



O NEXO ÁGUA-ENERGIA-ALIMENTO NA OPERAÇÃO DE SISTEMAS HIDROTÉRMICOS: ESTUDO DE CASO DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

Ana Carolina Peixoto Deveza

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Planejamento Energético.

Orientador: André Frossard Pereira de Lucena

Rio de Janeiro

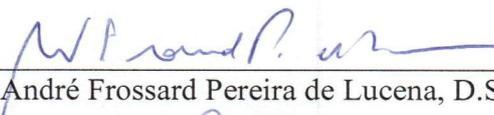
Março de 2019

O NEXO ÁGUA-ENERGIA-ALIMENTO NA OPERAÇÃO DE SISTEMAS
HIDROTÉRMICOS: ESTUDO DE CASO DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

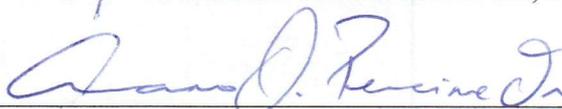
Ana Carolina Peixoto Deveza

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Examinada por:



Prof. André Frossard Pereira de Lucena, D.Sc.



Prof. Amaro Olimpio Pereira Junior, D.Sc.



Prof. Rodrigo Flora Calili, D.Sc.



Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2019

Deveza, Ana Carolina Peixoto

O nexu água-energia-alimento na operação de sistemas hidrotérmicos: estudo de caso da bacia do rio São Francisco / Ana Carolina Peixoto Deveza: UFRJ/COPPE, 2019.

XVIII, 162 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: André Frossard Pereira de Lucena

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 147 - 156

1.Nexo água-energia-alimento. 2. Bacia São Francisco. 3. Modelagem integrada. I. Lucena, André Frossard Pereira de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

Aos meus pais, Cléa e Edson.



- Outro dia tive um sonho. De que minha pesquisa fez do mundo um lugar melhor. Sonhei que meus artigos eram lidos por milhões de pessoas. Que minhas ideias eram tão revolucionárias que inspiravam paz e igualdade para todos.

- Aí você acordou?

- Não, continuo sonhando.

AGRADECIMENTOS

À UFRJ, por muitos anos de ensino de qualidade, e à sociedade brasileira, por ainda investir na universidade pública.

Ao meu orientador André Lucena, pela confiança, pela cordialidade e pelas reflexões propostas.

Ao Rafael Kelman, pela proposta deste trabalho e pelos direcionamentos. Ao Mario Veiga, pela orientação, pelos questionamentos e por viabilizar que a semente deste trabalho floresça. À equipe da PSR, em especial: Tarcísio Castro, pelo incentivo, pela oportunidade de visitar a área de estudo e pelos ensinamentos; Silvio Binato, pela paciência, pelo suporte nas análises e pelos ensinamentos teóricos; Fernanda Thomé, pela implementação do SDDP que permitiu aplicar a metodologia proposta; Martha Carvalho, pela imensa compreensão e ensinamentos; Rodolpho Albuquerque, José Rosenblatt, Felipe Nazaré, Júlio Alberto, Celso Dall’Orto, André Granville, João Vilela e Rodrigo Novaes, pelas discussões e pelo suporte. Muito obrigada!

Aos professores Amaro Olimpio e Rodrigo Calili, por se interessarem pelo tema e por aceitarem o convite para a banca avaliadora deste trabalho. Ao Prof. Otto Rotunno, por fazer parte da banca, pela revisão cuidadosa do trabalho, mas especialmente pelo apoio que tem me levado a ir cada vez mais avante na carreira acadêmica e profissional.

Aos colegas de PPE, pelo companheirismo. Em especial ao Gerd Angelkorte, pelas consultorias agrícolas e pela revisão cuidadosa, e à Victória Santos, que me apresentou o mundo das análises integradas. Aos professores, que me inspiraram, e aos funcionários, pela ajuda constante, especialmente Sandrinha e Paulo.

Àqueles que, ainda na graduação, incentivaram minha caminhada de pesquisa: Edson Watanabe, Bia Watanabe, Márcio D’Agosto, Antônio Borges, entre tantos outros.

À Lígia Araújo e aos colegas da ANA, CCEE e ONS, pela disposição em responder meus questionamentos e fornecer dados. Ao amigo e mentor Prof. Vladimir Caramori, pelos conselhos. Aos colegas Demetrios Christofidis, Jorge Werneck, Rodrigo Vieira, Jônatas Moreira e Maria Clara Xavier pelas trocas de ideias e referências.

À minha família e aos meus amigos, por suportarem as ausências e por me incentivarem.

Aos meus pais, Edson e Cléa, pelo amor incondicional, por nunca limitarem os meus sonhos, por investirem na minha formação e por me darem todo o suporte que se poderia desejar para desenvolver este trabalho. Hoje, a COPPE é mais que o prédio branco do outro lado do canal.

À Tainá Martins, pela parceria no desenvolvimento da pesquisa, no tratamento e modelagem dos dados hidrológicos e no geoprocessamento. Pelo apoio incondicional, paciência e incentivo constantes, sem os quais o desenvolvimento desta dissertação não teria sido possível. Pela amizade, pelas viagens, pelas tirinhas, pelos ensinamentos; não há canjica no mundo que possa pagar, mas tentarei.

A Deus, pela maestria com a qual conduz a minha vida.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

O NEXO ÁGUA-ENERGIA-ALIMENTO NA OPERAÇÃO DE SISTEMAS
HIDROTÉRMICOS: ESTUDO DE CASO DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

Ana Carolina Peixoto Deveza

Março/2019

Orientador: André Frossard Pereira de Lucena

Programa: Planejamento Energético

O nexo água-energia-alimento oferece uma abordagem que cria sinergias e reduz os desequilíbrios nas trocas entre os setores envolvidos. A hidroeletricidade domina a matriz elétrica nacional. Porém, a água também é um recurso fundamental para o setor agrícola, que por sua vez depende muito de energia. Este trabalho avaliou o nexo no âmbito da operação do Sistema Interligado Nacional, tendo como estudo de caso a bacia do rio São Francisco. Através do uso de três modelos: modelo agrícola, modelo chuva-vazão SMAP e modelo de despacho SDDP, conclui-se que a representação da irrigação variando com o clima, em comparação com a usual abordagem de sazonalidade constante, traz maior probabilidade de prejuízos econômicos para o setor elétrico. A seca e as restrições de uso de água recentes na bacia apontam para a necessidade de mais ferramentas de planejamento integrado para embasar as tomadas de decisão.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

