jaboatão dos Guararapes, sendo estratégico para o abastecimento da RMR (CPRH, 2000)

Com uma área calculada de 603 km², a bacia do rio Pirapama está inserida no Grupo de bacias de pequenos rios litorâneos nº 2 –GL2, trata-se de uma das 29 unidades de planejamento estabelecidas pelo Plano Estadual de Recursos Hídricos-PERH (PERNAMBUCO, 1998) para a gestão dos recursos hídricos no Estado.

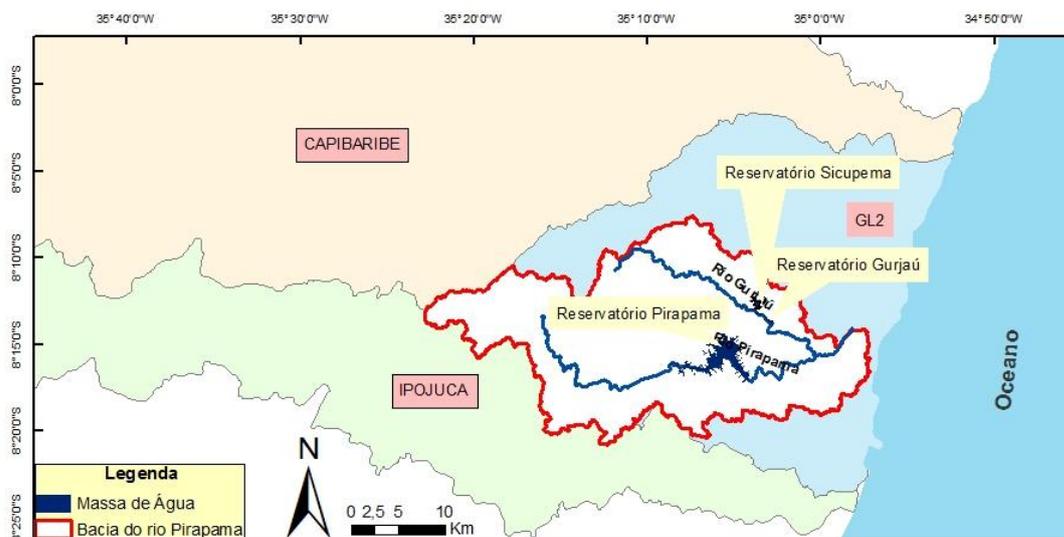
Sete municípios têm suas áreas inclusas na bacia, são eles: Cabo de Santo Agostinho, Escada, Ipojuca, Jaboatão dos Guararapes, Moreno, Pombos e Vitória de Santo Antão. Destaca-se, entre eles, o município do Cabo com 76% do seu território na bacia, inclusive sua sede municipal (Figura 1)

Figura 1-Municípios contidos na bacia do rio Pirapama



A bacia do rio Pirapama limita-se ao Norte com as Bacias dos rios Jaboatão e Tapacurá - afluente do Capibaribe, a Oeste com a bacia do rio Ipojuca, ao Sul com as Bacias dos rios Ipojuca e Massangana e a Leste com o Oceano Atlântico (GAMA,2003). Os principais reservatórios existentes na bacia são o Pirapama, o Gurjaú e o Sicupema (Figura 2).

Figura 2-Bacias fronteiriças da GL-2

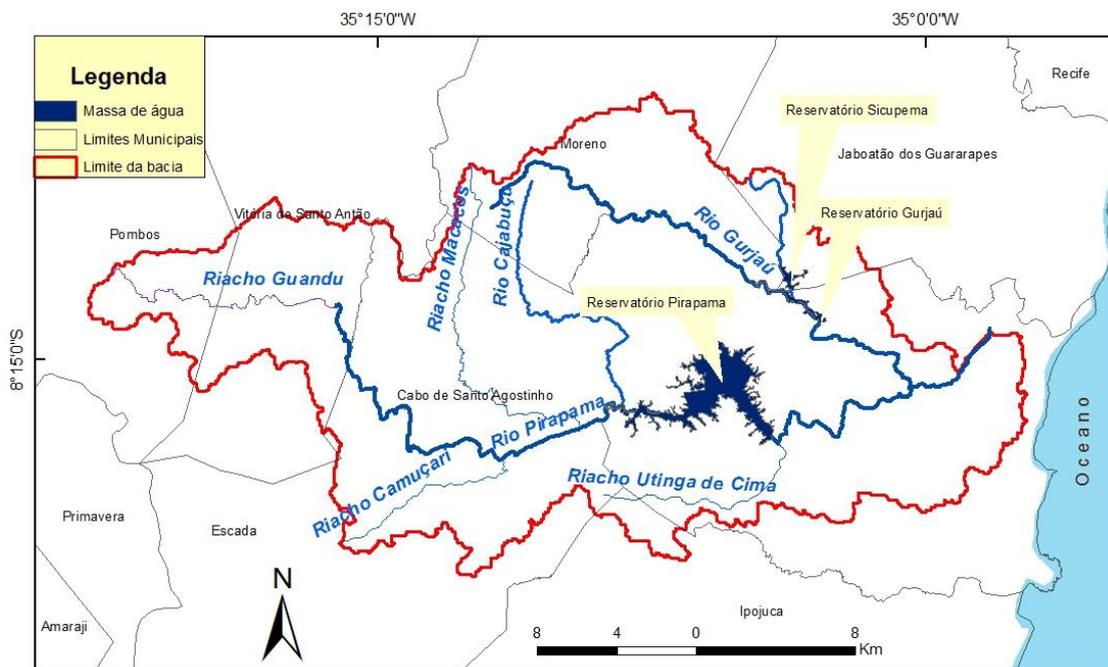


3.2 Características físicas

3.2.1 Hidrografia

Em decorrência do caráter assimétrico da bacia fluvial, os maiores tributários do rio Pirapama encontram-se na margem esquerda. São, em ordem decrescente de extensão, os rios Gurjaú, Cajabuçu e Riacho dos Macacos (CPRH/DFID, 1999), servindo o primeiro, de manancial para abastecimento de água da RMR, pela Companhia Pernambucana de Saneamento – COMPESA, através da barragem de Gurjaú. Pela margem direita, os principais afluentes são: o Camaçari e o Utinga de Cima (Figura 3).

Figura 3-Principais rios e reservatórios da bacia do rio Pirapama



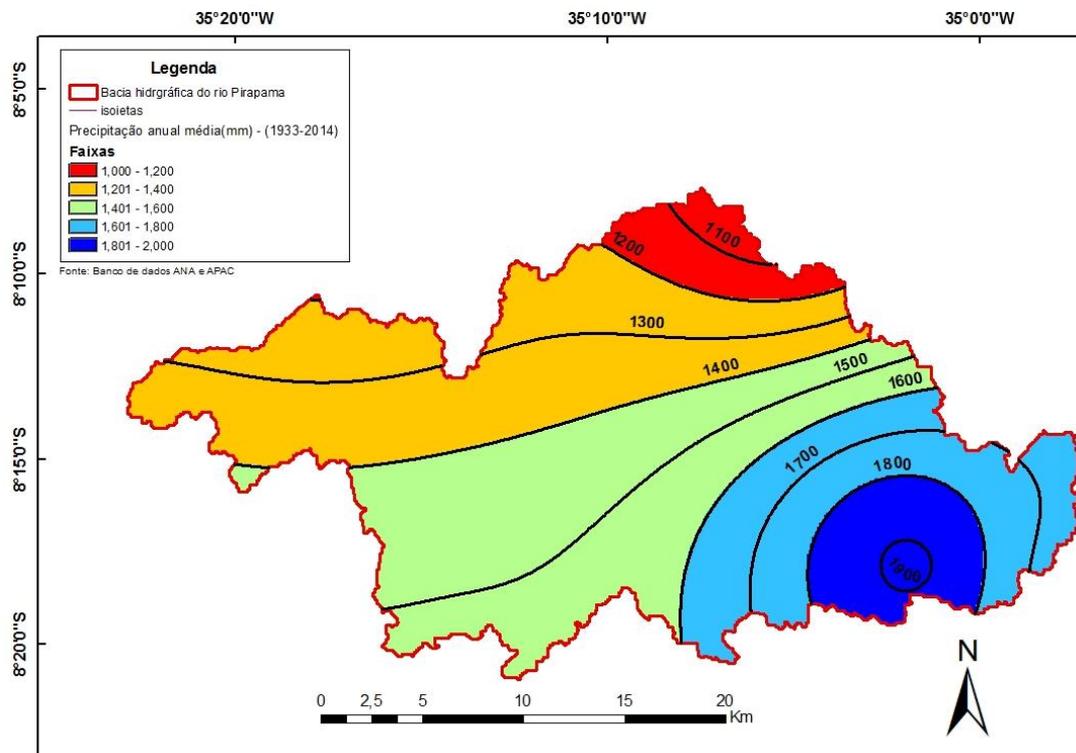
3.2.2 Clima

O clima da bacia é quente e úmido do tipo As', pseudotropical, da classificação de Köppen, com chuvas de outono-inverno, relativamente bem distribuídas ao longo do ano. No que se refere à distribuição dos totais pluviométricos no interior da bacia, estes apresentam sensível redução de leste para oeste, passando de 2300 mm anuais na extremidade sul-oriental da bacia para 1300 mm em sua extremidade noroeste, aumentando também do litoral para o

interior a duração da estação seca que passa de 3 meses, no primeiro, para 6 meses no segundo setor. A temperatura média anual é de 23°C. (ANDRADE e LINS, 1984).

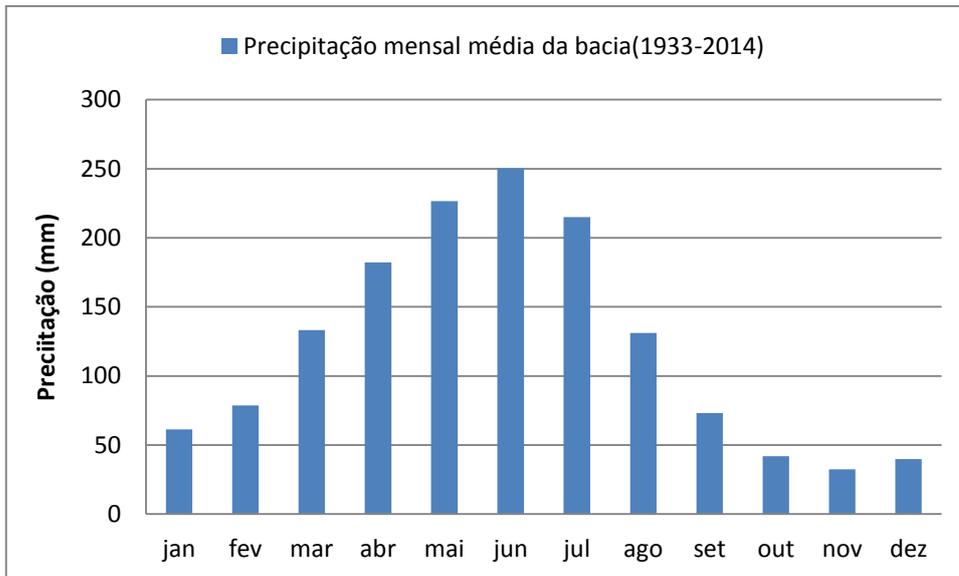
A Figura 4 mostra as isoietas, que são as curvas de igual intensidade de chuva, construídas com as médias anuais de chuvas registradas em 23 postos pluviométricos da região da bacia do rio Pirapama e seu entorno, indicando que existe uma considerável variação pluviométrica nos municípios da bacia. As menores concentrações pluviométricas são registradas em Moreno.

Figura 4-Mapa de Isoietas da área de estudo



Quanto ao regime de chuvas, a Figura 5 mostra que a região possui dois períodos bem definidos: (a) seco, entre os meses de setembro a fevereiro, com precipitação mensal média menor do que 60 mm e evaporação que excede a precipitação; (b) chuvoso, entre os meses de março a agosto de um mesmo ano, no qual o balanço hidrológico é positivo.

Figura 5-Regime de precipitação da bacia do rio Pirapama

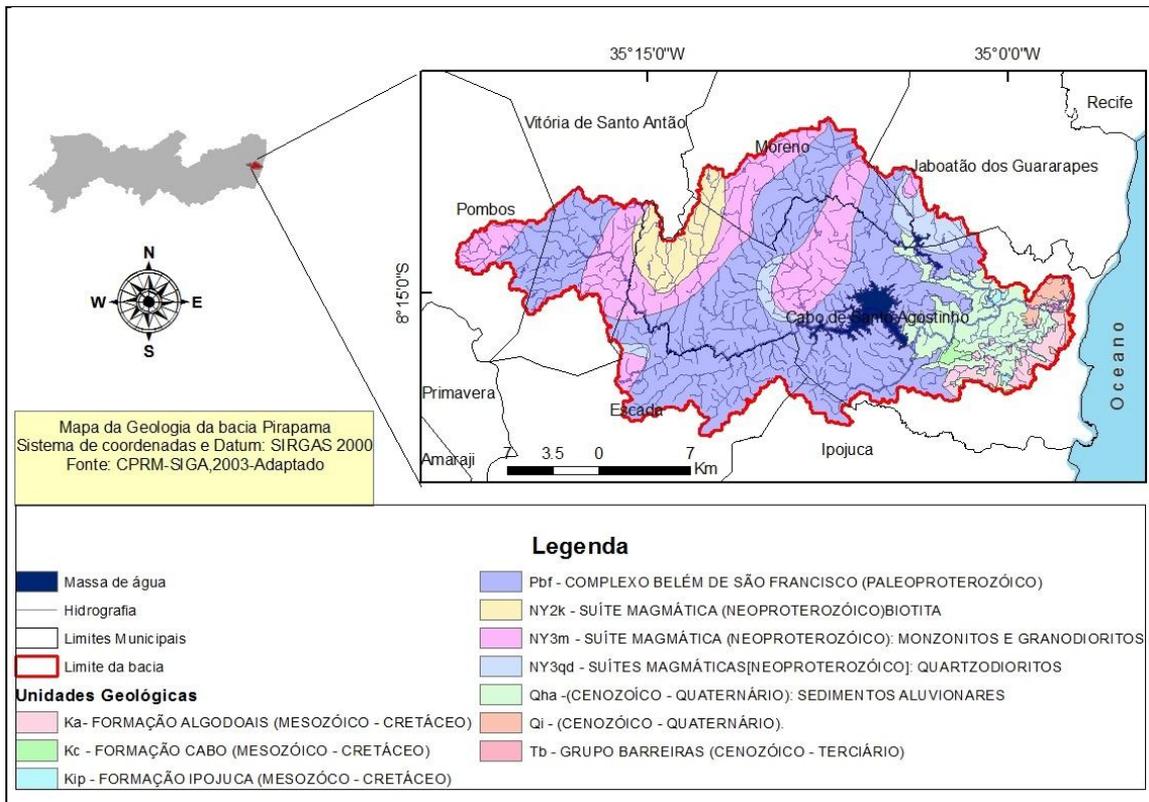


3.2.3 Geologia e Geomorfologia

A bacia do rio Pirapama tem cinco sextos de sua área situados no embasamento cristalino integrantes do Núcleo Nordestino do Escudo Brasileiro que se estendem, de forma contínua, da extremidade oeste da bacia até às proximidades da cidade do Cabo de Santo Agostinho (Figura 6). Vigoroso sistema de falhas e diáclases atingiu, em diferentes épocas, o embasamento cristalino, na área da bacia, exercendo forte controle em sua rede fluvial (ANDRADE E LINS, 1984).

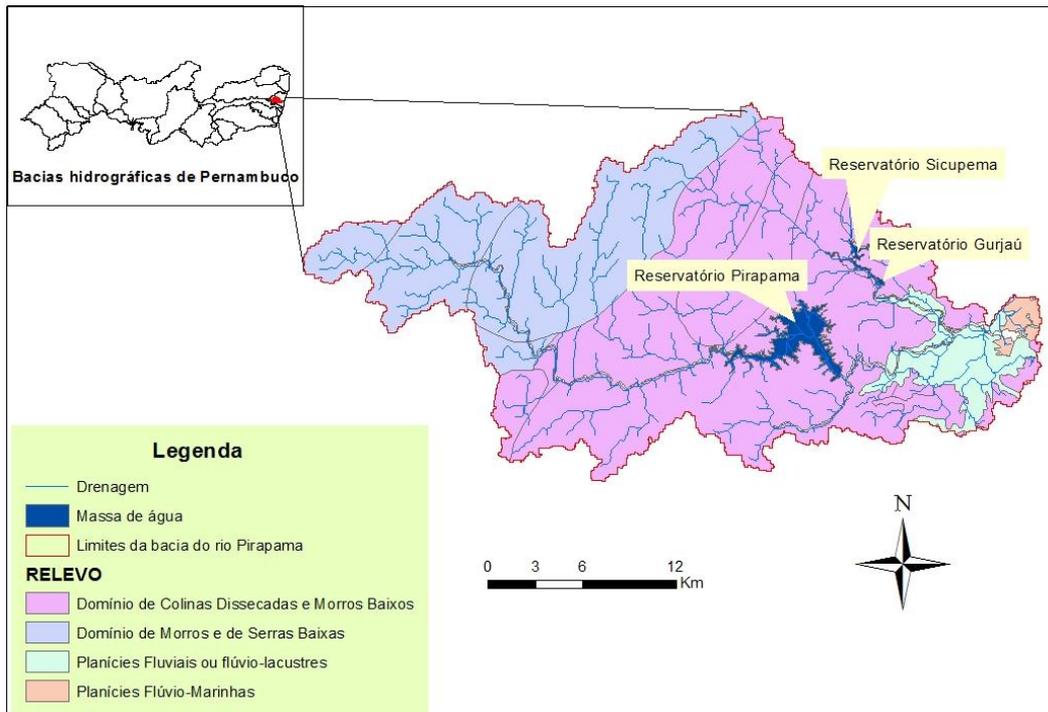
O restante da área da bacia, que abrange a quase totalidade de seu trecho inferior, assenta-se em rochas sedimentares das Formações Cabo (principalmente conglomerado) e Ipojuca (rochas vulcânicas), ambas de idade cretácica, bem como em sedimentos cenozóicos pertencentes à Formação Barreiras e aos depósitos aluviais e flúvio-marinhos, de idade mais recente (holocênica) (CPRH/DFID, 1999).

Figura 6-Geologia da bacia do rio Pirapama



A custa dessas estruturas geológicas foram modeladas as formas de relevo da bacia em cuja composição se destacam três tipos de unidades morfo-topográficas: a planície flúvio-marinha, os tabuleiros, as colinas ou outeiros e os morros e patamares cristalinos (DNPM, 1995) conforme pode ser visto na Figura 7.

Figura 7- Geomorfologia da bacia do rio Pirapama



Fonte: (CPRM, 2015)

A *planície flúvio-marinha*, com cotas inferiores a 10 m, inclui, na área da bacia, mangues e terrenos baixos à retaguarda dos mangues, praias e restingas. Está constituída por sedimentos aportados, alternadamente, pelo mar e pelos rios, ao longo do Quaternário. Sua largura máxima é 8 km atingida próximo à cidade do Cabo de Santo Agostinho. Nela se encontra grande parte do curso inferior do Pirapama com seu trecho terminal afogado (CPRH, 2000), devido ao fluxo e refluxo diário das marés através do leito fluvial, responsável pela ocorrência de extensos manguezais. (CPRH, 1999)

Os *tabuleiros*, modelados em sedimentos da Formação Barreiras, apresentam-se intensamente entalhados pela erosão, compondo uma topografia que varia de suave ondulada a ondulada. Com altitudes que não ultrapassam 70 m, os remanescentes dos tabuleiros formam o arco colinoso que se ergue a oeste de Ponte dos Carvalhos e bordeja, mais ao sul, o manguezal e a restinga de Itapoama(CPRH, *op.cit.*).

A oeste dos relevos acima mencionados encontram-se as *colinas* modeladas nas Formações Ipojuca e Cabo, esta última constitutiva dos outeiros sobre os quais acha - se instalada a

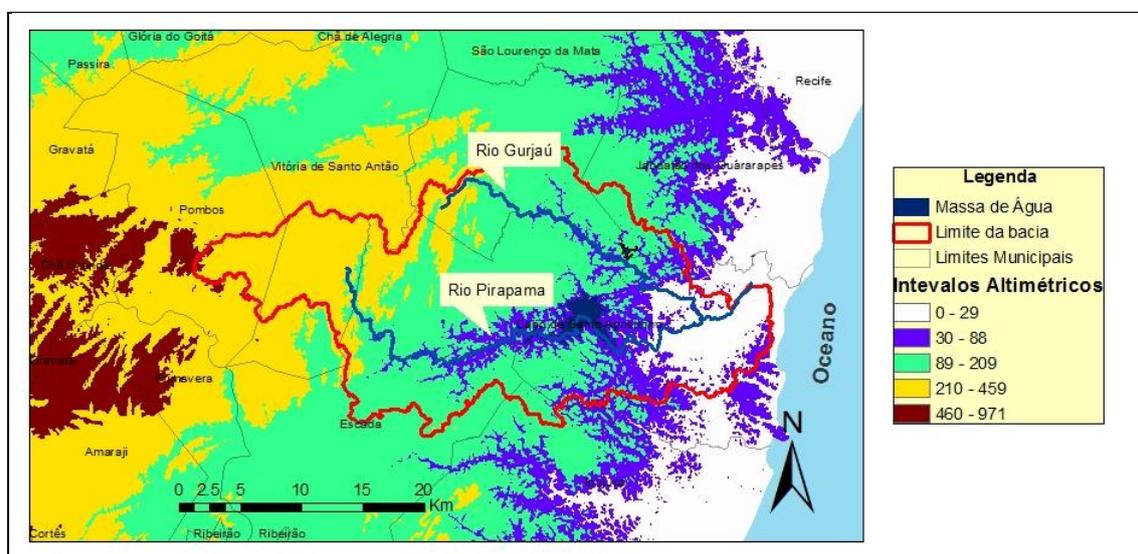
cidade do Cabo de Santo Agostinho, em altitudes que variam de 50 a 75 m (ANDRADE E LINS, 1984).

Às colinas, sucedem, a oeste, os relevos modelados em estruturas cristalinas que dominam no restante da área da bacia. São os *morros* de topos arredondados ora isolados, ora ainda não destacados que, nos limites ocidentais da bacia, cedem lugar às *cristas*, orientadas segundo a direção das linhas de falhas predominantes na área (CPRH,2000).

Os morros apresentam altitudes que aumentam, gradualmente, de leste (60-70 m) para oeste e para noroeste, atingindo 424 m na Serra do Urucu (ponto culminante da Região Metropolitana do Recife) no município do Cabo de Santo Agostinho e cotas superiores a 300 m, nos divisores do Pirapama com o Jaboatão e o Tapacurá (DNPM, 1995).

A Figura 8 mostra a distribuição altimétrica da bacia e a presença de uma barreira orográfica na sua direção oeste, abrangendo os municípios de Pombos, Gravatá, Chã Grande e Primavera com altitudes acima de 460m. Tais barreiras podem possibilitar a ocorrência de chuvas orográficas na cabeceira da bacia.

Figura 8-Mapa altimétrico da bacia do rio Pirapama

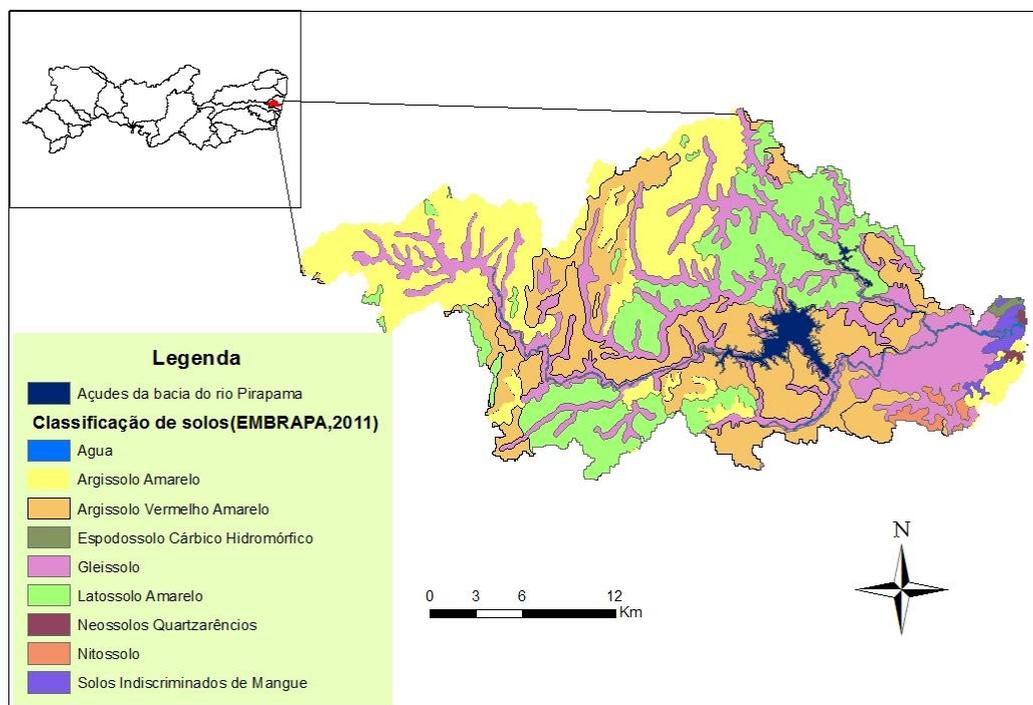


3.2.4 Classificação de solos

O solo da bacia do rio Pirapama é composto por 50% de Argilossolos do tipo amarelo e vermelho amarelo, que segundo definições de Pfaltzgraff et al.(2003), são solos em geral profundos e bem drenados e 20% de Latossolo amarelo, normalmente muito profundos, com espessura em geral superior a dois metros, de elevada permeabilidade e comumente bem acentuadamente drenados. Segundo Medina (2000), estes solos são predominantes nos domínios de rochas pré-cambrianas do embasamento cristalino, constituídos por complexos gnáissicos-graníticos-migmatíticos, cujas alta suscetibilidade à erosão e baixa fertilidade natural são fatores de limitação ao uso.

Os Gleissolos compõem 26% do território da bacia Pirapama, e segundo EMBRAPA (2015), são solos minerais, hidromórficos, desenvolvidos de sedimentos recentes não consolidados, de constituição argilosa, argilo-arenosa e arenosa, do período do Holoceno. Também aparecem em terraços fluviais, lacustres ou marinhos e ainda, em áreas abaciadas e depressões. A Figura 9 apresenta a distribuição espacial do tipo de solo.

Figura 9-Distribuição espacial dos tipos de solo na área de estudo.



3.2.5 Uso do solo

A cobertura vegetal da região não apresenta mais a exuberância e a heterogeneidade primitiva da Mata Atlântica. Nos dias de hoje foi quase totalmente retirada em detrimento ao plantio da cana-de-açúcar e também pela exploração da madeira para a construção de engenhos e exportação em larga escala, principalmente para países europeus (SILVA,2005).

Segundo Gama (2003), a precariedade social e econômica das condições de vida da população residente na bacia resulta, em parte, num processo de ocupação do território também precário e acompanhado pelo contínuo desmatamento de remanescentes florestais. A expansão da área de cultivo da cana-de-açúcar tem resultado numa forte erosão dos solos, causando assoreamento dos cursos d'água e a poluição dos recursos hídricos da bacia. Esta dinâmica é complementada pelas atividades agrícolas dos pequenos produtores rurais, os quais ocupam as margens dos córregos e rios e também contribuem para o processo de desmatamento. Nas áreas nobres, a especulação imobiliária tem determinado a ocupação de mangues e também do desmatamento de florestas.

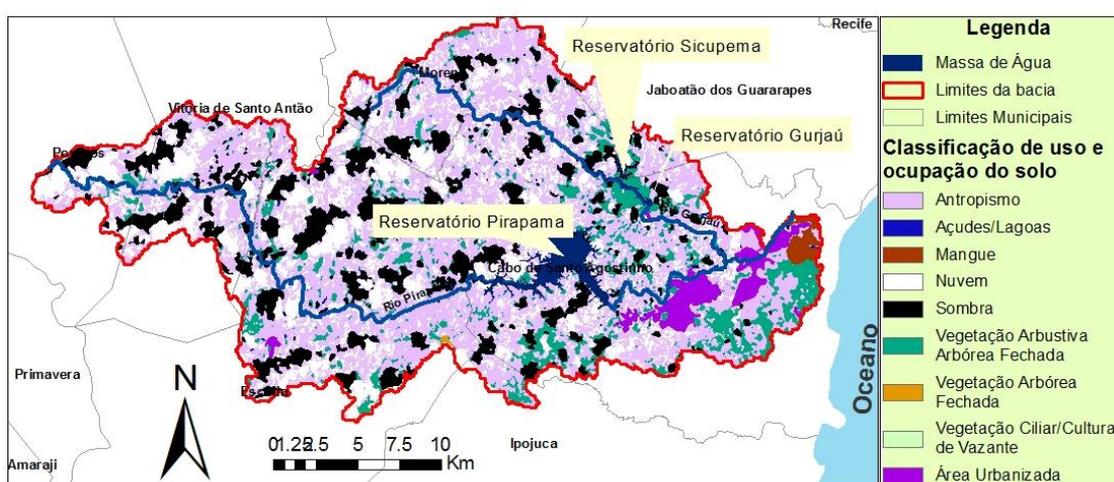
A vegetação no entorno do reservatório de Pirapama é composta, em sua maioria, pelo cultivo da cana, e em menores proporções, arbustos espaçados e fragmentos de vegetação arbórea fechada. Diferentemente do Pirapama, o reservatório Gurjaú, localizado à margem esquerda do rio Pirapama, possui vegetação ciliar arbórea densa, pois está localizado dentro da Unidade de Conservação do sistema Gurjaú (Figura 10). Porém, a vegetação vem sofrendo pressão do cultivo de cana pelas usinas da região (APAC, 2013).

Figura 10-Imagens da vegetação ciliar do lago do reservatório Gurjaú



Durante o percurso da nascente do rio Pirapama, no município de Pombos, até o reservatório Pirapama, predomina em suas margens o cultivo da cana, com manchas espaçadas de vegetação arbustiva. Após o reservatório, no sentido litoral, identifica-se intensa ocupação por habitações e indústrias nas margens do curso d'água (Figura 11). Próximo ao exutório, no município do Cabo Santo Agostinho, o rio Pirapama passa a ser margeado por vegetação arbórea densa até a área de confluência com o rio Jaboatão, onde a foz se encontra densamente urbanizada (APAC, op. cit.).

Figura 11-Mapa de uso e ocupação do solo



Fonte: (APAC, 2013)

3.3 Importância da bacia do rio Pirapama para o abastecimento público da RMR

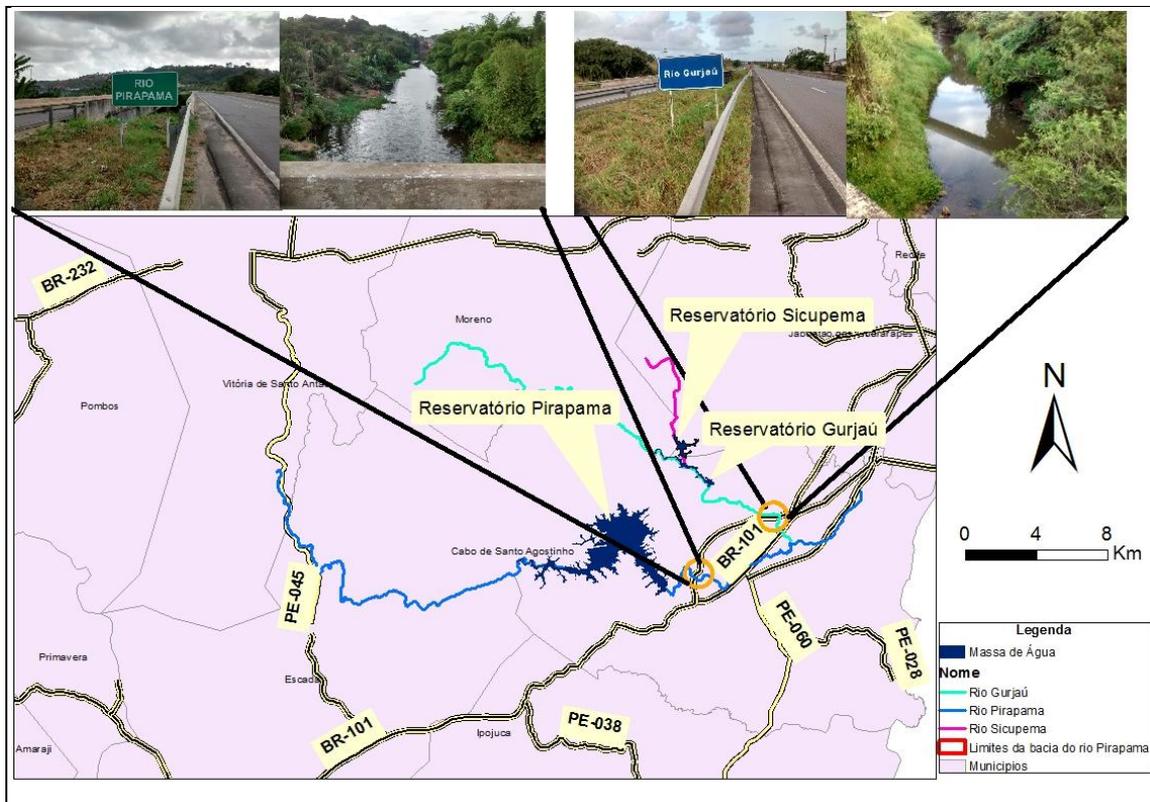
A captação de água na bacia do rio Pirapama para abastecimento público remonta a década de 1920, com a construção de uma barragem e a primeira adutora de água para a cidade do Recife. Nos últimos anos, após estudos hidrológicos, revelou o rio Pirapama como principal manancial com potencial para atender a RMR. Foi determinado em seguida a construção de uma barragem, denominada de Barragem Pirapama (SILVA, 2005).

Segundo o Plano de Aproveitamento dos Recursos Hídricos da RMR, Zona da Mata e Agreste Pernambucano-PARH (PERNAMBUCO, 2005), a despeito da prioridade do uso para fins de abastecimento público, as águas da bacia do Pirapama, além do já mencionado uso para abastecimento urbano, são atualmente também utilizadas para outros fins, tais como:

- Abastecimento da zona rural, através da utilização de poços amazonas nas residências situadas nos aglomerados rurais;
- Abastecimento das indústrias situadas na área da bacia;
- Fins hidroagrícolas que, na área da bacia, se caracterizam como a utilização da água para irrigação dos canaviais pertencentes às usinas de açúcar e destilarias presentes na área e, residualmente, pelas atividades policultoras.

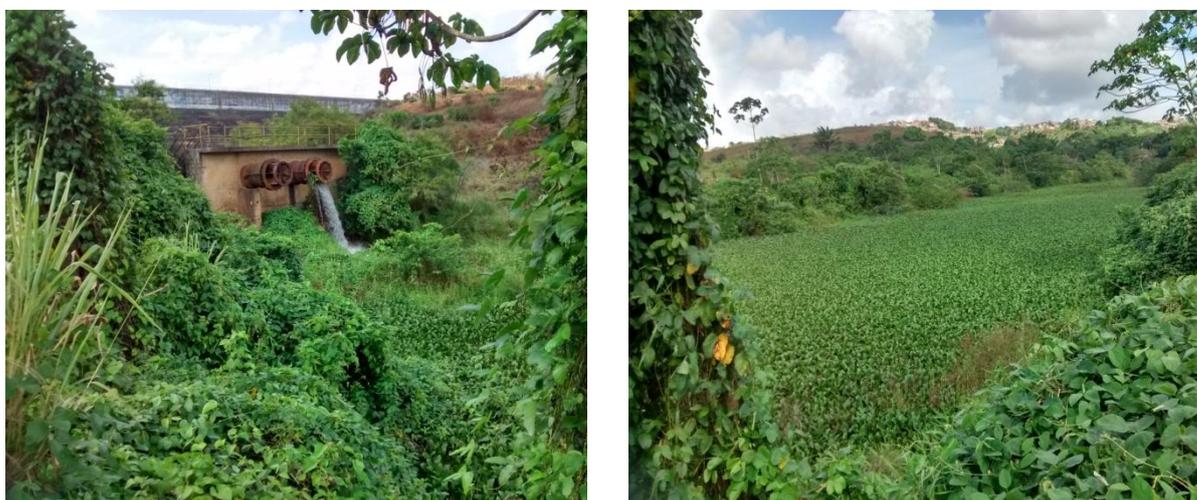
As sedes dos municípios integrantes da bacia do rio Pirapama encontram-se articuladas por um sistema viário pouco integrado, deficitário, tendo a cidade do Recife como pólo de irradiação, isto é, com a função de concentração e dispersão das rotas comerciais e de migração da região. A área possui dois grandes eixos estruturados, de caráter interestadual, as Rodovias Federais BR-101 e BR-232, e duas vias de importância intermunicipal, a PE-60 e PE-45(SILVA, 2005). A Figura 12 mostra estas rodovias, e no detalhe, podem-se visualizar as pontes que cruzam o rio Pirapama e Gurjaú na BR-101, bem como seus respectivos trechos de rios.

Figura 12-Mapa das estradas que cortam a bacia do rio Pirapama



O principal problema da bacia é, atualmente, a degradação ambiental generalizada associada aos processos de ocupação do território para habitação e para o desenvolvimento de atividades agroindustriais. A degradação substancial dos ecossistemas naturais na bacia do rio Pirapama é agravada pelas precárias condições de vida da população. Este processo de lapidação do território da bacia é agravado pela poluição por esgoto doméstico resultante das deficientes condições sanitárias associadas à ocupação irregular do solo e pela poluição difusa das agroindústrias existentes na região (GAMA, 2003). A Figura 13 mostra a tubulação à jusante da barragem Pirapama, por onde é liberada a vazão ecológica e um imenso campo de algas com indicativo de eutrofização.

Figura 13-Vista a jusante da barragem de Pirapama (fev./2015)



A despeito dos diferentes problemas identificados, a bacia do rio Pirapama é atualmente uma grande exportadora de água, haja vista que sua população é estimada em 195.790 habitantes (IBGE,2010),no entanto, mais de 1,5 milhões de habitantes são atendidos pela sua oferta hídrica.

Segundo CPRH/DFID (1998), a bacia por apresentar um conjunto de elementos de natureza física, social, cultural, econômica e ecológica é capaz de potencializar ações de desenvolvimento fundamentadas na sustentabilidade ambiental da área. A própria localização da bacia, com cerca de dois terços de sua área na RMR, é um diferencial positivo. Isso lhe confere uma posição privilegiada na definição de políticas de desenvolvimento local articuladas com o centro metropolitano e outros centros regionais.

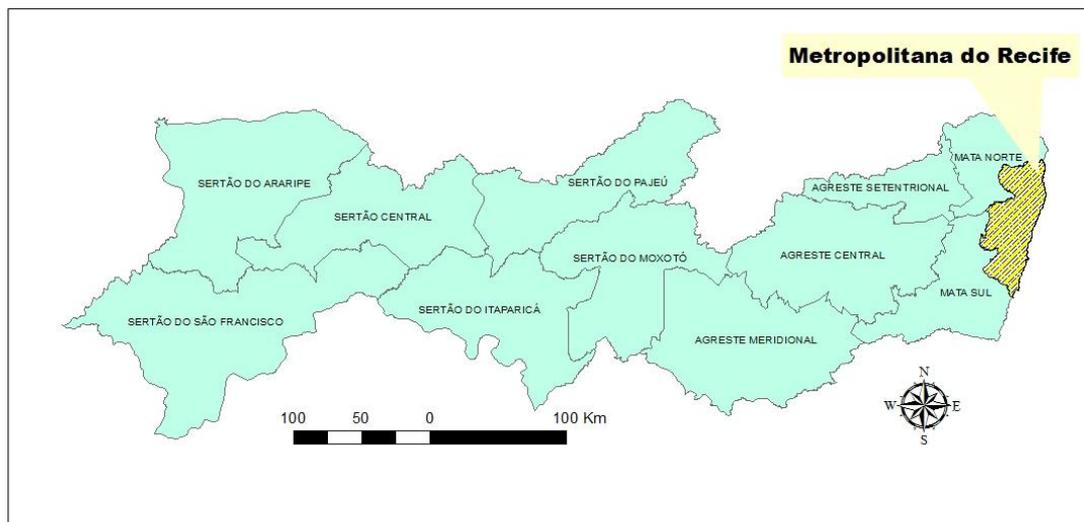
Dois importantes sistemas de abastecimento público da RMR estão inseridos na bacia, são eles: Pirapama e Gurjaú, que juntos respondem por uma oferta hídrica de 6,5 m³/s, que constitui 65% de toda água produzida pelos reservatórios da RMR. Estes dois sistemas, juntamente com o SUAPE que pertence à bacia hidrográfica do rio Ipojuca, formam o mais importante sistema produtor integrado da RMR.

Apresenta-se em seguida, uma síntese da caracterização da RMR e do seu sistema de abastecimento, visando melhor compreensão da importância dos sistemas Pirapama e Gurjaú como parte integrante do mesmo.

3.3.1 Sistema de Abastecimento de Água da Região Metropolitana do Recife

Pernambuco possui 185 municípios e uma população de cerca de 7,05 milhões de habitantes (ANA, 2010). O Estado foi dividido em 12 (doze) regiões de desenvolvimento, sendo uma destas, a Região Metropolitana do Recife-RMR como pode ser observado na Figura 14. A regionalização em Pernambuco foi elaborada no âmbito do Programa Governo nos Municípios, com o intuito de representar um instrumento chave para a diminuição das tradicionais disparidades inter-regionais, fazendo emergir o conceito de “Região de Desenvolvimento” com destaque para o aproveitamento das oportunidades locais (PERNAMBUCO, 2006).

Figura 14-Regiões de Desenvolvimento (RD) do Estado de Pernambuco



Fonte: Base temática da Lei Estadual Nº 12.247, de 25 de setembro de 2003

A RMR é constituída por 14 municípios, que corresponde a 51% da população urbana do Estado (ANA, 2010). Apresenta uma população estimada de aproximadamente 3,8 milhões em 2013 (IBGE, 2010), sendo Recife, capital do estado de Pernambuco, o município mais populoso da região, seguido por Jaboatão dos Guararapes, Olinda e Paulista, todos com mais de trezentos mil habitantes (RODELLA, 2014).

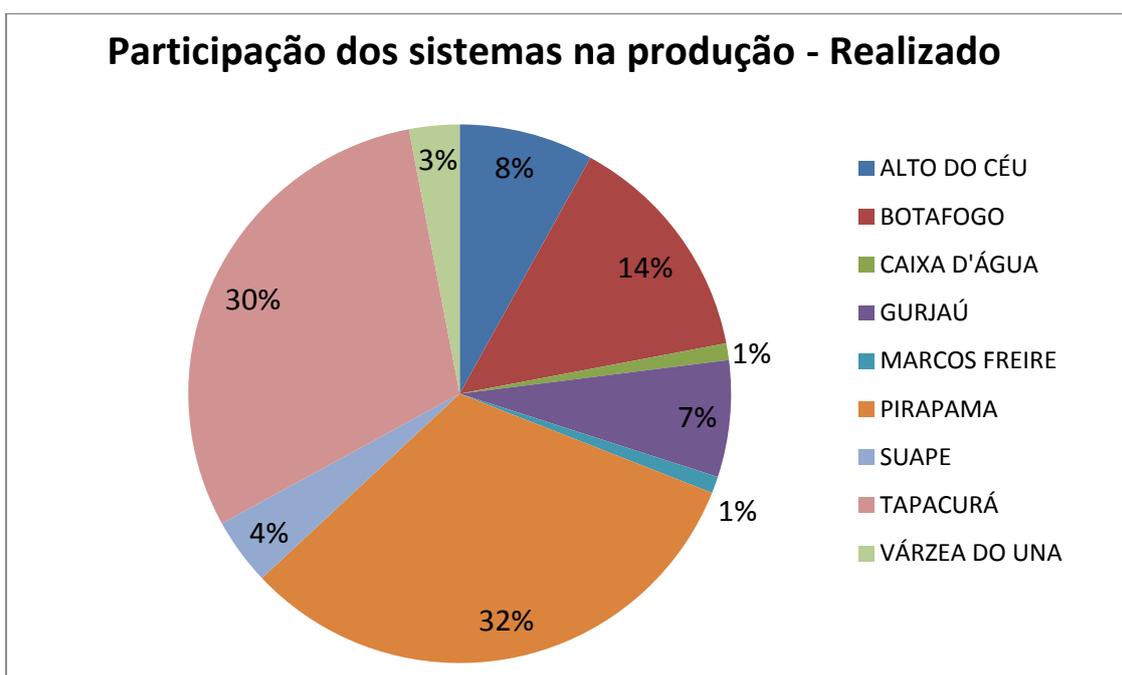
Segundo Montenegro et al. (2009), com uma demanda hídrica de cerca de 14 m³/s, a população da RMR, vinha enfrentando sérios problemas com o déficit do abastecimento público. Em 2011, já com uma demanda hídrica estimada em 15 m³/s, entrou em operação plena o sistema produtor Pirapama produzindo 5,13 m³/s de água, o que, segundo COMPESA (2014), representou um incremento de 50% da produção de água da RMR, beneficiando cerca de 3 milhões de pessoas no Recife, Jaboatão dos Guararapes, Cabo de Santo Agostinho e, indiretamente, as cidades de São Lourenço da Mata e Camaragibe, acabando com o rodízio no fornecimento de água em toda área plana da capital Pernambucana.

Segundo o Atlas Brasil: Abastecimento Urbano de Água (ANA, 2010), a RMR é abastecida por um conjunto complexo e interligado de mananciais e sistemas de produção (incluindo captação, adução, tratamento e distribuição), com destaque aos sistemas

integrados, definidos como sistemas que abastecem diversos municípios simultaneamente ou quando mais de uma unidade produtora abastece um único município, bairro, setor ou localidade (BRASIL, 2007). Estes sistemas respondem por quase 90% do volume total produzido, operados pela COMPESA.

Para se ter uma ideia da complexidade do sistema de abastecimento da RMR, de acordo com os Relatórios de Produção da COMPESA (Jan. a Dez. 2013), para fornecer água para essa região em 2013 foram acionados 9 (nove) sistemas integrados e 17 (dezessete) isolados complementares, onde nesta contagem, os diversos poços utilizados foram considerados um único sistema isolado (RODELLA, 2014). Baseado nos dados desses relatórios, Rodella (2014) traçou o cenário atual da produção destes sistemas, onde se pôde constatar na Figura 15, que Pirapama e Gurjaú participam com 39% de toda a produção de água dos sistemas integrados da RMR.

Figura 15-Participação dos sistemas integrados na produção anual (Adaptado de RODELLA, 2014)



Verifica-se na Figura 16 a localização da RMR em relação às bacias hidrográficas litorâneas estaduais, onde na parte Norte da RMR, identificam-se duas bacias de grandes rios, Goiana e Capibaribe, e uma bacia de pequenos rios litorâneos GL-1. Na parte Sul, destacam-se três bacias de grandes rios, Capibaribe, Ipojuca e Sirinhaém, e duas bacias de pequenos rios

litorâneos a GL-3 e a GL-2, esta última, dada a importância relativa dos seus rios, foi subdividida nas bacias dos rios Tejipió, Jaboação, Pirapama e Massangana. A Figura 16 destaca ainda, os reservatórios que compõem o sistema de abastecimento de água, suas respectivas capacidades máximas e estimativas das vazões regularizadas com garantia plena, conforme COMPESA (2014).

Figura 16-Reservatórios que compõem o Sistema de Abastecimento urbano da RMR



Segundo a COMPESA (2014), as nove barragens da RMR fornecem cerca de 10m³/s de vazões regularizadas, equivalendo a 66% da demanda. O manual de operações do Projeto de Sustentabilidade Hídrica (*PSH-PE*)” da COMPESA (PERNAMBUCO, 2009) atesta a existência de mais de cem poços operados pela COMPESA que cobrem 13% da demanda e os 21% restantes vem de pontos de captação de água de rios, formando assim, o sistema de abastecimento de água da RMR.

3.3.2 Sistema Pirapama

Segundo o PARH (PERNAMBUCO, 2005), o sistema Pirapama foi projetado para produzir, inicialmente, 5,6 m³/s de água, sendo constituído pelas seguintes unidades: barragem, torre de captação de água, tubulações de tomada de água, estação elevatória de água bruta, adutora de água bruta, estação de tratamento de água, adutora de água tratada, subadutoras, reservatórios e reforço dos grandes anéis de distribuição da RMR.

Em 2001, iniciou-se a construção do sistema produtor Pirapama com área de drenagem à montante do reservatório de 338 km² e previsão de ser entregue em 3(três) etapas, sendo a última etapa concluída em dezembro de 2011.

Mediante visita técnica ao local da barragem Pirapama em fevereiro de 2015 foi possível realizar um registro fotográfico de alguns dos principais componentes do Sistema, são eles:

- Barragem do tipo gravidade, em concreto compactado a rolo (CCR), com capacidade de acumular 61 milhões de metros cúbicos de água (Figura 17);
- Tomada de água através de torre submersa (Figura 18) e descarga de fundo em tubos de aço com 2,00m de diâmetro;
- Estação Elevatória (Figuras 19 e 20) situada próxima à barragem, recebendo água através de tubulação de 2,00m de diâmetro, com capacidade para recalcar 5,6m³/s até o local da Estação de Tratamento de Água, através de 6 conjuntos motor-bomba com potencia de 1.600 cv.

Figura 17-Perfil longitudinal da barragem



Figura 18-Tomada de água do reservatório



Figura 19-Instalações da estação elevatória



Figura 20-Sala de controle da estação elevatória



3.3.3 Sistema Gurjaú

Segundo COMPESA (2014), o sistema Gurjaú entrou em operação em 1918 com capacidade de regularização de 1.100 L/s. A captação da água bruta do sistema é feita através da barragem de nível homônima, cuja função principal é elevar o nível da água até a cota em que se encontra a estação de tratamento. A bacia hidrográfica da barragem Gurjaú é de 144 km² e a regularização, propriamente dita, é feita logo a montante no rio Sicupema, um afluente do rio Gurjaú, através de uma pequena barragem de 3,2 milhões de metros cúbicos

(Barragem de Sicupema, construída em 1944/1946) que por sua vez recebe contribuições dos açúdes de São Salvador e São Brás.

Por ocasião da visita técnica ocorrida em Fevereiro de 2015 à ETA-Gurjaú, pôde-se verificar que já há algum tempo foram desativadas duas linhas de adutoras com diâmetro de 200 mm que abasteciam a fábrica da Brahma no Distrito do Cabo. Constatou-se ainda, que a estação elevatória de Matapagipe que durante muito tempo captou água do rio Pirapama e transportou para o reservatório de Gurjaú havia sido desativada no mês da visita.

A adutora de água bruta do sistema Gurjaú funciona por gravidade ligando a Barragem de Gurjaú a sua estação de tratamento. É feita em aço com diâmetro de 1.000mm e extensão de aproximadamente 150m (Figura 21). Tem capacidade de transporte para 1.000L/s (COMPESA, 2014).

Figura 21-Adutora de água bruta da barragem de Gurjaú



A produção do Sistema Gurjaú, com relação às cidades da Região Metropolitana do Recife, está distribuída da seguinte forma (COMPESA, op. cit.):

- 7% da produção é distribuída no Município do Cabo;
- 36% da produção é distribuída na Cidade do Recife;
- 57% da produção é distribuída no Município de Jaboatão dos Guararapes.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo, é apresentada a metodologia utilizada para estimar as disponibilidades hídricas e simular as regras de operação para os reservatórios da bacia do rio Pirapama. São apresentados os modelos e dados utilizados, os critérios adotados para análise da calibração e validação do modelo hidrológico, bem como as variáveis necessárias ao modelo de simulação. Em seguida, foram apresentadas as metodologias aplicadas ao levantamento das demandas hídricas e à elaboração de uma rede de fluxo representativa da bacia. Além disso, são descritas as metodologias empregadas na quantificação dos eventos de seca e nas propostas de regras de operação.

Para o desenvolvimento da pesquisa, fez-se necessária a realização das seguintes etapas:

- Composição da chuva média mensal através de um método denominado inverso do quadrado da distância, tanto para as áreas de drenagem dos postos fluviométricos selecionados, bem como para as bacias e sub-bacias de interesse do estudo;
- Simulação hidrológica- Calibração e validação do modelo chuva-vazão para as estações fluviométricas selecionadas e geração das séries de vazões mensais afluentes de longo período para todas as sub-bacias e reservatórios;
- Simulação da disponibilidade hídrica nos reservatórios com uso do AcquaNet para as garantias de 80%, 90%, 95% e 100%;
- Determinação das demandas consuntivas existentes na bacia;
- Utilização de índice de quantificação de seca para caracterização das vazões mínimas afluentes ao reservatório Pirapama. Esta atividade dá suporte à definição das curvas-guia utilizadas para a primeira regra de operação avaliada;
- Elaboração da proposta das curvas de aversão a risco, utilizando módulo específico do AcquaNet.

4.1 Escolha e descrição dos modelos

A partir da revisão bibliográfica procurou-se embasamento técnico-científico para definição e escolha dos modelos a serem utilizados no presente trabalho. Assim, têm-se as seguintes considerações:

Definição do tipo de modelo chuva-vazão – Optou-se por se trabalhar com um modelo hidrológico concentrado devido a algumas razões a considerar:

- Na área de estudo há pouca disponibilidade de dados e os modelos distribuídos com base física requerem uma grande quantidade de dados;
- As bacias hidrográficas dos reservatórios que serão modelados são consideradas médio porte, não havendo expressivas variações em suas características físicas, constituindo um indicativo para o uso do modelo;
- A existência de inúmeras aplicações deste tipo de modelo em Estudos e Planos na área de estudo com resultados satisfatórios.

Escolha do modelo chuva-vazão SMAP Iterativo– Os principais aspectos analisados para a sua escolha foram:

- Disponibilidade de dados fluviométricos compatíveis com as exigências de calibração e verificação do modelo;
- Formulação conceitual compatível com as condições e regime hidroclimatológico da região;
- Experiência regional prévia na aplicação do modelo, sendo importante que o modelo escolhido disponha de um acervo de parâmetros na região que facilitem as calibrações, orientando a busca e limitando o universo de valores possíveis dos parâmetros;
- Grau de detalhe pretendido no conhecimento dos deflúvios para cada unidade hidrográfica;
- Possibilidade de utilização dos parâmetros do modelo hidrológico para as outras bacias sem dados fluviométricos.

Escolha do modelo de Simulação e Otimização AcquaNet- Os principais aspectos analisados para a sua escolha foram:

- Possibilidade de otimizar quantitativamente um sistema hídrico atribuindo prioridades de captação aos diversos usuários, considerando não apenas cenários com vazões de referência, mas também séries históricas de vazões;
- Permite que diferentes atributos das demandas e das singularidades hidráulicas sejam inseridos como elementos da modelagem;
- Por ser um modelo de rede de fluxo de grande aplicação em diversas áreas de atuação dos recursos hídricos: como análise, gestão e decisão;
- A facilidade da sua estrutura modular constituída por um módulo base, denominado AcquaNet, e de módulos complementares para o cálculo de alocação de água, avaliação da qualidade da água e entre outros, o módulo de Curva de Aversão a Risco-CAR que foi muito importante no escopo do presente estudo.

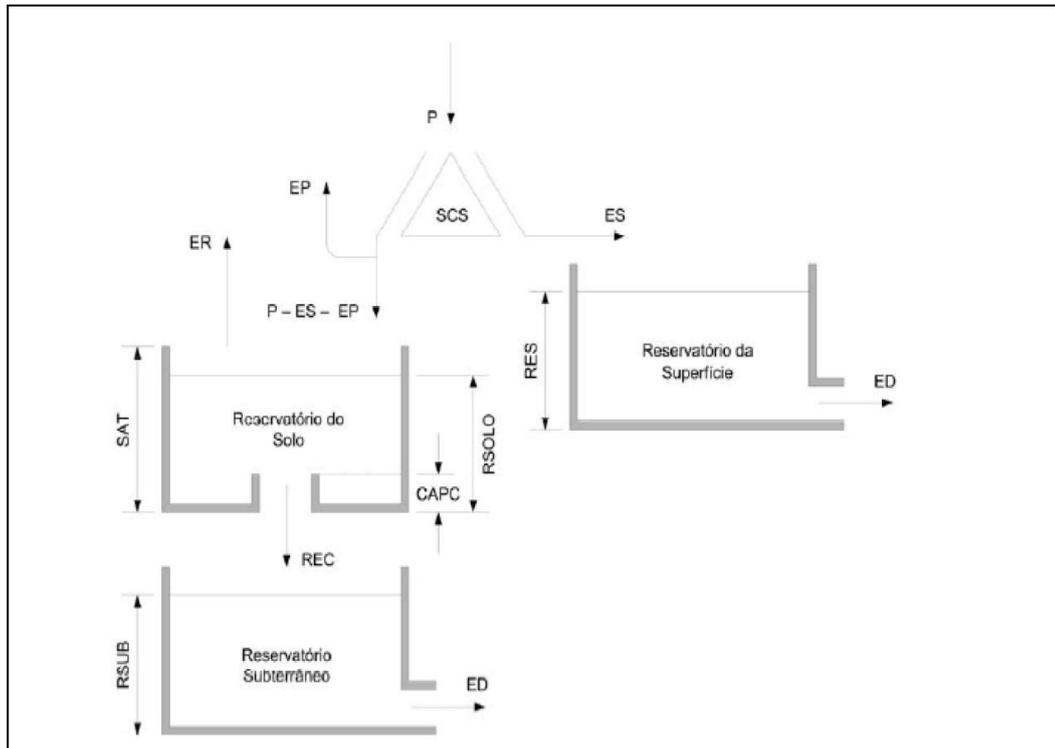
4.1.1 Modelo SMAP

O SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure), desenvolvido por Lopes et al. (1981), é um modelo de simulação hidrológica do tipo chuva-vazão, tradicionalmente empregado na engenharia de recursos hídricos nacional.

O modelo SMAP mensal usa a equação de escoamento superficial do SCS – Soil Conservation Service. Um contador de umidade do solo é continuamente atualizado partindo de condições iniciais dadas ao modelo. A cada mês a atualização da umidade do solo na zona não saturada é processada calculando-se a infiltração através da equação de escoamento do SCS, a evaporação real em função da evaporação potencial e a recarga para a zona saturada é feita usando-se o conceito de capacidade de campo. A vantagem do modelo consiste no pequeno número de parâmetros os quais são facilmente calibrados. O tempo de calibração e validação do modelo é também bem menor do que outros modelos resultando numa maior eficiência no processo de modelagem.

O modelo realiza o balanço da umidade do solo baseado em três reservatórios que representam a superfície e as zonas não saturadas (solo) e saturadas (aquífero) do solo, como exemplifica a Figura 22.

Figura 22-Eschema de funcionamento do Modelo Chuva-Vazão SMAP



Fonte: Barros (2007)

A cada evento de precipitação é feito um balanço de massa. Uma fração da chuva é transferida como escoamento superficial (ES). A lâmina restante (P-ES) sofre perda por evaporação potencial (EP). A lâmina remanescente (P-ES-EP) vai para o reservatório do solo onde a umidade é atualizada ao longo do tempo através da evapotranspiração real (ER):

$$ER = EP * TU \quad (1)$$

Onde:

TU – taxa de umidade do solo;

$$TU = RSOLO / SAT$$

Onde:

RSOLO – taxa de umidade do reservatório (nível atual);

SAT – capacidade de saturação (nível máximo).

A outra saída do reservatório é a recarga para o reservatório subterrâneo através da capacidade de campo, isto é, se RSOLO for maior que a CAPC * SAT haverá recarga (REC):

$$REC = RSOLO * TU^4 * CREC \quad (2)$$

Onde:

CAPC - capacidade de campo, isto é, taxa de umidade máxima que o solo retém contra a ação da gravidade;

CREC - coeficiente de recarga.

No reservatório subterrâneo o nível de água existente (RSUB) é deplecionado a uma taxa constante (K) gerando o escoamento de base (EB):

$$K = (K1)^N \quad (3)$$

Onde:

K1 – constante de recessão para intervalo diário;

N – número de dias do novo intervalo de tempo.

A vazão total em m³/s é dada por:

$$Q = (EB + ES) * \text{Área (Km}^2) / 86,4 \quad (4)$$

Onde:

$$EB = RSUB * (1 - K) \quad (5)$$

O escoamento superficial do SCS é dado pela fórmula:

$$ES = P * TU^{E2} \quad (6)$$

Onde:

E2 – parâmetro que controla o escoamento superficial;

SOLIN – taxa inicial de umidade do solo;

SUBIN – vazão básica inicial.

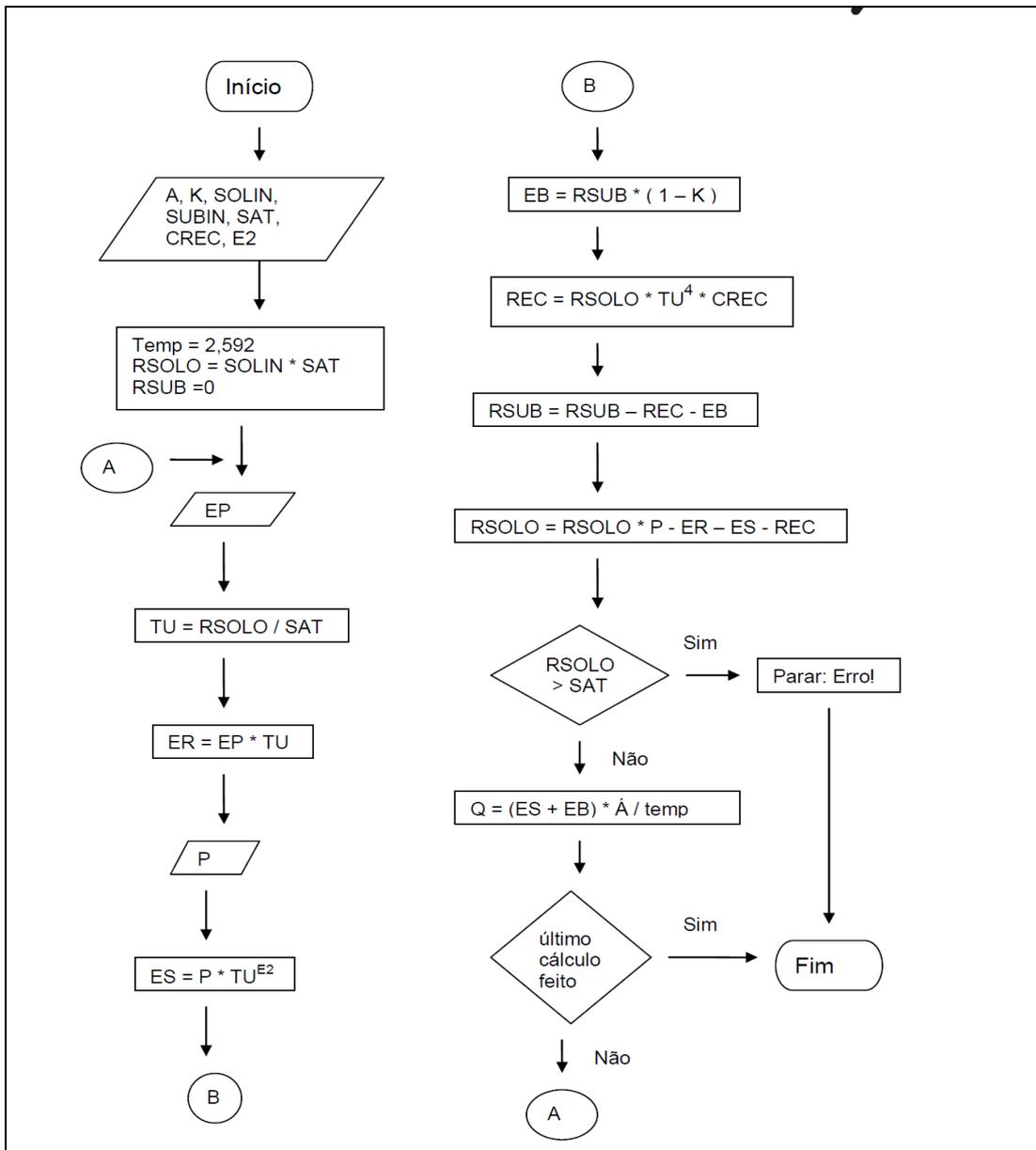
$$SAT = S / (1 - SOLIN) \quad (7)$$

$$RSOLO = SOLIN * SAT \quad (8)$$

$$RSUB = SUBIN * 86,4 / (Área * (1 - K)) \quad (9)$$

A Figura 23 mostra o fluxograma do modelo SMAP.

Figura 23-Fluxograma do Modelo Chuva-Vazão SMAP a Nível Mensal



Fonte: Lopes et al. (1981)

O modelo chuva-vazão SMAP tem uma estrutura relativamente simples, cujos parâmetros são relacionados com parâmetros físicos da bacia. Neste modelo, o número de parâmetros que dependem de calibração é reduzido ao máximo, o que permite a determinação dos valores ótimos globais com maior facilidade permitindo a regionalização dos mesmos. O SMAP utiliza como dados de entrada a precipitação mensal (P) em mm; a evapotranspiração potencial (EP) mensal em mm e a área da bacia hidrográfica em km².

O modelo possui seis parâmetros que precisam ser calibrados, quais sejam: a capacidade de saturação do solo (SAT), que varia entre 400 e 5000; a taxa de geração de escoamento superficial (KES ou PES), que varia entre 0,1 e 10; o coeficiente de recarga do aquífero (CREC), que está relacionado com a permeabilidade da zona não-saturada do solo, e que varia entre 0,0 e 70,0; a taxa de deplecionamento (K) do nível d'água do terceiro reservatório (RSUB), responsável pela geração do escoamento de base (EB), que varia entre 1 a 6; a taxa de umidade inicial do solo (SOLIN). Que determina o nível inicial do segundo reservatório (RSOLO); e o escoamento de base inicial (SUBIN) (NASCIMENTO et.al.,2007).

4.1.2 Modelo AcquaNet

O AcquaNet tem sido um dos focos de pesquisa do Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões da Escola Politécnica da USP, na área de desenvolvimento de técnicas de análise de sistemas de recursos hídricos. O seu uso nos mais variados sistemas de recursos hídricos e nas mais diversificadas regiões do país, indicam que o AcquaNet é uma ferramenta extremamente útil na análise de alocação da água em bacias complexas (PORTO et al., 2003;PORTO; MÉLLO JUNIOR e ROBERTO, 2005). O sistema, em sua fase inicial, foi inspirado em um modelo de rede de fluxo denominado ModSim, desenvolvido na Colorado State University pelo professor John Labadie (LABADIE, 1988)

O princípio básico para utilização do AcquaNet é que o sistema de recursos hídricos possa ser representado como rede de fluxo. Os componentes do sistema são representados na rede como nós, sendo nós de volume (reservatórios) e nós que não são de volume, também chamados nós de passagem (confluências, pontos de desvio, pontos de entrada e pontos de demanda) e arcos (canais, adutoras e trechos naturais de rios). Para considerar as demandas, as vazões afluentes e regras de operação desejadas do reservatório, diversos nós e arcos artificiais deverão ser criados de forma a assegurar que o balanço de massa seja satisfeito em toda a rede. Estes nós e arcos artificiais são criados automaticamente pelo módulo de alocação restando ao usuário a criação dos nós e arcos reais do sistema. O AcquaNet, resolve iterativamente o seguinte problema de fluxo em rede, de forma seqüencial, ao longo do tempo(SCHARDONG, 2006):

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij} q_{ij} \quad (10)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in I_j} q_{ij} - \sum_{k \in O_j} q_{ik} = 0 \quad (11)$$

$$l_{ij} \leq q_{ij} \leq u_{ij} \text{ para todos } i, j = 1, \dots, N \quad (12)$$

Em que q_{ij} é a vazão média (número inteiro) no arco (i, j) definido pelo nó inicial i e o nó terminal j durante o intervalo de tempo desejado; C_{ij} é o custo unitário associado à vazão q_{ij} , que pode ser um custo monetário ou um fator de ponderação que represente direitos de água ou prioridades operacionais (um custo negativo é tratado como um benefício ou prioridade); I_j é o conjunto de todos os nós com arcos que terminam no nó j ($i \in I_j$ significa todos os nós i que sejam elementos do conjunto I_j); O_j é o conjunto de todos os nós com arcos que originam-se no nó j ; l_{ij} é a vazão mínima no arco (i, j) ; u_{ij} é a vazão máxima no arco (i, j) . A equação (11) é a restrição que garante a satisfação do equilíbrio de massa em todos os nós $j = 1, \dots, N$ (inclusive nos artificiais).

As prioridades C_{ij} são calculadas para cada nó pela equação $C_{ij} = - (1000 - P \cdot 10)$, em que P varia de 1 a 99. Os valores de C_{ij} que representam prioridade são sempre negativos, portanto, ao atender uma prioridade, o modelo estará diminuindo os custos da rede de um valor C_{ij} por unidade de vazão fornecida. O usuário precisa selecionar as prioridades relativas a volumes armazenados e demandas. Se ocorrerem déficits, então as demandas com menor prioridade são reduzidas em primeiro lugar. O modelo permite que o usuário altere P a cada 12 meses.

O AcquaNet combina, com eficácia, a simulação e a otimização de tal forma que acentua as vantagens de cada uma e, garante que as metas, prioridades e limitações operacionais sejam satisfeitas de uma forma computacionalmente eficiente. Entretanto, o modelo realiza uma

otimização estática, ou seja, não se garante o ótimo global para um período de “ n ” intervalos de tempo à frente (SCHARDONG, op. cit.).

Os módulos que constituem o AcquaNet são sucintamente descritos:

- Alocação de Água: analisa problemas de alocação de água em bacias hidrográficas, considerando a disponibilidade, demandas atuais e futuras, prioridades de uso, restrições operacionais, etc. Os déficits e os riscos associados à operação do sistema são avaliados (PORTO et al., 2003).
- Qualidade da Água: avalia impactos na qualidade da água associados às mudanças no plano de descarga dos reservatórios, às fontes pontuais de poluição, ou variações nas condições hidrológicas, definindo a melhor estratégia de manejo da água (AZAMBUJA, 2004).
- Irrigação: Simula o reservatório da zona superior do solo, determinando a alocação da água para irrigação de acordo com as necessidades da cultura. Nas estiagens, o modelo calcula uma quantidade de água necessária para garantir sua produção mínima (CARVALHO, 2003).
- Energia: simula a produção de energia firme desejada no sistema proveniente das descargas dos reservatórios. Os múltiplos usos da água, as variações das vazões afluentes e a sazonalidade das demandas são consideradas na análise. (PORTO et al., 2003).
- Economia: permite a modelagem do valor econômico na alocação da água, através de curvas de benefício marginal, que relacionam valores econômicos marginais com quantidades de água alocada para cada uso (PORTO et. al., 2003).
- Curvas de Aversão ao Risco: constrói automaticamente as Curvas de Aversão ao Risco para um ou vários reservatórios (Sistema Equivalente), definido pelo usuário. O resultado é baseado no horizonte (número de anos) de simulação e a reserva estratégica desejada (ROBERTO, MÉLLO JUNIOR e PORTO, 2005).

4.2 Dados utilizados

Os dados hidrológicos utilizados neste estudo foram obtidos da base de dados disponibilizada pela Agência Nacional de Águas (ANA) através de seu Hidroweb e pela Agência Pernambucana de Água e Clima-APAC através de seu Sistema de Geoinformação Hidrometeorológico (APAC, 2015). No caso específico das chuvas foram utilizados, entre os postos indicados pela ANA, aqueles que foram produto de uma análise de consistência e preenchimento de falhas realizados por esta instituição por ocasião do Atlas Nordeste (ANA, 2006), que resultou, em sua maioria, em séries com um período uniforme de 69 anos (1933 a 2001).

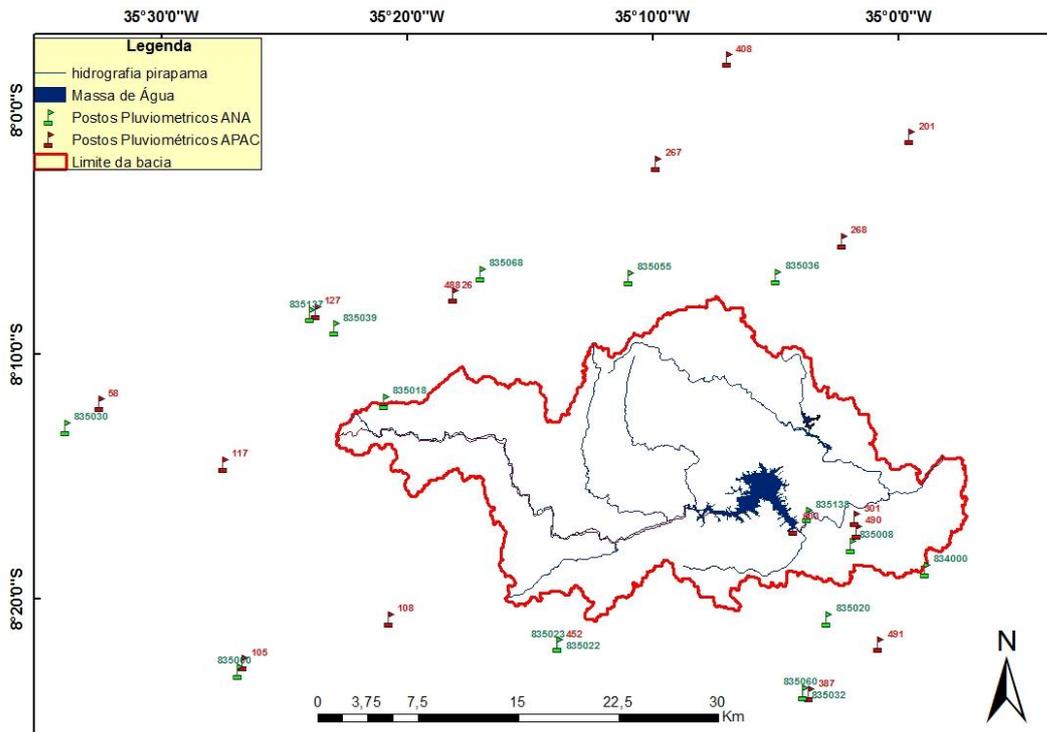
Os dados dos reservatórios analisados foram inventariados no PARH (PERNAMBUCO, 2005), estudos e bases de dados estaduais. As localizações dos reservatórios foram aferidas, sempre que possível, utilizando-se imagens de satélite. As bacias de contribuição dos reservatórios foram obtidas a partir de um modelo digital do terreno (MDT) gerado com os dados da SRTM90.

Na área de estudo e em seu entorno foram inventariadas 7 estações fluviométricas, todas com dados da ANA, e 33 estações pluviométricas, sendo 17 postos pertencentes à base de dados da APAC e 16 da ANA, conforme Tabela 1. Na Figura 24 podem-se visualizar a distribuição espacial das estações pluviométricas.

Tabela 1-Estações inventariadas para estudo

Nº Posto	Base de dados	Nome Posto	Período	Nº Posto	Base de dados	Nome Posto	Período
Estações Pluviométricas							
490	APAC	Cabo (Barragem de Gurjaú)	1980-2014	408	APAC	Paudalho (Barragem de Goitá)	2000-2014
491	APAC	Cabo (Barragem de Suape)	2000-2014	835055	ANA	Tapera	1967-1976
603	APAC	Cabo (Pirapama)	2012-2014	835018	ANA	Engenho Serra Grande	1967-1989
301	APAC	Cabo	1998-2014	834000	ANA	Engenho Algodoads	1965-1987
387	APAC	Ipojuca	2006-2014	835000	ANA	Amaraji	1933-2001
268	APAC	Jaboatão dos Guararapes (Bar,Duas Unas)	1997-2014	835008	ANA	Cabo	1933-2001
108	APAC	Primavera	1980-2014	835023	ANA	Escada (RFN)	1923-1949
26	APAC	Vitória de Santo Antão (IPA)	1952-2014	835020	ANA	Engenho Tabatinga	1967-1977
488	APAC	Vitória de Santo Antão (PCD)	1999-2014	835032	ANA	Ipojuca	1962-1979
452	APAC	Escada	1999-2014	835060	ANA	Usina Ipojuca (IAA)	1963-1978
117	APAC	Chã Grande (IPA)	1993-2014	835039	ANA	Pombos (São José dos Pombos)	1967-1991
127	APAC	Pombos (IPA)	1967-2014	835137	ANA	Pombos	1986-2014
58	APAC	Gravatá	1933-2014	835030	ANA	Gravatá	1933-2001
105	APAC	Amaraji	1993-2014	835036	ANA	Moreno	1933-2001
201	APAC	Camaragibe	2002-2014	835068	ANA	Vitória de Santo Antão	1933-2001
267	APAC	São Lourenço da Mata (Tapacurá)	1933-2014	835138	ANA	Pirapama	1987-2014
Estação Evaporimétrica							
835022	ANA	Escada	1933-2001				
Estações Fluviométricas							
39190000	ANA	Destilaria JB	2000-2007	39192000	ANA	Cachoeira Tapada	2000-2014
39190500	ANA	Arandu	2000-2003	39195000	ANA	Destilaria Inexport	2000-2014
39190800	ANA	Destilaria JB-II	2001-2014	39200000	ANA	Pirapama	1986-2014
39191000	ANA	Ponte PE-35	2000-2010				

Figura 24-Distribuição espacial das estações pluviométricas



4.2.1 Dados Pluviométricos

Tomando por base os dados das estações consistidas da ANA, visando estendê-los até o ano de 2014, buscou-se montar uma série histórica contemplando o período de 1933-2014. O mapa de falhas das estações encontra-se no Apêndice A- Tabela 1. A seleção das estações se deu de acordo com as seguintes considerações:

- Serão utilizadas todas as estações da APAC por terem dados, em sua maioria, acima de 10 anos e até o ano de 2014;
- Em relação às estações da ANA; exceto a estação Pirapama, localizada no reservatório, só serão utilizadas as estações com as séries históricas de dados consistidas relativas ao período 1933-2001, haja vista que a consistência realizada permite uma representatividade destas em relação às demais existentes;
- Foram eleitas aquelas cuja localização é capaz de caracterizar a variabilidade pluviométrica da região.