THE WATER-ENERGY-FOOD NEXUS ON HYDROTHERMAL SYSTEMS
OPERATION: THE SÃO FRANCISCO RIVER BASIN CASE STUDY

Ana Carolina Peixoto Deveza

March/2019

Advisor: André Frossard Pereira de Lucena

Department: Energy Planning

The water-energy-food nexus offers an approach that reduces *trade-offs* and creates synergies across the related sectors. Hydroelectricity dominates the national electricity mix. However, water is also a key resource for the agricultural sector, which in turn depends heavily on energy. This work evaluated the nexus in the scope of the operation of the National Interconnected System, having as a case study the São Francisco river basin. Through the use of three models, namely agricultural model, SMAP rainfall-runoff model and SDDP dispatch model, this work concludes that the representation of irrigation that varies with the climate, compared to the usual approach of constant seasonality, brings greater probability of economic losses for the power sector. The recent drought and water use constrain in the basin point to the need for more tools related to integrated planning to support decision making.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABELAS.....	xvi
LISTA DE SIGLAS.....	xvii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	4
1.2 Contribuição.....	5
1.3 Estrutura da dissertação	5
2 O NEXO E SUA APLICAÇÃO NA OPERAÇÃO DO SIN.....	7
2.1 O nexo água-energia-alimento.....	7
2.1.1 Interrelações	9
2.1.2 Análise crítica.....	13
2.2 Gestão de águas no Brasil.....	14
2.3 Uso da água para a geração de energia elétrica	17
2.3.1 Participação da hidroeletricidade no contexto brasileiro	17
2.3.2 Planejamento da operação do sistema elétrico brasileiro.....	20
2.3.3 Modelagem hidrológica como insumo para a operação.....	23
2.4 Uso da água para produção agrícola.....	25
2.4.1 Políticas de irrigação no Brasil	32
2.4.2 Métodos para cálculo de retiradas para irrigação.....	33
3 BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO	40
3.1 Características gerais	40
3.2 Usos e conflitos.....	45
3.3 Projeto de Integração do Rio São Francisco – PISF	49
3.4 Geração de hidroeletricidade	51
3.5 Produção agrícola.....	52
3.6 Condições adversas.....	59

4	PROPOSTA METODOLÓGICA	63
4.1	Modelo agrícola	65
4.1.1	Evapotranspiração	69
4.1.2	Precipitação efetiva	70
4.2	Modelo físico chuva-vazão SMAP	71
4.3	Modelo de despacho SDDP	76
4.4	Procedimento de estudo	82
5	ESTUDO DE CASO	88
5.1	Descrição do estudo de caso	88
5.2	Dados de entrada.....	90
5.2.1	Precipitação	90
5.2.2	Temperatura	93
5.2.3	Vazão natural	93
5.2.4	Características dos lotes	96
5.2.5	Modelagem energética	99
5.3	Resultados	101
5.3.1	Modelo agrícola	101
5.3.2	Modelo chuva-vazão	113
5.3.3	Modelo de despacho.....	124
5.4	Discussão dos resultados	139
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	144
6.1	Conclusões	144
6.2	Limitações e recomendações	145
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	147
	APÊNDICE A.....	157
	APÊNDICE B.....	160

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: O nexu sob o enfoque da alocação do recurso água.	8
Figura 2-2: Principais elos entre água, energia e alimento.	9
Figura 2-3: O nexu sob o enfoque das partes interessadas.	12
Figura 2-4: Composição institucional do SINGREH.	16
Figura 2-5: Evolução da capacidade instalada hidroelétrica no mundo (GW).	18
Figura 2-6: Participação por fonte na capacidade instalada brasileira (%).	19
Figura 2-7: Evolução da geração elétrica por fonte no Brasil.	19
Figura 2-8: Subsistemas do SIN.	20
Figura 2-9: Indicadores de rendimento – arroz, feijão e trigo (2004-2015).	29
Figura 2-10: Participação regional na área irrigada (1960-2015).	30
Figura 2-11: Proporção de área dos métodos de irrigação – Brasil e regiões.	31
Figura 2-12: Evolução da participação dos métodos de irrigação no Brasil (%).	31
Figura 2-13: potencial de expansão da área irrigável – Brasil.	32
Figura 2-14: Demanda de irrigação para a UHE Sobradinho segundo PMOs.	35
Figura 3-1: Regiões fisiográficas do São Francisco (SUB 1).	41
Figura 3-2: Região semiárida na bacia.	44
Figura 3-3: Usos múltiplos na bacia.	46
Figura 3-4: Estrutura do PISF.	50
Figura 3-5: Representação da cascata com as principais UHEs da bacia.	52
Figura 3-6: Destino da produção nordestina de frutas em 2016.	53
Figura 3-7: Demanda média anual por microbacia – 2015.	54
Figura 3-8: Sazonalidade de demanda para irrigação na bacia (m ³ /s).	54
Figura 3-9: Principais pólos nacionais de irrigação por pivôs centrais.	56
Figura 3-10: Estimativas da vazão mensal a partir do consumo de energia e vazão declarada - perímetro Lagoa Grande (MG) em m ³ /s.	57
Figura 3-11: Área da bacia do São Francisco atendida pela Coelba.	58
Figura 3-12: Consumo energético de irrigantes da Coelba em anos selecionados (GWh).	59
Figura 3-13: Vazões naturais (m ³ /s) na UHE Sobradinho (1931-2017).	60
Figura 3-14: Redução das vazões defluentes das UHEs Sobradinho e Xingó.	61
Figura 3-15: Evolução do volume de reservatórios na bacia do São Francisco.	61
Figura 3-16: Relação entre ENA média por década e MLT para o subsistema NE.	62

Figura 4-1: Impacto da variabilidade climática na demanda de água.	63
Figura 4-2: Proposta metodológica.....	64
Figura 4-3: Representação esquemática dos processos relacionados à irrigação.....	66
Figura 4-4: Valores de Kc conforme o estágio do ciclo de uma cultura.	68
Figura 4-5: Estrutura da versão mensal do SMAP.	71
Figura 4-6: Processo de decisão em um sistema hidrotérmico.....	77
Figura 4-7: Ponto ótimo da função de custo total.....	78
Figura 4-8: Significado das derivadas das funções de custo futuro e imediato.....	79
Figura 4-9: Esquemática da construção de um cenário de estudo.	82
Figura 4-10: Construção de séries via horizonte rolante para compor cenários para a política operativa estocástica.	84
Figura 4-11: Procedimento metodológico.	86
Figura 4-12: Representação esquemática dos passos 6 e 7.	87
Figura 5-1: Divisões espaciais utilizadas no estudo.	89
Figura 5-2: Postos pluviométricos operados pela CPRM. Período 1961-2006.....	91
Figura 5-3: Postos pluviométricos operados pelo INMET. Período 2007-2014.	92
Figura 5-4: Distribuição espacial dos postos de temperatura utilizados.	93
Figura 5-5: Vazões incrementais na UHE Itaparica entre 1961 e 1975.	94
Figura 5-6: Vazões incrementais na UHE Itaparica entre 1976 e 2017.	95
Figura 5-7: Fluxograma de definição dos lotes de interesse.	96
Figura 5-8: Seleção de cultivo por participação na retirada para irrigação no SFA.....	96
Figura 5-9: Seleção de cultivos por participação na retirada para irrigação no SFM. ...	97
Figura 5-10: Seleção de cultivos por participação na retirada para irrigação no SFSM. 97	
Figura 5-11: Área ocupada pelos cultivos representados no SFM.	98
Figura 5-12: Área ocupada pelos cultivos representados no SFSM.	99
Figura 5-13: Nomenclatura dos casos de sensibilidade.....	101
Figura 5-14: Evapotranspiração média total anual.	102
Figura 5-15: Variação da evapotranspiração média mensal calculada.....	102
Figura 5-16: Séries de demanda de irrigação (SFA).	103
Figura 5-17: Séries de demanda de irrigação (SFM).....	104
Figura 5-18: Séries de demanda de irrigação (SFSM).	105
Figura 5-19: Distribuição das demandas de irrigação na UHE Três Marias.....	106
Figura 5-20: Distribuição das demandas de irrigação na UHE Sobradinho.....	107
Figura 5-21: Distribuição das demandas de irrigação na UHE Itaparica.	108