A partir das condições estabelecidas, foi selecionado um grupo de 23 estações pluviométricas; destas, 17 postos pertencem à base da APAC e 6 à base da ANA(Tabela 2).

Tabela 2-Estações pluviométricas selecionadas.

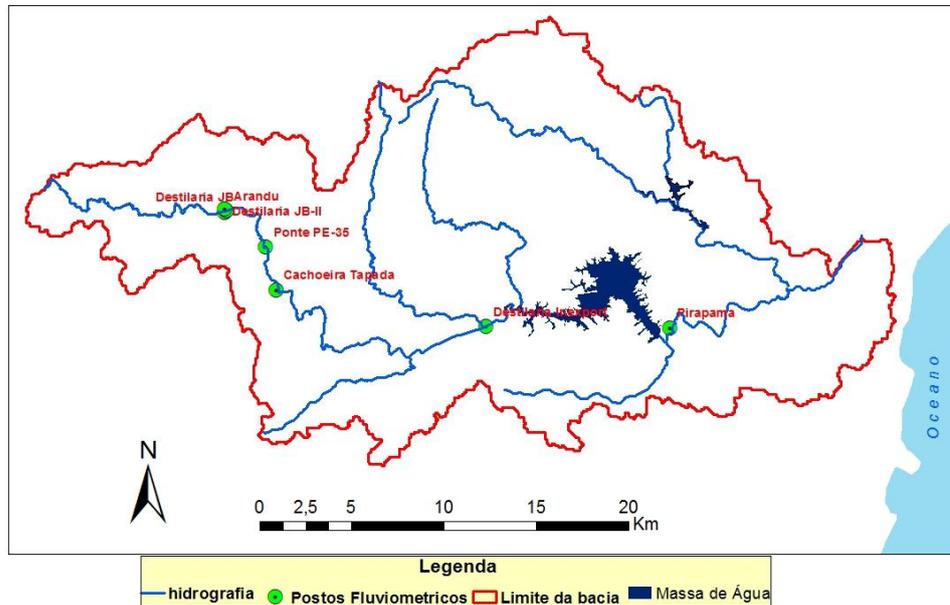
Nº Posto	Base de dados	Nome Posto	Período	Nº Posto	Base de dados	Nome Posto	Período
490	APAC	Cabo (Barragem de Gurjaú)	1980-2014	58	APAC	Gravatá	1933-2014
491	APAC	Cabo (Barragem de Suape)	2000-2014	105	APAC	Amaraji	1993-2014
603	APAC	Cabo (Pirapama)	2012-2014	201	APAC	Camaragibe	2002-2014
301	APAC	Cabo	1998-2014	267	APAC	São Lourenço da Mata (Tapacurá)	1933-2014
387	APAC	Ipojuca	2006-2014	408	APAC	Paudalho (Barragem de Goitá)	2000-2014
268	APAC	Jaboatão dos Guararapes (Bar,Duas Unas)	1997-2014	835000	ANA	Amaraji	1933-2001
108	APAC	Primavera	1980-2014	835008	ANA	Cabo	1933-2001
26	APAC	Vitória de Santo Antão (IPA)	1952-2014	835030	ANA	Gravatá	1933-2001
488	APAC	Vitória de Santo Antão (PCD)	1999-2014	835036	ANA	Moreno	1933-2001
452	APAC	Escada	1999-2014	835068	ANA	Vitória de Santo Antão	1933-2001
117	APAC	Chã Grande (IPA)	1993-2014	835138	ANA	Pirapama	1987-2014
127	APAC	Pombos (IPA)	1967-2014				

4.2.2 Dados Fluviométricos

Para representação do comportamento hidrológico de uma dada área de interesse é indispensável a seleção das estações fluviométricas, uma vez que a eficácia na aplicação do modelo chuva-vazão dependerá dos dados de vazão utilizados no ajuste do modelo, onde na medida do possível, deverá representar um regime de vazões naturais. Baseado nos sete postos fluviométricos inventariados, elaborou-se um mapa de falhas (Apêndice A- Tabela 2), visando subsidiar o processo de escolha.

Apesar da grande quantidade de estações fluviométricas existentes na bacia, percebe-se no mapa de falhas (Apêndice A- Tabela 2), que as estações Destilaria JB, Arandu e Destilaria JB-II possuem série de dados inferiores a 10 anos consecutivos e estão praticamente na mesma posição, conforme mostrado na Figura 25, não sendo recomendadas para a calibração do modelo hidrológico.

Figura 25-Localização das estações fluviométricas



As estações Ponte PE-35 e Cachoeira Tapada possuem ambas 15 anos de dados, no entanto, conforme pode ser vista na Figura 25, elas estão muito próximas e possuem praticamente a mesma área de drenagem, desta forma, optou-se pela utilização da estação de Cachoeira Tapada por apresentar menos falhas e representar uma alternativa para a calibração das vazões do alto curso da bacia do rio Pirapama.

A estação Destilaria Inexport situada no médio curso da bacia, também possui 15 anos de dados, e assim como as demais, não possui em sua área de drenagem nenhuma área controlada por reservatório, permitindo-se a utilização de toda a série histórica de dados para a calibração do modelo hidrológico.

Outra estação selecionada foi a de Pirapama, a mesma encontra-se a jusante e bem próxima ao barramento do reservatório e possui uma série de dados de vazão com boa qualidade, de modo a se obter uma avaliação confiável do comportamento hidrológico da área de contribuição do reservatório analisado. No entanto, para a calibragem do modelo foi selecionado o período anterior à ocorrência da construção da barragem Pirapama que data de 2001. Haja vista a grande interferência da barragem em sua bacia de contribuição considerou-se para esta estação o período de 1987 a 1996. A Tabela 3 mostra as estações selecionadas para o presente estudo e suas respectivas áreas de contribuição calculadas.

Tabela 3-Estações fluviométricas selecionadas

Nº Posto	Base de dados	Nome Posto	Período	Área de contribuição (km ²)
39192000	ANA	Cachoeira Tapada	2000-2013	90.00
39195000	ANA	Destilaria Inexport	2000-2013	235.00
39200000	ANA	Pirapama	1987-1996	372.00

4.2.3 Dados de evapotranspiração

A evapotranspiração potencial (ETP) foi determinada com base no acervo de dados de evapotranspiração potencial média mensal, calculados com o método de Hargreaves para locais escolhidos no Nordeste. Os dados utilizados no estudo foram oriundos da Estação Climatológica de Escada, constante na Tabela 1 e Figura 9 do inventário de dados, cujos valores mensais médios são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4- Evapotranspiração anual média

Estação Escada (mm)											
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
143	120	124	102	88	76	82	98	106	132	138	145

4.2.4 Dados altimétricos

Neste estudo, a extração das características físicas e delimitação das bacias foram determinadas a partir do modelo Numérico de Terreno (MNT), com resolução espacial de 90 m, obtidos através da missão espacial do radar SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) criado com o objetivo de obter informações altimétricas da superfície terrestre gerando uma base para estudos espaciais diversos. Os dados utilizados foram do banco de dados da Embrapa – CNPM (MIRANDA et al., 2005).

O Radar SRTM foi lançado em fevereiro de 2000 a bordo do ônibus espacial Endeavour. Durante 11 dias obteve dados de altimetria estereoscópica de 80% da superfície terrestre,

gerando imagens com resolução espacial (nos dados fontes) de um arco segundo para os Estados Unidos e três arcos segundo para o restante do mundo e com uma amplitude de grade 30 metros para o (SRTM 1) e 90 metros para o (SRTM 3), projetados para uma precisão vertical e horizontal absoluta de 16 e 20 metros, respectivamente, com 90% de confiança (MEDEIROS et al., 2009).

Os dados derivados do radar SRTM tem um vasto campo de aplicação e utilidade para as ciências da Terra. No caso específico da Geomorfologia os dados são utilizados como base cartográfica para levantamento de campo sendo capaz de auxiliar na delimitação automática de bacias hidrográficas, extração de níveis hipsométricos, curvas de nível, criação de perfis topográficos etc.(VITAL et al., 2010).

4.2.5 Dados Reservatórios

Os Quadros 1 e 2 apresentam as fichas técnicas dos Reservatórios Pirapama e Sicupema, com informações de localização, curso barrado e área da bacia hidrográfica. Baseado no PARH (PERNAMBUCO, 2005), as Tabelas 5 e 6 apresentam seus dados básicos, como cota-área-volume, dados de precipitação e evaporação mensal sobre o espelho d'água. As Figuras 26 e 27 mostram os gráficos das curvas Cota x Área e Cota x Volume.

Quadro 1-Ficha Técnica do reservatório Pirapama

Curso Barrado	Rio Pirapama (PE)
Bacia hidrográfica	GL-2
Município	Cabo de Santo Agostinho
Localidade	Eng. Matapagipe
Órgão Executor	Estado de Pernambuco
Tipo de Material	Concreto Compactado a Rolo -CCR
Cota Coroamento(m)	53,00
Cota Sangradouro(m)	45,70
Ano de construção	2001
Uso do açude	Abastecimento
Área da Bacia Hidrográfica (Km ²)(Calculada)	338
Volume máximo (m ³)	60.937.000,00
Volume mínimo (m ³)	1.100.000,00
Posto pluviométrico representativo do espelho d'água	Recife Caxangá (3960026)
Evaporação representativa do espelho d'água	Ipojuca

Fonte: APAC (2015)

Quadro 2-Ficha Técnica do reservatório Sicupema

Curso Barrado	Arroio Sicupema (PE)
Bacia hidrográfica	GL-2
Município	Cabo de Santo Agostinho
Localidade	Não informado
Órgão Executor	Não informado
Tipo de Material	Não informado
Cota Coroamento(m)	60,50
Cota Sangradouro(m)	Não informado
Ano de construção	1963
Uso do açude	Abastecimento
Área da Bacia Hidrográfica (Km ²)(Calculada)	12
Volume máximo (m ³)	3.200.000,00
Volume mínimo (m ³)	320.000,00
Posto pluviométrico representativo do espelho d'água	(3869694)
Evaporação representativa do espelho d'água	Recife (Curado)

Fonte: APAC (2015)

Tabela 5-Dados básicos do reservatório Pirapama

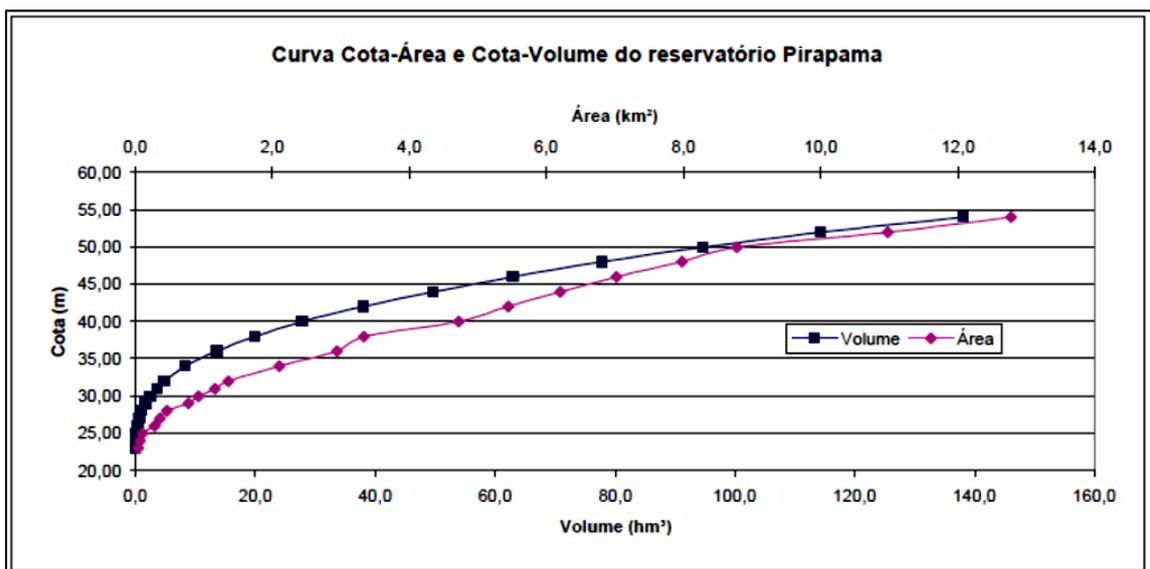
Meses	Precipitação (mm)	Evaporação (mm)
Jan	93,6	228,3
Fev	80,3	140,2
Mar	221,1	223,6
Abr	217,4	226,6
Mai	250,6	192,1
Jun	273,4	187,6
Jul	304,6	204,6
Ago	156,8	211,9
Set	73,9	242,4
Out	49,5	266,4
Nov	26,6	247,7
Dez	30,0	281,8
TOTAL	1777,50	2653,20

Cota (m)	Área (km ²)	Volume (hm ³)
23,00	0,04	0,04
24,00	0,07	0,09
25,00	0,10	0,18
26,00	0,28	0,37
27,00	0,36	0,69
28,00	0,46	1,10

(Continuação)

Cota (m)	Área (km ²)	Volume (hm ³)
29,00	0,78	1,72
30,00	0,92	2,57
31,00	1,16	3,61
32,00	1,36	4,87
34,00	2,10	8,40
36,00	2,94	13,62
38,00	3,34	19,90
40,00	4,72	27,85
42,00	5,44	38,13
44,00	6,20	49,77
46,00	7,02	62,98
48,00	7,98	77,90
50,00	8,78	94,70
52,00	10,98	114,40
54,00	12,78	138,10

Figura 26-Curva Cota x Área x Volume Pirapama



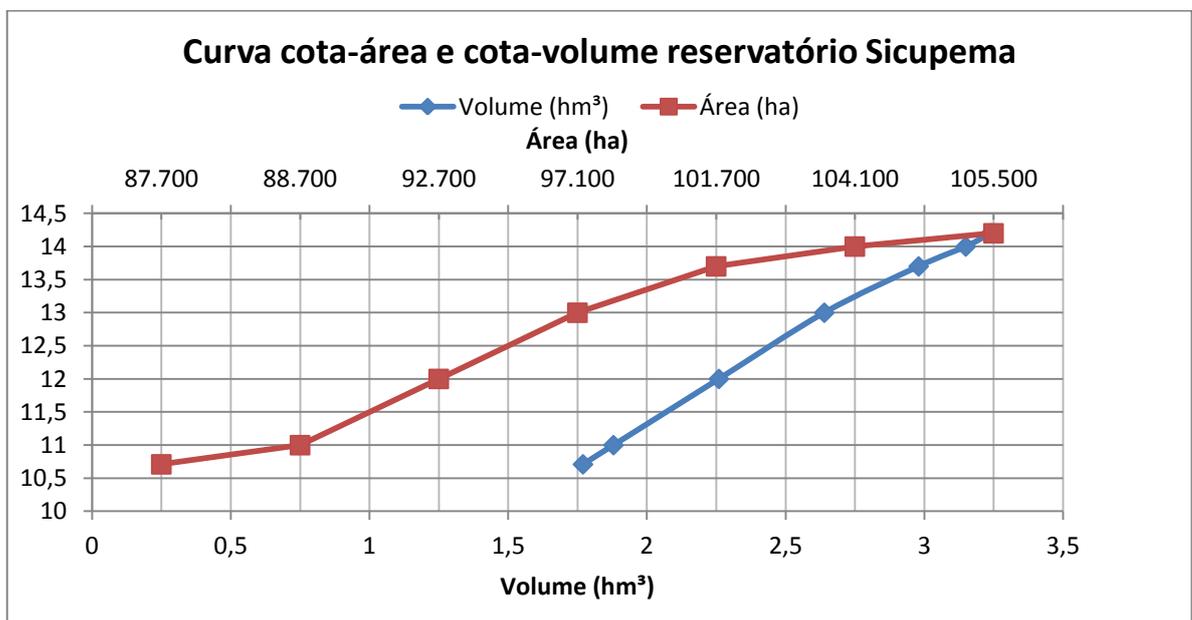
Fonte: PERNAMBUCO (2005)

Tabela 6-Dados básicos do reservatório Sicupema

Meses	Precipitação (mm)	Evaporação (mm)
Jan	97,3	109,7
Fev	122,5	93,0
Mar	202,4	74,2
Abr	260,2	61,9
Mai	280,2	57,5
Jun	303,4	57,5
Jul	349,3	63,3
Ago	201,2	85,8
Set	116,6	91,1
Out	58,9	110,9
Nov	45,7	117,9
Dez	70,2	117,0
TOTAL	2107,90	1039,80

Cota (m)	Área (ha)	Volume (hm ³)
10,71	87.700	1,77
11,00	88.700	1,88
12,00	92.700	2,26
13,00	97.100	2,64
13,70	101.700	2,98
14,00	104.100	3,15
14,20	105.500	3,24

Figura 27-Curva Cota x Área x Volume Sicupema



Fonte: PENAMBUCO (2005)

4.3 Simulação com os modelos

4.3.1 Calibração e validação do modelo hidrológico

A calibração é um processo que busca igualar os hidrogramas simulados em relação aos observados, contribuindo para a precisão dos resultados gerados pelo modelo. Na validação verifica-se se o modelo representa bem a realidade da bacia, verificando a qualidade da aplicação (ALBUQUERQUE, 2008).

A calibração dos parâmetros pelos modelos utiliza como dados de entrada a precipitação média na bacia, a evapotranspiração média e a vazão medida no exutório, todos no mesmo período de monitoramento. A vazão observada deverá ser aproximada pelo modelo, em busca dos parâmetros ideais.

Os critérios utilizados para avaliação da calibração e validação do modelo se deram através das estatísticas relacionadas à comparação entre os hidrogramas calculado e observado, onde para Machado e Vettorazzi (2003), um dos mais importantes critérios para avaliar o ajuste de modelos hidrológicos é o Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe-COE (NASH e SUTCLIFFE, 1970). Foram calculados também o erro de volume e o coeficiente de rendimento médio da bacia de contribuição através das seguintes equações:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - Q_{cal})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{cal}})^2} \quad (13)$$

$$\Delta V(\%) = \frac{\sum (Q_{Obs} - Q_{Cal})}{\sum (Q_{Obs})} \cdot 100 \quad (14)$$

Onde: R^2 é o coeficiente de Nash; $\Delta V(\%)$ é o erro de volume; Q_{obs} é a vazão observada; Q_{cal} é a vazão calculada e $\overline{Q_{Obs}}$ a vazão média observada.

$$R(\%) = [Q(\text{mm})/P(\text{mm})].100 \quad (15)$$

Onde R é o rendimento da bacia em %, Q é o volume escoado em mm e P é o volume precipitado em mm.

Cálculo da precipitação média

A metodologia adotada para a extração da precipitação média utilizou o pré-processamento do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH, através do programa INTERPLU, com o suporte do software comercial de geoprocessamento ArcGis.

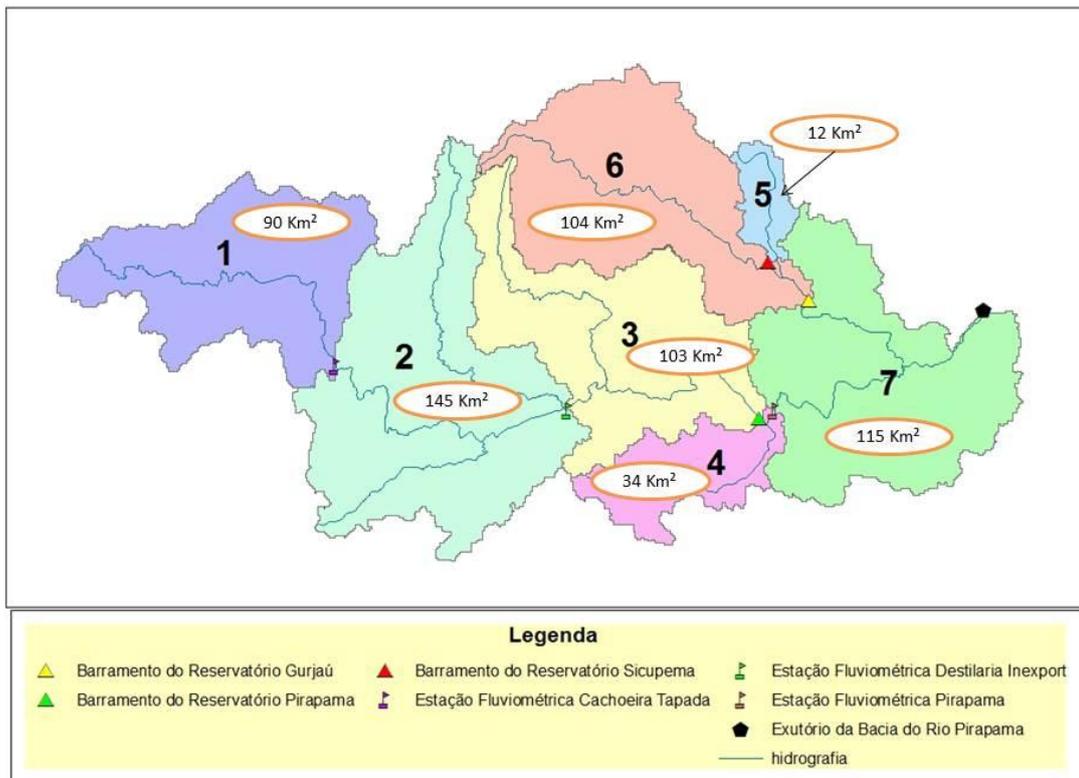
É requisito para a utilização do INTERPLU a preparação de informações extraídas ou derivadas do MNT. Esta etapa preparatória permite a geração dos dados que alimentarão os arquivos de entrada do aplicativo. Mediante a utilização de técnicas de geoprocessamento realizou-se a discretização espacial da região de estudo, considerando principalmente os critérios relacionados com as áreas de contribuição: (a) dos reservatórios, (b) das estações fluviométricas estratégicas para calibração do modelo e (c) das áreas incrementais existentes entre (a) e (b). Sendo delimitadas as seguintes sub-bacias:

- **Sub-bacia 1**- formada pela área da bacia hidrográfica entre a nascente do rio Pirapama e a Estação fluviométrica Cachoeira Tapada (39192000); representando uma área de 90 km².
- **Sub-bacia 2** - formada pela área da bacia hidrográfica do rio Pirapama entre as Estações fluviométricas Cachoeira Tapada (39192000) e Destilaria Inexport (39195000); representando uma área de 145 km².
- **Sub-bacia 3** - formada pela área da bacia hidrográfica do rio Pirapama entre as Estações fluviométricas Destilaria Inexport (39195000) e a barragem Pirapama; representando uma área de 103 km².
- **Sub-bacia 4** - formada pela área da bacia hidrográfica do rio Pirapama entre a barragem do reservatório Pirapama e a Estação fluviométrica homônima (39200000); representando uma área de 34 km².

- **Sub-bacia 5** - formada pela área de contribuição da barragem do reservatório Sicupema dentro da bacia hidrográfica do rio Pirapama; representando uma área de 12 km².
- **Sub-bacia 6** - formada pela área de contribuição da barragem do reservatório Gurjaú deduzida a área da barragem do reservatório Sicupema (sub-bacia 5) dentro da bacia hidrográfica do rio Pirapama; representando uma área de 104 km².
- **Sub-bacia 7** - formada pela área da bacia hidrográfica do rio Pirapama entre a Estação fluviométrica Pirapama (39200000) e o exutório da bacia; representando uma área de 115 km².

As sub-bacias que dividem a bacia do rio Pirapama nesse estudo podem ser observadas na Figura 28.

Figura 28-Mapa das sub-bacias delimitadas



A precipitação média na bacia foi calculada utilizando-se o método do inverso do quadrado da distância. O método toma como base uma grade de pontos onde será feito o cálculo da precipitação. Foi construída uma grade com espaçamento de 1 km conforme mostrado na Figura 29. A precipitação em cada ponto é calculada pela equação 16:

$$P_m = \frac{P_1 * \frac{1}{d_1^2} + P_2 * \frac{1}{d_2^2} + \dots + P_n * \frac{1}{d_n^2}}{\frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2} + \dots + \frac{1}{d_n^2}} \quad (16)$$

onde:

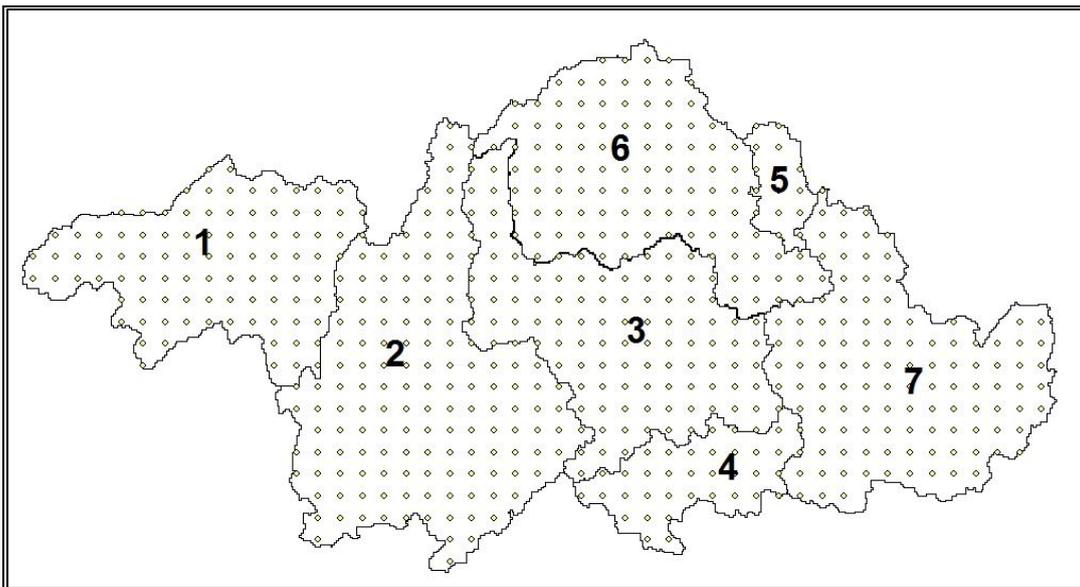
P_m é a precipitação média no ponto m da grade;

$P_1, P_2 \dots P_n$ são os valores de precipitação das n estações mais próximas do ponto m da grade;

$d_1, d_2 \dots d_n$ são as distâncias das estações até o ponto m da grade.

A precipitação média na área de interesse é dada pela média aritmética dos valores de precipitação dos pontos da grade.

Figura 29-Grade de pontos sobre a bacia hidrográfica do rio Pirapama para o cálculo da precipitação média



4.3.2 Simulação dos reservatórios

Conforme estabelecido no item 4.1 foi empregado o modelo de simulação e otimização AcquaNet para a realização do balanço de massa dos reservatórios Pirapama e Sicupema. Quanto ao reservatório Gurjaú, por ser considerada uma barragem de nível, não apresentando dados de cota x área x volume, não tem a função de atendimento à demanda através do volume regularizado ou retirado. Portanto não fará parte do estudo de eficiência dos reservatórios, mas entrará na rede de fluxo do sistema da bacia do rio Pirapama como um nó de oferta hídrica, onde serão localizadas as demandas referentes à área de contribuição deste reservatório.

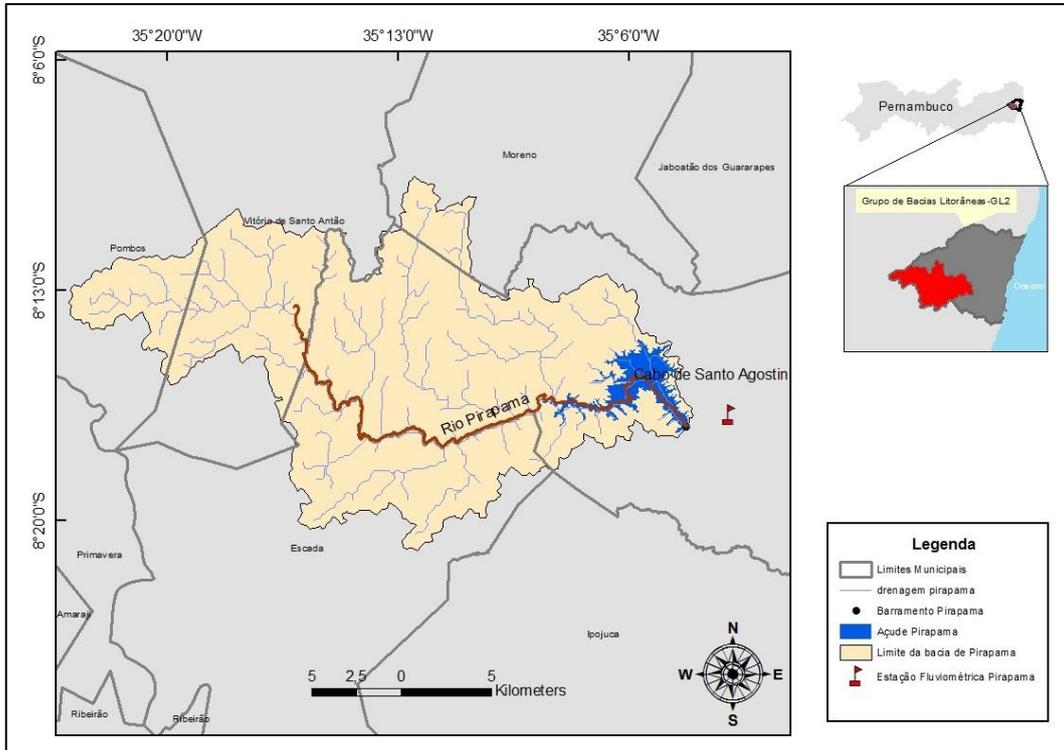
Os dados de entrada necessários à simulação dos reservatórios no AcquaNet são:

- Vazões afluentes geradas pelo modelo hidrológico (SMAP);
- Características físicas do reservatório;
- A evaporação representativa da superfície do lago do reservatório;
- Demandas dos diversos usos.

Reservatório Pirapama

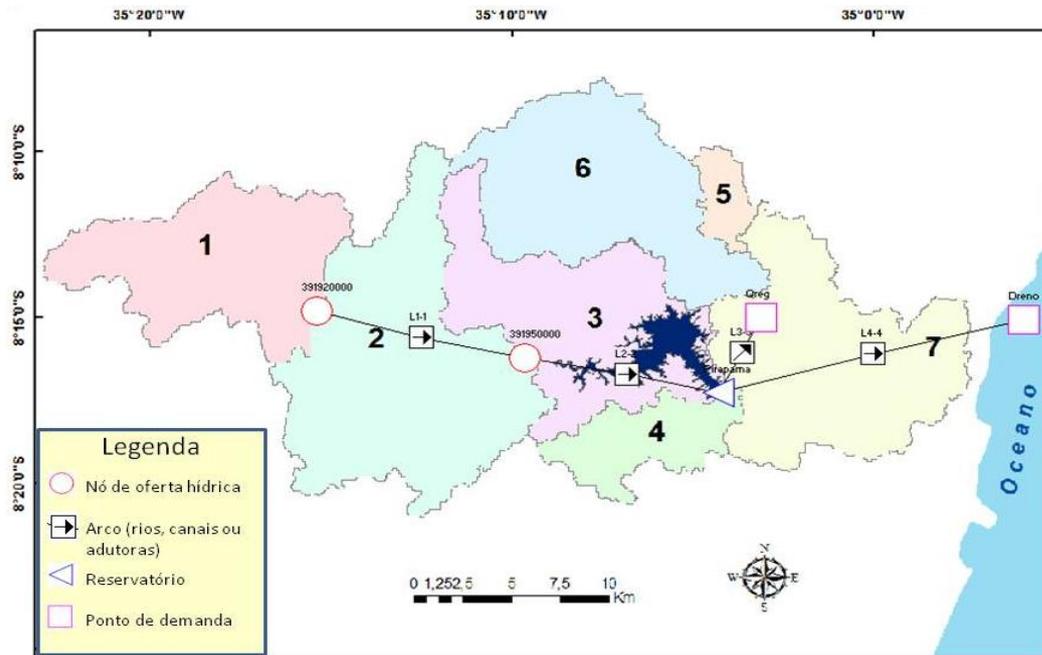
A bacia hidrográfica da barragem de Pirapama corta os municípios de Cabo de Santo Agostinho, Moreno, Escada, Vitória de Santo Antão e Pombos, fica situada entre as coordenadas geográficas 08°18'29,50'' e 08°13'21,48'' de latitude sul e 35°29',36'' e 35°09'38'' de longitude oeste. A Figura 30 apresenta a área de contribuição do reservatório, contendo a estação fluviométrica a jusante.

Figura 30-Bacia hidrográfica da barragem Pirapama



Para determinação das vazões regularizadas foi criada uma rede de fluxo simplificada, em que o reservatório Pirapama dispõe de apenas uma demanda que representa a vazão por ele regularizada (Q_{reg}), conforme mostrado na Figura 31.

Figura 31-Rede de fluxo do reservatório Pirapama



Foi estabelecido que o reservatório teria como volume meta o valor de 100% de sua capacidade, entretanto com uma prioridade inferior às demandas, admitidas com prioridade máxima, ou seja, com o valor de 1. Assim, sempre que houver excesso hídrico ele será totalmente armazenado, garantindo uma situação mais favorável aos períodos seguintes. Desta forma, sempre que possível, o reservatório estará cheio.

Também foi considerada no final da rede uma demanda bastante elevada, mas de baixíssima prioridade, que funciona como dreno, absorvendo o volume excedente que sangra do reservatório devido à incapacidade de armazenamento. As prioridades adotadas estão apresentadas na Tabela 7, lembrando que, para o AcquaNet, a prioridade máxima é dada pelo valor unitário e a mínima pelo valor 99.

Tabela 7-Prioridades adotadas

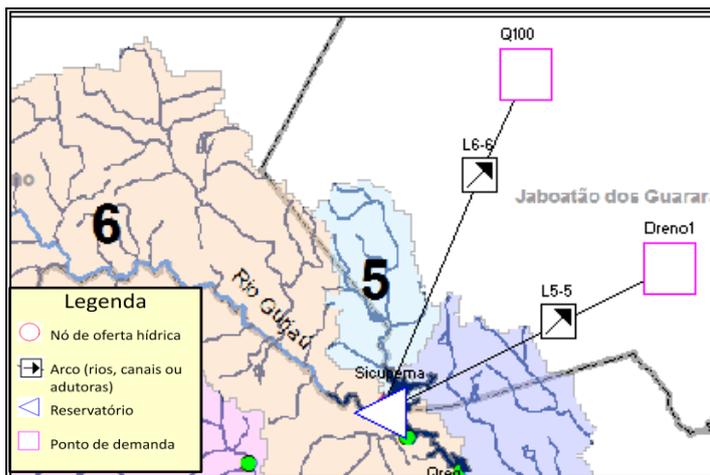
Elemento	Prioridade
Qreg	1
Dreno	99
Pirapama	99

Definidas as prioridades e informados os dados de entrada no AcquaNet inicia-se o processo de determinação das vazões regularizadas associadas às garantias. Para todas as simulações, o volume inicial de todas as barragens foi adotado igual à metade de sua capacidade.

Reservatório Sicupema

Utilizaram-se as mesmas metodologias e condições estabelecidas com o reservatório Pirapama para fins de determinação da vazão regularizada deste reservatório. Devido a sua pouca expressividade só foram definidos a vazão e o volume retirado que apresentassem um grau de atendimento de 100%. A Figura 32 mostra a rede de fluxo simplificada criada para esta simulação.

Figura 32-Rede de fluxo simplificada Sicupema



4.3.3 Demandas e rede de fluxo

As demandas podem ser consuntivas ou não-consuntivas, as primeiras quando o uso da água implica consumo, as segundas quando a água não é consumida, mas mantida em determinadas condições que implicam restrições aos demais usos (PERNAMBUCO, 1998).

No presente trabalho foram consideradas apenas as demandas consuntivas, quais sejam, abastecimento humano (urbano e rural), abastecimento animal, irrigação e indústria.

A estimativa das demandas foi realizada tomando por base a metodologia utilizada no Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco- PERH-PE (PERNAMBUCO, 1998), os dados do Censo Demográfico e Agropecuário do IBGE, anos 2010 e 2006, respectivamente, o cadastro de Outorga da APAC, e o histórico de retiradas coletados na COMPESA.