Figura 5-22: Perfil de retiradas para irrigação na UHE Três Marias.....	109
Figura 5-23: Perfil de retiradas para irrigação na UHE Sobradinho.	110
Figura 5-24: Perfil de retiradas para irrigação na UHE Itaparica.....	111
Figura 5-25: Perfil de retiradas médias para irrigação na UHE Sobradinho por cultivo.	112
Figura 5-26: Perfil de retiradas médias para irrigação na UHE Itaparica por cultivo. .	113
Figura 5-27: Período de calibração para a UHE Três Marias (SFA).....	115
Figura 5-28: Período de validação para a UHE Três Marias (SFA).....	116
Figura 5-29: Período de aplicação para a UHE Três Marias (SFA).....	117
Figura 5-30: Período de calibração para a UHE Sobradinho (SFM).....	118
Figura 5-31: Período de validação para a UHE Sobradinho (SFM).....	119
Figura 5-32: Período de aplicação para a UHE Sobradinho (SFM).	120
Figura 5-33: Período de calibração para a UHE Itaparica (SFSM).....	121
Figura 5-34: Período de validação para a UHE Itaparica (SFSM).	122
Figura 5-35: Período de aplicação para a UHE Itaparica (SFSM).	123
Figura 5-36: Vazões incrementais entre as UHEs Sobradinho e Itaparica.....	123
Figura 5-37: Delta de valoração da água – UHE Três Marias.....	125
Figura 5-38: Delta de valoração da água – UHE Sobradinho.	126
Figura 5-39: Delta de valoração da água – UHE Itaparica.....	127
Figura 5-40: Delta de retiradas para irrigação – UHE Três Marias.....	128
Figura 5-41: Delta de retiradas para irrigação – UHE Sobradinho.	129
Figura 5-42: Delta de retiradas para irrigação – UHE Itaparica.....	130
Figura 5-43: Delta de energia armazenada no SIN.....	131
Figura 5-44: Comparação dos deltas de valoração da água – UHE Três Marias.	132
Figura 5-45: Comparação dos deltas de valoração da água – UHE Sobradinho.	133
Figura 5-46: Comparação dos deltas de valoração da água – UHE Itaparica.	134
Figura 5-47: Distribuição dos benefícios e prejuízos para o setor elétrico.	135
Figura 5-48: Comparação dos deltas de retirada acumulada – UHE Três Marias.	136
Figura 5-49: Comparação dos deltas de retirada acumulada – UHE Sobradinho.	137
Figura 5-50: Comparação dos deltas de retirada acumulada – UHE Itaparica.....	138
Figura 5-51: Comparação dos deltas de energia armazenada no SIN.	139
Figura 5-52: Visita à lavoura de cana (Método de sulcos - Perímetro Tourão).	141
Figura A-1: Representação da metodologia do pacote MICE.....	158

Figura A-2: Exemplo de análise de dupla massa de posto pluviométrico desconsiderado.	159
Figura A-3: Gráfico de dupla massa do posto 2046007 para o período 1962-2017 (esquerda) e 1961-2006 (direita).	159

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Demandas por finalidade no Brasil em 2016.	26
Tabela 2-2: Descrição dos principais métodos de irrigação.	27
Tabela 2-3: Indicadores de eficiência de uso da água para sistemas de irrigação.	28
Tabela 2-4: Abordagens do ONS para cálculo dos usos consuntivos.	34
Tabela 2-5: Abordagens para cálculo de coeficientes técnicos no uso agropecuário.	36
Tabela 3-1: Distribuição da região hidrográfica na divisão territorial.	40
Tabela 3-2: População da região hidrográfica do São Francisco em 2010.	42
Tabela 3-3: Características físicas das regiões fisiográficas.	43
Tabela 3-4: Distribuição das outorgas de origem superficial entre os diversos usos.	48
Tabela 3-5: Distribuição das outorgas de origem subterrânea entre os diversos usos.	48
Tabela 3-6: Vazões de retirada dos diferentes usos consuntivos (m ³ /s).	49
Tabela 3-7: Principais aproveitamentos hidrelétricos da bacia do rio São Francisco.	52
Tabela 3-8: Notas técnicas da ANA sobre usos consuntivos.	55
Tabela 3-9: Área equipada para irrigação (1970-2015)	59
Tabela 5-1: Características dos lotes.	98
Tabela 5-2: Demanda energética (GWh) - Brasil.	100
Tabela 5-3: Períodos de análise do modelo SMAP.	114
Tabela 5-4: Métricas de avaliação do modelo SMAP.	114
Tabela 5-5: Conjunto de parâmetros ajustados para o modelo SMAP.	115
Tabela B-1: Postos pluviométricos operados pelo INMET - período 2007-2014.	160
Tabela B-2: Postos pluviométricos operados pela CPRM - período 1961-2006.	161
Tabela B-3: Postos de temperatura utilizados – período 1961-2014.	162

LISTA DE SIGLAS

AHSFRA	Administração da Hidrovia do São Francisco
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BDGD	Base de Dados Geográfica da Distribuidora
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
CBHSF	Comitê de Bacia Hidrográfica do São Francisco
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CGH	Central geradora Hidrelétrica
Conab	Companhia Nacional de Abastecimento
DHI	Divisão Hidrográfica Nacional
ENA	Energia Natural Afluente
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
FCF	Função de Custo Futuro
FCI	Função de Custo Imediato
GIRH	Gestão Integrada de Recursos Hídricos
HS	Hargreaves Samani
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MICE	Multivariate Imputation by Chained Equations
MLT	Média de Longo Prazo
MMA	Ministério do Meio Ambiente
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PD	Programação Dinâmica
PDDE	Programação Dinâmica Dual Estocástica
PDE	Plano Decenal de Energia
PISF	Projeto de Integração do São Francisco
PL	Programação Linear
PM	Penman-Monteith
PMO	Plano Mensal de Operação
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
RAMS	<i>Regional Atmospheric Modeling System</i>
SAL	Sistema Aquífero Urucuia
SDDP	<i>Stochastic Dual Dynamic Programming</i>
SEB	Setor Elétrico Brasileiro
SEBAL	<i>Surface Energy Balance Algorithm for Land</i>
SFA	Alto São Francisco
SFB	Baixo São Francisco
SFM	Médio São Francisco
SFSM	Submédio São Francisco