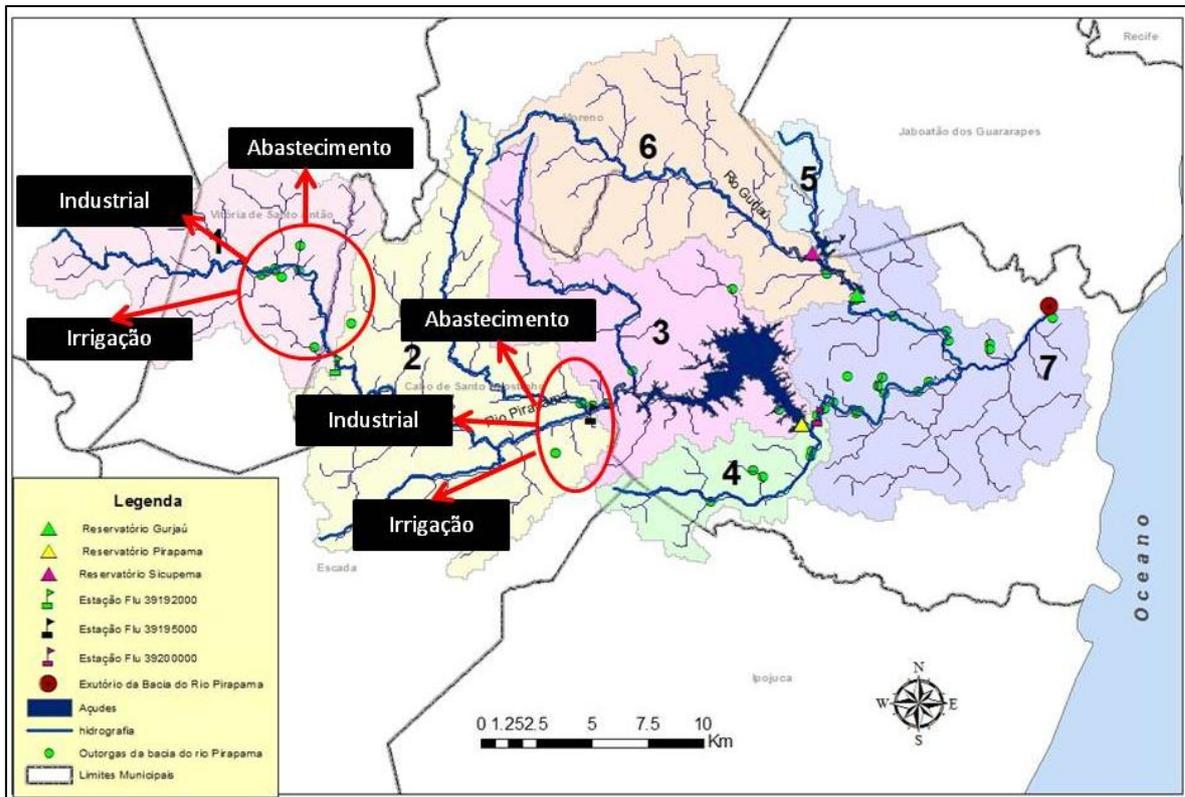
Para extração de algumas demandas levantadas fez-se necessário à utilização de ferramentas de geoprocessamento na definição da parcela de área de cada município inserida na bacia do rio Pirapama, resultando na Tabela 8.

Tabela 8-Coefficientes de área municipais da bacia do rio Pirapama

Município	Bacia hidrográfica da sede municipal	Área Total (Km²)	Área na bacia do rio Pirapama (Km²)	% de Área presente
CABO DE SANTO AGOSTINHO	GL2	448.96	343.14	76.43%
ESCADA	IPOJUCA	347.22	71.87	20.70%
IPOJUCA	IPOJUCA	527.38	7.11	1.35%
JABOATÃO DOS GUARARAPES	GL2	258.80	16.57	6.40%
MORENO	GL2	196.19	82.73	42.17%
POMBOS	CAPIBARIBE	203.37	10.36	5.10%
VITÈRIA DE SANTO ANTÃO	CAPIBARIBE	372.93	71.73	19.23%

Na utilização do cadastro de Outorga foram espacializados os pontos de outorgas, separados por tipos de uso e agregados por sub-bacias, conforme Apêndice B - Tabela 1, sendo ilustrados na Figura 33.

Figura 33- Desagregação das Outorgas



Fez-se necessária a análise e o confronto dos resultados obtidos pela metodologia do PERH-PE (PERNAMBUCO, 1998) em relação aos valores atuais de vazões outorgadas existentes no cadastro de Outorgas da APAC, a fim de se evitar a sobreposição de demandas, e considerar o cenário mais realista possível.

Abastecimento humano

Para a demanda de abastecimento humano foi considerado o cadastro de Outorga da APAC, uma vez que a outorga fornecida supera qualquer metodologia de cálculo de demanda que leve em conta a população da área da bacia com base no censo demográfico, haja vista ser o sistema Pirapama um grande produtor de água, com suas águas sendo distribuídas em toda RMR.

A demanda do reservatório Pirapama, visando uma maior aproximação da realidade, foi alimentada no AcquaNet, considerando não o valor outorgado, mas os reais valores médios

mensais de retiradas dos últimos 4 (quatro) anos (Tabela 9). Estes dados foram coletados no Centro de Controle e Operação- CCO COMPESA e nos relatórios de produção da ETA- Pirapama, onde consta que desde agosto de 2014, em função de um contrato com a fornecedora de energia do Estado, a vazão de retirada do reservatório obedece a seguinte escala: 5.000 litros por segundo no horário das 21 às 17h. e 4.000 litros por segundo das 17 às 21h., resultando numa vazão média de 4.830 litros por segundo. Sendo esta a vazão de retirada média aplicada para todo o restante do período simulado (1933-2010).

Tabela 9-Histórico de retiradas para abastecimento humano do reservatório Pirapama

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
2011	2.394	1.807	2.513	2.783	2.746	2.631	1.359	2.101	2.525	2.696	4.203	4.255
2012	4.255	4.255	4.229	4.271	4.491	4.373	3.457	4.306	4.274	3.846	3.890	3.830
2013	3.500	3.500	2.400	2.500	2.800	4.300	4.100	4.100	4.100	4.500	4.500	4.500
2014	4.500	4.800	4.800	4.800	4.100	4.100	4.500	4.830	4.830	4.830	4.830	4.830

Em relação à vazão ecológica, que é a “vazão mínima necessária para garantir a preservação do equilíbrio natural e a sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos” (BUCHIANERI, 2004), foi considerado o valor de 500 litros por segundo, em razão da informação fornecida pelo operador de sistema por ocasião da visita técnica realizada.

Abastecimento Animal

O cálculo da demanda de água para dessedentação animal foi baseado na metodologia do PERH-PE (1998), que utilizou o produto efetivo dos rebanhos por um coeficiente per capita diário. Para efeito de cálculo foram utilizados os dados da Pesquisa da Pecuária Municipal (IBGE, 2010), referente ao efetivo dos rebanhos para cada município inserido nas bacias hidrográficas do Estado. Para que seja possível a compatibilização dos diferentes coeficientes de demanda requeridos pelos animais de diferentes portes (bovinos, bubalinos, equinos, asininos, muares, caprinos, ovinos, suínos e aves), é empregada uma unidade hipotética denominada Bovinos Equivalentes para Demanda de Água – Beda, assim representada:

$$\text{Beda} = \text{Bovinos} + \text{Bubalinos} + \frac{\text{Equinos} + \text{Muares} + \text{Asininos}}{1,25} + \frac{\text{Ovinos} + \text{Caprinos}}{6,25} + \frac{\text{Suínos}}{5} + \frac{\text{Aves}}{250} \quad (17)$$

A Beda possibilita o somatório dos diferentes tipos de rebanho, ponderando o que cada espécie utiliza de água em relação ao bovino, admitindo-se para o mesmo um consumo de 50 l / cab / dia. A demanda animal foi calculada para cada município e posteriormente agregada em cada sub-bacia de estudo, proporcionalmente às respectivas áreas, como demonstra a Tabela 10.

Irrigação

Para o cálculo de demanda de água para irrigação foi utilizada a metodologia empregada no PERH-PE (1998), por apresentar resultados mais próximos da realidade em relação ao cadastro de vazões outorgadas pela APAC. Desta forma, foram utilizados os dados da área irrigada nos municípios da bacia, disponibilizados no Censo Agropecuário do IBGE (2006). Sendo estipulado para a área da bacia, devido às suas peculiaridades fisiográficas e climáticas, o coeficiente de demanda de água para irrigação no valor de $12000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$.

A demanda de irrigação foi calculada para cada município e posteriormente agregada em cada sub-bacia de estudo, proporcionalmente às respectivas áreas. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 10 e representam a demanda potencial, correspondente a 100% de utilização.

Industrial

A demanda industrial foi estimada com base no cadastro de outorgas, agregando em cada sub-bacia estudada as demandas existentes.

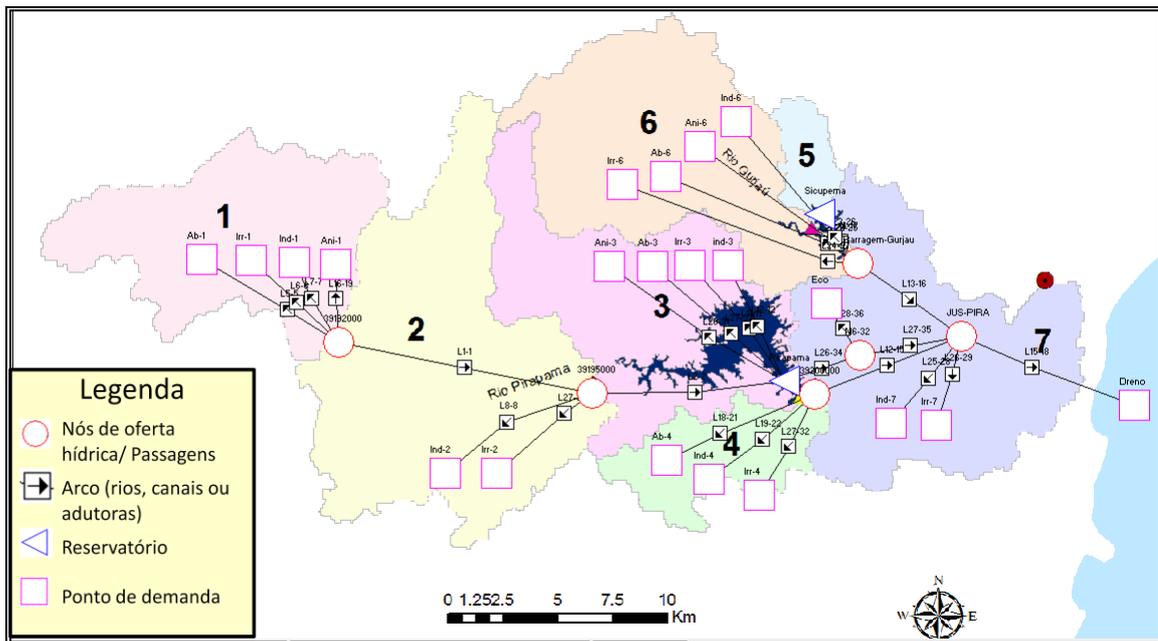
Tabela 10-Resumo das demandas por sub-bacia

PONTO DE DEMANDA	Metodologia Aplicada	Demandas (m3/s)													Média	Total
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez			
ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 39192000																
Abs. Humano	Cadastro de Outorga APAC	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,305
Abs. Animal	PERH-PE	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	
Abs. Industrial	Cadastro de Outorga APAC	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	
Irrigação	PERH-PE	0,160	0,160	0,160	0,160	0,160	0,160	0,160	0,160	0,160	0,160	0,160	0,160	0,160	0,160	
ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 39195000																
Abs. Industrial	Cadastro de Outorga APAC	0,908	0,866	0,422	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,908	0,908	0,815	0,765	0,480	1,074	
Irrigação	PERH-PE	0,594	0,594	0,594	0,594	0,594	0,594	0,594	0,594	0,594	0,594	0,594	0,594	0,594		
RESERVATÓRIO PIRAPAMA																
Abs. Humano	DADOS COLETADOS DA COMPESA	4,830	4,830	4,830	4,830	4,830	4,830	4,830	4,830	4,830	4,830	4,830	4,830	4,830	5,932	
Abs. Animal	PERH-PE	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002		
Abs. Industrial	Cadastro de Outorga APAC	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002		
Irrigação	PERH-PE	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599	0,599		
Vazão Ecológica	DADOS COLETADOS DA COMPESA	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500		
ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 39200000																
Abs. Humano	Cadastro de Outorga APAC	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,220	
Abs. Industrial	Cadastro de Outorga APAC	0,000	0,000	0,010	0,009	0,009	0,009	0,009	0,010	0,010	0,010	0,010	0,008			
Irrigação	PERH-PE	0,172	0,172	0,172	0,172	0,172	0,172	0,172	0,172	0,172	0,172	0,172	0,172			
RIO PIRAPAMA À JUSANTE DO RESERVATÓRIO																
Abs. Industrial	Cadastro de Outorga APAC	0,321	0,321	0,321	0,176	0,176	0,176	0,176	0,321	0,321	0,321	0,321	0,260	0,955		
Irrigação	PERH	0,695	0,695	0,695	0,695	0,695	0,695	0,695	0,695	0,695	0,695	0,695	0,695			
BARRAGEM GURJAU																
Abs. Humano	DADOS COLETADOS DA COMPESA	1,100	1,053	0,976	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100	0,974	0,896	1,058	1,336		
Abs. Animal	PERH-PE	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003			
Abs. Industrial	Cadastro de Outorga APAC	0,004	0,004	0,004	0,004	0,000	0,000	0,000	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003			
Irrigação	PERH-PE	0,272	0,272	0,272	0,272	0,272	0,272	0,272	0,272	0,272	0,272	0,272	0,272			

Rede de fluxo da bacia do rio pirapama

A rede de fluxo foi construída utilizando o modelo AcquaNet, tendo como dados de entrada os mesmos utilizados na determinação da vazão regularizada, só que ao invés de se ter apenas uma demanda (Qreg) utilizaram-se as demandas levantadas. Desta forma, com as vazões afluentes geradas nas sub-bacias, alocaram-se os nós de oferta hídrica, os reservatórios e as demandas hídricas calculadas para cada ponto de oferta, realizando-se assim, a representação simplificada da bacia, conforme mostrada na Figura 34.

Figura 34- Rede de fluxo da bacia do rio Pirapama



Esta rede de fluxo foi utilizada para analisar de forma sistêmica a disponibilidade hídrica da bacia e aferir o atendimento às demandas dentro das prioridades estabelecidas. Essa análise se deu mediante a utilização de curva de permanência ou de duração de vazões.

A ideia foi reproduzir um sistema com os componentes envolvidos na bacia, visando estudar o comportamento do reservatório Pirapama através de simulação dos 82 anos de série de vazões afluentes geradas e confrontar com a série de dados monitorados para o mesmo, permitindo assim, analisar a sua vulnerabilidade frente aos eventos de escassez hídrica.

Para realizar a simulação do sistema se fez necessário ainda, estabelecer as prioridades das demandas no AcquaNet. De acordo com os fundamentos da Política Nacional de Recursos hídricos (Lei 9433/1997), em situação de escassez hídrica, o abastecimento humano e a dessedentação de animais são consideradas demandas prioritárias. As demais demandas tiveram prioridade decrescente na seguinte ordem: vazão ecológica, abastecimento industrial, volume meta do reservatório e irrigação (Tabela 11). Estas prioridades foram embasadas pelas informações coletadas na COMPESA, visando reproduzir a operação do reservatório numa forma mais próxima possível da realidade. A Tabela 12 mostra a ordem de prioridades de todos os elementos do sistema atrelados a sub-bacia correspondente.

Tabela 11-Prioridades de usos

Prioridade	Tipo de uso	Abreviaturas
1	Abastecimento humano	Ab
2	Abastecimento animal	Ani
3	Vazão ecológica	Eco
4	Industrial	Ind
5	Reservatórios	-
6	Irrigação	Irr

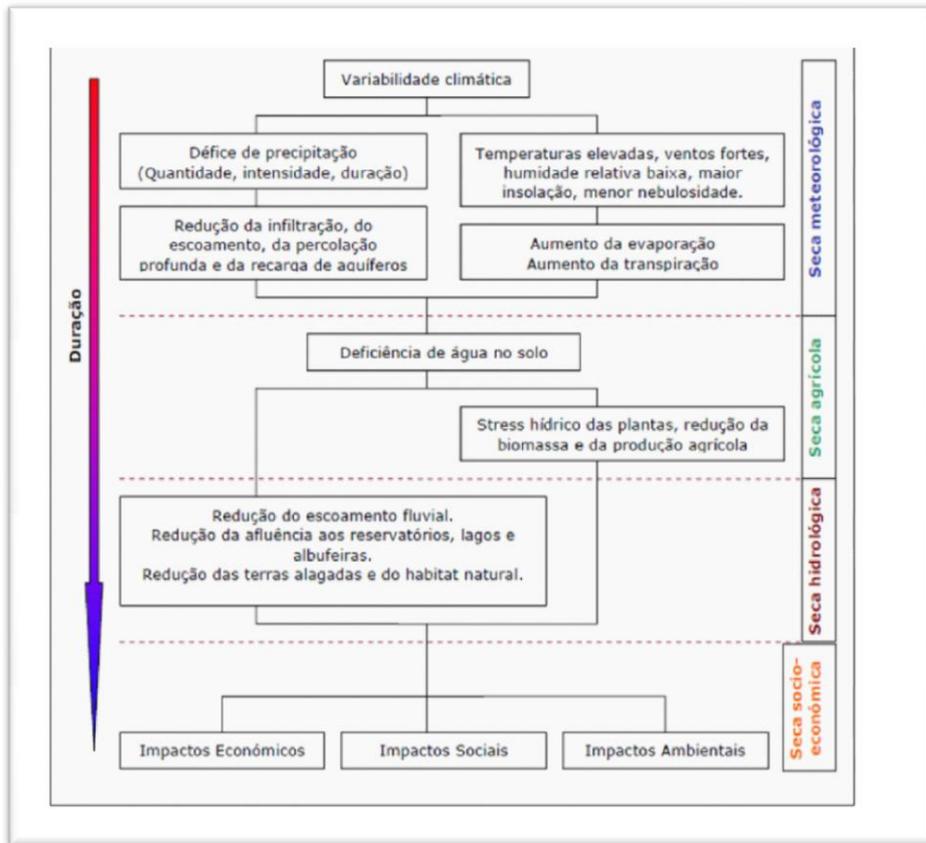
Tabela 12- Ordem de prioridades do AcquaNet

Elemento	Prioridade	Elemento	Prioridade	Elemento	Prioridade
Ab-3	1	Ind-2	4	Irr-3	6
Ab-6	1	Ind-7	4	Irr-6	6
Ab-1	1	ind-3	4	Irr-4	6
Ab-4	1	Ind-6	4	Irr-7	6
Ani-6	2	Ind-4	4	Irr-2	6
Ani-1	2	Ind-1	4	Irr-1	6
Ani-3	2	Pirapama	5	Dreno	99
Eco	3	Sicupema	5		

4.4 Índices de quantificação de secas

As situações de seca são fenômenos naturais extremos que resultam de um déficit prolongado no tempo das condições de precipitação e que, pelo seu lento desenvolvimento, se desencadeiam de forma quase imperceptível nos estágios iniciais, afetando progressivamente os ecossistemas e as atividades socioeconômicas (MENDES et al., 2011). Dada a complexidade e as dimensões espaciais destes fenômenos não existe uma definição padrão adotada sobre a seca. Ainda assim, com vista a uma mais fácil identificação do início, severidade e final de uma situação de seca, distinguem-se, habitualmente, as tipologias de seca esquematizadas na Figura 35: meteorológica, agrícola, hidrológica e socioeconômica (WILHITE e GLANTZ, 1987; NDMC 2006 apud MENDES et al., 2011)

Figura 35-Esquema da sequência temporal dos diversos tipos de seca (adaptado de NDMC, 2006).



O esquema apresentado na Figura 35 mostra a sucessão e a possível evolução temporal na cadeia de fenômenos resultantes de uma seca, passando por todos os tipos de seca. Tem início pela seca meteorológica, a qual desencadeia uma série de eventos que resultam em uma seca agrícola e, mais tarde, em função da longa duração do período da seca, torna-se uma seca hidrológica com impactos na afluência para reservatórios e lagos. Por último, ocorre a seca socioeconômica, que impacta os setores sociais, ambientais e econômicos. A dimensão e a gravidade do problema são basicamente dependentes da extensão e da duração da seca meteorológica (EMBRAPA, 2009).

Com o intuito de se caracterizar e modelar apropriadamente o fenômeno das secas tem sido ampliado o uso de índices de seca. Hayes (2006) afirma que esses índices são representados por um valor numérico, mais prático no processo de tomada de decisão do que dados brutos de precipitação, vazão e outros indicadores de disponibilidade hídrica. Esses índices

sintetizam esses vários fenômenos em um valor único que revela a situação de umidade em determinada localidade em um dado período.

Além da praticidade de seu manuseio, outra vantagem do uso desses índices é que eles possibilitam melhores condições de comparação, ou relativização, da situação de umidade em diferentes regiões. De posse do índice de seca calculado para duas ou mais localidades, independentemente das condições normais de disponibilidade hídrica em cada uma delas, seria possível reconhecer qual região se encontra em situação mais crítica quanto às secas, sem que houvesse a necessidade de maiores informações acerca das condições médias dessa região. Esse fato é importante no momento em que, por exemplo, um órgão gestor centralizado pretende priorizar ações em locais que estejam sofrendo com a reduzida disponibilidade. Um índice adimensional, capaz de revelar a criticidade de determinado local quanto à disponibilidade hídrica, seria mais interessante a um gestor no momento de priorizar regiões a serem beneficiados por intervenções de gestão de recursos hídricos (SANTOS, 2011).

Para se realizar uma avaliação dos períodos secos dos 82 anos simulados para o reservatório Pirapama deve-se definir um indicador de seca e dos estágios de severidade dela. Este indicador será utilizado para decidir uma resposta apropriada ao evento e, conseqüentemente definir as ações adequadas a cada resposta.

Este indicador deve ser definido em razão do tipo de seca a ser estudado, no caso em questão, trata-se de uma seca hidrológica que está relacionada com a redução dos níveis médios de água em reservatórios superficiais por um determinado período de tempo, podendo ser de dias, semanas, meses ou anos.

Identificado o tipo de seca, optou-se pelo processo de normalização das vazões geradas afluentes ao reservatório de Pirapama. O processo de normalização adotado consistiu na aplicação do índice de escoamento padronizado (Standardized Runoff Index -SRI), cuja metodologia de cálculo é idêntica ao índice de precipitação padronizada (Standardized Precipitation Index- SPI) alterando-se apenas a escala temporal.

Shukla e Wood (2008) aplicaram o conceito de base do SPI a séries de dados de escoamento, analisando diferentes escalas temporais, através do Standardized Runoff Index (SRI). Mo (2008) confirma que o SRI pode ser calculado de modo idêntico ao SPI, preconizando que tal procedimento seja limitado a séries de dados mensais.

Aplicando o índice SRI, os valores positivos indicam a vazão maior do que a mediana ou média e os valores negativos indicam vazões menores que a mediana ou média (EMBRAPA,2009) . Neste estudo adotou-se como referencial a vazão mediana, pois esta representa o valor com uma probabilidade e ocorrência de 50%, em detrimento da média, que em razão das vazões máximas, frequentes no período chuvoso do reservatório Pirapama, tende a elevar o valor da média.

Baseado em EMBRAPA (2009), será apresentada a metodologia para o cálculo do SPI (MCKEE et al.,1993) aplicada aos dados de vazões afluentes (SRI). Deve-se utilizar uma base de dados de vazão com pelo menos 30 anos, sendo ajustado por meio da distribuição gama, que posteriormente é transformada em uma distribuição normal, que por definição, apresenta sua média com valor zero e variância unitária. A distribuição gama é definida pela função de densidade de probabilidade dada pela equação 18 :

$$g(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (18)$$

Sendo:

$\alpha > 0$ = parâmetro de forma (adimensional);

$\beta > 0$ = parâmetro de escala (mm);

$\chi > 0$ = total de precipitação (mm);

$\Gamma(\chi)$ = função gama.

A função gama é obtida por meio da equação 19:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (19)$$

Para estimar os parâmetros de forma a e b , utiliza-se o método da máxima verossimilhança (THOM, 1966), equações 20 a 22:

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (20)$$

$$\beta = \frac{\bar{X}}{\alpha} \quad (21)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(x) \quad (22)$$

Sendo:

\bar{X} = média aritmética da precipitação pluvial (mm);

\ln = logaritmo neperiano;

N = número de observações de precipitação.

Os resultados dos parâmetros de forma e escala são então usados para encontrar a probabilidade cumulativa de um evento de precipitação observado para uma escala de tempo mensal. A probabilidade cumulativa é dada pela equação 23:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^a \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{a-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (23)$$

Substituindo $t = \frac{x}{\beta}$, a equação 23 transforma-se na função gama incompleta, equação 24:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (24)$$

Desde que a função gama é indeterminada para $x = 0$ e uma distribuição de precipitação pode conter zeros, a probabilidade cumulativa toma o seguinte aspecto, equação 25:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (25)$$

Sendo:

$H(x)$ = distribuição de probabilidade cumulativa;

q = probabilidade de ocorrência de valores nulos (zeros);

$G(x)$ = distribuição cumulativa teórica.

Se m é o número de zeros em uma série temporal de precipitação, Thom (1966) indica que q pode ser estimado por $m/n + 1$. Thom (1966) usa tabelas da função gama incompleta para determinar a probabilidade cumulativa $G(x)$. McKee et al. (1993) usam um método analítico junto com um código de software sugerido por Press et al. (1988) para determinar a probabilidade cumulativa.

A distribuição de probabilidade cumulativa $H(x)$ é então transformada em uma variável aleatória normalizada (Z) com média zero e desvio padrão 1, onde a variável (Z) corresponderá ao valor de SPI. Essa é uma transformação equiprobabilística que Panofsky e Brier (1958) definiram como uma característica essencial para transformar uma variável de distribuição gama para uma variável com uma distribuição normal, onde a probabilidade de ser menor que um valor dado será igual à probabilidade de ser menor que o valor correspondente da variável transformada.

As probabilidades cumulativas empíricas foram bem desenvolvidas por Panofsky e Brier (1958), onde os dados de precipitação são ordenados em ordem crescente de magnitude, de forma que os valores são baixos e onde o tamanho da amostra é dado pela equação 26:

$$q = \frac{m}{n + 1} \quad (26)$$

Sendo:

m = número de ordem dos valores de zero em uma série climatológica;

n = tamanho da amostra.

Visto que seria desnecessário reproduzir vários gráficos para cada localidade e em todas as escalas temporais possíveis e para cada mês do ano, o valor de (Z) ou SPI é obtido mais facilmente pela aproximação matemática desenvolvida por Abramowitz e Stegun (1965), que converte a probabilidade cumulativa em uma distribuição normal a variável (Z).

Em que Z é definido pelas equações 27 e 28:

$$Z = SPI = - \left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ para } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad (27)$$

$$Z = SPI = + \left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ para } 0,5 < H(x) \leq 1 \quad (28)$$

Sendo t definido pelas equações 29 e 30:

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(H(x))^2} \right]} \text{ para } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad (29)$$

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{1 - (H(x))^2} \right]} \text{ para } 0,5 < H(x) \leq 1 \quad (30)$$

Os coeficientes utilizados nas equações 27 e 28 são:

$$C_0 = 2,515517;$$

$$C_1 = 0,802853;$$

$$C_2 = 0,010328;$$

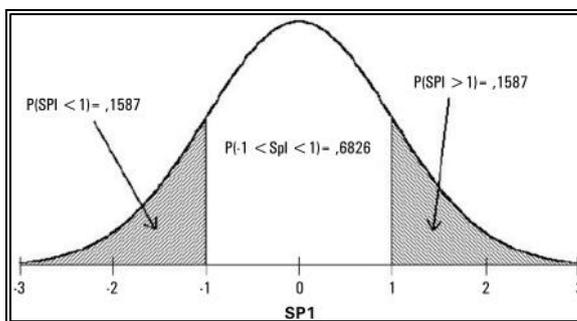
$$d_1 = 1,432788$$

$$d_2 = 0,189269;$$

$$d_3 = 0,001308.$$

Conceitualmente, o SPI representa o z-score, ou seja, o número de desvios padrão acima e abaixo do qual um evento (valor) se encontra em relação à média ou mediana. Entretanto, isso não é totalmente correto para escalas curtas de tempo, visto que a distribuição original da precipitação original não é assimétrica. No entanto, a Figura 36 ilustra que durante o período base, no qual os parâmetros gama são estimados, o SPI terá uma distribuição normal com valor esperado 0 e variância 1. Um índice com essas características é desejável de modo a permitir comparações de valores do índice para diferentes localidades e regiões significantes.

Figura 36-Distribuição normal com o SPI tendo uma média de 0 e uma variância de 1.



Fonte: Domingos (2006)

Mckee et al. (1993) usaram os valores de SPI para definirem a existência ou não de seca e o seu grau de intensidade. Segundo os autores, a seca ocorre sempre que o valor do SPI é continuamente negativo, atingindo uma intensidade igual ou menor que menos um (-1,0). A seca termina quando o valor do SPI se torna positivo. A classificação é feita com base nos limites indicados na Tabela 13, permitindo caracterizar não somente as secas, mas também os períodos mais úmidos. Esse método tem a grande vantagem de padronizar a análise, permitindo comparar regiões totalmente distintas, como por exemplo regiões com climas mais úmidos e chuvosos com regiões mais áridas e secas.

Tabela 13-Classificação do SPI

SPI	Classificação
$\geq 2,00$	Extremamente úmido
1,00 a 1,99	Muito úmido
0,50 a 0,99	Moderadamente úmido
0,49 a - 0,49	Próximo ao normal
-0,50 a - 0,99	Moderadamente seco
-1,00 a -1,99	Muito seco
$\leq -2,00$	Extremamente seco

Fonte: McKee et al. (1993)

4.5 Curvas-guia e curva de aversão a risco

Para realização das curvas-guia é importante definir previamente o objetivo que norteará a operação do reservatório. No caso do Pirapama, a principal missão destas curvas-guia é evitar ou minimizar o risco do reservatório atingir o estado de racionamento ou colapso, utilizando para isso, o planejamento das retiradas para abastecimento humano que representam mais de 80% das demandas estimadas para o reservatório e, ao contrário das outras, são de fácil controle.

Antes, porém, se faz necessário estabelecer algumas condições de contorno dentro das zonas do volume útil do reservatório. A Tabela 14 mostra os níveis dos volumes adotados para as condições de racionamento, colapso e normal.

Tabela 14-Zoneamento do volume

CONDIÇÃO	Volume (hm ³)	Volume (%)
NORMAL	>12.18	>20
RACIONAMENTO	>3.04 e <12.18	>5 e <20
COLAPSO	<3.04	<5

A adoção do limite superior da condição de racionamento em 12,18 milhões de metros cúbicos se deu devido aos fatos já ocorridos, quando o reservatório estava em 20% de sua capacidade e foi decretado o seu racionamento. Quanto à condição de colapso, visando considerar a deposição de sedimentos ao longo do tempo no reservatório, buscou-se

estabelecer uma margem de segurança ao volume mínimo de projeto (2,3% do volume útil), adotando-se, portanto, 5% do volume útil para a referida condição.

A metodologia empregada foi baseada no Plano de Gestão de Secas em Cidades: Sistema Jucazinho (SOUZA FILHO et. al.,2014) onde foram estabelecidos os gatilhos de seca e as metas de resposta para aquele sistema.

A partir da classificação das vazões afluentes foram delineados quatro estágios de severidade de seca: Alerta, Moderado seco, Severo seco e Extremo seco. Estes estágios estão associados ao volume do reservatório Pirapama que foi definido como indicador de seca por representar o resultado de todos os fatores que afetam a oferta hídrica como, precipitação, escoamento superficial e umidade do solo bem como, pelo abastecimento das cidades ser proveniente da água acumulada neste manancial.

Deste modo, os gestores estarão em um determinado nível de alerta quando o volume do reservatório estiver inferior aos volumes associados aos gatilhos de seca, que por sua vez foram definidos pela classificação das vazões afluentes.

Outra metodologia utilizada para operação de reservatório neste trabalho são as Curvas de Aversão a Risco-CAR, que permitem a possibilidade de se analisar o comportamento de um dado reservatório, tendo por base a previsão de afluências nos meses subsequentes a partir de vazões observadas, julgadas representativas, e operá-lo com outras vazões de retirada de uma determinada demanda, prevendo assim, o risco associado às mesmas.

Segundo FUSP (2009) a construção das curvas de aversão ao risco segue as seguintes etapas:

- É fixada uma vazão qualquer Q para a construção da curva de aversão ao risco, que representa a vazão total a ser aduzida para atendimento das demandas existentes no reservatório;
- Estabelece-se uma reserva estratégica (Volt) para o volume do reservatório Pirapama, desejável ao final do período de 2 anos;

- Determina-se o volume requerido no final do mês antecedente (Volt-1) pela soma do volume da reserva estratégica (Volt) com a diferença entre o volume a ser aduzido ($Q \cdot \Delta t$) e o volume afluente ($Q_{aflt} \cdot \Delta t$), ou seja:

$$\text{Volt-1} = \text{Volt} + (Q - Q_{aflt}) \cdot \Delta t \quad (31)$$

onde t é o índice que representa o mês e Δt é o intervalo de tempo representado pelo período de 1 mês;

- O procedimento, então, é repetido até o início do período, determinando-se para cada mês t o volume requerido para adução da vazão Q , ou seja:

$$\text{Volt-2} = \text{Volt-1} + (Q - Q_{aflt-1}) \cdot \Delta t \quad (32)$$

O mencionado procedimento é repetido para diversas vazões Q a serem aduzidas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Modelagem hidrológica

5.1.1 Calibração e Validação

Baseado na precipitação média calculada e nas estações fluviométricas selecionadas (Tabela 3) foram realizadas a calibração e validação do modelo, sendo sempre considerado o período adequado para cada estação fluviométrica, e quando nos casos em que as áreas de contribuição da estação envolveram mais de uma bacia incremental, o cálculo da precipitação média se deu por proporção de área aplicada à precipitação média de cada sub-bacia envolvida, conforme a equação 33.

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n P_{m_{\text{sub-bacia } i}} \times \text{Área}_{\text{sub-bacia } i}}{\text{Área total}} \quad (33)$$

Onde:

P_m - Precipitação média (mm)

$P_{m_{\text{sub-bacia } i}}$ -Precipitação média da iésima sub-bacia (mm);

$\text{Área}_{\text{sub-bacia } i}$ - Área da iésima sub-bacia (km²);

Área total- Somatório das iésimas sub-bacias que compõe a área de contribuição em análise (km²).

Estação fluviométrica Cachoeira Tapada-39192000

A estação Cachoeira Tapada possui 14 anos de série de dados observados apresentando poucas falhas. Sua área de contribuição calculada é de 90 Km², sendo considerado o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2006 para a calibração e o restante da série para a validação.

A precipitação média utilizada corresponde à encontrada em sua bacia de contribuição (bacia-1) para o mesmo período (2000 a 2013).

A calibração do modelo foi realizada pelo método manual das tentativas e erros, onde, a cada simulação realizada, parâmetros estatísticos eram acompanhados a fim de se avaliar a

influência de modificações nos parâmetros do modelo nas vazões calculadas. Os parâmetros admitidos como melhores encontram-se no Apêndice C- Tabela 1.

Já a Figura 37 mostra os hidrogramas calculado e observado relativos ao período de calibração. Verifica-se nos meses de 66 a 68 que existem falhas importantes nas vazões de pico observadas (destacadas com círculo laranja), não permitindo aferir se o modelo representou adequadamente essas vazões máximas. Situação semelhante ocorreu em outros meses nos períodos de calibração e verificação, também destacados nas figuras. Vale resaltar que estas falhas não trazem prejuízos para a avaliação do desempenho do modelo. A Tabela 15 mostra as estatísticas relacionadas à comparação entre os hidrogramas calculado e observado.

Figura 37-Hidrograma de calibração da estação fluviométrica 39192000.

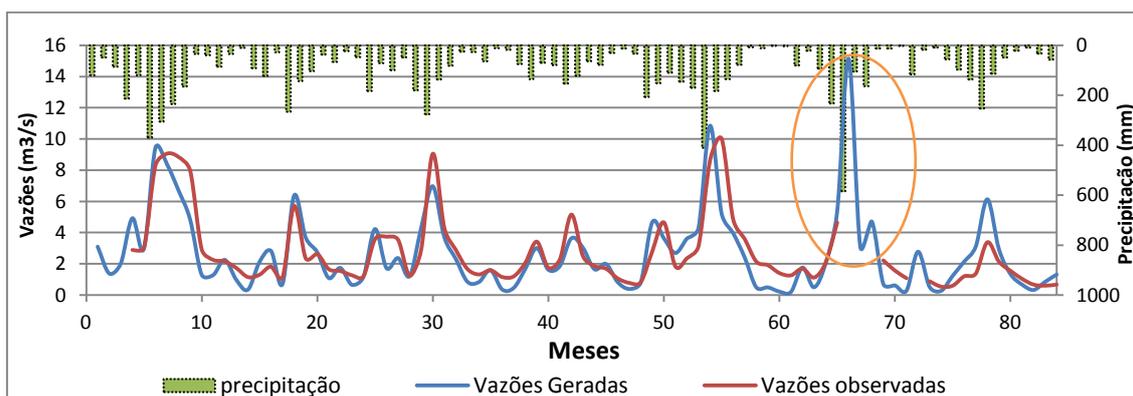


Tabela 15-Estatísticas da calibração na estação fluviométrica 39192000.

Estadística	Observado	Calculado
Média (m ³ /s)	2.73	2.67
Mediana (m ³ /s)	1.98	2.00
Vazão de pico (m ³ /s)	10.02	15.14
Vazão mínima (m ³ /s)	0.53	0.19
Total do período (m ³ /s)	212.60	195.47
Desvio Padrão médio (m ³ /s)	2.23	2.56
Coef. Variação (%)	81.95%	95.87%
Coef. Rendimento (%)	75.79	74.34
Erro de Volume (%)		8.06
Coef. de Nash		0.71
Coef. de correlação		0.86

A calibração do modelo foi considerada satisfatória face à constatação gráfica apresentada na Figura 37, demonstrando uma boa aderência das vazões geradas às observadas, assim como na análise estatística mostrada na Tabela 15, onde se observa uma excelente aproximação das vazões médias, desvio padrão e coeficiente de variação obtidos para as vazões observadas e calculadas. Os coeficientes de correlação e de Nash entre as vazões observadas e calculadas são de 0,86 e 0,71 respectivamente. Estes resultados indicam que o modelo representa adequadamente o regime às vazões observadas.

Uma vez calibrados os parâmetros do modelo, passou-se para o processo de validação dos parâmetros determinados na fase de calibração. O processo de validação foi realizado para o período de janeiro de 2007 a dezembro de 2013. O mesmo posto fluviométrico utilizado no processo de calibração foi utilizado para a validação. A Figura 38 apresenta os resultados gráficos da validação. Já na Tabela 16 são apresentados os parâmetros estatísticos que possibilitam a avaliação do processo de validação.

Figura 38-Hidrograma de validação da estação fluviométrica 39192000.

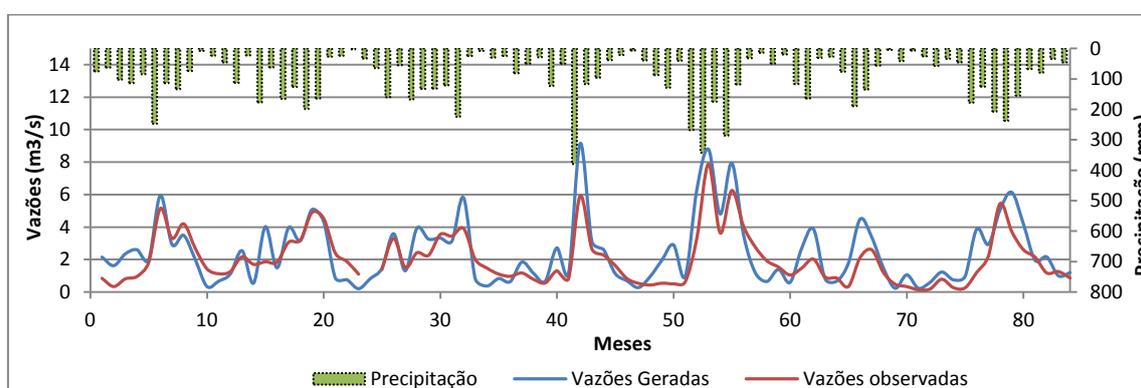


Tabela 16-Estatísticas da validação na estação fluviométrica 39192000.

Estatística	Observado	Calculado
Média (m ³ /s)	2.06	2.41
Mediana (m ³ /s)	1.66	1.90
Vazão de pico (m ³ /s)	7.88	9.15
Vazão mínima (m ³ /s)	0.13	0.21
Total do período (m ³ /s)	167.00	201.83
Desvio Padrão médio (m ³ /s)	1.55	1.97
Coef. Variação (%)	75.15%	81.79%
Coef. Rendimento (%)	62.26	73.23

(Continuação)

Estatística	Observado	Calculado
Erro de Volume (%)	-20.86	
Coef. de Nash	0.50	
Coef. de correlação	0.85	

Analisando-se o hidrograma resultante do processo de validação e os parâmetros estatísticos calculados, nota-se que a validação não apresentou resultados tão bons quanto os encontrados na calibração. Apesar de o coeficiente de correlação estar muito próximo ao da calibração, o coeficiente de Nash calculado de 0,50 caiu bastante em relação ao 0,71 da calibração. Mesmo assim, segundo Silva et al. (2008), quando o valor do coeficiente de Nash for maior que 0,75, o desempenho do modelo é considerado bom. Para valores de Nash entre 0,36 e 0,75, o desempenho é considerado aceitável, enquanto valores inferiores a 0,36 fazem com que o modelo seja julgado como inaceitável. Assim sendo, os parâmetros determinados foram aceitos.

Com relação às discretas diferenças das vazões de pico do hidrograma apresentado na Figura 38, onde as geradas em alguns meses superaram às observadas, percebe-se que houve uma superestimativa por parte do modelo para este período, haja vista que este comportamento se deu de forma uniforme em todos os demais parâmetros da Tabela 16, ou seja, média, mediana, total do período e volume total, todos apresentaram valores ligeiramente superiores, mas dentro do aceitável.

Estação fluviométrica Destilaria Inexport-39195000

A estação Destilaria Inexport situa-se no rio Pirapama à jusante da estação Cachoeira Tapada, possui 14 anos de série de dados observados apresentando poucas falhas. Sua área de contribuição calculada é de 235 Km², sendo considerado o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2006 para a calibração e o restante da série para a validação.

A precipitação média utilizada corresponde à média ponderada das áreas das sub-bacias 1 e 2 (Equação 33) que formam a bacia de contribuição da estação analisada.

A calibração do modelo foi realizada tendo os parâmetros admitidos como melhores expressos no Apêndice C- Tabela 2.

Já a Figura 39 mostra os hidrogramas calculado e observado relativos ao período de calibração. A Tabela 17 mostra as estatísticas relacionadas à comparação entre os hidrogramas calculado e observado.

Figura 39-Hidrograma de calibração da estação fluviométrica 39195000.

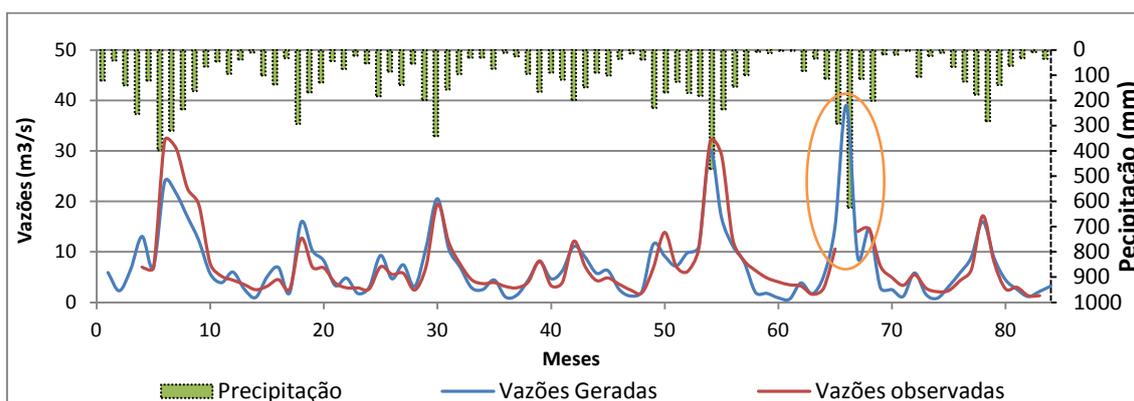


Tabela 17-Estatísticas da calibração na estação fluviométrica 39195000.

Estatística	Observado	Calculado
Média (m ³ /s)	7.56	7.32
Mediana (m ³ /s)	4.96	5.77
Vazão de pico (m ³ /s)	32.10	38.98
Vazão mínima (m ³ /s)	1.35	0.62
Total do período (m ³ /s)	597.29	558.29
Desvio Padrão médio (m ³ /s)	6.94	6.72
Coef. Variação (%)	91.78%	91.77%
Coef. Rendimento (%)	69.87	68.51
Erro de Volume (%)		6.53
Coef. de Nash		0.81
Coef. de correlação		0.90

A calibração do modelo foi considerada satisfatória face à constatação gráfica apresentada na Figura 39, demonstrando uma boa aderência das vazões geradas às observadas, ainda assim, na análise estatística mostrada na Tabela 17 se observa uma excelente aproximação das vazões médias, desvio padrão e coeficiente de variação obtidos para as vazões observadas e calculadas. Os coeficientes de correlação e de Nash entre as vazões observadas e calculadas

são de 0,81 e 0,90 respectivamente. Estes resultados indicam que o modelo representa adequadamente o regime às vazões observadas.

Uma vez calibrados os parâmetros do modelo, passou-se para o processo de validação dos parâmetros determinados na fase de calibração. O processo de validação foi realizado para o período de janeiro de 2007 a dezembro de 2013. O mesmo posto fluviométrico utilizado no processo de calibração foi utilizado para a validação. A Figura 40 apresenta os resultados gráficos da validação. Já na Tabela 18 são apresentados os parâmetros estatísticos que possibilitam a avaliação do processo de validação.

Figura 40-Hidrograma de validação da estação fluviométrica 39195000.

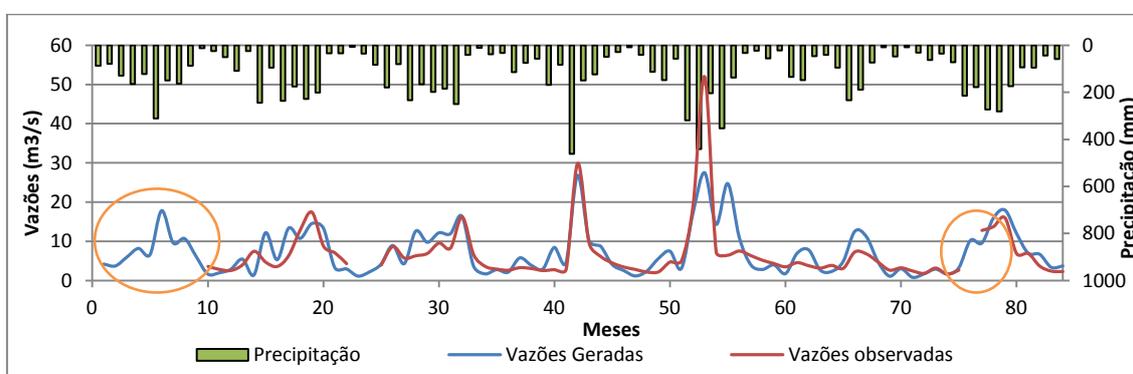


Tabela 18-Estatísticas da validação na estação fluviométrica 39195000.

Estatística	Observado	Calculado
Média (m³/s)	6.67	7.30
Mediana (m³/s)	4.47	5.36
Vazão de pico (m³/s)	51.97	27.52
Vazão mínima (m³/s)	1.56	0.77
Total do período (m³/s)	480.04	527.11
Desvio Padrão médio (m³/s)	7.18	5.88
Coef. Variação (%)	107.66%	80.51%
Coef. Rendimento (%)	61.35	67.18
Erro de Volume (%)		-9.81
Coef. de Nash		0.59
Coef. de correlação		0.78

Analisando-se o hidrograma resultante do processo de validação e os parâmetros estatísticos calculados, nota-se que a validação desta estação também não apresentou resultados tão bons quanto os encontrados na calibração, mas apesar de terem caídos em

relação à calibração, os coeficientes de Nash e de correlação com valores de 0,59 e 0,78, respectivamente, ainda apresentam valores admissíveis, permitindo que os parâmetros de calibração possam ser considerados dentro de um desempenho aceitável.

Com relação à vazão de pico do hidrograma apresentado na Figura 40, que é a vazão máxima do período considerado para validação, Almeida (2006) elucida que duas situações podem explicar a diferença entre os valores observado e calculado. Primeiro, como a vazão medida em campo (observada) advém de um curva chave, onde, em geral, valores superiores de vazões são estimados em função de um ajuste de pontos de níveis d'água do rio e vazões medidas, onde dificilmente há condições favoráveis para medições das vazões de maior magnitude. Em geral, a medição de vazões de menores valores é realizada com maior regularidade e confiabilidade, enquanto que vazões de elevada magnitude são estimadas em função da extrapolação da curva chave.

Estação fluviométrica Pirapama-39200000

A estação Pirapama situa-se à jusante do reservatório homônimo possui 28 anos de série de dados observados, no entanto conforme já identificado no item 4.2.2 (fluviometria) só será utilizado o período de 1987 a 1996 devido à interferência da construção do reservatório à montante.

Sua área de contribuição calculada é de 372 Km², sendo considerado o período de janeiro de 1987 a dezembro de 1992 para a calibração e o restante da série para a validação.

A calibração do modelo foi realizada tendo os parâmetros admitidos como melhores expressos no Apêndice C- Tabela 3.

Já a Figura 41 mostra os hidrogramas calculado e observado relativos ao período de calibração. A Tabela 19 mostra as estatísticas relacionadas à comparação entre os hidrogramas calculado e observado.

Figura 41-Hidrograma de calibração da estação fluviométrica 39200000.

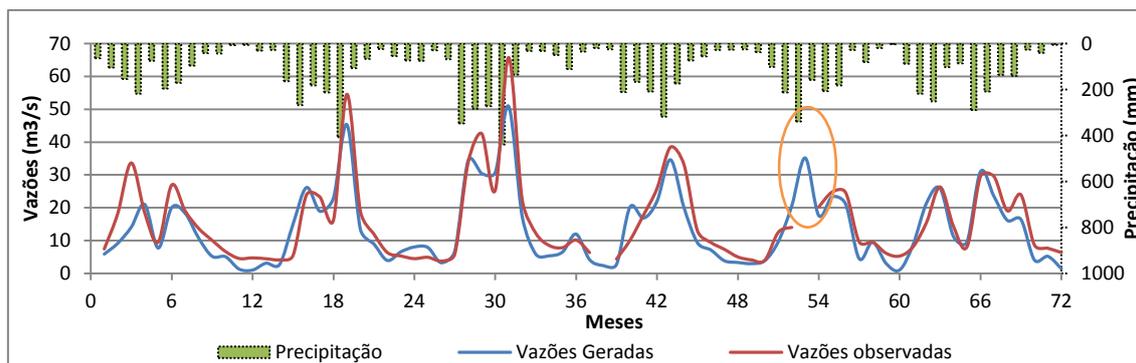


Tabela 19-Estatísticas da calibração na estação fluviométrica 39200000.

Estadística	Observado	Calculado
Média (m ³ /s)	15.68	13.54
Mediana (m ³ /s)	11.07	9.57
Vazão de pico (m ³ /s)	65.77	50.85
Vazão mínima (m ³ /s)	3.75	1.03
Total do período (m ³ /s)	1097.69	980.38
Desvio Padrão médio (m ³ /s)	12.19	10.96
Coef. Variação (%)	77.74%	80.90%
Coef. Rendimento (%)	88.69	77.01
Erro de Volume (%)		10.69
Coef. de Nash		0.71
Coef. de correlação		0.92

A calibração do modelo foi considerada satisfatória face à constatação gráfica apresentada na Figura 41, demonstrando uma boa aderência das vazões geradas às observadas, assim como na análise estatística mostrada na Tabela 19, onde se observa uma relativa aproximação das vazões médias, desvio padrão e coeficiente de variação obtidos para as vazões observadas e calculadas.

As vazões geradas apresentaram valores de pico subestimados, pois devido à prioridade do presente estudo girar em torno da disponibilidade hídrica foram priorizados os ajustes dos parâmetros visando às vazões médias e um bom desempenho no coeficiente de correlação.

Uma vez calibrados os parâmetros do modelo, passou-se para o processo de validação dos parâmetros determinados na fase de calibração. O processo de validação foi realizado para o período de janeiro de 1993 a dezembro de 1996. O mesmo posto fluviométrico utilizado no

processo de calibração foi utilizado para a validação. A Figura 42 apresenta os resultados gráficos da validação. Já na Tabela 20 são apresentados os parâmetros estatísticos que possibilitam a avaliação do processo de validação.

Figura 42-Hidrograma de validação da estação fluviométrica 39200000.

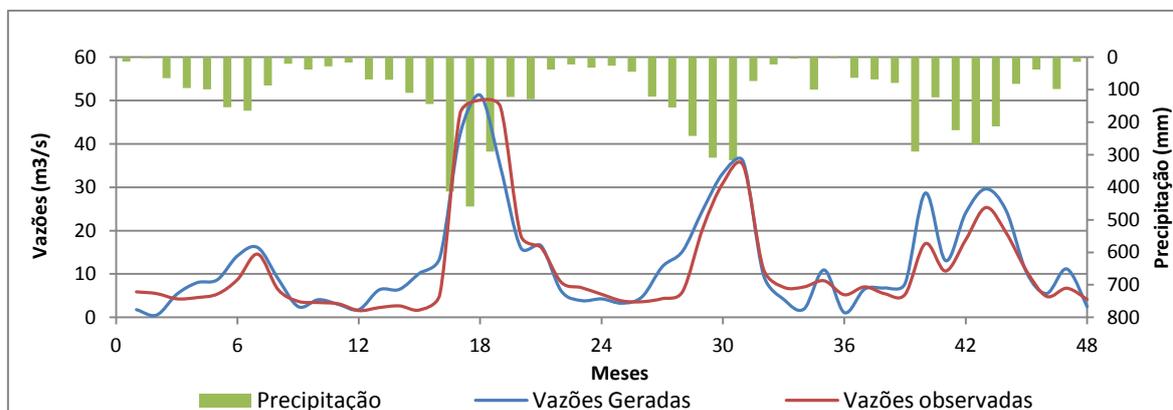


Tabela 20-Estatísticas da validação na estação fluviométrica 39200000.

Estadística	Observado	Calculado
Média (m³/s)	11.59	12.65
Mediana (m³/s)	6.88	8.69
Vazão de pico (m³/s)	50.06	51.18
Vazão mínima (m³/s)	1.55	0.57
Total do período (m³/s)	556.38	614.59
Desvio Padrão médio (m³/s)	11.91	11.76
Coef. Variação (%)	102.74%	92.96%
Coef. Rendimento (%)	69.19	76.43
Erro de Volume (%)		-10.46
Coef. de Nash		0.86
Coef. de correlação		0.93

Analisando-se o hidrograma resultante do processo de validação e os parâmetros estatísticos calculados, nota-se que a validação desta estação apresentou resultados tão bons quanto os encontrados na calibração, inclusive nas vazões de pico, permitindo a admissibilidade dos parâmetros calibrados.

5.1.2 Geração das vazões

Baseado nas calibrações efetuadas, levando-se em conta a escassez de dados de vazões observadas foi necessária a geração de vazões sintéticas pelo modelo hidrológico de transformação chuva-vazão, SMAP, para todas as sub-bacias delimitadas do rio Pirapama.

O modelo chuva-vazão SMAP utiliza como dados de entrada a série de precipitações e evapotranspirações para o período desejado, além da área da bacia de interesse e os parâmetros do modelo definidos na fase de calibração. Nesse estudo foram geradas as vazões sintéticas no período de janeiro de 1933 a dezembro de 2014 para cada sub-bacia, perfazendo um total de 82 anos.

A Tabela 21 mostra os exutórios a serem estudados, suas respectivas áreas incrementais e de qual posto de calibração foram utilizados os parâmetros.

Tabela 21-Calibração utilizada nas sub-bacias estudadas

Exutório	Sub-bacia	Área (Km²)	Posto de Calibração utilizado
Estação fluviométrica Cachoeira Tapada (39192000)	1	90	39192000
Estação fluviométrica Destilaria Inexport(39195000)	2	145	39195000
Reservatório Pirapama-Área incremental	3	103	39200000
Estação fluviométrica Pirapama (39200000)	4	34	39200000
Reservatório Sicupema	5	12	39200000
Reservatório Gurjaú	6	104	39200000
Bacia do rio Pirapama	7	115	39200000

Uma síntese das séries mensais médias de vazões e precipitações calculadas por sub-bacias estão apresentadas na forma gráfica no APÊNDICE C- Figura 1.

5.2 Simulação com o AcquaNet

5.2.1 Vazão regularizada e totalização de volume

Reservatório Pirapama

Para definição das vazões regularizadas do reservatório, adotou-se como vazão inicial da demanda de regularização o valor de 4,026 m³/s, que corresponde a 30% da vazão média

afluente ao reservatório. Realizada a simulação, foi observado o grau de atendimento à demanda na opção Resultados (Tabela 22).

Tabela 22-Resumo da primeira tentativa da Demanda Q_{reg}

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (hm^3)	Vazão média fornecida (m^3/s)
Q_{reg}	0	0	0	4.024

Como pode ser percebido, não foram observadas falhas de atendimento das vazões requeridas em Q_{reg} (0% de frequência abaixo da demanda necessária). Com esta primeira simulação podemos afirmar que estamos diante da faixa de vazões regularizadas com 100% de garantia, pois houve atendimento pleno a demanda requerida, porém não encontramos ainda o limite superior que define a vazão Q_{100} .

Na segunda tentativa, simulamos o reservatório com a demanda representativa da regularização no valor de $6,71 m^3/s$, que corresponde a 50% da vazão média afluente ao reservatório, simulada pelo SMAP. A Tabela 23 mostra os resultados.

Tabela 23-Resumo da segunda tentativa da Demanda Q_{reg} -

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (hm^3)	Vazão média fornecida (m^3/s)
Q_{reg}	4	1.93	65.59	6.68

Nesta segunda simulação percebemos falhas de atendimento da vazão requerida (1,93% do tempo abaixo do valor necessário, portanto, podemos concluir que a vazão simulada ($6,71 m^3/s$) corresponde a $Q_{98,07}$. Como resumo são apresentados pelo programa, ainda, o tempo de 4 meses, que corresponde ao período máximo de meses consecutivos em que houve falha de atendimento (tempo abaixo da demanda necessária), a soma de todos os volumes que não foram atendidos no período simulado (volume acumulado dos déficits) e a vazão média fornecida para cada demanda.

É possível observar nas Tabelas 22 e 23 uma leve discrepância entre as vazões demandadas e a vazão média fornecida devido ao procedimento de cálculo do modelo. Segundo Roberto (2002), “os cálculos do Modsim envolvem, em geral, números inteiros, o que favorece muito

a velocidade de processamento do modelo”. Ou seja, as vazões são transformadas em números inteiros, correspondentes ao volume mensal, o que ocasiona “erros” de arredondamento.

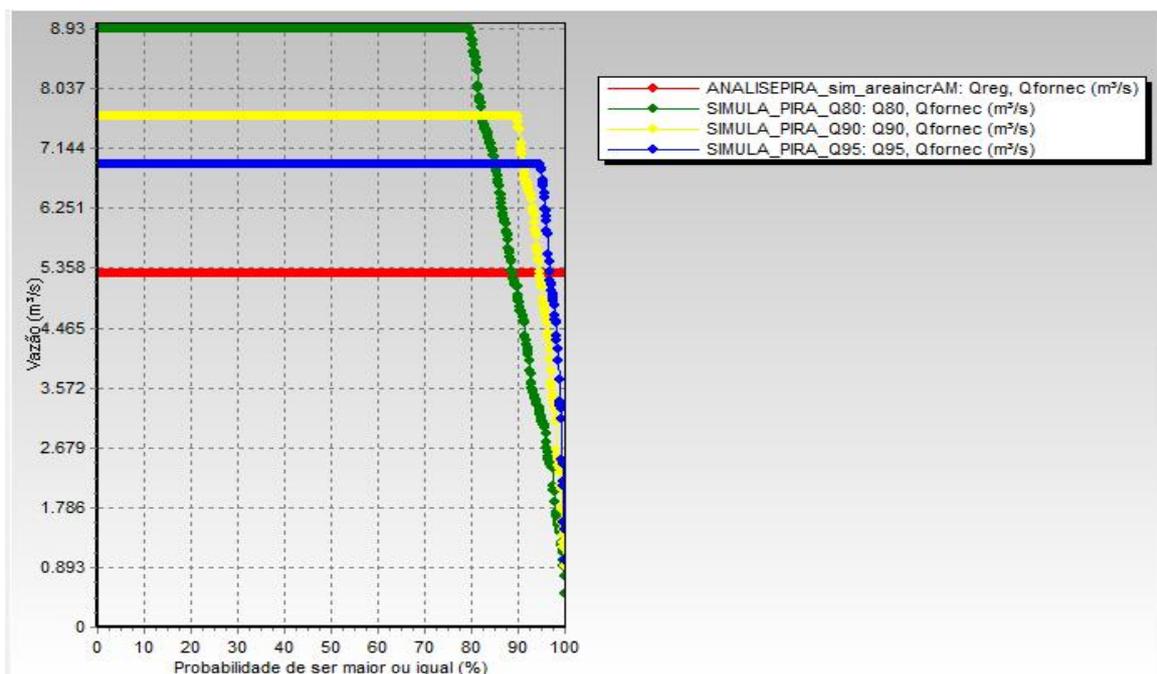
Assim, para a determinação da vazão regularizada com 100% de garantia é necessário se determinar o valor limite de demanda em que não é verificada falha no atendimento. Desta forma, foi diminuída a demanda, repetindo tal procedimento de ajuste até que fossem obtidas as vazões máximas demandadas que apresentassem um grau de atendimento de 100%, 95%, 90% e 80%, conforme apresentado na Tabela 24 e Figura 43.

Tabela 24-Vazões regularizadas com 100, 95, 90, e 80% de garantia

Vazões Regularizadas (m³/s)	
Q ₁₀₀ *	5,28
Q ₉₅ *	6,92
Q ₉₀ *	7,63
Q ₈₀ *	8,93

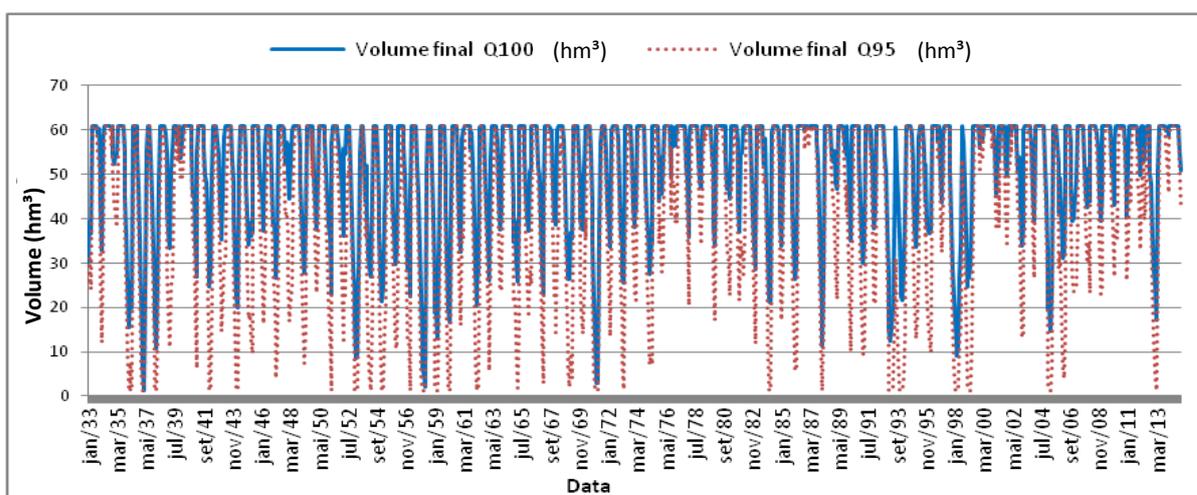
*Q₁₀₀, Q₉₅, Q₉₀ e Q₈₀- Corresponde ao valor da vazão da série histórica gerada que é excedida ou igualada , respectivamente, em 100%, 95%,90% e 80% do tempo.

Figura 43-Curva de permanência das vazões regularizadas



A Figura 44 ilustra a variação do volume ao longo do período de simulação do reservatório (1933-2014), estabelecendo o comparativo entre o comportamento dos volumes finais do mesmo, considerando a retirada das vazões regularizadas para as garantias de 100% e 95%. É possível observarmos no gráfico do volume final da Q_{95} , que frequentemente o reservatório operou no volume mínimo.

Figura 44-Volumes finais ao longo dos meses do Reservatório Pirapama para Q_{100} e Q_{95}



As Figuras 45 e 46 apresentam as totalizações do período de simulação (1933-2014), onde verificamos uma redução discreta do volume evaporado em razão das garantias das vazões regularizadas, já no volume vertido estas reduções são significantes, no entanto estes vertimentos só são observados nos períodos chuvosos quando não há escassez hídrica.

Figura 45-Volume total evaporado por vazão regularizada

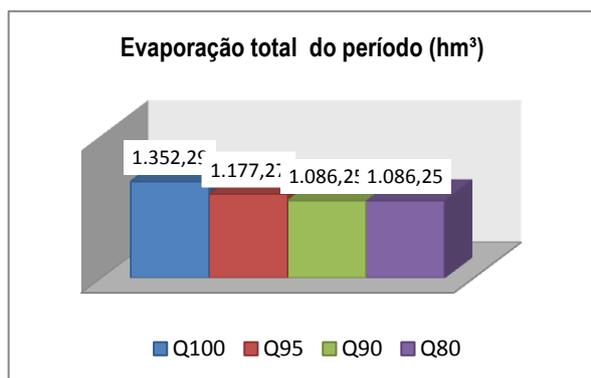
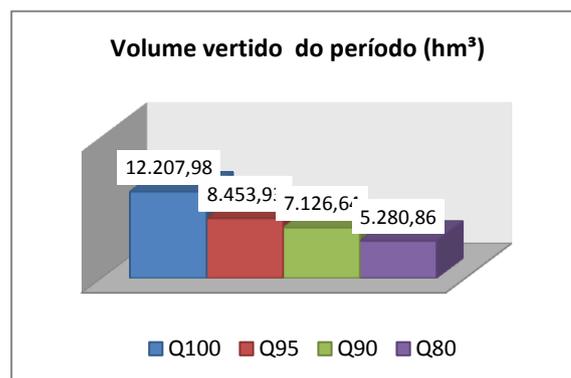


Figura 46-Volume total vertido por vazão regularizada



Finalmente são apresentados os volumes acumulados finais, associados às diversas garantias, onde no gráfico da Figura 47, a falha de 5%, ou seja, a vazão de retirada Q_{95} implica numa perda de volume acumulado no reservatório ao longo do tempo, da ordem de 17,68% (8.880,07 Mm^3), ratificando a análise da Figura 44. Já na Figura 48, ainda comparando a totalização de volumes da Q_{100} com a Q_{95} , identificamos um ganho do volume total de retirada do reservatório da ordem de 4.240,87 Mm^3 , cerca de 31,06 %, quando associamos a vazão regularizada de retirada à garantia de 95%.

Figura 47- Volume total final por vazão regularizada

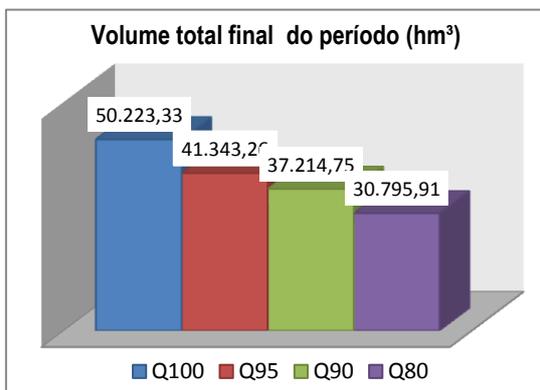
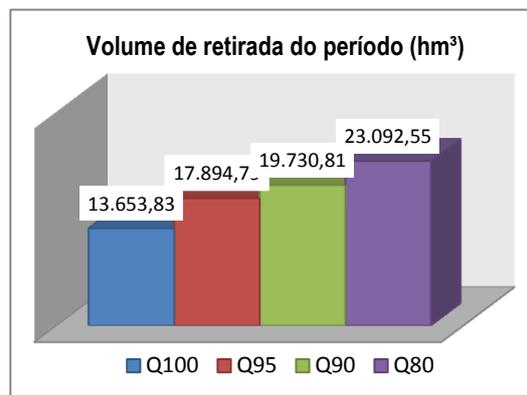


Figura 48- Volume total de retirada do reservatório por vazão regularizada



Reservatório Sicupema

Como a função principal deste reservatório é auxiliar a barragem de nível Gurjaú, e o mesmo possui pouca capacidade de regularização, foi aferida apenas sua vazão regularizada com garantia plena de atendimento, sendo preteridas as demais análises realizadas no reservatório Pirapama. A Tabela 24 mostra a vazão regularizada e o volume retirado do reservatório.

Tabela 25- Resultado da Simulação Sicupema

Simulação Q ₁₀₀	
Vazão regularizada (m³/s)	0.21
Volume total (hm³)	2,754.22

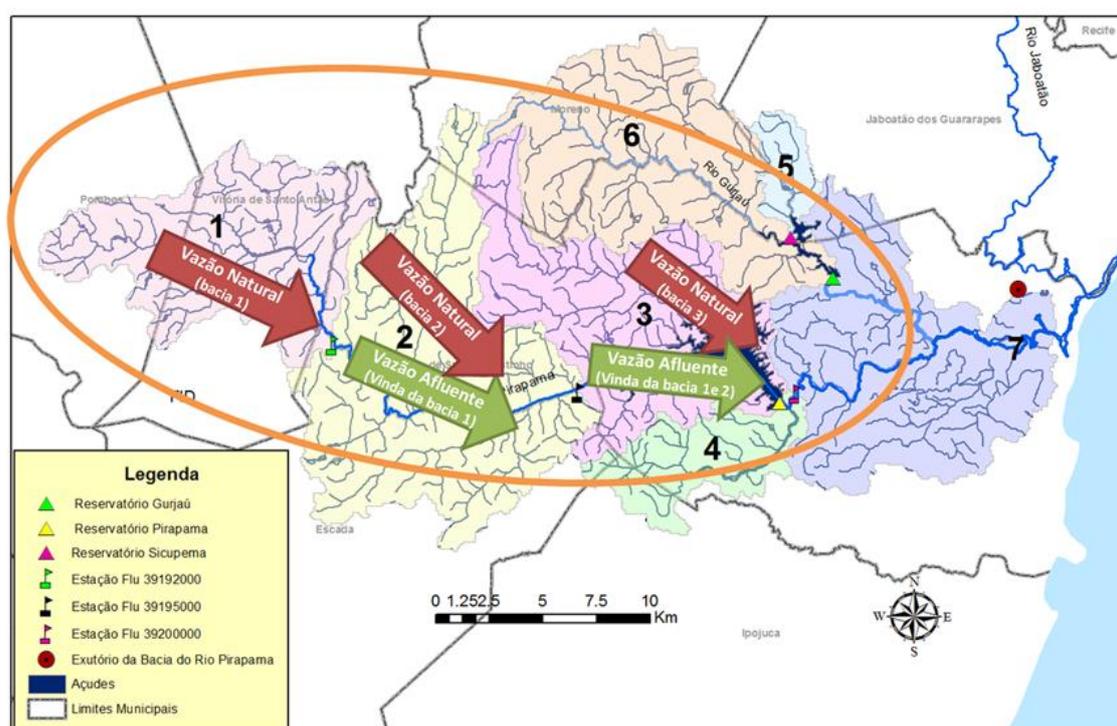
5.2.2 Disponibilidade hídrica

A disponibilidade hídrica da bacia do rio Pirapama foi realizada através da simulação da rede de fluxo, onde se estabeleceu o confronto entre oferta e demanda hídrica nas sub-bacias e reservatórios estratégicos através de curvas de permanência.

No modelo AcquaNet existe uma diferenciação entre as vazões afluentes e naturais, quando a rede de fluxo é montada com áreas incrementais, as vazões naturais são as vazões geradas considerando à área incremental e as vazões afluentes são as vazões vindas da(s)

bacia(s) de montante, quando não se possui bacia à montante então as vazões naturais são também afluentes. A Figura 49 ilustra a interpretação dada pelo AcquaNet em relação a estas vazões.

Figura 49-Eschema de vazões no AcquaNet



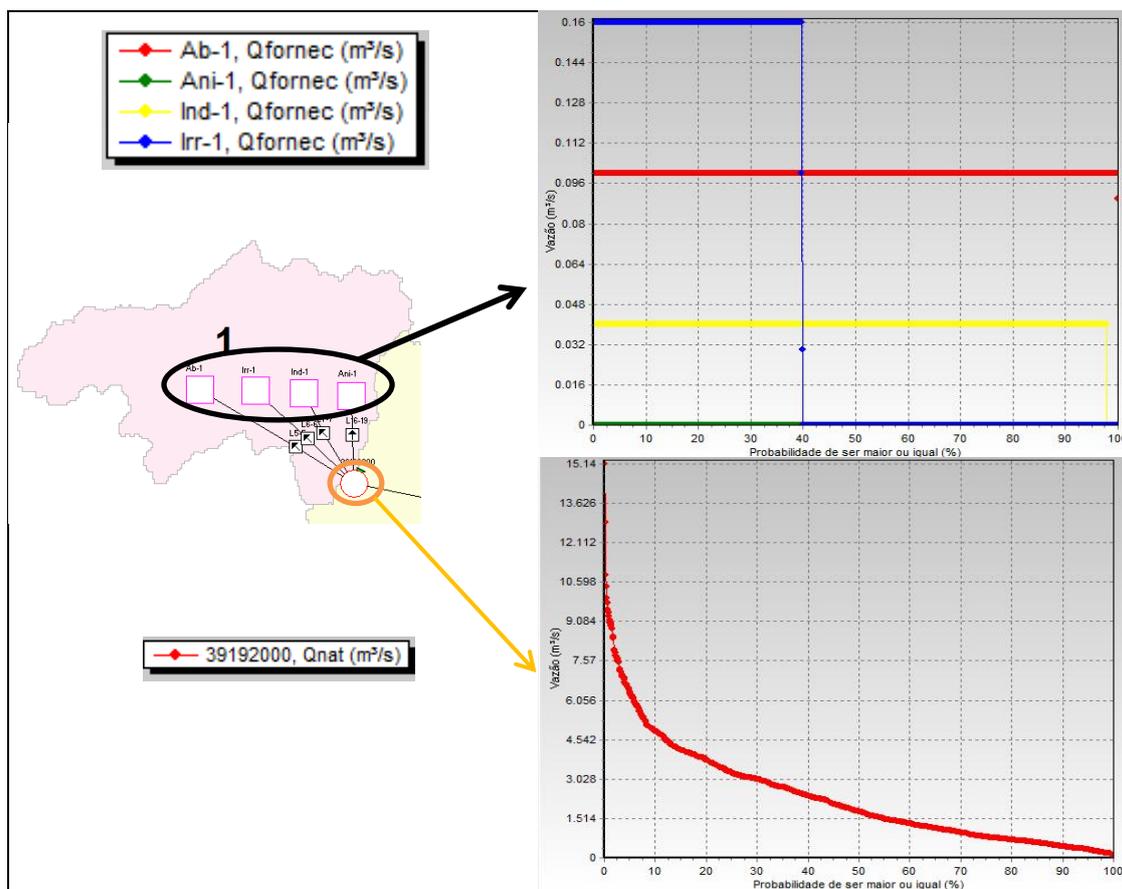
Observa-se na Figura 49, que nas sub-bacias 2 e 3 serão obtidas duas curvas de permanência, uma das vazões naturais e outra das vazões afluentes, onde a soma destas é que consistirá na disponibilidade hídrica no exutório em estudo.

A seguir serão mostrados por sub-bacias os quadros de atendimento às demandas e as curvas de permanência, das ofertas e demandas hídricas, resultantes da simulação da rede de fluxo.

Sub-bacia-1

A Figura 50 mostra as curvas de permanência das vazões naturais geradas para a sub-bacia na modelagem hidrológica e as vazões fornecidas para atendimento às demandas associadas às ofertas hídricas.

Figura 50-Curvas de permanência oferta e demanda (Sub-bacia-1)



Percebe-se no gráfico, que a demanda de irrigação teve seu atendimento associado apenas a uma garantia de 40%, sendo considerado normal, tendo em vista este tipo de uso e a prioridade do sistema que é abastecimento humano. Este por sua vez, obteve 99,9% de garantia. A demanda industrial obteve uma garantia próxima da plena (97,76%) e a demanda animal também foi atendida, apesar de a vazão média fornecida apresentar valor nulo, isto ocorreu devido à pequena ordem de grandeza da demanda analisada estar fora do arredondamento do AcquaNet. O resumo estatístico encontra-se na Tabela 26.