SIG-R	Sistema de Informação Geográfica Regulatório
SIN	Sistema Interligado Nacional
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos
SMAP	<i>Soil Moisture Accounting Procedure</i>
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
UHE	Usina hidrelétrica
UTE	Usina termelétrica

1 INTRODUÇÃO

A despeito do desenvolvimento nas últimas décadas, os benefícios do progresso nos setores de água, energia e segurança alimentar foram distribuídos de forma muito desigual entre e dentro dos países (HOFF, 2011). Uma variedade de pressões de mudanças globais e regionais, como crescimento populacional, desenvolvimento econômico e mudança de estilos de vida, estão se acentuando com potencial de amplificação mútua e requerimento crescente de recursos (BAZILIAN *et al.*, 2011; WBCSD, 2014).

A conferência *The Water, Energy and Food Security Nexus Solutions for the Green Economy*¹ realizada em Bonn, Alemanha, em 2011, o *Fórum Econômico Mundial*, realizado no mesmo ano em Davos, na Suíça, bem como a *Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (Rio+20)*, realizada no Rio de Janeiro, em 2012, foram alguns dos ambientes onde se começou a estabelecer as bases conceituais para uma abordagem destinada a lidar com essas diferentes pressões: o nexo água-energia-alimento (World Economic Forum, 2011; HOFF, 2011; ALBRECHT *et al.*, 2018)).

Segundo esse conceito, a provisão de água, energia e segurança alimentar pode ser alcançada através de uma abordagem que integra gestão e governança entre setores e escalas. Uma abordagem de nexo também pode apoiar a transição para uma economia verde, que visa, entre outras coisas, a eficiência no uso de recursos e maior coerência política (ALBRECHT *et al.*, 2018).

Dada a crescente interconectividade entre setores no espaço e no tempo, uma redução de externalidades sociais econômicas e ambientais negativas pode aumentar a eficiência geral de uso de recursos, fornecer benefícios e garantir os direitos humanos à água e ao alimento. A política convencional e a tomada de decisão baseada em "silos" precisam dar lugar a uma abordagem que reduz os desequilíbrios nas trocas e cria sinergias entre setores - uma abordagem de nexo. O tratamento das relações comerciais na sua forma usual deixou de ser uma opção (HOFF, 2011).

¹ O nexo entre água, energia e segurança alimentar: soluções para a economia verde – em tradução livre.

Sob o ponto de vista do setor elétrico brasileiro, o nexos água-energia-alimento tem grande importância. A hidroeletricidade representa 60% da capacidade da matriz elétrica nacional (EPE, 2018). Além disso, historicamente, a infraestrutura de recursos hídricos no Brasil tem sido impulsionada majoritariamente pelo setor elétrico. Um exemplo disso é que desde a década de 1920, o estudo específico de desníveis hidráulicos caminhava lado a lado com o estudo da hidrologia, quase exclusivamente baseado na pluviometria (ANA, 2007).

A indústria da hidroeletricidade conta também com um sofisticado mercado de transação de energia, fortemente influenciado pelas peculiaridades da variabilidade hidrológica (KELMAN, 2009). Historicamente, existia premissa de que a água dos rios “pertencia” às usinas de energia elétrica. Como as hidroelétricas “não consomem água”, a sutileza dessa premissa estava no fato de que cabe ao Operador Nacional do Sistema (ONS) decidir como os reservatórios devem ser esvaziados ou reenchidos. Essas decisões sempre foram tomadas levando em conta basicamente a lógica do setor elétrico, sujeitas apenas a algumas restrições eventualmente determinadas, muito recentemente, pela Agência Nacional de Águas (ANA) (MOLINAS, 2013; BARRAL, 2014; PSR, 2016).

A necessidade de mudar essa premissa passou a ser anunciada com as crescentes restrições ambientais à construção de novas usinas e as restrições à operação das existentes. A questão, de uma forma geral, não foi bem resolvida, pois, em vez de se encontrar soluções que harmonizem o aproveitamento do potencial hidroelétrico com a preservação ambiental e a convivência mutuamente proveitosa com as populações ribeirinhas, o que tem ocorrido é uma relação essencialmente conflituosa entre esses atores, que tem resultado em uma rejeição, cada vez maior, aos aproveitamentos hidrelétricos (BARRAL, 2014; CARVALHO, 2015; PSR, 2016;).

Especialmente a partir de 1997, quando da promulgação da lei nº 9.433, a “Lei das Águas”, o planejamento dos recursos hídricos ganhou força, e o setor elétrico viu-se em uma nova posição, na qual não cabe mais posição de predominância de outrora, em que suas necessidades de uso da água eram prioridade, pois o abastecimento humano e a dessedentação animal passaram a ser os usos qualificados como mais essenciais em termos de uma bacia (BRASIL, 1997; KELMAN 2009; PSR, 2015).

Com a lei nº 9.433, criou-se uma estrutura de governança na qual prevalecem a figura dos comitês de bacia como instâncias deliberativas, das agências técnicas que embasam as diretrizes formuladas pelos comitês e da ANA como entidade reguladora. O setor elétrico passou igualmente por significativas mudanças no início do século XXI, destacando-se a figura centralizadora do ONS como operador do sistema e da ANEEL como agência reguladora (KELMAN, 2009).

O sistema elétrico conta historicamente com uma série de blindagens jurídicas e institucionais que moldam a operação dos reservatórios sob premissas estritas de maximização da produção energética, considerando as questões ambientais e de gestão de usos múltiplos dos recursos hídricos como externalidades complementares suscetíveis de serem mitigadas ou administradas no contexto de comissões intersetoriais (MOLINAS, 2013).

Fato é que, apesar de toda a institucionalização em vigor, os conflitos quanto à alocação da água dos reservatórios tornam-se cada vez mais frequentes. Destaque deve ser dado à recente seca que persiste na bacia do São Francisco, à crise hídrica do sistema Cantareira, ocorrida em 2014/2015 e à interrupção por vários meses da operação da hidrovía Tietê- Paraná AZEVEDO *et al.*, 2018; VÁSQUEZ P. *et al.*, 2018). Esses conflitos têm requerido intervenção constante da ANA, pois as regras existentes não são capazes de regular por si próprias a alocação eficiente (PSR, 2015; ANA, 2017a)).