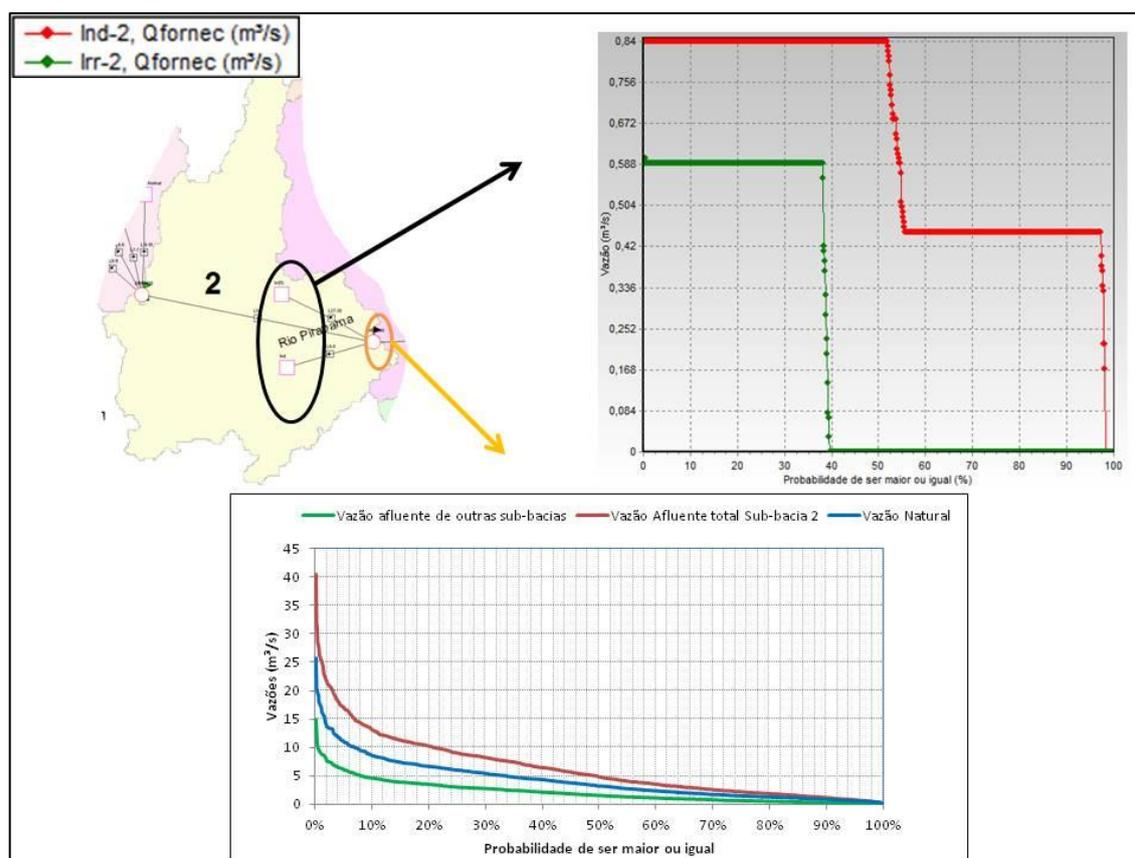
Tabela 26-Resumo do atendimento às demandas sub-bacia 1

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (hm³)	Vazão média fornecida (m³/s)
Ab-1	1	0,10	0,026	0,10
Ani-1	0	0	0	0
Ind-1	4	2,24	2,31	0,039
Irr-1	19	60,37	249,42	0,064

Sub-bacia-2

A Figura 51 apresenta os resultados da disponibilidade hídrica da sub-bacia através das curvas de permanência das vazões naturais, afluentes e totais em seu exutório e das vazões fornecidas para atendimento às demandas.

Figura 51- Curvas de permanência oferta e demanda (Sub-bacia-2)



Percebe-se na Tabela 27 que o atendimento à demanda industrial foi satisfatório em cerca de 94% do tempo com uma vazão média fornecida de 0,650 m³/s e a de irrigação esteve com falhas em 61,89% do tempo, consistindo em patamares esperados para este tipo de uso.

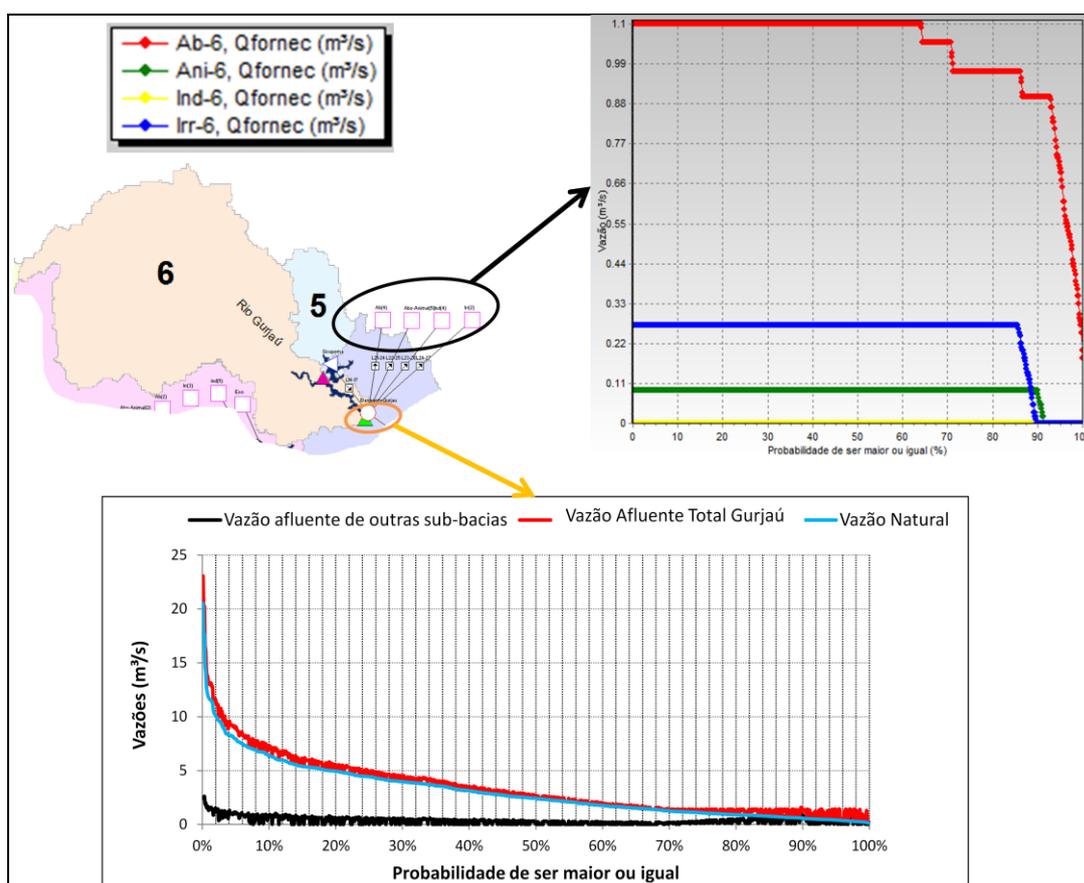
Tabela 27-Resumo do atendimento às demandas sub-bacia 2

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (hm ³)	Vazão média fornecida (m ³ /s)
Ind-2	5	6,61	71,59	0,65
Irr-2	19	61,89	936,75	0,23

Reservatório Gurjaú

O reservatório Gurjaú por ser uma barragem de nível teve sua disponibilidade hídrica avaliada mediante curvas de permanência, conforme Figura 52, onde se percebe uma contribuição discreta do reservatório de Sicupema, haja vista que as vazões afluentes ao reservatório Gurjaú são as vazões efluentes de Sicupema.

Figura 52-Curvas de permanência oferta e demanda reservatório Gurjaú



Na Tabela 28 constatamos um atendimento diferenciado da demanda de irrigação (Ir6) onde houve uma garantia em 85% do tempo. Já no abastecimento humano (Ab-6) houve uma

queda em relação às demais sub-bacias, permanecendo com uma garantia de 91,67% e acumulando um déficit de volume de 82,4 milhões de metros cúbicos.

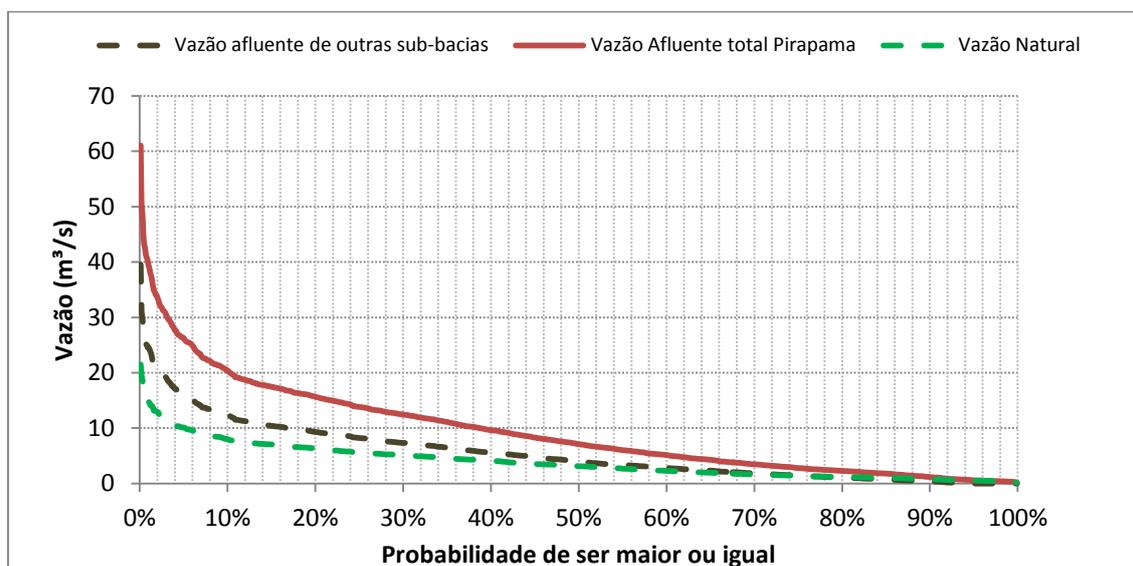
Tabela 28-Resumo do atendimento às demandas reservatório Gurjaú

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (hm ³)	Vazão média fornecida (m ³ /s)
Ab-6	3	8,33	82,47	1,03
Ani-6	4	9,96	21,60	0,08
Ind-6	0	0	0	0
Irr-6	6	14,33	85,54	0,24

Reservatório Pirapama

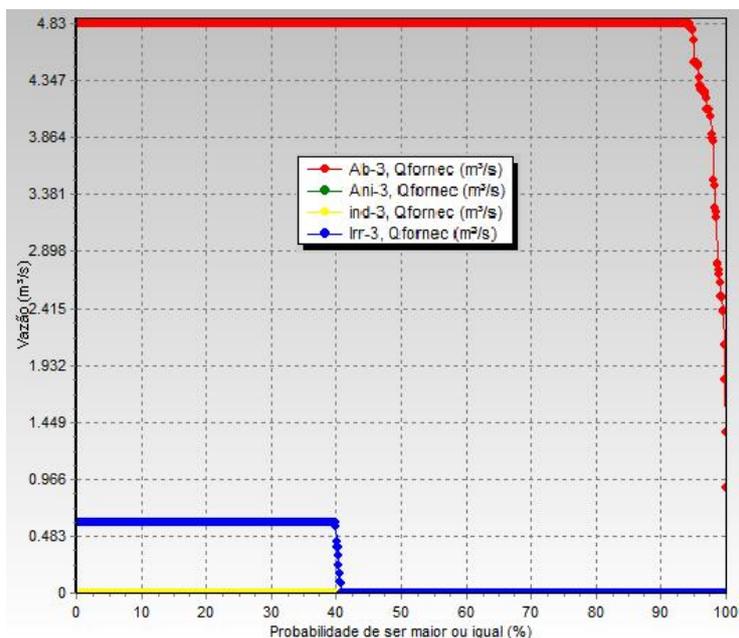
A Figura 53 mostra as curvas de permanência das vazões naturais da área incremental, as afluentes oriundas de outras sub-bacias e o somatório das duas que são as afluentes totais para o reservatório Pirapama.

Figura 53-Curvas de permanência do reservatório Pirapama



A Figura 54 apresenta as curvas de permanência das vazões fornecidas para atendimento às demandas do reservatório.

Figura 54-Curva de permanência das demandas



Constata-se na Figura 54, um atendimento quase pleno do abastecimento humano com garantia de 98,78%, a demanda de irrigação se coloca no nível esperado (40% de garantia) e as demais demandas foram atendidas, conforme mostrado na Tabela 29.

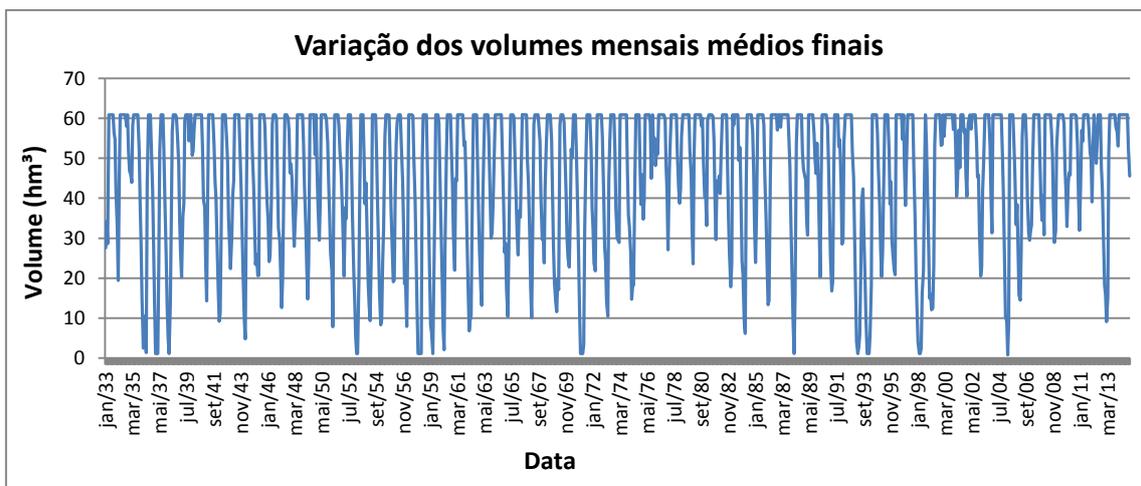
Tabela 29-Resumo do atendimento às demandas

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (hm ³)	Vazão média fornecida (m ³ /s)
Ab-3	3	1,22	31,67	4,77
Ani-3	0	0	0	0
Ind-3	0	0	0	0
Irr-3	19	60,16	926,45	0,242

5.3 Análise do reservatório Pirapama

A análise sistêmica da bacia do rio Pirapama proporcionou nesta etapa, não apenas verificar a questão da disponibilidade hídrica do reservatório Pirapama, mas também analisar o comportamento da variação dos seus volumes finais mensais ao longo do período simulado. A Figura 55 mostra os 82 anos simulados.

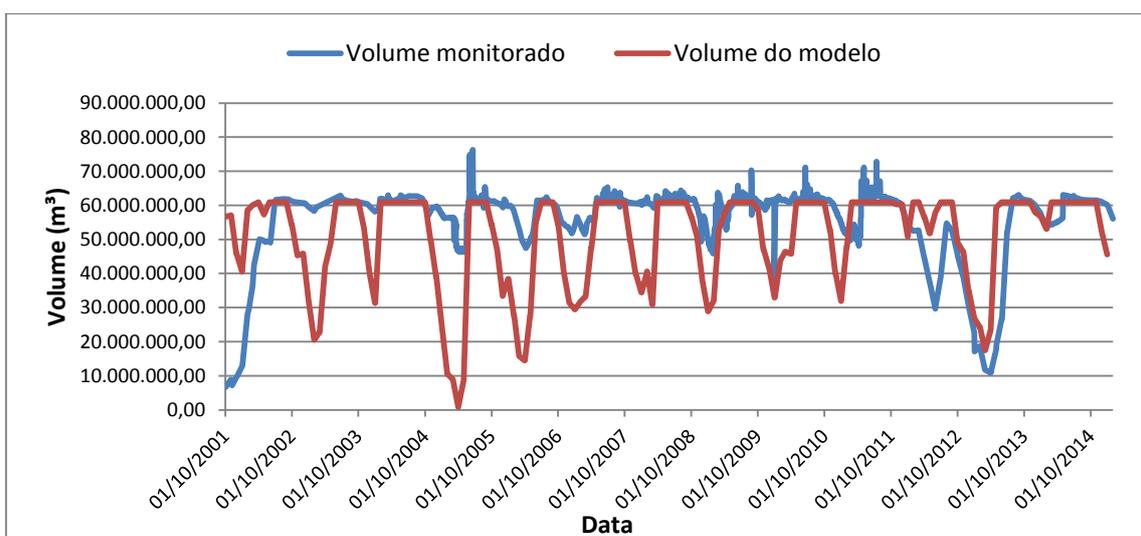
Figura 55- Volumes finais reservatório Pirapama



5.3.1 Análise dos volumes simulados

Visando verificar os resultados obtidos pelo modelo foi realizada uma comparação com os volumes monitorados obtidos no banco de dados da APAC. Os dados de monitoramento do reservatório possuem cotas e volumes diários relativos ao período de setembro de 2001 a dezembro de 2014. Para compatibilização dos dados monitorados com os do modelo foram considerados o primeiro e o último volume monitorado de cada mês e os volumes mensais iniciais e finais calculados pelo AcquaNet para o mesmo período. A Figura 56 mostra o gráfico comparativo.

Figura 56- Volumes monitorados e calculados



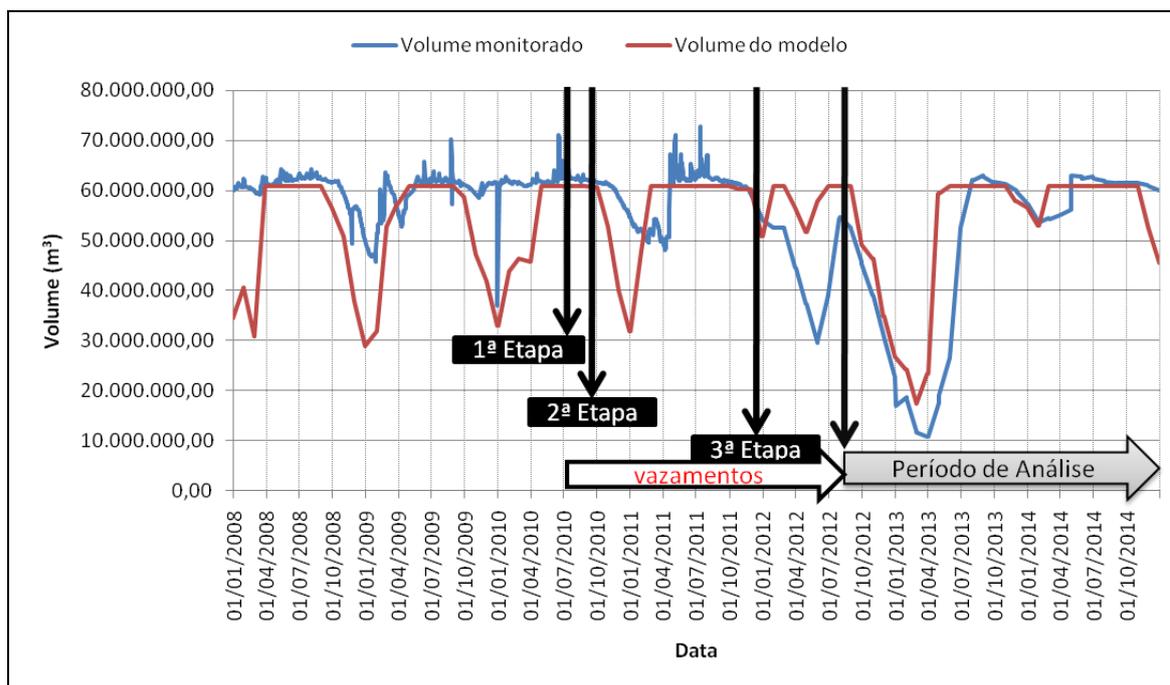
Para analisar a resposta do modelo frente aos volumes monitorados fez-se necessário identificar na linha do tempo a variação dos volumes monitorados e calculados a partir da entrada em operação do sistema produtor Pirapama. O sistema foi entregue em três etapas, descritas na Tabela 30, onde constam também os registros das ocorrências que permitiram melhor avaliar o desempenho do modelo.

Tabela 30-Levantamento dos principais eventos do sistema Pirapama

Data	Evento	Ocorrência
Março -2008	Implantação do sistema	Início das obras para implantação de adutoras, estações de tratamento e reservatórios do Jordão e de Ponte dos Carvalhos
Julho-2010	Entrada em operação da 1ª etapa com uma vazão de 1.000 litros por segundo	Beneficiou 400 mil pessoas do racionamento d'água, nos bairros de Massangana, Massaranduba, Prazeres, Porta Larga, Jordão Baixo, Ibura de Baixo, Imbiribeira, localidades do entorno do aeroporto, Setúbal e Boa Viagem (da Armindo Moura à Rua Bruno Veloso).
Outubro-2010	Entrada em operação da 2ª etapa com uma vazão de 1.500 litros por segundo	Beneficiou 520 mil pessoas alcançandoos bairros da Imbiribeira, Jardim São Paulo, Areias, Cordeiro, Dois Irmãos, Iputinga, Várzea, Boa Vista, São José, Santo Antônio, Coelhoos, Graças, Espinheiro, Madalena, Boa Viagem, Pina e Brasília Teimosa.
Julho-2011	Paralisação do sistema	Realização de serviços para viabilizar obras em tubulações do município do Cabo de Santo Agostinho.
Dezembro-2011	Entrada em operação da 3ª e última etapa com uma vazão de 2.500 litros por segundo	Beneficiou 3,5 milhões de pessoas, livrando o Grande Recife do racionamento.
Janeiro a Setembro de 2012	Vazamentos na rede de distribuição	Em setembro 2012 foi realizado a substituição de 160 quilômetros de tubulações antigas devido à vazamentos e estouramentos que decorreram da entrada do Sistema Pirapama(FOLHA-PE, 2012).

Baseado neste levantamento foi possível realizar uma análise temporal no gráfico da Figura 57 referente ao comportamento dos volumes calculados e monitorados do reservatório para este período.

Figura 57-Verificação do modelo



Qualquer aferição de resposta do modelo só é possível ser realizada quando o sistema entra em operação na 1ª etapa, porque antes desta data, o sistema ainda estava num processo de implantação. Observa-se na Figura 57 que com três meses de funcionamento da 1ª etapa, entrou em operação a 2ª etapa, inserindo na rede de distribuição, já antiga, uma alta pressão que provocou freqüentes vazamentos e a interrupção do sistema diversas vezes. Como no modelo AcquaNet a demanda de abastecimento humano do reservatório Pirapama só foram alimentadas com dados reais a partir de janeiro de 2011 (Tabela 30) não foi possível comparar o que ocorreu antes deste marco.

De janeiro de 2011 até a entrada da 3ª etapa em dezembro de 2011, ainda não foi o melhor período para verificação do modelo, pois grande parte do tempo esteve no período chuvoso, quando normalmente o reservatório está vertendo e os hidrogramas se igualam.

A partir da 3ª etapa, quando foi inserida no sistema a vazão total de 5.000 litros por segundo, aumentaram consideravelmente os vazamentos e rompimentos da rede. Este cenário de desequilíbrio do sistema inviabilizou a análise pretendida até setembro de 2012. Neste mesmo mês, a COMPESA substituiu 160 km de tubulações antigas como parte do projeto de

setorização do abastecimento da RMR, que consistia no isolamento de bairros por áreas, chamadas de distrito, visando controle de pressão e vazão para melhor distribuição de água à população.

De setembro de 2012 até dezembro de 2014 é o período mais apropriado para aferir a resposta do modelo, haja vista terem minimizados os vazamentos e o sistema ter adquirido uma maior estabilidade, face aos investimentos realizados na infraestrutura da rede de distribuição. Percebe-se no referido período mostrado na Figura 57 que graficamente os volumes calculados demonstraram uma boa aderência aos volumes monitorados e estatisticamente apresentaram uma boa correlação de 84%. Permitindo-se aferir que o modelo AquaNet representou satisfatoriamente a realidade do sistema.

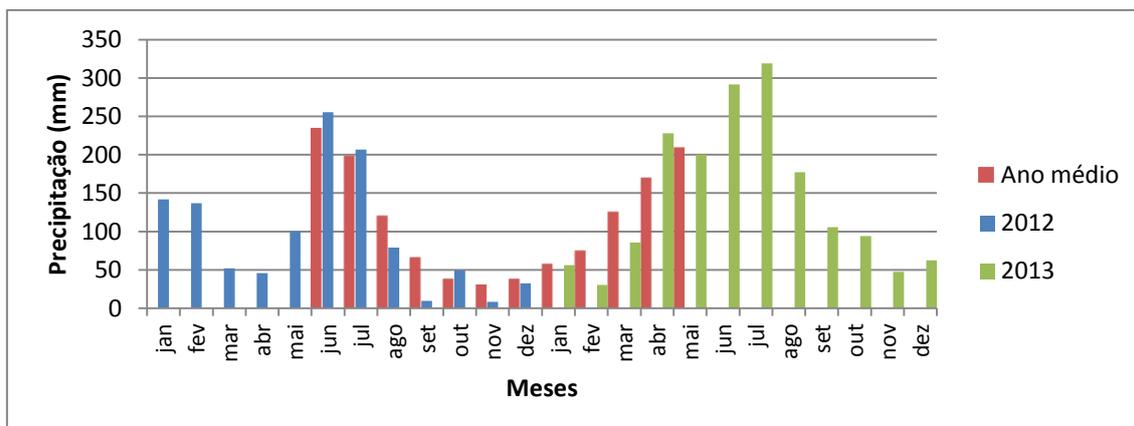
5.3.2 Avaliação dos períodos de escassez hídrica

Baseada na verificação dos resultados obtidos pela simulação do reservatório Pirapama foi possível analisar o seu comportamento frente aos eventos de seca, considerando as demandas atuais e visando olhar o passado e projetar o futuro.

Contextualizando o fenômeno da seca no reservatório Pirapama

Os anos de 2012 e 2013 foram marcados pela seca em todo o Nordeste brasileiro, e para a bacia do rio Pirapama não foi diferente, observando-se na Figura 58 a precipitação média histórica para a bacia hidrográfica do reservatório, percebe-se que para o ano de 2012 as chuvas foram bem abaixo da média nos meses de setembro e novembro. Já em 2013, fevereiro e março também registraram baixos índices pluviométricos.

Figura 58-Gráfico comparativo das precipitações mensais de 2012-2013 com as médias históricas.



Na verificação realizada no gráfico da Figura 57, constata-se que no período de dezembro de 2012 a Março de 2013 os volumes do reservatório caíram aos seus níveis mínimos, obrigando o governo do Estado a decretar a partir de Março de 2013, por um prazo de 90 dias o racionamento para o sistema Pirapama.

Com o racionamento estabelecido, 74 dos 94 bairros da capital passaram a ser abastecidos em dias alternados, no esquema de 20 horas com água e 28 horas sem o produto. A crise hídrica se instalara afetando o principal sistema de abastecimento do Estado e atingindo principalmente 1,3 milhão de pessoas que moram nas áreas planas da capital Pernambucana e em bairros de Jaboatão dos Guararapes e do Cabo de Santo Agostinho. A população acostumada a ter água nas torneiras todos os dias desde 2010, com a inauguração do Sistema, tivera que conviver com a nova realidade.

O menor volume registrado pela APAC se deu no dia 05 de Março de 2013, quando o reservatório atingiu a cota de 35,01 metros, equivalente a 11,04 milhões de metros cúbicos ou 18,11% do volume útil. No entanto, devido ao racionamento implementado, as vazões de retiradas que já haviam sido diminuídas em janeiro de 2013, caíram em mais de 1000 litros por segundo no mês de março de 2013. Conforme pode ser visto na Tabela 31.

Tabela 31-Histórico de retiradas dos anos 2012 e 2013

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
2012	4.255	4.255	4.229	4.271	4.491	4.373	3.457	4.306	4.274	3.846	3.890	3.830
2013	3.500	3.500	2.400	2.500	2.800	4.300	4.100	4.100	4.100	4.500	4.500	4.500

A redução da demanda para abastecimento humano, em função do racionamento implantado, e as chuvas intensas que ocorreram no mês de maio em 2013 possibilitaram a recuperação do volume do reservatório para 42% da sua capacidade, antecipando em 10 dias o fim do racionamento e sinalizando de forma inequívoca a necessidade de se planejar a gestão do reservatório frente aos eventos de seca.

Quantificação da Seca

Fazendo uso da ferramenta MATLAB (Matrix Laboratory), cujo script encontra-se no APÊNDICE D- Figura 1, realizou-se o SRI (Índice de Normalização de Escoamento), classificando as vazões geradas afluentes à Pirapama nas classes do SPI da Tabela 13.

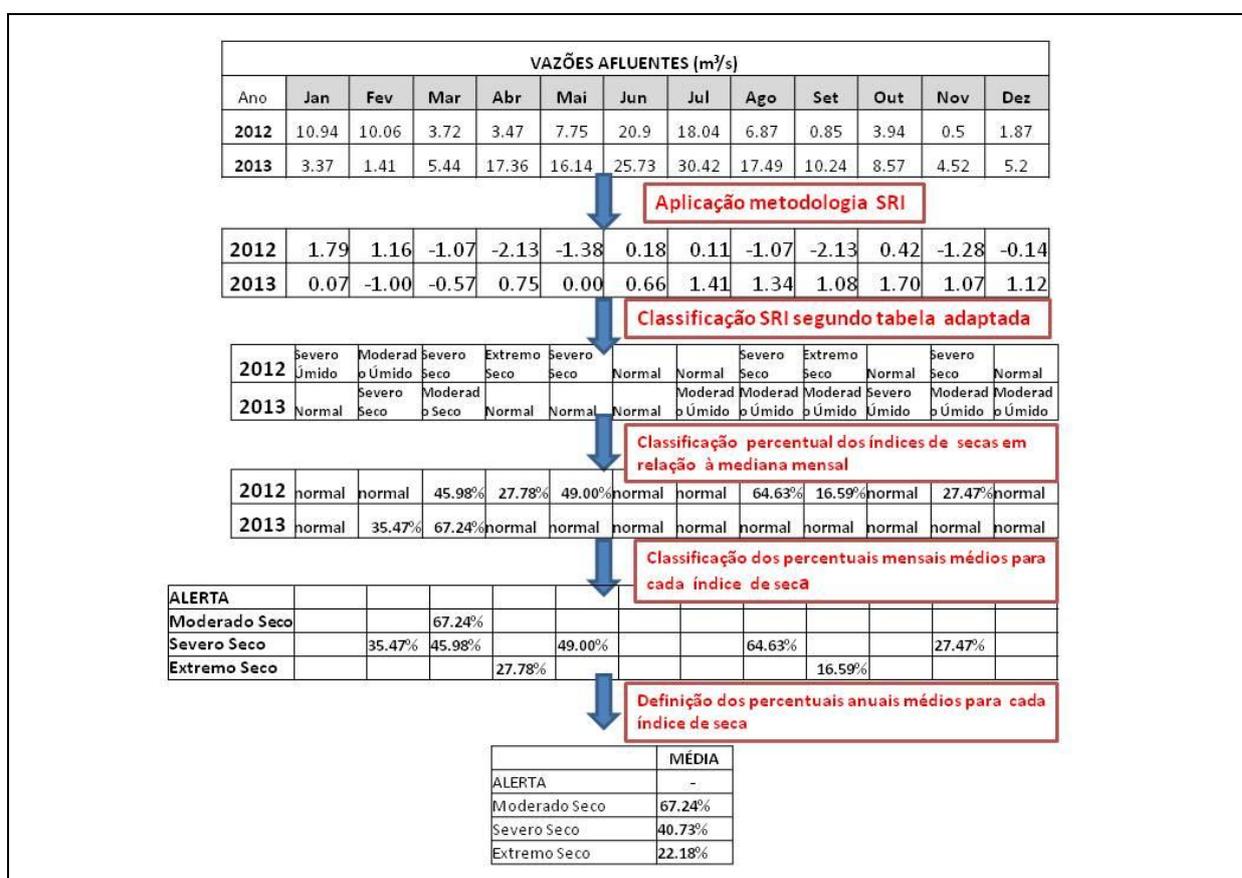
No entanto, em razão da natureza deste trabalho ser voltada para o estudo de seca, onde o que vai interessar são as vazões afluentes classificadas abaixo das vazões medianas, buscou-se uma alteração no intervalo da classe “próximo ao normal”, pois a mesma possui um intervalo com classificação acima e abaixo da mediana, sendo portanto criadas duas classes a partir desta, a “normal” quando a classificação for acima da mediana até o estado “ moderado úmido” e a classe “alerta” quando a vazão encontrar-se abaixo da mediana até o estado “ moderado seco” conforme Tabela 32. Desta forma se estabeleceu uma garantia de que todas as vazões classificadas nos estados de Alerta a extremo seco estão abaixo das vazões medianas.

Tabela 32-Classificação SRI adaptada

Classificação do Índice de escoamento Padronizado SRI(Standardized Runoff Index)			
Extremo Úmido		>	2.00
Severo Úmido	1.50	-	1.99
Moderado Úmido	1.00	-	1.49
Normal	-0.18	-	0.99
ALERTA	-0.19	-	-0.49
Moderado Seco	-0.50	-	-0.99
Severo Seco	-1.00	-	-1.99
Extremo Seco		<	-2.00

Em seguida, com as vazões classificadas foi quantificado percentualmente o quanto correspondia de cada vazão enquadrada nas classes de intensidade de seca em relação à mediana, afim de que esses percentuais médios estabelecessem os patamares da seca. A título de exemplo, a Figura 59 mostra as etapas realizadas até atingir os percentuais médios dos níveis de seca. Para este exemplo, utilizaram-se os anos de 2012 e 2013 para além de ilustrar as etapas, também aferir a classificação das vazões afluentes deste período dentro da metodologia do índice SRI.

Figura 59-Etapas para classificação das vazões afluentes nos níveis de seca



Verifica-se na classificação das vazões afluentes dos anos detalhados no exemplo da Figura 59, que os meses classificados nos níveis críticos de seca se afiguram os mesmos da análise realizada com a precipitação média histórica da Figura 58, refletindo a relação destas variáveis na classificação dos níveis de intensidade de seca. O resultado do percentual médio dos níveis de seca de todo o período de simulação das vazões encontram-se na Tabela 33.

Tabela 33-Percentual médio das vazões afluentes nos estados de seca em relação à mediana do período (1933-2014)

Estado	Vazão afluente em relação à mediana (%)
Alerta	83.41%
Seca moderada	62.38%
Seca Severa	38.78%
Seca Extrema	20%

Interpretando a Tabela 33, se conclui que quando as vazões afluentes ao reservatório Pirapama foram classificadas no estado de “Alerta” em média elas tiveram valores correspondentes a 83,41% das medianas das vazões mensais de todo o período de análise correspondente àquele mês, e assim por diante em relação aos outros estados de seca.

Finalizada esta etapa, foi possível quantificar o cenário da seca em relação às vazões afluentes ao reservatório Pirapama, criando as bases para estabelecer os gatilhos de seca e possíveis respostas aos mesmos.

5.4 Propostas de regras de operação

Existem diferentes regras de operação de reservatórios, mas todas indicam o volume do reservatório ou a vazão efluente que se pretende atingir em determinados períodos de tempo como o diário, decenal, semanal ou mensal. Estas regras visam atender os requerimentos de vazão efluente e demandas do sistema para otimizar determinados objetivos (MAYS e TUNG, 1992 apud BRAVO et al., 2006).

5.4.1 Curvas-guia

Na Figura 60 podemos visualizar que por vários meses no período simulado, o volume do reservatório entrou na condição de racionamento e em alguns outros em colapso. A Tabela 34 quantifica o número de meses das condições atingidas pelo volume do reservatório dentro do período simulado.

Figura 60- Volumes de racionamento e colapso

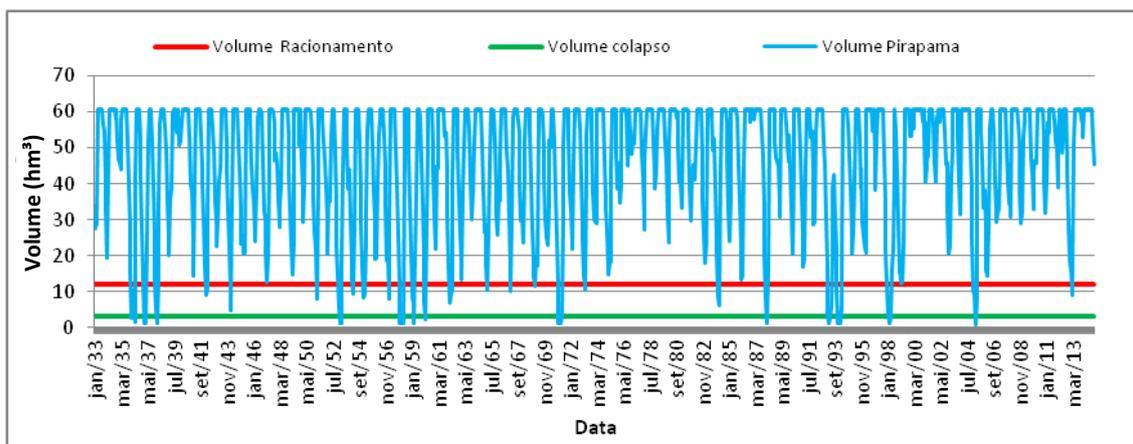


Tabela 34- Condições atingidas pelo volume do reservatório Pirapama

CONDIÇÃO	Qtd. (meses)
NORMAL	918
RACIONAMENTO	39
COLAPSO	27

Observando a Tabela 34, percebe-se a importância de se estabelecer as curvas-guia para o reservatório Pirapama, pois se em apenas 4 anos de operação ele já esteve na condição de racionamento por quase três meses, no período simulado de 82 anos ficou evidenciado que dadas as condições atuais de demanda, ele teria estado 39 meses em racionamento e 27 meses em colapso, ou seja, 5 anos e meio com comprometimento do mais importante sistema de abastecimento do Estado.

A partir da classificação das vazões afluentes em relação aos níveis de seca, elaborou-se uma proposta de curvas-guia onde os gatilhos de seca seguiram a classificação estabelecida na Tabela 33, havendo alguns arredondamentos a favor da segurança, e as metas de resposta consideradas foram espelhadas no Plano de Gestão de Secas em Cidades: Sistema Jucazinho (SOUZA FILHO et al.,2014) , resultando na Tabela 35. Com isso, admite-se que o índice SRI calculado com as vazões afluentes pode ser considerado como representativo do estado de severidade do armazenamento no reservatório.