O principal uso consuntivo de água no mundo, e também no Brasil, é a agricultura, representando 70% de toda a água consumida (ANA, 2017a). A agricultura irrigada produz aproximadamente 40% da produção de alimento do mundo (POSTEL, 2000). Sua importância fica mais evidente se for levado em consideração que existe uma limitação física para o crescimento da agricultura de sequeiro², o que indica que, no futuro, a produção de alimentos será, cada vez mais, dependente da agricultura irrigada. Portanto, a tendência do conflito entre hidroeletricidade e agricultura é se agravar, especialmente no contexto de mudanças climáticas (ANA, 2017a; RODRIGUES *et al.*, 2017).

Sob a ótica das bacias hidrográficas brasileiras e das cascatas de usinas mais significativas para o Sistema Interligado Nacional (SIN), salta aos olhos a bacia do Rio

² Puramente dependente das chuvas.

São Francisco, por conjugar expressiva geração hidrelétrica (10,5 GW de capacidade instalada), penetração de energias renováveis na região e conflitos entre diversos usos (MMA, 2006; CBHSF, 2016; EPE, 2018).

Com uma área de cerca de 638.000 km², a bacia abrange parte de 6 estados e do Distrito Federal. O São Francisco é o maior rio a escoar exclusivamente em território brasileiro, sendo conhecido como “o rio da integração nacional”. Nessa bacia, tem destaque o crescimento da fruticultura irrigada e dos projetos de abastecimento das populações da região semiárida, especialmente o Projeto de Integração do São Francisco (PISF). Junto a essas questões, somam-se, ainda, a grande diversidade fisiográfica na área da bacia e as diferenças de clima (SILVA 2004; DI BELLO, 2005; NICÁCIO, 2008; BANCO DO NORDESTE (2016).

Dado que a função de um planejador é essencialmente fornecer alternativas para o tomador de decisão, a bacia do São Francisco enquadra-se como um excelente estudo de caso para analisar as interações do nexo água-energia- alimento.

Esta dissertação tem como motivação propor uma abordagem integrada que permita ao setor elétrico antecipar-se à discussão, criando um ambiente colaborativo e proporcionando soluções racionais que beneficiem não apenas a si, como também aos demais usuários da água, entre os quais estão os irrigantes.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral aplicar a metodologia do nexo água-energia-alimento no contexto da operação do Sistema Interligado Nacional (SIN), um sistema hidrotérmico de grande porte.

Os objetivos específicos do estudo são os seguintes:

- identificar as questões relacionadas ao nexo água-energia-alimentos na bacia do São Francisco através de revisão bibliográfica e pesquisa de campo para compreender os impactos de restrições de uso da água para os irrigantes da região;
- calcular demandas de irrigação para cultivos representativos na bacia do rio São Francisco;
- incorporar a variabilidade da precipitação na demanda para irrigação considerada pelo modelo probabilístico de despacho hidrotérmico SDDP;

- simular vazões através de um modelo físico chuva-vazão, com a precipitação de referência utilizada para o cálculo das demandas de irrigação, e comparar com as séries de vazões naturais oficiais;
- avaliar o impacto de uma melhor representação da irrigação sobre a alocação de água através de um modelo de otimização de sistemas hidrotérmicos na bacia do São Francisco e suas implicações para a gestão de recursos hídricos e a operação do SIN.

1.2 Contribuição

A contribuição original deste trabalho é fornecer uma ferramenta replicável, baseada na metodologia donexo água-energia-alimento, capaz de avaliar os impactos econômicos e energéticos em sistemas hidrotérmicos devidos à alocação de água para a produção agrícola segundo a variação mensal das condições climáticas.

1.3 Estrutura da dissertação

O texto da dissertação está organizado em seis capítulos.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão conceitual donexo água-energia-alimento, apresentando suas vantagens e fragilidades. Na sequência, é apresentado o arcabouço de gestão de águas no Brasil. Por fim, são apresentadas as interrelações donexo que merecem destaque no contexto da operação do Sistema Interligado Nacional: água para energia (com foco na hidroeletricidade) e água para alimento (com foco na produção agrícola). No contexto dessas interrelações de interesse, apresenta-se a revisão bibliográfica que embasa a metodologia desenvolvida na dissertação.

O Capítulo 3 apresenta o levantamento das principais características da bacia do rio São Francisco, bem como dos aspectos mais relevantes que a fizeram ser escolhida para o estudo de caso desta pesquisa. Além das características físicas da bacia, destacam-se as atividades de geração de hidroeletricidade e produção agrícola nela realizadas, além das condições hidrológicas adversas observadas na última década.

O Capítulo 4 mostra, de forma detalhada, a proposta metodológica da dissertação, abordando os três modelos que serão utilizados: modelo agrícola, modelo chuva-vazão SMAP e modelo de despacho SDDP. Tendo em vista o caráter emergente da abordagem conceitual donexo água-energia-alimento e seu potencial para o aprimoramento da

operação de sistemas hidrotérmicos, o capítulo indica como incorporar a variabilidade climática na demanda de água para irrigação e como avaliar os impactos dessa contribuição para a operação de sistemas hidrotérmicos.

O Capítulo 5 apresenta a aplicação da metodologia proposta no estudo de caso da bacia do rio São Francisco. Adicionalmente, são descritos as fontes de obtenção de dados e os tratamentos neles efetuados. Também são apresentados os resultados obtidos e suas discussões correlatas.

O Capítulo 6 contém as conclusões acerca das contribuições da metodologia proposta, bem como a identificação das limitações do presente estudo e as sugestões para trabalhos futuros.

2 O NEXO E SUA APLICAÇÃO NA OPERAÇÃO DO SIN

O presente capítulo, inicialmente, apresenta uma revisão conceitual do nexo, apresentando suas vantagens e fragilidades. Na sequência, é apresentado o arcabouço de gestão de águas no Brasil. Por fim, são apresentadas as interrelações do nexo que merecem destaque no contexto da operação do Sistema Interligado Nacional: água para energia (com foco na hidroeletricidade) e água para alimento (com foco na produção agrícola). No contexto dessas interrelações de interesse, apresenta-se a revisão bibliográfica que embasa a metodologia desenvolvida na dissertação.

2.1 O nexo água-energia-alimento

A população global tem crescido significativamente nas últimas décadas, chegando a 7,6 bilhões em 2017. A expectativa é que a população mundial atinja 8,6 bilhões de pessoas em 2030, 13% a mais do que em 2017 (UNITED NATIONS, 2017).

Todo esse crescimento, acompanhado por má gestão dos recursos naturais, mudanças climáticas, pobreza e fome são alguns dos desafios globais. Os desafios estão ligados a riscos e inquietações sociais, econômicas e políticas que as gerações presentes e futuras enfrentam. Diferentes combinações de nexos, incluindo água, alimento, energia, comércio, clima e crescimento populacional, estão sendo estudadas na tentativa de identificar os tipos de interconectividade presentes entre esses sistemas. A criação dos nexos surge como resultado da compreensão da multidimensionalidade e complexidade da questão (MOHTAR, 2012).

Ao considerar como os sistemas de água, energia e alimentos operam e interagem, o nexo tem como objetivos maximizar as sinergias (resultados mutuamente benéficos) e minimizar os *trade-offs* (que não necessariamente produzem resultados ótimos), além de melhorar a eficiência do uso de recursos e internalizar impactos sociais e ambientais (HOFF, 2011).

Torna-se necessário, assim, desenvolver modelos que quantifiquem e reproduzam essa gama de interações com o objetivo de orientar o planejamento e as futuras tomadas de decisão relativas ao uso desses recursos e às estratégias mencionadas. Ferramentas adequadas podem contribuir, também, para uma mudança de atitude que priorize as

políticas adaptativas, em vez do habitual comportamento reativo e de soluções paliativas de curto prazo (BYERS, 2015).

A abordagem do nexo água-energia-alimento não se limita a um conjunto de relações de insumo-produto, pois absorve um entendimento mais amplo de impacto. Pode ser utilizada, por exemplo, para relacionar o consumo de energia para mitigação de carbono e adaptação climática (BELLEZON, 2018).

A Figura 2-1 mostra de forma esquemática a abordagem do nexo água-energia-alimento, segundo descrita por HOFF (2011). Destaca-se a alocação de recursos hídricos para assegurar abastecimento hídrico, segurança energética e segurança alimentar (pilares). Os campos de ação que podem influenciar no balanço entre os pilares são a sociedade em que a análise está inserida, a economia em questão e o ambiente de onde se originam os recursos. As tendências globais que influenciam o nexo nas suas diferentes escalas são a urbanização acelerada, o crescimento populacional e as mudanças climáticas.

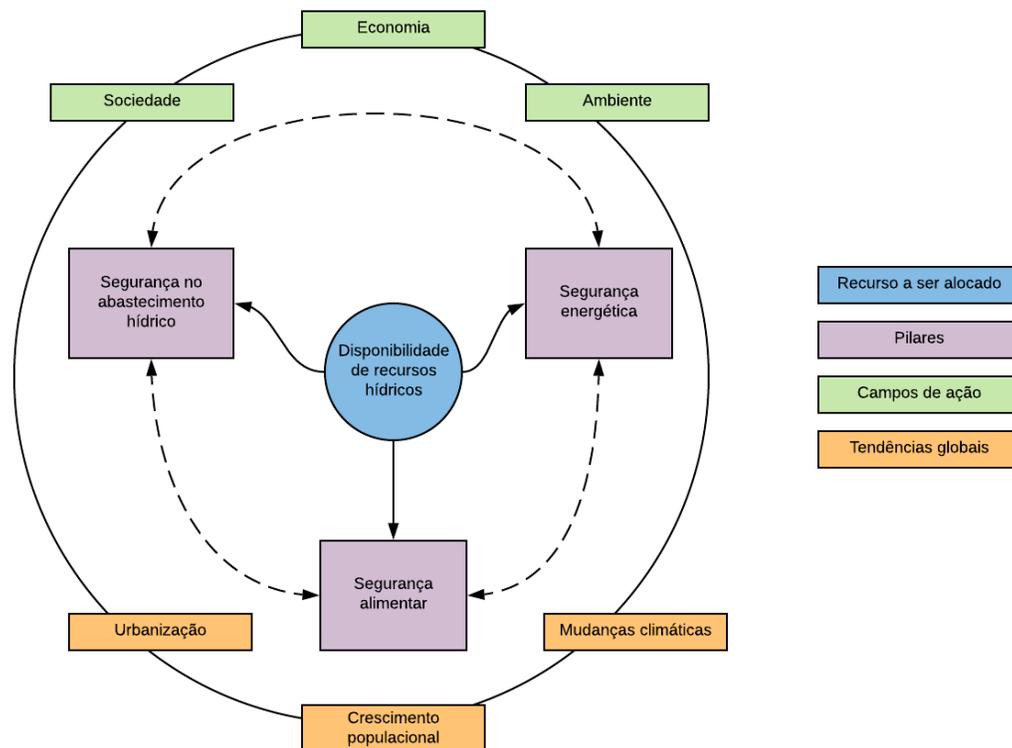


Figura 2-1: O nexo sob o enfoque da alocação do recurso água.
Fonte: Adaptado de HOFF (2011).

2.1.1 Interrelações

Para gerir a interação entre sistemas homem-ambiente, FAO (2014a) defende duas condições fundamentais: i) identificar as interações do nexo e as implicações que eventuais intervenções possam causar; e ii) desenvolver e priorizar opções de resposta.

As interrelações entre água, energia e alimento são muitas. Essa seção não objetiva esgotar essas interrelações, mas sim listar as principais e comentar aspectos relevantes para o presente estudo, de modo a facilitar a priorização de respostas. A Figura 2-2 auxilia na visualização dos pilares e dos elos do nexo. Propõem-se a análise da água em todas as suas formas (subterrânea, superficial e atmosférica). Semelhantemente, a energia deve ser vista além da eletricidade, englobando-se suas funções como combustível e provedora de calor, entre outras. Por fim, o alimento também deve ser visto como mais que o produto da agricultura, pois a pecuária e a aquacultura são também formas de produzir alimentos.

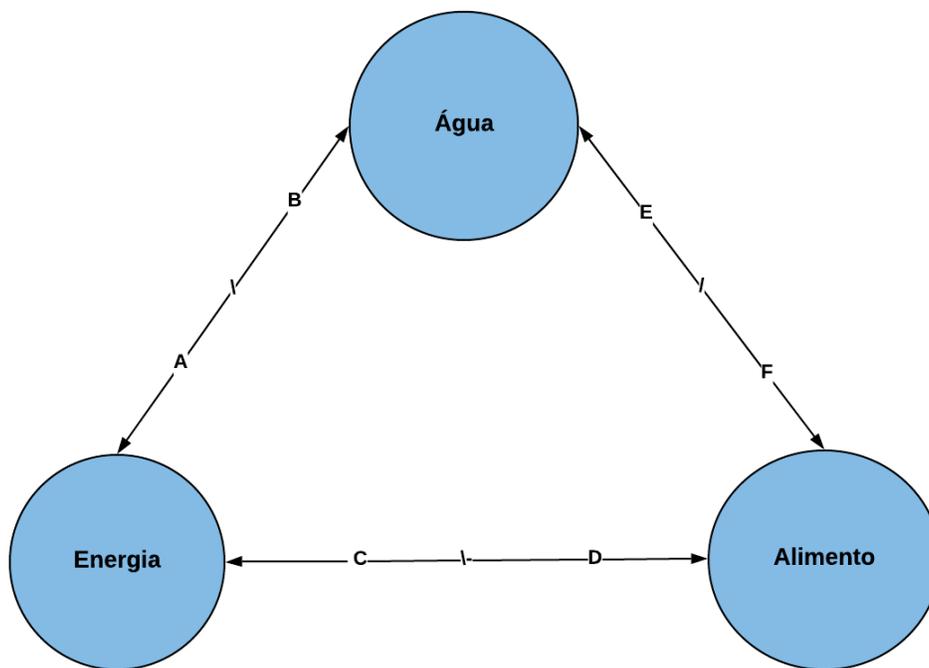


Figura 2-2: Principais elos entre água, energia e alimento.