Tabela 35-Cenários de seca

Estado	Gatilhos das Secas*	Metas de Resposta*
Alerta	85%	Redução 10% no consumo
Seca Moderada	65%	Redução 20% no consumo
Seca Severa	40%	Redução 30% no consumo
Seca Extrema	20%	Redução 60% no consumo

* Gatilho de seca – Percentual do volume mediano

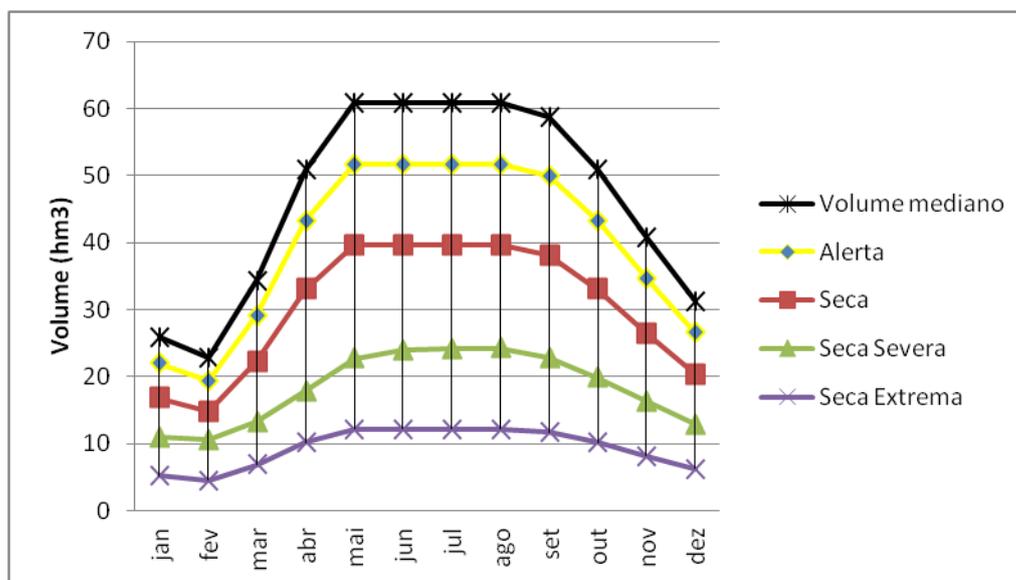
* Meta de resposta – Percentual do consumo da demanda de abastecimento humano.

A partir da aplicação dos gatilhos de seca nos volumes medianos mensais do reservatório Pirapama foi possível traçar as curvas-guia, considerando os volumes metas a serem alcançados em cada mês, conforme ilustrado na Tabela 36 e Figura 61.

Tabela 36-Volume dos estados de seca em relação à mediana (hm³)

Meses	Mediana	Alerta (85%)	Seca moderada (65%)	Seca severa (40%)	Seca Extrema (20%)
JAN	25.84	21.96	16.79	10.93	5.17
FEV	22.78	19.36	14.80	10.61	4.56
MAR	34.33	29.18	22.31	13.30	6.87
ABR	50.84	43.21	33.05	17.82	10.17
MAI	60.90	51.77	39.59	22.73	12.18
JUN	60.90	51.77	39.59	23.92	12.18
JUL	60.90	51.77	39.59	24.17	12.18
AGO	60.90	51.77	39.59	24.25	12.18
SET	58.71	49.90	38.16	22.79	11.74
OUT	50.85	43.22	33.05	19.86	10.17
NOV	40.78	34.66	26.51	16.28	8.16
DEZ	31.25	26.56	20.31	12.90	6.25

Figura 61-Volume mediano e Curvas-guia do reservatório Pirapama



Para avaliar a proposta, foi realizada uma simulação da demanda mensal de abastecimento humano atual (4.830 L/s) em todo o período simulado, considerando a aplicação das regras de operação estabelecidas na Tabela 35 e Figura 61 em relação aos volumes mensais finais simulados do reservatório. Desta forma, mediante planilha eletrônica, quando os volumes mensais atingiam os volumes metas dos estados de seca (Tabela 36), a demanda mensal (4.830 L/s) era reduzida de acordo com a meta de resposta do nível de seca alcançado, resultando numa nova demanda oriunda da aplicação das regras das curvas-guia. Com a nova demanda simulada, alimentou-se o AcquaNet para nova simulação do reservatório. O resultado pode ser visto na Figura 62 e quantificado na Tabela 37.

Figura 62-Volumes simulados com as curvas-guia

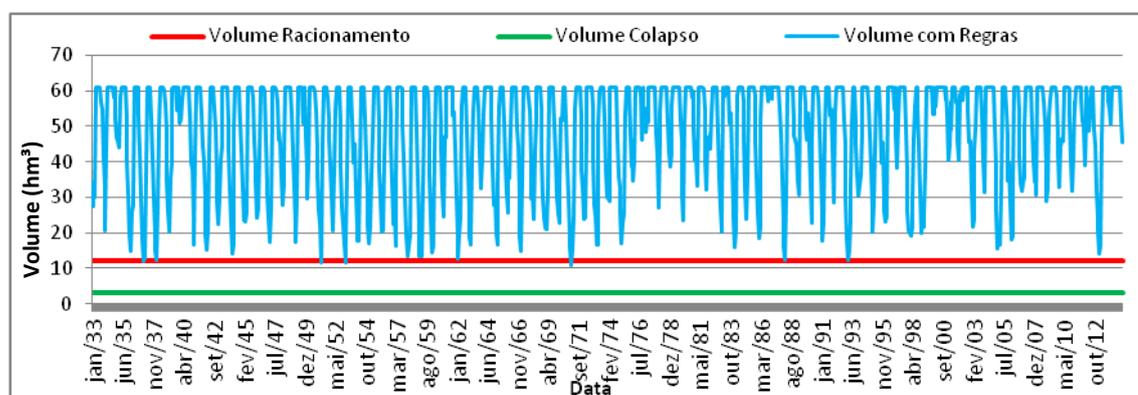


Tabela 37-Condições atingidas pelo volume do reservatório Pirapama quando aplicadas curvas-guia

CONDIÇÃO	Qtd. (meses)
NORMAL	980
RACIONAMENTO	4
COLAPSO	0

Percebe-se na Tabela 37 uma excelente resposta por parte das regras de operação propostas, onde em 82 anos de simulação, o reservatório entrou em apenas 4 meses na condição de racionamento, ou seja, em somente 0,4% do tempo ele teve seu volume ameaçado por esta condição e nenhuma vez entrou em colapso.

Outra verificação realizada foi em relação à perda dos volumes mensais médios destinados à demanda de abastecimento humano que foram retidos no reservatório devido às regras de operação implantadas nos 82 anos de simulação. Conforme a Tabela 38 a implantação destas regras reteve apenas 4,29% da água no reservatório em relação aos volumes sem as regras. Indicando uma excelente relação custo-benefício na aplicação destas curvas-guia no período simulado.

Tabela 38-Análise dos volumes na simulação com e sem regras de operação

Situação da simulação	Volumes mensais médios simulados (hm³)
Com as regras	47.79
Sem as regras	45.74

5.4.2 Curva de Aversão a Risco- CAR

Outra proposta foi elaborada levando-se em conta a possibilidade de se analisar o comportamento do reservatório Pirapama diante da possibilidade de operá-lo com outras vazões de retirada na demanda de abastecimento humano, e prever o risco associado a cada uma delas.

Desta forma estabeleceu-se um conjunto de CAR utilizando a mesma rede de fluxo de simulação da bacia, porém no módulo específico de CAR no AcquaNet, cuja metodologia, segundo FUSP (2009), tem como base a previsão de afluições nos meses subsequentes a

partir de vazões observadas, julgadas representativas. Esta sequência de vazões é denominada de cenário hidrológico.

A construção das curvas de aversão ao risco requer que seja definida a reserva estratégica que indica o volume mínimo desejável ao final do período de previsão representado pelo cenário hidrológico, neste caso, optou-se por 20% do volume útil do reservatório Pirapama, haja vista ser este o nível de racionamento definido para o mesmo.

A análise dos períodos críticos das vazões afluentes ao reservatório para toda série simulada (1933 a 2014) foi realizada pelo módulo CAR do AcquaNet, onde a partir das vazões afluentes do reservatório, o próprio modelo encontrou o evento hidrológico mais desfavorável no período de 1952 a 1953, indicando a necessidade dos cenários hidrológicos terem período de 2 anos.

A Figura 63 apresenta a tela dos dados de entrada no AcquaNet para construção das CAR, onde se observa que o nó de retirada (Ab-3) corresponde a demanda de abastecimento humano do reservatório Pirapama, foi através dele que foram simuladas as vazões de retiradas compreendidas entre 4 e 8 m³/s com intervalos de 0,5 m³/s. A vazão máxima de retirada foi admitida em até 8 m³/s, em razão da ETA do sistema Pirapama permitir ampliações futuras em até 14,6 m³/s, conforme relatado no item 3.3.2.

Figura 63-Tela das definições gerais do módulo CAR do AcquaNet

Sistema Equivalente

Reservatórios existentes: Pirapama, Sicupema

Reservatórios escolhidos: Pirapama

Parâmetros das CAR

Horizonte das CAR (anos): 2

Reserva Estratégica (%): 20.00

Vol. mín. no horizonte (%): 20.00

Vazão de Retirada

Mínima (m³/s): 4.000

Máxima (m³/s): 8.000

Intervalo de cálculo (m³/s): 0.500

Nó de retirada: Ab-3

Vazões afluentes ao Sistema Equivalente

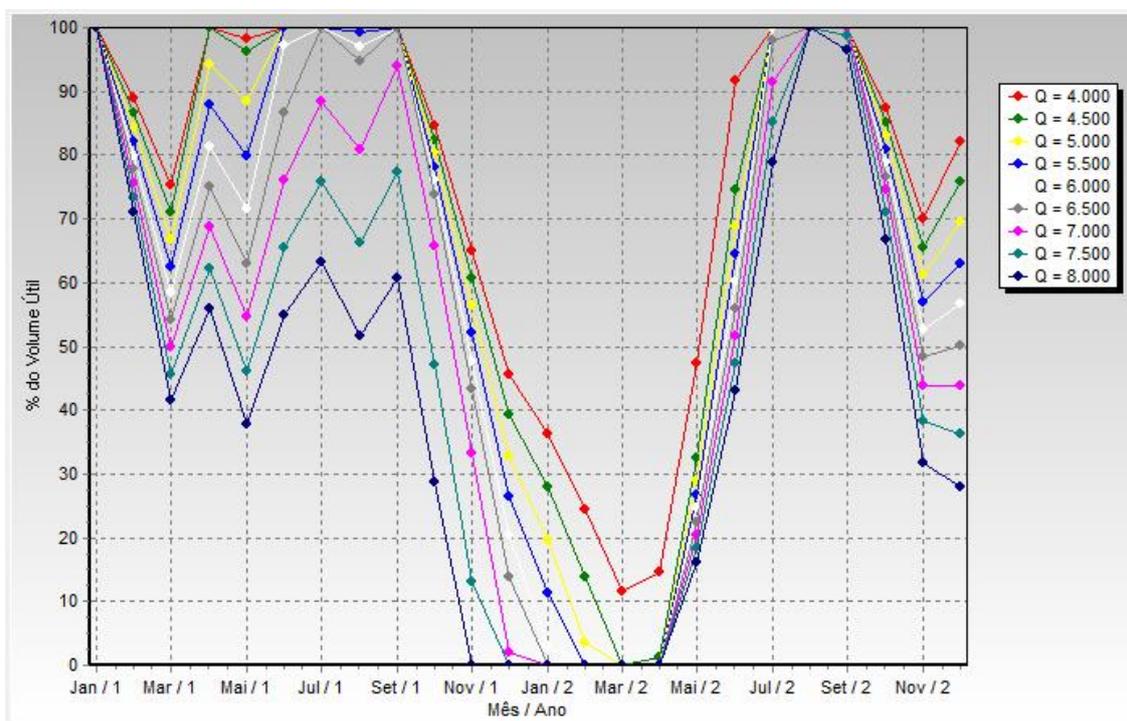
Ano inicial	Ano final	Qmed (m³/s)	Garantia (%)	Jan	Fev	Mar	Abr
1952	1953	6.477	100.00	2.590	1.490	12.150	4.720

Ano inicial para construção das CAR: 1952 Garantia (%): 100.00

Ok Cancelar

Dessa forma, foi obtida uma família de Curvas Bianaus de Aversão a Risco do reservatório Pirapama, apresentada na Figura 64, para cada vazão de retirada fixada, considerando uma reserva estratégica de 20 % e um cenário hidrológico do período bianual de mínima disponibilidade hídrica, correspondente ao biênio de 1952/1953.

Figura 64-Curvas bianuais de Aversão a Risco do reservatório Pirapama



Utilizando-se dos resultados obtidos para o primeiro ano dessas Curvas, para cada mês do ano, podem ser obtidas as curvas que indicam a vazão máxima de retirada total em função do nível de armazenamento, em termo de volume útil, a ser praticada de forma que o nível mínimo de segurança seja obedecido, olhando um horizonte de, no mínimo, um ano para frente (FREITAS e FILHO, 2007). O resultado tabular das curvas anuais encontra-se na Tabela 39 e a Figura 65 ilustra as mesmas, juntamente com a variação das medianas dos volumes mensais simulados.

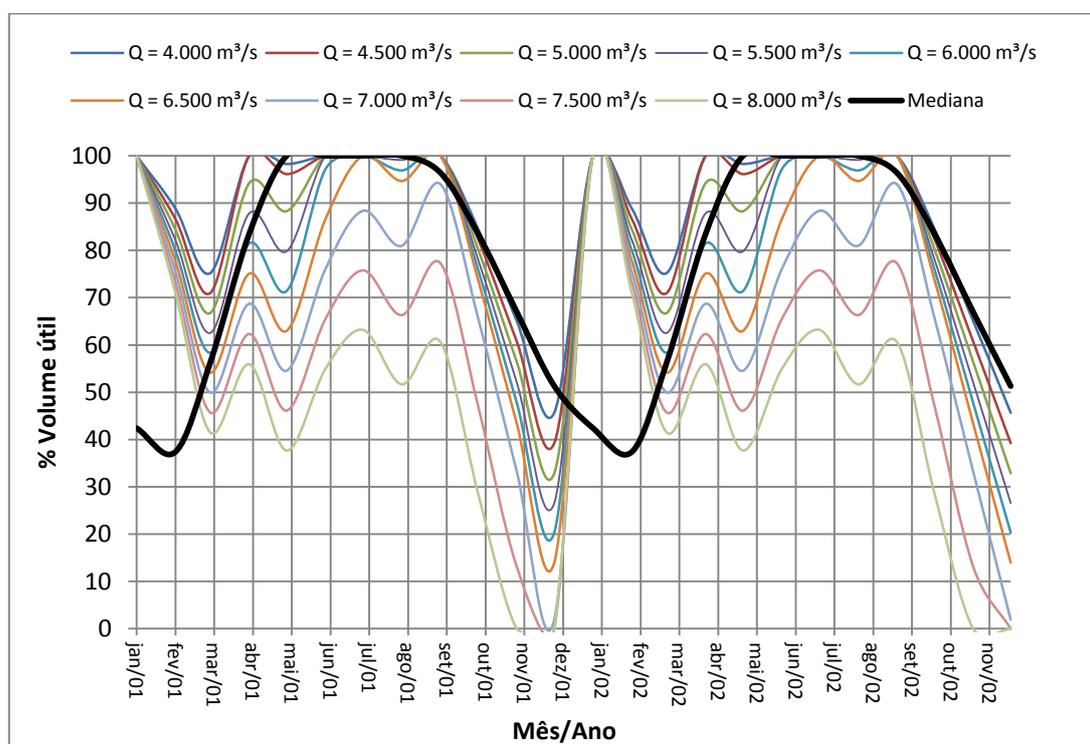
Tabela 39- Curvas de Aversão a Risco (% do Volume Útil)

mês	Q = 4.000 m ³ /s	Q = 4.500 m ³ /s	Q = 5.000 m ³ /s	Q = 5.500 m ³ /s	Q = 6.000 m ³ /s	Q = 6.500 m ³ /s	Q = 7.000 m ³ /s	Q = 7.500 m ³ /s	Q = 8.000 m ³ /s
jan/01	100	100	100	100	100	100	100	100	100
fev/01	88.88	86.66	84.41	82.19	79.97	77.74	75.52	73.29	71.07
mar/01	75.23	71.02	66.77	62.56	58.34	54.15	49.92	45.7	41.49
abr/01	100	100	94.21	87.83	81.45	75.1	68.7	62.32	55.95
mai/01	98.29	96.15	88.29	79.83	71.42	62.99	54.55	46.12	37.69
jun/01	100	100	100	100	97.17	86.62	76.05	65.5	54.97

(Continuação)

mês	Q = 4.000 m ³ /s	Q = 4.500 m ³ /s	Q = 5.000 m ³ /s	Q = 5.500 m ³ /s	Q = 6.000 m ³ /s	Q = 6.500 m ³ /s	Q = 7.000 m ³ /s	Q = 7.500 m ³ /s	Q = 8.000 m ³ /s
jul/01	100	100	100	100	100	100	88.36	75.77	63.21
ago/01	100	100	100	99.13	96.91	94.68	80.95	66.3	51.69
set/01	100	100	100	100	100	100	93.96	77.27	60.65
out/01	84.58	82.44	80.28	78.13	75.99	73.83	65.74	47.16	28.66
nov/01	65.07	60.74	56.4	52.06	47.73	43.39	33.23	13.13	0
dez/01	45.67	39.26	32.86	26.57	20.32	13.96	1.91	0	0

Figura 65-Curvas Anuais de Aversão ao Risco e Volumes medianos simulados do Reservatório Pirapama



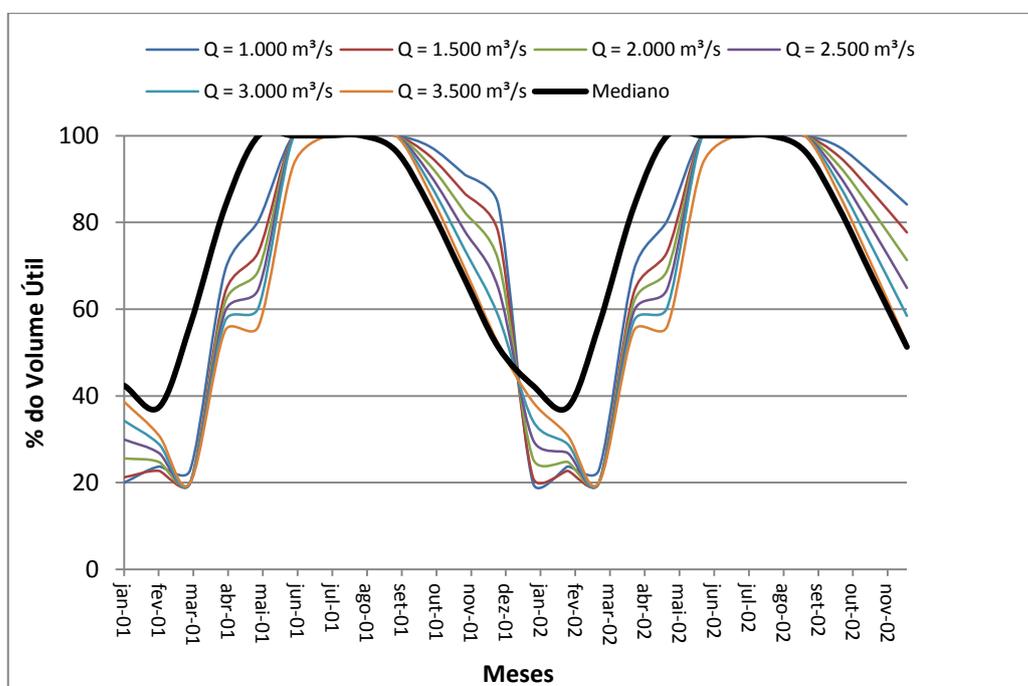
Percebe-se na Figura 65, que para o armazenamento do reservatório em nenhum mês do primeiro ano crítico fosse inferior ao seu nível mínimo de segurança (20% do volume útil), as vazões de 6 a 8 m³/s não poderiam ser consideradas, pois ultrapassam a reserva estratégica, e as demais vazões teriam que iniciar o ano com o reservatório totalmente cheio, o que parece pouco provável, quando comparado com a curva da mediana dos volumes mensais simulados, concluindo-se, portanto, pela inaplicabilidade desta família de CAR serem utilizadas como instrumento de regra de operação.

Desta forma, utilizando a mesmas etapas anteriores, elaborou-se outra família de CAR considerando as vazões de retiradas de 1 a 3,5 m³/s, resultando na Tabela 40 , ilustrada na Figura 66.

Tabela 40-Novas CAR (% do Volume Útil)

mês	Q = 1.000 m ³ /s	Q = 1.500 m ³ /s	Q = 2.000 m ³ /s	Q = 2.500 m ³ /s	Q = 3.000 m ³ /s	Q = 3.500 m ³ /s
jan/01	20	21.25	25.62	29.92	34.25	38.63
fev/01	23.71	22.73	24.8	26.82	28.86	30.89
mar/01	22.96	19.97	20	20	20	19.98
abr/01	68.83	63.73	61.56	59.36	57.17	54.97
mai/01	80.48	73.31	69.01	64.7	60.38	56.09
jun/01	100	100	100	100	99.62	93.16
jul/01	100	100	100	100	100	100
ago/01	100	100	100	100	100	100
set/01	100	100	100	100	100	100
out/01	97.49	95.33	93.19	91.04	88.88	86.74
nov/01	91.07	86.74	82.41	78.06	73.71	69.41
dez/01	84.15	77.73	71.32	64.9	58.46	52.09

Figura 66-Nova família de CAR e Volumes medianos



Observa-se na Figura 66, que no início da simulação todas as novas vazões de retiradas encontram-se abaixo da mediana dos volumes simulados, compatibilizando assim, esta nova família de CAR ao mesmo referencial das curvas-guia.

5.4.3 Análise das propostas

Para análise entre as propostas apresentadas foi necessária a adequação das CAR para estabelecer os volumes associados às vazões de retirada. Diferente das curvas-guia, onde os volumes dos gatilhos foram obtidos de forma direta, nas CAR, os mesmos foram extraídos em razão da simulação do reservatório para cada vazão de retirada, fazendo-se necessárias algumas simplificações e adequações para extração dos referidos volumes.

Realizando uma análise mensal dos períodos seco e chuvoso das CAR através da Figura 66, observa-se que em janeiro e fevereiro os volumes para cada vazão de retirada podem ser obtidos de forma direta. Em março e junho, como as curvas praticamente se encontram, tem-se o mesmo volume associado a todas as curvas, desta forma, visando um maior aproveitamento do reservatório, foi considerada a vazão de retirada máxima de 3,5 m³/s. Já abril e maio, incluso no período chuvoso, se obtêm uma relação inversa nas curvas, onde a vazão de retirada menor está associada a um volume maior, não podendo o volume ser obtido de forma direta.

Para equacionar este problema adotou-se como referencial o volume da curva 3,5 m³/s, por esta representar a vazão máxima a ser retirada para um nível mínimo de segurança do armazenamento. A partir do volume de referência estabeleceu-se a diferença entre este e os volumes associados às demais curvas, em seguida, deduziu-se do volume de referência as diferenças encontradas, nos temos da equação (34) e (35). Desta forma, garante-se que o volume mínimo das CAR para os meses chuvosos será respeitado em função da redução das vazões de retiradas expressas nas curvas de 1 a 3 m³/s.

$$\Delta V_{\text{curva } i} = V_{\text{curva } i} - V_{\text{ref}} \quad (34)$$

$$V_{\text{curva } i \text{ calc}} = V_{\text{ref}} - \Delta V_{\text{curva } i} \quad (35)$$

Onde:

$C_{\text{curva } i}$ - Curva de uma determinada vazão i .

$V_{\text{curva } i}$ - Volume encontrado para a curva da vazão i

V_{ref} - Volume de referência

$V_{\text{curva } i \text{ calc}}$ - Volume calculado para a curva i

Para finalizar a análise, nos meses de julho a dezembro têm-se dois cenários: Até setembro, quando o reservatório está vertendo; e de outubro a dezembro, quando entra no período seco e as CAR encontram-se acima da curva mediana. Nos dois casos não se prevê redução da vazão de retirada.

Realizada a adequação das CAR foi possível analisar a operação do reservatório para o cenário hidrológico mais crítico, onde a Tabela 41 mostra os volumes mensais associados a cada vazão de retirada, esclarecendo que quando não há volume definido, ou foi considerado o volume da vazão máxima (3,5 m³/s), ou as CAR não requeria redução de vazão.

Tabela 41-Volumes metas das Novas CAR em hm³

mês	Q = 3.5 m ³ /s	Q = 3m ³ /s	Q = 2.5 m ³ /s	Q = 2m ³ /s	Q = 1.5 m ³ /s	Q = 1m ³ /s
jan/01	23.53	20.86	18.22	15.60	12.94	12.18
fev/01	18.81	17.58	16.33	15.10	13.84	14.44
mar/01	12.17	-	-	-	-	-
abr/01	33.48	32.14	30.80	29.46	28.14	25.04
mai/01	34.16	31.55	28.92	26.29	23.67	19.31
jun/01	56.73	-	-	-	-	-
jul/01	-	-	-	-	-	-
ago/01	-	-	-	-	-	-
set/01	-	-	-	-	-	-
out/01	-	-	-	-	-	-
nov/01	-	-	-	-	-	-
dez/01	-	-	-	-	-	-

Desta forma, as CAR passaram a funcionar de forma semelhante aos gatilhos de seca e metas de resposta das curvas-guia, onde cada vazão de operação significa uma meta de resposta. Portanto, a vazão de operação de 3,5 m³/s representa uma redução de 28% da demanda de abastecimento humano (4,83 m³/s) e assim por diante, conforme Tabela 42.

Tabela 42-Respostas das CAR

Vazão de Operação (m ³ /s)	Metas de Resposta*
3,5	28 % de redução
3	38% de redução
2,5	48% de redução
2	59% de redução
2,5	69% de redução
1	79% de redução

* Meta de resposta – Percentual do consumo da demanda de abastecimento humano.

De forma análoga às curvas-guia, para avaliar a proposta das CAR foi realizada uma simulação da demanda de abastecimento humano atual (4,83 m³/s) no período simulado, considerando a aplicação das regras de operação estabelecidas na Tabela 41 em relação aos volumes mensais finais simulados do reservatório. Assim, quando os volumes mensais simulados do reservatório atingiam os volumes metas das vazões de operação (Tabela 41) , a demanda mensal (4,83 m³/s) era reduzida para a vazão de operação da CAR correspondente, resultando numa nova demanda oriunda da aplicação das regras das CAR. Com a nova demanda simulada, alimentou-se o AcquaNet para nova simulação do reservatório. O resultado pode ser visto na Figura 67 e quantificado na Tabela 43.

Figura 67-Volumes simulados com as CAR

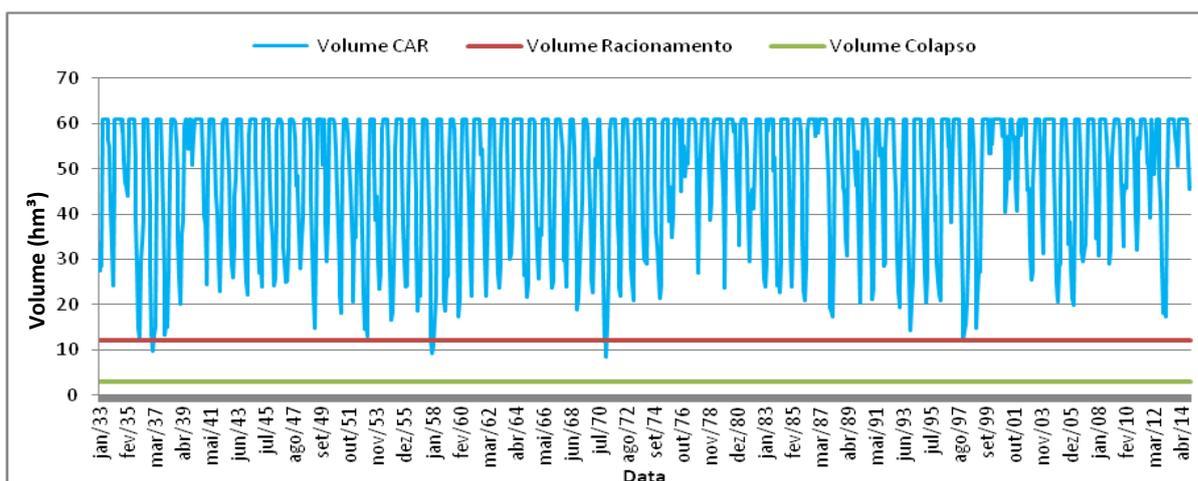


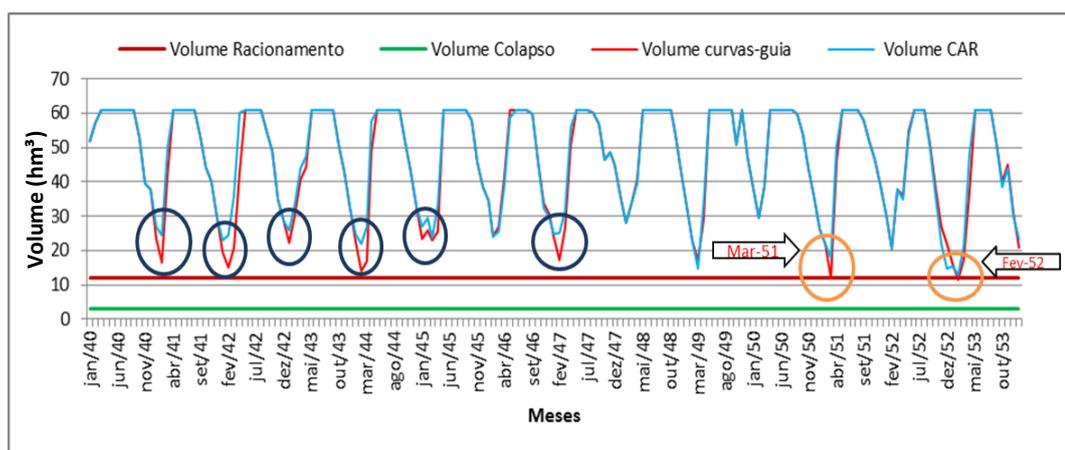
Tabela 43-Condições atingidas pelo volume do reservatório Pirapama quando aplicadas as CAR

CONDIÇÃO	Qtd. (meses)
NORMAL	977
RACIONAMENTO	7
COLAPSO	0

Numa análise comparativa entre as propostas CAR e curvas-guia pôde-se concluir que ambas apresentaram bons resultados, no entanto, as curvas-guia se mostraram mais eficientes e eficazes diante dos objetivos propostos, sendo realizadas algumas considerações nos aspectos quali-quantitativos das regras aplicadas:

- A Figura 68 mostra os detalhes da simulação dos volumes do reservatório com as duas regras aplicadas entre os anos de 1940 a 1953, onde se percebe um melhor aproveitamento das curvas-guia nos meses de janeiro a março sem ultrapassar o limite do volume de racionamento, enquanto as CAR embasadas no biênio crítico (1952/53), nestes mesmos meses, promoveram uma redução brusca da vazão de retirada. Entretanto, nos meses críticos de março de 1951 e fevereiro de 1953 o volume das CAR não atingiu o racionamento, enquanto o das curvas-guia esteve na referida condição.

Figura 68-Simulação dos volumes curvas-guia e CAR



- As curvas-guia se mostraram quantitativamente melhores, pois o volume do reservatório esteve apenas por 4 meses na condição de racionamento, enquanto nas CAR foram 7 meses;
- Em relação à perda dos volumes mensais médios destinados à demanda de abastecimento humano, a implantação das curvas-guia se mostrou mais eficiente do que as CAR, pois observando a Tabela 44 percebe-se que as CAR retiveram 0,95 % a mais dos volumes mensais médios do reservatório em relação às curvas-guia, o que significa um atendimento menor à demanda analisada;

Tabela 44-Análise comparativa dos volumes

Regra aplicada	Volumes mensais médios simulados (hm³)
Sem as regras	45.74
Curvas-guia	47.79
CAR	48.25

- As CAR, por serem traçadas para o cenário hidrológico mais desfavorável de afluências, inviabilizou a análise da retirada de outras vazões, enquanto as curvas-guia podem ser aplicadas a qualquer vazão de retirada;
- As curvas-guia se mostraram mais sensíveis à variabilidade climática, uma vez que sua metodologia permitiu estabelecer níveis de armazenamento durante todo o ano, enquanto as CAR, parte do ano ficou sem alternativas de regras operacionais;
- A metodologia das CAR permite maiores alternativas operacionais em relação às curvas-guia, pois é possível traçar famílias de curvas para vários cenários hidrológicos em função da garantia de afluências, enquanto as curvas-guia são fixadas em função dos gatilhos de seca e metas de resposta, sendo mais restritiva no universo de possibilidades.

5.4.1 Regras de operação para o reservatório Sicupema

Concebendo a perspectiva sistêmica da bacia do rio Pirapama foi proposta uma regra de operação para o reservatório Sicupema, uma vez que este se situa à montante do reservatório

Gurjaú, e possui uma válvula de descarga, que em determinada época do ano é acionada para auxiliar no atendimento à demanda de Gurjaú.

Realizaram-se simulações no AcquaNet, estabelecendo regras no volume meta de Sicupema para melhor ofertar Gurjaú. A Figura 69 mostra as vazões naturais mensais médias de Gurjaú e a Figura 70 mostra as vazões efluentes mensais médias de Sicupema com Volume meta-1 (sempre cheio).

Figura 69-Vazões naturais mensais médias (1933-2014)

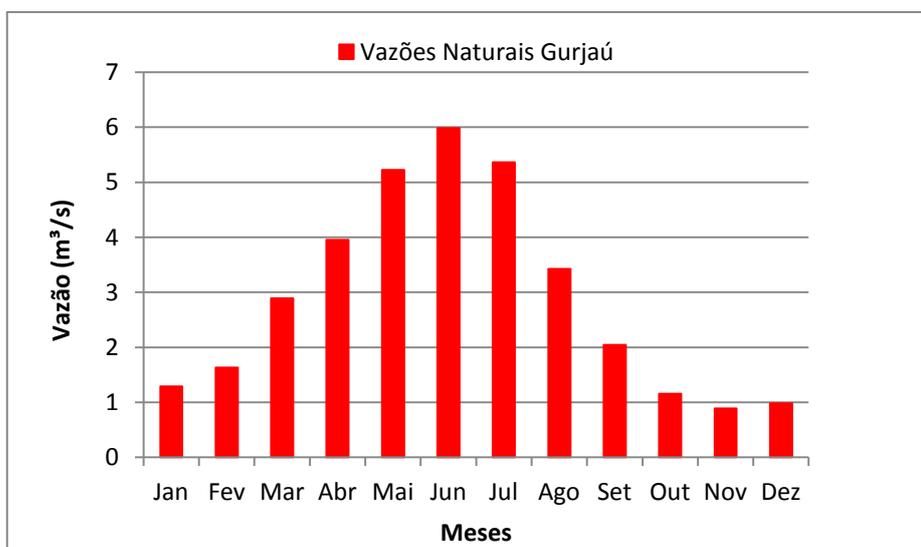
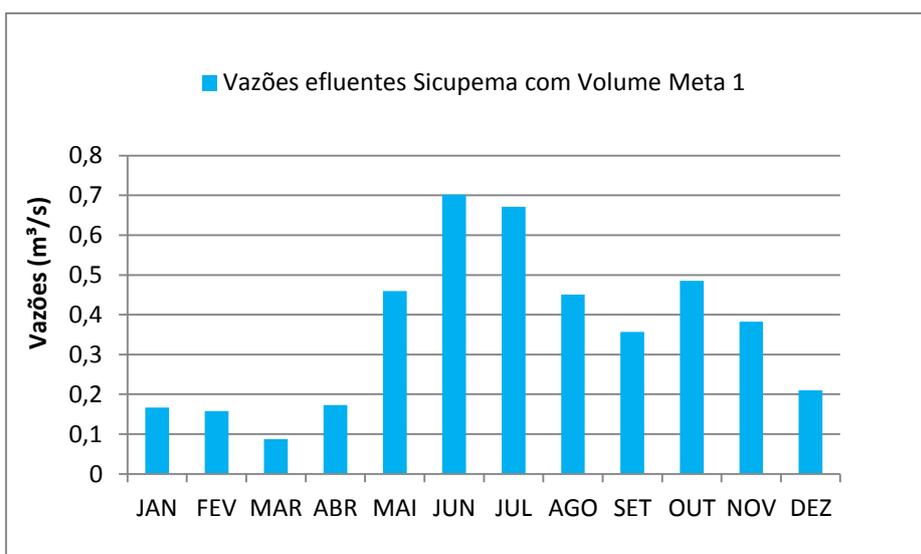


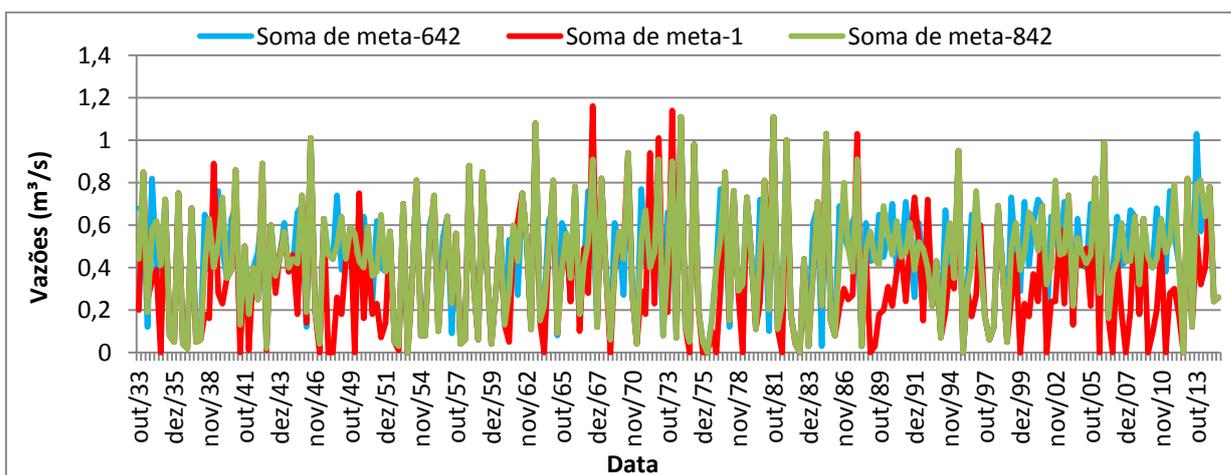
Figura 70-Vazões efluentes mensais médias do reservatório Sicupema



Percebe-se na Figura 69 que o último trimestre é quando ocorrem as vazões mínimas no reservatório Gurjaú, principalmente o mês de novembro. Desta forma, foram realizadas várias simulações com o AcquaNet considerando várias hipóteses de operação do volume meta de Sicupema envolvendo sempre seu último trimestre.

Após várias simulações, encontrou-se a melhor relação no cenário em que o volume meta operou Sicupema em 80% do seu volume útil em Outubro, 40% em Novembro e 20% em Dezembro, adotando a nomenclatura meta-842. A Figura 71 mostra a análise comparativa da variação das vazões efluentes do último trimestre de algumas das tentativas, onde o volume meta-1 o reservatório opera sempre cheio e a meta-642 ele opera com 60% do seu volume útil em Outubro, 40% em Novembro e 20% em Dezembro.