Fonte: Adaptado a partir de MOHTAR (2012), FAO (2014a), ENDO *et al.* (2015), RODRIGUES *et al.* (2017), e ARROYO (2018).

As principais atividades contidas em cada interrelação da Figura 2-2 são as seguintes:

- A. Energia para água:
 - i. Captação de água;

- ii. Distribuição de água;
 - iii. Tratamento de esgoto e efluentes;
 - iv. Aquecimento de água;
 - v. Dessalinização;
- B. Água para energia:
- i. Geração hidroelétrica;
 - ii. Geração termoelétrica;
 - iii. Resfriamento de usinas;
 - iv. *Fracking*³;
 - v. Produção de bioenergia
- C. Água para alimento:
- i. Agricultura irrigada;
 - ii. Colheita baseada em chuva;
 - iii. Água para processamento de alimentos;
- D. Alimento para água:
- i. Salinização e poluição dos mananciais por nutrientes, pesticidas e outros produtos agrícolas.
 - ii. A erosão do solo em áreas de maiores declividades devido à atividade agrícola;
 - iii. Desaparecimento de áreas úmidas e a destruição de habitats naturais;
- E. Alimento para energia:
- i. Biocombustíveis;
- F. Energia para alimento:
- i. Armazenamento de alimentos;
 - ii. Bombeamento e aplicação de água nos cultivos irrigados,
 - iii. Produção de fertilizante e agroquímicos;
 - iv. Uso de maquinaria e transporte.

A modernização da agricultura irrigada, via de regra, implica aumentar a demanda por energia. Isto porque a energia é componente importante do seu custo de produção da irrigação e fator decisivo no sucesso da produção. A substituição de sistemas de irrigação

³ O fraturamento hidráulico, como é conhecido em português, é um método que possibilita a extração de combustíveis líquidos e gasosos do subsolo através da injeção sob alta pressão de uma mistura de água, material propante e diversos produtos químicos.

buscando simplesmente aumentar a eficiência no uso da água pode desequilibrar a relação oferta-demanda de energia na região, criando insegurança energética (RODRIGUES *et al.*, 2017)

Embora a irrigação não demande tanta energia como os setores industriais e urbanos, a disponibilidade de energia é crucial para o seu desenvolvimento. Além disso, em geral, a demanda energética agrícola ocorre em áreas mais remotas, afastadas dos grandes centros (RODRIGUES *et al.*, 2017). Segundo esses mesmos autores, o aumento da tarifa de energia elétrica é um dos fatores que tem contribuído para o uso mais eficiente da água, bem como para a baixa utilização do potencial das áreas irrigáveis.

Com respeito à variante que avalia a importância da água para o planejamento e a operação dos sistemas elétricos, US-EU ENERGY COUNCIL (2015) enxerga o nexo como uma oportunidade de flexibilização para reserva girante, no contexto da intermitência das fontes renováveis, que, cada vez mais, penetram na matriz energética global. Como se pode ver na publicação, essa é uma preocupação tanto da União Europeia quanto dos EUA, levando a uma cooperação entre ambos para abordar o tema.

FAO (2014a) argumenta que uma abordagem de nexo fornece oportunidades para os tomadores de decisão se envolverem uns com os outros. Pode-se envolver uma série de partes interessadas, como governos locais, regionais e nacionais, organizações de bacias, bancos e agências de desenvolvimento, organizações internacionais, institutos e universidades, ONGs, sociedade civil, setor privado, entre outros. A interação entre essas partes interessadas está no centro do conceito de nexo, segundo a visão da FAO (conforme Figura 2-3).

FAO (2014a) também aborda explicitamente as interações complexas e as relações de *feedback* entre sistemas humanos e naturais. Conforme apresentado na Figura 2-3, a base de recursos⁴ considerada nessa abordagem refere-se a recursos biofísicos e socioeconômicos, dos quais dependemos para alcançar os objetivos de desenvolvimento relativos à água, energia e alimentos.

⁴ Outras abordagens baseadas em base de recursos são: *nexo água-terra-energia*, *nexo água-terra-energia-alimento-clima*, *nexo água-solo-resíduo*, ou ainda *nexo de recursos globais*.

Como também explicitado na Figura 2-3, as interações ocorrem dentro do contexto de fatores influenciadores globalmente relevantes, tais como mudança climática, urbanização, desenvolvimento industrial, modernização agrícola, comércio internacional, mercados e preços, avanços tecnológicos, diversificação de dietas; bem como no contexto de fatores específicos para o local, como estruturas e processos de governança, interesses investidos, crenças e comportamentos culturais e sociais.

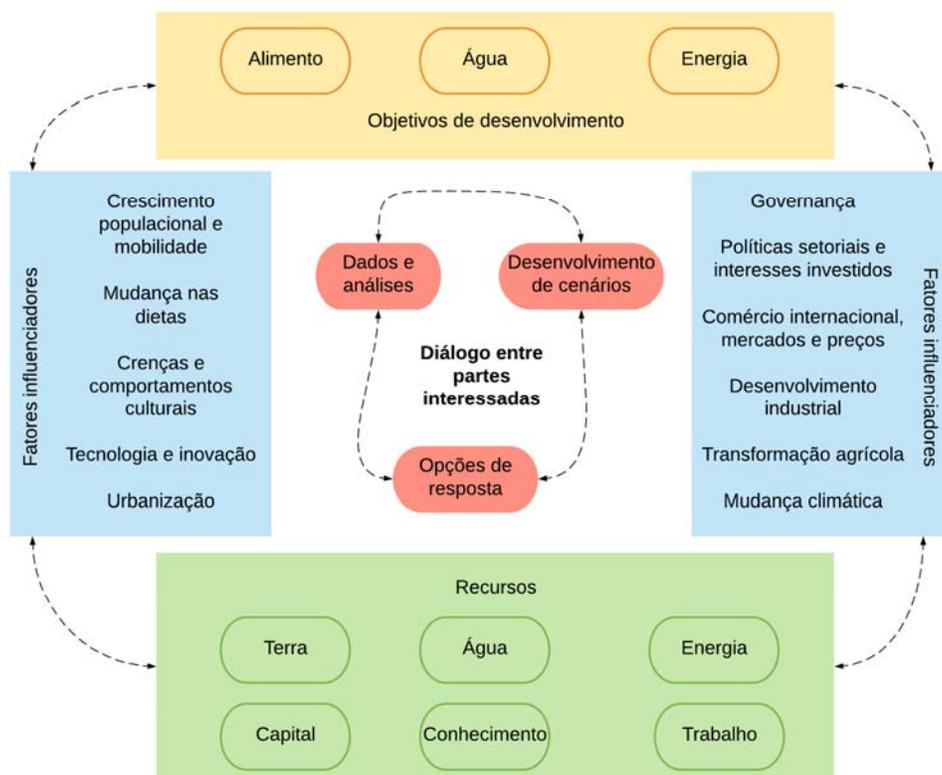


Figura 2-3: O nexo sob o enfoque das partes interessadas.
 Fonte: Adaptado de FAO (2014a).