Figura 71-Variação vazões efluentes Sicupema



A Tabela 45 mostra o somatório das vazões efluentes do último trimestre de cada ano para o período simulado (1933-2014) no reservatório sicupema. Considerando as três simulações de volume meta, percebe-se que a meta 842 se constitui na melhor regra de operação para o reservatório Sicupema.

Tabela 45-Somatório das vazões efluentes no período simulado

Volume meta	Out (m³/s)	Nov (m³/s)	Dez (m³/s)
1	38.96	31.31	16.77
642	56.1	33.98	18.89
842	46.31	41.21	21.14

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho realizou uma análise da vulnerabilidade do sistema Pirapama diante das variabilidades climáticas, sobretudo em eventos de seca, a partir da integração entre os modelos hidrológico e de simulação foi possível estabelecer as disponibilidades hídricas da bacia e propor regras de operação, visando principalmente, evitar as condições de racionamento e colapso do reservatório Pirapama.

6.1 Conclusões

A simulação da disponibilidade hídrica da bacia do rio Pirapama, confrontando as ofertas com as demandas hídricas, permite subsidiar o estudo de outorga e planos de recursos hídricos que envolvam a bacia.

Os volumes simulados do reservatório Pirapama apresentaram, em período adequado, uma boa aderência aos volumes monitorados, permitindo-se analisar o comportamento do reservatório frente aos 82 anos simulados.

A simulação das curvas-guia apresentaram resultados promissores, quando aplicadas ao reservatório Pirapama, pois praticamente evitou a condição de racionamento, caindo para apenas 0.4 % do tempo, e eliminou a condição de colapso.

As CAR, também se mostraram promissoras na medida em que se eliminou a condição de colapso e reduziu a de racionamento para 7 meses (ou 0,7% do tempo), contemplando a simulação de várias vazões de retiradas frente a um biênio de vazões críticas afluentes ao reservatório.

A regra de operação baseada nas curvas-guia, comparada com as CAR adaptadas se mostrou mais eficiente e eficaz no aspecto quali-quantitativo, na medida em que se demonstrou mais sensível à variabilidade climática e sua metodologia permitiu estabelecer níveis de armazenamento durante todo o ano, enquanto as CAR, parte do ano ficou sem alternativas de regras operacionais.

Dentro da visão sistêmica da bacia do rio Pirapama foi simulado o reservatório Sicupema, visando o aporte de água no reservatório Gurjaú nos períodos de vazões mínimas. Por meio das simulações com o modelo Acquanet, foi possível identificar os volumes meta mais adequados para os meses críticos de armazenamento.

A simulação das disponibilidades hídricas da bacia do Pirapama associada às regras de operação aplicadas aos reservatórios de abastecimento mostraram-se importantes ferramentas de gestão para o enfrentamento dos eventos de seca, proporcionando ao gestor antecipar-se aos eventuais problemas e servindo de base às tomadas de decisão que envolvem o planejamento de recursos hídricos.

6.2 Recomendações

Com base nos resultados obtidos e nas conclusões expostas anteriormente, são feitas a seguir algumas recomendações que visam contribuir para o desenvolvimento de novas pesquisas tanto na bacia hidrográfica do rio Pirapama, quanto na aplicação do AcquaNet como sistema de simulação em outros reservatórios, são elas:

Promover a integração de modelos hidrológicos e de simulação visando à otimização na operação de reservatórios;

Acoplar modelos de simulação e otimização a sistemas de suporte à decisão fornecendo um instrumento eficiente para auxiliar grupos de tomada de decisões na busca das melhores alternativas, bem como realizar a análise das consequências e impactos das decisões tomadas.

Ampliar a utilização do modelo AcquaNet para diferentes reservatórios, proporcionando a comparação de resultados e o compartilhamento de informações;

Realizar novos estudos para a bacia do rio Pirapama visando à comprovação dos parâmetros adotados neste trabalho, tendo em vista que os resultados mostraram que o modelo SMAP obteve índices de correlação animadores;

Associar novos estudos envolvendo modelos de previsão climática acoplado a modelos de simulação a fim de indicar a flexibilização das curvas-guia na operação de sistemas de reservatórios visando mitigar impactos de cenários futuros de extremos climáticos.

Agregar a este trabalho outras estratégias de resposta à seca, que não só a redução do consumo, tendo em vista a importância de medidas mitigadoras, tais como: (a) inventário de fontes alternativas de abastecimento; (b) redução de perdas de água no transporte e distribuição; (c) campanhas educativas de redução de consumo; e melhorias na eficiência do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. A. Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables. New York: Dover, 1965. 1046 p.

ALBUQUERQUE, A. S. O. Avaliação da Influência das Mudanças Climáticas na Operação Ótima de Sistema de Reservatórios com Múltiplos Fins. 2008. 1v. 141p. Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco - Engenharia Civil.

ALLEN, R. G. et al. Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LYSIMETRY, 1991, New York. Proceedings... New York: ASCE, 1991. 456 p.

ALMEIDA, C.N. modelagem integrada de recursos hídricos com apoio de um sistema de informações geográficas. 147p. Tese (Doutorado)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2006

ANA-AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: resultados por estado. Engecorps/Cobrape, Brasília, v.2, 2010. Disponível em <<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/Download.aspx>> Acesso em 04 dez. 2013.

_____. Atlas Nordeste - Abastecimento Urbano de Água - Ministério do Meio Ambiente; Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos – SPR. Brasília – DF; 2006.

_____. Plano de recursos hídricos da bacia do rio Piranhas-Açu. RP-01-Relatório de programação. 2012. 88p. Disponível em: <<http://piranhasacu.ana.gov.br/produtos/RP01.pdf>>. Acesso em : 11.Jul.2014.

ANDRADE, G. O. De; LINS, R. C. Pirapama: um estudo geográfico e histórico. Recife: FUNDAJ/Ed. Massangana. 1984.

APAC- AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMAS. Relatório de situação de recursos hídricos do Estado de Pernambuco 2011/2012 – Recife: 2013.

_____. Sistema de Geoinformação Hidrometeorológico de Pernambuco. Disponível em: <<http://www.apac.pe.gov.br/sighpe/#>> Acesso em 02 jan. 2015.

ASSIS, H. M. B de. Atividades Impactantes sobre o Meio Ambiente da Região Metropolitana do Recife. Recife: CPRM. 2001.

AZAMBUJA, C. Gerenciamento integrado de quantidade e qualidade de água. 251p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. SP. 2004.

BARROS, F.V.F. Uso de Algoritmos Evolucionários na Calibração de Modelos Hidrológicos e na Operação de Sistemas de Reservatórios. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2007. 198p.

BRAGA, B., BARBOSA, P. S. F., NAKAYAMA, P. T. 1998. Sistemas de Suporte à Decisão. RBRH – Revista Brasileira de recursos Hídricos, volume 3, n 3, Jul/Set 1998.

BRAGA, A.C.F.M., SILVA, R.M. DA., SANTOS, C. A. G., GALVÃO, C. O., NOBRE, P. Downscaling of a global climate model for estimation of runoff, sediment yield and dam storage: A case study of Pirapama basin, Brazil. *J. Hydrol.* 498, 46-58. 2013.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Manual de orientação para cadastramento das diversas formas de abastecimento de água para consumo humano. Brasília: Ministério da Saúde, 2007. 40 p. – (Série A. Normas e Manuais Técnicos).

BRAVO J. M.; COLLISCHONN W.; PILAR. J. V.; TUCCI. C. E. M. Otimização de regras de operação de reservatórios utilizando um algoritmo evolutivo. I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste. Curitiba. 2006

BUCHIANERI, V. C. Geração da série histórica de vazão por meio do modelo SMAP: subsídio para o plano de manejo da bacia do Rio Grande de Ubatuba. 124p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba. SP. 2004

CARDOSO, G. B. B., MARTINS. E. S. P. R., SOUZA FILHO, F. DE A. De. Uso de otimização/simulação e previsão de aflúncias na operação tática dos reservatórios do sistema Jaguaribe-Metropolitano – CE. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 11 n.4, 175-186. 2006.

CARRIJO, I. De. B. ; REIS, L. F. R. ; CHEUNG, P. B. ; SOARES, A. K. ; SILVA, F. G. B. Da. Otimização da Operação de Sistemas de Distribuição de Água utilizando Algoritmos Genéticos Multiobjetivo. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003, Curitiba. Anais eletrônicos, 2003.

CARVALHO, M. A. Sistema de Suporte a Decisão para Alocação de Água em Projetos de Irrigação. 219p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

CHANG, F.J., CHEN, L., CHANG, L.C. Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms. *Hydrological Processes* 19 (11), 2277–2289. 2005.

CHANG, F.J., WANG, K.W. A systematical water allocation scheme for drought mitigation. *Journal of Hydrology*. 507, 124–133. 2013.

CHEN, H., GUO, S.L., XU, C.Y. Historical temporal trends of hydro-climatic variables and runoff response to climate variability and their relevance in water resource management in the Hanjiang basin. *Journal of Hydrology* 334, 171–184. 2007b.

CHEN, L., MCPHEE, J., YEH, W.W.-G. A diversified multi-objective GA for optimizing reservoir rule curves. *Advances in Water Resources* 30 (5), 1082–1093. 2007a.

CHENG, C.T., WANG, W.C., XU, D.M., et al. Optimizing hydropower reservoir operation using hybrid genetic algorithm and chaos. *Water Resources Management* 22 (7), 895–909. 2008.

COMPESA- Companhia Pernambucana de Saneamento. Abastecimento de água. Disponível em: <<http://www.compesa.com.br/saneamento/abastecimentodeagua>>. Acesso em: 11. Jul.2014.

CPRH. Diagnóstico socioambiental da área piloto sub-bacia riacho dos macacos. Relatório parcial. Recife, 2000.

CPRH. Diagnóstico Socioambiental e Zoneamento Ecológico Econômico Costeiro do Litoral Sul de Pernambuco. Recife, 1999.

CPRH/DFID. Diagnóstico Ambiental Integrado da Bacia do Pirapama. Recife, 1999.

CPRH/DFID. Estudo dos recursos hídricos da bacia do rio Pirapama. Recife: Companhia Pernambucana de Meio Ambiente/Department for International Development. 1998.

CPRM, Projeto Geobank. 2015. Disponível em: < <http://geobank.sa.cprm.gov.br/>> .Acesso em: 22 abr. 2015

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL-DNPM /GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO. Plano Diretor de Mineração para a Região Metropolitana do Recife. Recife, 1995

DOMINGOS, S. I. S. Análise do índice de seca Standardized Precipitation Index (SPI) em Portugal Continental e sua comparação com o Palmer Drought Severity Index (PDSI). 2006. 62 p. Tese (Licenciatura em Meteorologia) - Universidade de Lisboa, Portugal.

DOUGHERTY, D.E., MARRYOTT, R.A. Optimal groundwater management 1. Simulated annealing. *Water Resour. Res.* 1991. 27 (10), 2493e2508.

DUAN, Q., SOROOSHIAN, S., GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resour. Res.* 1992. 28 (4), 1015e1031.

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. NETO M. B. DE O. ; SILVA, M.S.L.Da. Gleissolos. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_mata_sul_pernambucana/arvore/CONT000gt7eon7k02wx7ha087apz2kfhpkns.html# Acesso em: 13.04.2015.

_____. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Índices para a quantificação da seca. Diego Simões Fernandes et al. –Santo Antônio de Goiás : Embrapa Arroz e Feijão, 2009.48 p. - (Documentos / Embrapa Arroz e Feijão, ISSN 1678-9644 ; 244)

FREITAS, M. A. S.; FILHO J. G. C. G.; Curvas de aversão ao risco para os reservatórios Armando Ribeiro Gonçalves e Curemas-Mãe D'Água . XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.São Paulo.2007

FUNDAÇÃO DE APOIO À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO-FUSP. Plano da bacia hidrográfica do Alto Tietê.Relatório final.2009.

GAMA, A. M. C. F. Avaliação da agenda 21 da bacia hidrográfica do Rio Pirapama.Recife: /s.e./, 2003. (Dissertação de Mestrado/PPGGPA/UFPE).

GEORGAKAKOS A.P., YAO, H., KISTENMACHER, M., GEORGAKAKOS, K.P., GRAHAM, N.E., CHENG, F.-Y. , SPENCER, C., SHAMIR, E. Value of adaptive water resources management in Northern California under climatic variability and change: Reservoir management. *Journal of Hydrology* 412–413, 34–46.2012.

GLOVER, F. Heuristics for Integer Programming using surrogate constraints.*Decis. Sci.* 1977.8, 156e166.

GOES, F. A. Gestão de Reservatórios com Sistema de Apoio à Decisão Espacial: o Caso do Açude Castanhão.Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia.Fortaleza, 2012.166p.

GOLDBERG, D.E., KUO, C.H. Genetic algorithms in pipeline optimization. *J. Comput. Civ. Eng.*.1987.

GUO, X., HU, T., ZHANG, T., LV, Y. Bilevel model for multi-reservoir operating policy in inter-basin water transfer-supply project. *Journal of Hydrology.* 424–425, 252– 263. 2012.

GUO, Y., WALTERS, G.A., SAVIC, D.A. Optimal design of storm sewer networks: past, present and future. In: Proc., 11th Int. Conf. on Urban Drainage (ICUD 2008). IWA Pub., London. 2008.

HASTENRATH, S., GREISCHAR, L. Further Work on the Prediction of Northeast Brazil Rainfall Anomalies. *Journal of Climate*, v. 6, p. 743-758, 1993.

HAYES, M. J. What is Drought. National Drought Mitigation Center. 2006. EUA. Disponível em <http://www.drought.unl.edu/whatis/indices.htm>. Acesso em Nov. 2010.

HAYLOCK, M. R., PETERSON, T. C., ALVES, L. M., AMBRIZZI, T., ANUNCIACÃO, Y. M. T., BAEZ, J., BARROS, V. R., BERLATO, M. A., BIDEGAIN, M., CORONEL, G., GARCIA, V. J., GRIMM, A. M., KAROLY, D., MARENGO, J. A., MARINO, M. B., MONCUNILL, D. F., NECHET, D., QUINTANA, J., REBELLO, E., RUSTICUCCI, M., SANTOS, J. L., TREBEJO, I., VINCENT, L. A. Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. *Journal of Climate*, v. 19, p. 1490-1512, 2006.

HINCAL, O., ALTAN-SAKARYA, B., GER, A.M. Optimization of multi-reservoir systems by genetic algorithm. *Water Resources Management* 25 (6), 1465–1487. 2011.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário Brasileiro. 2006.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico Brasileiro. 2010.

LABADIE, J. W. MODSIM: River basin network flow model for conjunctive stream-aquifer management. Fort Collins: Department of Civil Engineering, Colorado State University, 1988. 55p

LERMA, N., PAREDES-ARQUIOLA, J., ANDREU J., SOLERA A., SECHI, G.M. Assessment of evolutionary algorithms for optimal operating rules design in real Water Resource Systems. *Environmental. Journal Modelling e Software* 69, 425-436.2015.

LI, X., GUO, S., LIU, P., CHEN, G. Dynamic control of flood limited water level for reservoir operation by considering inflow uncertainty. *Journal of Hydrology* 391, 124–132. 2010.

LIU, P., CAI, X.M., GUO, S.L. Deriving multiple near-optimal solutions to deterministic reservoir operation problems. *Water Resources Research* 47 (W08506), 1–20. 2011b. <http://dx.doi.org/10.1029/2011WR010998>.

LIU, P., GUO, S.L., XIAO, Y., et al. Derivation of aggregation-based joint operating rule curves for cascade hydropower reservoirs. *Water Resources Management* 25 (3), 3177–3200. 2011a.

LIU, P., GUO, S.L., XIONG, L.H., et al. Deriving reservoir refill operating rules by using the proposed DPNS model. *Water Resources Management* 20 (3), 337–357. 2006.

LIU, X.Y., GUO, S.L., LIU, P., et al. Deriving optimal refill rules for multipurpose reservoir operation. *Water Resources Management* 25, 431–448.2011c.

LOPES, J.E.G.; BRAGA JR., B.P.F.; CONEJO, J.G.L. Simulação hidrológica: Aplicações de um modelo simplificado. In: *Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, v.2, 42-62, Fortaleza.1981.

MACHADO, R.E. e VETTORAZZI, C.A. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, SP. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:735-741, 2003.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to the time scales. In: *CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY*, 8., 1993, Anaheim, CA. Proceedings. Boston: American Meteorological Society, 1993. p. 179-184.

MEDEIROS, L. C. FERREIRA, N. C. FERREIRA, L. G. Avaliação de Modelos Digitais de Elevação para Delimitação Automática de Bacias Hidrográficas. *Revista Brasileira de Cartografia* n61/02, 2009. p. 138-151

MEDINA A. I. de M.; Dantas. M. E.; Bastos M. L. L.; Shinzato. E. Projeto Porto Seguro-Santa Cruz Cabralia : geomorfologia, avaliação da vulnerabilidade à erosão e diagnóstico geoambiental /– Salvador : CPRM/SUREG/SA, 2000. 87 p. : il.; mapas.

MELO, C. R. Análise do eixo leste da transposição do Rio São Francisco face aos cenários de uso previstos . Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2010. 178p.

MENDES, J.;MAIA, R.; VIVAS, E. Monitorização de Secas na Margem esquerda do Guadiana. Revista Recursos Hídricos, Vol. 32, Nº 2, 31-43, Novembro de 2011.

MIRANDA, E. E. et al, (Coord.). Brasil em Relevô. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 12 fev 2014.

MO, K.C. Model-Based Indices over the United States. Journal of Hydrometeorology, Vol. 9, pp. 1212- 1230. 2008.

MONTENEGRO, S. M. G. L., CABRAL, J. J. S. P., PAIVA, A. L. R., MONTENEGRO, A. A.A., DEMETRIO, J. G. A., CAVALCANTE, G. L. Águas Subterrâneas na Zona Costeira da Planície do Recife (PE): Evolução da Salinização e Perspectivas de Gerenciamento. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v 14, n.3, p. 81-93, Jul/Set 2009.

MULETA, M.K., NICKLOW, J.W. Decision support for watershed management using evolutionary algorithms. J. Water Resour. Plann. Manag. 2005.131 (1), 35e44.

MURTHY, Z.V.P., VENGAL, J.C. Optimization of a reverse osmosis system using genetic algorithm. Sep. Sci. Technol. 2006. 41 (4), 647e663.

NASCIMENTO, B. B.Vulnerabilidade do abastecimento de água potável da Região Metropolitana do Recife: intermitência e poluição.2003.250f.Dissertação (Mestrado em Gestão e Políticas ambientais).Universidade de Pernambuco.Recife.

NASCIMENTO, L.S., REIS Jr.,D.S., MARTINS, E.S.. Avaliação do algoritmo evolucionário MOPSO na calibração multiobjetivo do modelo SMAP no Estado do Ceará. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH. 2007. São Paulo-SP.

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River Flow Forecasting Through Conceptual Models, Part I: A Discussion of Principles, Journal of Hydrology,1970.10 (3), pp. 282–290.

NDMC, National drought mitigation center. What is drought? Understanding and defining drought. University of Nebraska-Lincoln, 2006. Disponível em: <<http://drought.unl.edu/DroughtBasics.aspx>> Acesso em: 18 de mar. 2014.

NICKLOW, J., REED, P., SAVIC, D., DESSALEGNE, T., HARRELL, L., CHAN-HILTON, A., KARAMOUZ, M., MINSKER, B., OSTFELD, A., SINGH, A., ZECHMAN. State of the

art for genetic algorithms and beyond in water resources planning and management. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 2009.136 (4), 412e432.

NÓBREGA, R. S., FARIAS, R. F. DE L., SANTOS, C. A. C. DOS. Variabilidade temporal e espacial da precipitação pluviométrica em Pernambuco através de índices de extremos climáticos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.30, n.2, 171 - 180. 2015.

OLIVEIRA, R., LOUCKS, D.P. Operating rules for multi-reservoir systems. *Water Resources Research* 33 (4), 839–852. 1997.

OSTADRAHIMI, L., MARINO, M.A., AFSHAR, A. Multi-reservoir operation rules: multi-swarm PSO-based optimization approach. *Water Resources Management* 26 (5), 407–427. 2012.

PANOFSKY, H. A.; BRIER, G. W. Some applications of statistics to meteorology. University Park: Pennsylvania State University, 1958. 224 p.

PERNAMBUCO. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente de Pernambuco (SECTMA). Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco– Documento Síntese. Recife, 1998. 215p.

_____.Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente de Pernambuco (SECTMA). Plano de aproveitamento dos Recursos Hídricos da Região Metropolitana de Recife, Zona da Mata e Agreste Pernambucano –PARH. 2005

_____.Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente de Pernambuco (SECTMA). Atlas de Bacias Hidrográficas de Pernambuco. Recife. 2006.

_____.Secretaria de Recursos Hídricos de Pernambuco (SRH-PE). Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA). Manual de Operações do Projeto de Sustentabilidade Hídrica (*PSH-PE*). Recife, v. 1, p. 8, 2009. Disponível em <http://www.sirh.srh.pe.gov.br/site/attachments/article/309/MANUAL%20DE%20OPERA%C3%87OES_PSHPE.pdf> Acesso em 08 jun. 2015.

PFALTZGRAFF, P. A. S. et al. Sistema de Informações Geoambientais da Região Metropolitana do Recife-SIGA. Recife: CPRM. 2003.119p.

PORTO JUNIOR, J. F. Uso de Modelo Matemático no Planejamento Hidroagrícola – 2005.

PORTO, R. L. L. et al. Sistema de suporte a decisão para análise de sistemas de recursos hídricos, In: SILVA, R. C. V. et al. Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 6. Porto Alegre – RS. ABRH/UFRGS, 2003, Cap. 4. p. 93 – 240.

PORTO, R. L. L. Modelos de Simulação e de Rede de Fluxo. Cap 4 do Livro: Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. Organizado por Rubem La Laina

Porto, escrito por Luiz Gabriel T. de Azevedo –. Editora UFRGS – ABRH, Porto Alegre – 1997.

PORTO, R. L. L.; AZEVEDO, L. G. T. Sistemas de suporte a decisões aplicadas a problemas de recursos hídricos. In: TÉCNICAS quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/ UFRGS — ABRH, 2002.

PORTO, R. L. L.; MÉLLO JUNIOR, A.V., ROBERTO, A. N. Construção de curvas de aversão ao risco utilizando o SSD AcquaNet. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. João Pessoa - PB, 2005. ABRH.

PRESS, W. H.; FLANNERY, B. P.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T. Numerical recipes in C. Cambridge: Cambridge University Press, 1988. 768 p.

REDDY, M.J., KUMAR, D.N. Multi-objective particle swarm optimization for generating optimal trade-offs in reservoir operation. Hydrological Processes 21 (21), 2897–2909. 2007.

RODELLA, L. M. A.; Modelo de programação linear para apoio a decisão na distribuição de água de sistemas integrados de abastecimento. Recife. 2014.

SANTOS, M. S. Caracterização espaço-temporal de secas utilizando ondaletas e o standardized precipitation index: uma aplicação para a parcela mineira da bacia do rio São Francisco. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2011.148p.

SAVIC, D.A., WALTERS, G.A. Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. J. Water Resour. Plan. Manag. 1997. ASCE 23 (2), 67e77.

SCHARDONG, A. Aplicação de técnicas de Programação Linear e extensões para otimização da alocação de Água em Sistemas de Recursos Hídricos, utilizando métodos de Pontos Interiores. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SERRA, D. da S., 2014. Modelação de secas. Aplicação a casos de estudo. Mestrado. Instituto Superior Técnico de Lisboa. Disponível em: <<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395146394241/tese.pdf>> Acesso em 06 ago. 2015.

SHUKLA, S., WOOD, A.W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. Geophysical Research Letters. Vol. 35, L02405. 2008.

SILVA, H.T.D.DA. Análise dos Impactos da Utilização das Curvas de Aversão a Risco no Modelo de Planejamento da Operação Energética de Médio Prazo. Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica. 2012.

SILVA, P.M.O.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M. e COELHO, G. Modelagem da hidrografa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. R. Bras. Eng. Agric. Amb., 12:258-265, 2008.

SILVA, R. M. da. Previsão hidrossedimentológica numa bacia periurbana através do acoplamento de modelos climáticos e hidrológicos. Dissertação (Mestrado). João Pessoa: 2005. 171p.

SOUZA FILHO, F. de A. de.; SILVA, S. M. O. da; JÚNIOR, L. M. de A.; CID, D. A. C.; Plano de gestão de secas em cidades: sistema Jucazinho. Fortaleza. 2014

TAKEUCHI, K.; KUNDZEWICZ, Z. W. Sustainability and reservoirs. Sustainable Reservoir Development and Management. Wallingford, UK : International Association of Hydrological Sciences. 1998.

THOM, H. C. S. Some methods of climatological analysis. Geneva: World Meteorological Organization, 1966. 53 p. (WMO. Technical note, 81).

TUNDISI, J. G. Água no século XXI: enfrentando a escassez. São Carlos: Rima, 2003. 156 p.

VITAL, S. R. de O.; SILVEIRA, T. de A.; ALENCAR, H. M. Q. de; FERREIRA, B. Uso de imagem SRTM (shuttle radar topography mission) para o mapeamento geomorfológico na microbacia do açude Taperoá ii, Paraíba, Brasil. In: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife-PE, 2010.

WARDLAW, R., SHARIF, M. Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation. Journal of Water Resources Planning and Management 125 (1), 25–33. 1999.

WILHITE, D. A.; GLANTZ, M.H. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. In: WILHITE, D. A.; EASTERLING, W. E. (Ed.). Planning for drought: toward a reduction of societal vulnerability. Boulder: Westview Press, 1987. p. 11-27.

WURBS, R. A. Modeling and analysis of reservoir system operations. Prentice-Hall PTR. Upper Saddle River. New Jersey. 1996. 356 p.

ZHANG, J., LIU, P., WANG, H., LEI, X., ZHOU, Y. A Bayesian model averaging method for the derivation of reservoir operating rules. Journal of Hydrologic 528, 276–285. 2015.

ZHOU, Y., GUO, X. Incorporating ecological requirement into multipurpose reservoir operating rule curves for adaptation to climate change. Journal of Hydrologic 498, 153–164. 2013.

APÊNDICES

1. APÊNDICE A – Mapa de falhas

Na construção do mapa de falhas, as células em azul representam que não houve falha naquele mês, as em branco, que nenhum dado foi observado em tal ano; as células cinza com números representam a quantidade de meses com falhas e as células amarelas representam que não foi levantado as falhas por não atender a alguma das considerações elencadas no item 4.2.1. O mês foi considerado com falha quando não existe observação em qualquer número de dias que o compõem.

Apêndice A- Tabela 2-Mapa de falhas da fluviométrica

Posto Fluviométrico	Código	Lat	Long	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	
Destilaria JB	39190000	-8.2250	-35.2850															5			1	1	1	2	10								
Arandu	39190500	-8.2244	-35.2842															8															
Destilaria JB-II	39190800	-8.2233	-35.2850																												5	10	
Ponte PE-35	39191000	-8.2425	-35.2647															7				1	4	10	2		2				2	10	
Cachoeira Tapada	39192000	-8.2636	-35.2597															3					3			1						10	
Destilaria Inexport	39195000	-8.2822	-35.1567															3					1	1	9	2						1	10
Pirapama	39200000	-8.2833	-35.0661	3				1	1															1						1	3	10	

2. APÊNDICE B – Outorgas de águas superficiais na bacia do rio Pirapama

Apêndice B - Tabela 1- Processos de Outorgas existentes na bacia do Pirapama

Nº APAC	Requerente	Vazão Outorgada (m³/dia)	Finalidade de uso	Sub-bacia / Reservatório
155-S/99	DESTILARIA SIBERIA LTDA.	5000,00	Ab. Industrial	1
391-S/01	DESTILARIA J.B LTDA	216000,00	GEE	1
431-S/01	COMPANHIA INDUSTRIAL PIRAPAMA	346896,00	GEE	1
963-S/05	COMPANHIA ALCOOQUIMICA NACIONAL LTDA	1641,60	Irrigação	1
964-S/05	COMPANHIA ALCOOQUIMICA NACIONAL LTDA	1642,00	Irrigação	1
1690-S/10	PIRAPAMA BIOENERGIA LTDA	3700,00	Ab. Industrial	1
453-S/01	COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO - COMESA	8654,69	Ab. Humano	1
1384-S/08	ACUMULADORES MOURA S/A	240,00	Ab. Industrial	2
1452-S/08	CACHOOL COMERCIO E INDUSTRIA S/A	33600,00	Ab. Industrial	2
1460-S/08	A & G ENERGIA EMPREENDIMENTOS LTDA. ME	200,00	Ab. Industrial	2
2509-S/14	CACHOOL COMERCIO E INDUSTRIA S/A	42,00	Ab. Industrial	2
271-S/00	NERIVAL TAVARES FILHO	231,00	Irrigação	Pirapama
954A-S/05	COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO - COMESA	92016,00	Ab. Humano	Pirapama
954B-S/05	COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO - COMESA	443.232,00	Ab. Humano	Pirapama
1667-S/10	CONSÓRCIO CQG/CNO/OAS	50,00	Ab. Industrial	Pirapama
713-S/03	COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO - COMESA	3216,00	Ab. Humano	Pirapama
1254-S/07	CONSORCIO CQG/CNO/AG/CBM	120,00	Ab. Industrial	4
1253-S/07	CONSORCIO CQG/CNO/AG/CBM	30,00	Ab. Industrial	4
1543-S/09	PERNAMBUCO CONSTRUTORA EMPREENDIMENTO LTDA	10,00	Ab. Industrial	4
1252-S/07	CONSORCIO CQG/CNO/AG/CBM	120,00	Ab. Industrial	4
2082-S/13	COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO - COMESA	144,00	Ab. Humano	4
1015-S/06	RICARDO COELHO CAMPOS	1,50	Ab. Industrial	4
1189-S/06	LIMPOPLUS LTDA	80,00	Ab. Industrial	7
069-S/99	M & G FIBRAS RESINAS LTDA	16800,00	Ab. Industrial	7
031-S/98	LANXESS ELASTÔMEROS DO BRASIL	24000,00	Ab. Industrial	7
262-S/00	ISRAEL DO MONTE CARVALHO	7,42	Ab. Industrial	7
267-S/00	ASSOCIAÇÃO DOS TRABALHADORES INDEPENDENTES DO ASSENTAMENTO ARARIBA DE BAIXO	594,72	Irrigação	7
876-S/04	BAUMINAS QUÍMICA N/NE LTDA	150,00	Ab. Industrial	7

(Continuação)

Nº APAC	Requerente	Vazão Outorgada (m³/dia)	Finalidade de uso	Sub-bacia / Reservatório
1597-S/09	RECIFE ENERGIA S/A	3000,00	Ab. Industrial	7
1705-S/10	CONSORCIO CQG/CNO/AG/CBM	50,00	Ab. Industrial	7
2249-S/13	SULFNOR SULFATOS DO NORDESTE LTDA	150,00	Ab. Industrial	7
024-S/01	USINA BOM JESUS S/A	2354,00	Ab. Industrial	7
070-S/01	CORNS PRODUCTS BRASIL	3600,00	Ab. Industrial	7
2144-S/13	GLG EMPREENDIMENTOS LTDA	60,00	Irrigação	7
2416-S/14	INGREDION BRASIL INGREDIENTES INDUSTRIAIS LTDA	600,00	Ab. Industrial	7
537-S/02	COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO - COMPESA	80784,00	Ab. Humano	Gurjaú
955-S/05	COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO - COMPESA	92016,00	Ab. Humano	Gurjaú
2144-S/13	GLG EMPREENDIMENTOS LTDA	60,00	Irrigação	Gurjaú
1994-S/12	ASFAT SERVIÇOS LTDA.	15,00	Ab. Industrial	Gurjaú

3. APÊNDICE C – Parâmetros e gráficos da modelagem hidrológica

Apêndice C- Tabela 1-Parâmetros de calibração do SMAP – Estação fluviométrica 39192000

Parâmetro	Símbolo	Valor
Capacidade de saturação do solo (mm)	sat	660
Taxa de geração de escoamento superficial	KES	0,4
Taxa inicial de umidade da camada não saturada (%)	TU0	25
Coeficiente de recarga (%)	crec	50
Expoente da Evaporação (ad)		1,5
Vazão de base inicial [m ³ /s]	EBin	0,86
Coeficiente mensal de recessão de base (%)	K	50
Temperatura Média Anual (°C)		25

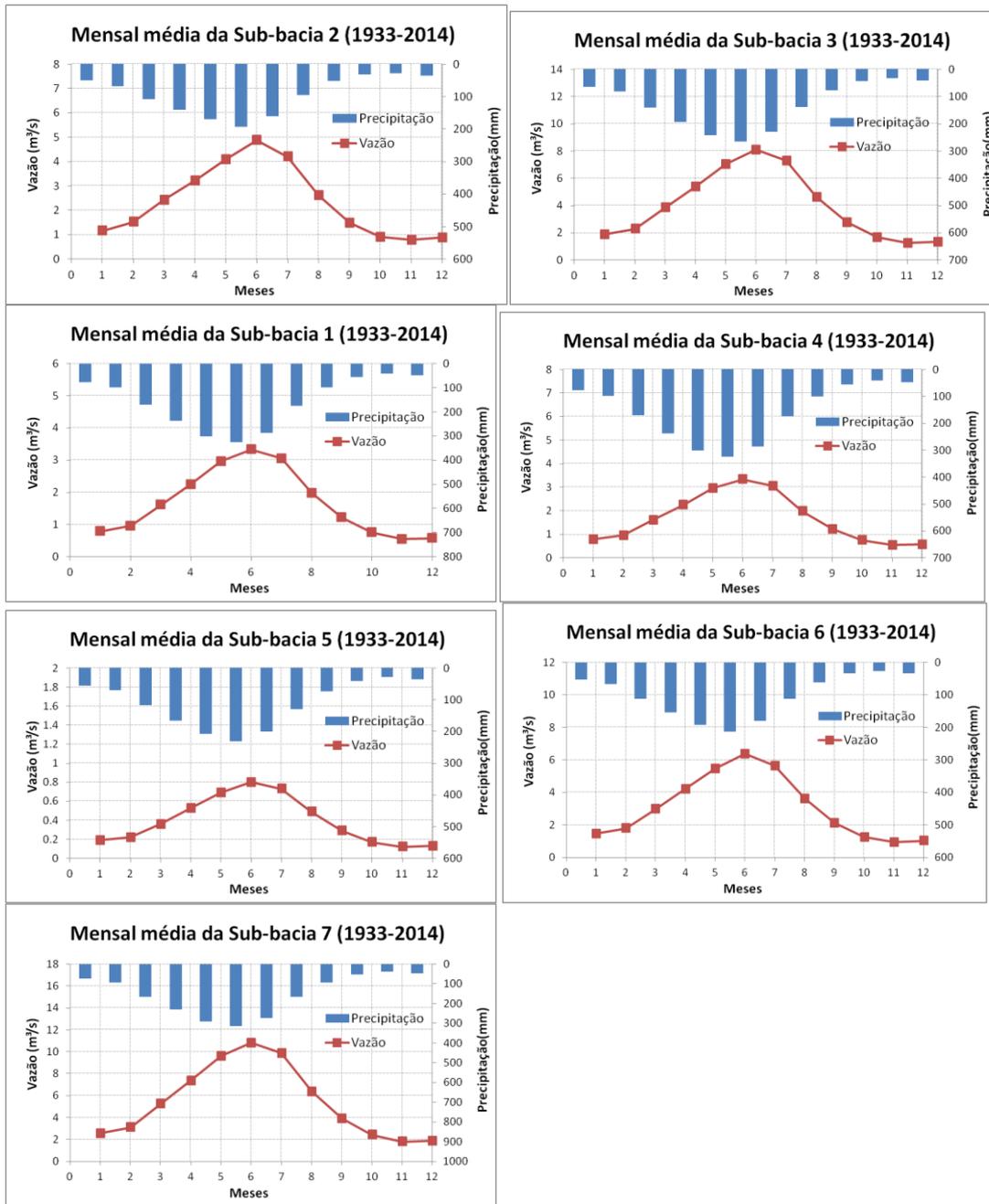
Apêndice C- Tabela 2-Parametros de calibração do SMAP – Estação fluviométrica 39195000

Parâmetro	Símbolo	Valor
Capacidade de saturação do solo (mm)	sat	800
Taxa de geração de escoamento superficial	KES	0,6
Taxa inicial de umidade da camada não saturada (%)	TU0	25
Coeficiente de recarga (%)	crec	50
Expoente da Evaporação (ad)		1,2
Vazão de base inicial [m ³ /s]	EBin	1,15
Coeficiente mensal de recessão de base (%)	K	50
Temperatura Média Anual (°C)		25

Apêndice C- Tabela 3-Parâmetros de calibração do SMAP – Estação fluviométrica 39200000.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Capacidade de saturação do solo (mm)	sat	800
Taxa de geração de escoamento superficial	KES	0,4
Taxa inicial de umidade da camada não saturada (%)	TU0	25
Coeficiente de recarga (%)	crec	50
Expoente da Evaporação (ad)		1,6
Vazão de base inicial [m ³ /s]	EBin	0,86
Coeficiente mensal de recessão de base (%)	K	50
Temperatura Média Anual (°C)		25

APÊNDICE C- Figura 1-Gráfico de precipitações e vazões mensais médias calculadas para as sub-bacias de 1 a 7.



4. APÊNDICE D – Roteiro de Cálculo do SPI no Matlab

APÊNDICE D- Figura 1-Script SPI Matlab

```

% Programmed by Taesam Lee, Dec.03,2009
% INRS-ETE, Quebec, Canada
function [Z]=SPI(Data,scale,nseas)
%Standardized Precipitation Index
% Input Data
% Data : Monthly Data vector not matrix (monthly or seasonal
precipitation)
% scale : 1,3,12,48
% nseas : number of season (monthly=12)
% Example
% Z=SPI(gamrnd(1,1,1000,1),3,12); 3-monthly scale,
% Notice that the rest of the months of the first year are
removed.
% eg. if scale =3, first year data 3-12 SPI values are not
estimated.

%if row vector then make column vector
%if (sz==1) Data(:,1)=Data;end
erase_yr=ceil(scale/12);

% Data setting to scaled dataset
A1=[];
for is=1:scale, A1=[A1,Data(is:length(Data)-scale+is)];end
XS=sum(A1,2);

if(scale>1), XS(1:nseas*erase_yr-scale+1)=[]; end

for is=1:nseas
    tind=is:nseas:length(XS);
    Xn=XS(tind);
    [zeroa]=find(Xn==0);
    Xn_nozero=Xn;Xn_nozero(zeroa)=[];
    q=length(zeroa)/length(Xn);
    parm=gamfit(Xn_nozero);
    Gam_xs=q+(1-q)*gamcdf(Xn,parm(1),parm(2));
    Z(tind)=norminv(Gam_xs);
end

%Gamma parameter estimation and transform

```