Kevany *et al.* (2013), não utilizando o termo *nexo*, porém baseados em uma visão ainda mais ampla das complexas relações estabelecidas através da água, examinam as intersecções entre a água, o gênero feminino, os resíduos, a sabedoria e a riqueza⁵. Através da revisão de vários artigos, o trabalho oferece visões multidisciplinares das questões da água, envolvendo perspectivas estruturais, bem como políticas, ambientais, sociais e culturais. Entre as recomendações estão propostas para políticas, abordagens e

⁵ O título do artigo faz um jogo de palavras entre os termos em inglês, todos iniciados pela letra *w*.

regulamentos que proporcionam melhorias sistêmicas para reduzir a poluição e regular o consumo de água.

2.1.2 Análise crítica

Com base em revisão bibliográfica sistemática envolvendo mais de 200 artigo, GALAITSI e HUBER-LEE (2018) afirmam que as pesquisas realizadas ao nexo água-energia-alimento ainda não produziram um conjunto de ferramentas intelectualmente relevante. Ressaltam, também, que não há evidências na literatura de que as abordagens do nexo possam, de fato, melhorar o gerenciamento de seus recursos. Ao contrário, a falta ou desbalanceamento de informações poderiam contribuir para um gerenciamento inadequado desses recursos. Além disso, as aplicações identificadas guardariam poucas semelhanças entre si e não há conclusões que possam ser generalizadas. Devido à amplitude do conceito de nexo, ainda não existiria uma metodologia clara e os limites e objetivos dessas análises variariam de caso a caso.

Em outra análise da produção científica relacionada ao tema, ALBRECHT *et al.* (2018a) confirmam que o uso de métodos específicos e reprodutíveis para avaliação do nexo é incomum, destacando que esses métodos raramente são capazes de captar as interações entre água, energia e alimento da forma conceitualmente pretendida, ficando confinados a silos disciplinares. Observam ainda que as avaliações existentes favorecem fortemente abordagens quantitativas e que o uso de métodos relacionados às ciências sociais ainda é limitado.

ALBRECHT *et al.* (2018a) verificaram também que mais da metade dos artigos pesquisados (55%) mostraram alguma preferência por um determinado setor, seja em termos de enquadramento da análise ou da disciplina a partir da qual os métodos utilizados são derivados. GALAITSI e HUBER-LEE (2018) reforçam a constatação da existência de uma certa predileção pela água, visto que a maioria dos trabalhos existentes foi publicada em revistas de recursos hídricos. Essa constatação talvez se justifique pelo fato de que a água é um insumo necessário para a produção tanto de alimentos quanto de energia e, assim, o problema de escassez, nesses setores, também pode ser caracterizado, por simplificação, como escassez de água.

ALBRECHT *et al.* (2018a) ressaltam que, como alguma simplificação é sempre necessária, um ponto crítico da modelagem é a forma como os limites do sistema são

delineados. Além de refletir os objetivos do estudo, esses limites devem ser dimensionados de forma a serem grandes o bastante para capturar os detalhes necessários, mas pequenos o suficiente para serem gerenciáveis. Afirmam, também, que as análises do nexu costumam ser conduzidas, nos níveis regional ou nacional, em função da disponibilidade de dados ou das metas de políticas públicas.

Muitas críticas são feitas ainda na linha de comparação entre a abordagem de nexu e a gestão integrada de recursos hídricos (GIRH). FAO (2014a) advoga que a abordagem nexu se diferencia da GIRH, por exemplo, pois trata igualmente das três vertentes, não priorizando qualquer uma delas. O argumento seria válido se, de fato, a literatura convergisse para a análise integrada dos três pilares, o que não se verifica.

2.2 Gestão de águas no Brasil

A primeira legislação elaborada para tratar da apropriação e uso das águas no Brasil foi o Código de Águas, Decreto Federal nº 24.643 de 1934. Ele foi promulgado em um contexto nacional de modernização e desenvolvimento econômico no qual a água era tida como um bem em abundância. Em decorrência da industrialização e do crescimento populacional após a década de 1970, a água disponível começou a se tornar mais escassa em algumas regiões, o que levou à intensificação dos conflitos entre usuários de água e impôs a necessidade da elaboração de mecanismos de planejamento e coordenação para os usos, direcionados à sua otimização (ANA, 2017a).

A atual gestão de recursos hídricos do Brasil está baseada na política nacional de recursos hídricos (PNRH), definida na lei nº 9.433 de 1997, a chamada “Lei das Águas”. A PNRH estruturou, orientou e modernizou a gestão dos recursos hídricos no Brasil. Foi a partir dessa lei que a gestão de recursos hídricos obteve avanços significativos no Brasil (ANA, 2017a).

A PNRH prevê que a gestão da água não deve dissociar aspectos de quantidade e qualidade e deve considerar a diversidade geográfica e socioeconômica das diferentes regiões do país, o planejamento dos setores usuários e os planejamentos regionais, estaduais e nacional, além da integração com a gestão ambiental do uso do solo, dos sistemas estuarinos e das zonas costeiras (ANA, 2017a).

A PNRH tem, entre seus objetivos, o de assegurar a disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos; a utilização racional e integrada dos recursos hídricos; e a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais. A bacia hidrográfica é sua unidade territorial de implementação (ARROYO, 2018).

A PNRH é implementada pela atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (SINGREH). As instituições do SINGREH possuem diferentes naturezas jurídicas e têm funções distintas, podendo ser deliberativas (conselhos de recursos hídricos e comitês de bacias) ou operacionais (órgãos gestores e agências de água) (ANA, 2017a).

A Figura 2-4 apresenta, de forma esquemática, a composição institucional do SINGREH. Os conselhos, existentes nos âmbitos nacional e estadual, bem como os comitês de bacia, representam as instâncias máximas de decisão. Os governos e órgãos gestores, também existentes nas esfera nacional e estadual, são responsáveis pela gestão e implementação dos instrumentos da PNRH, juntamente com as agências de bacia, que são os escritórios técnicos que dão suporte a esses órgãos.

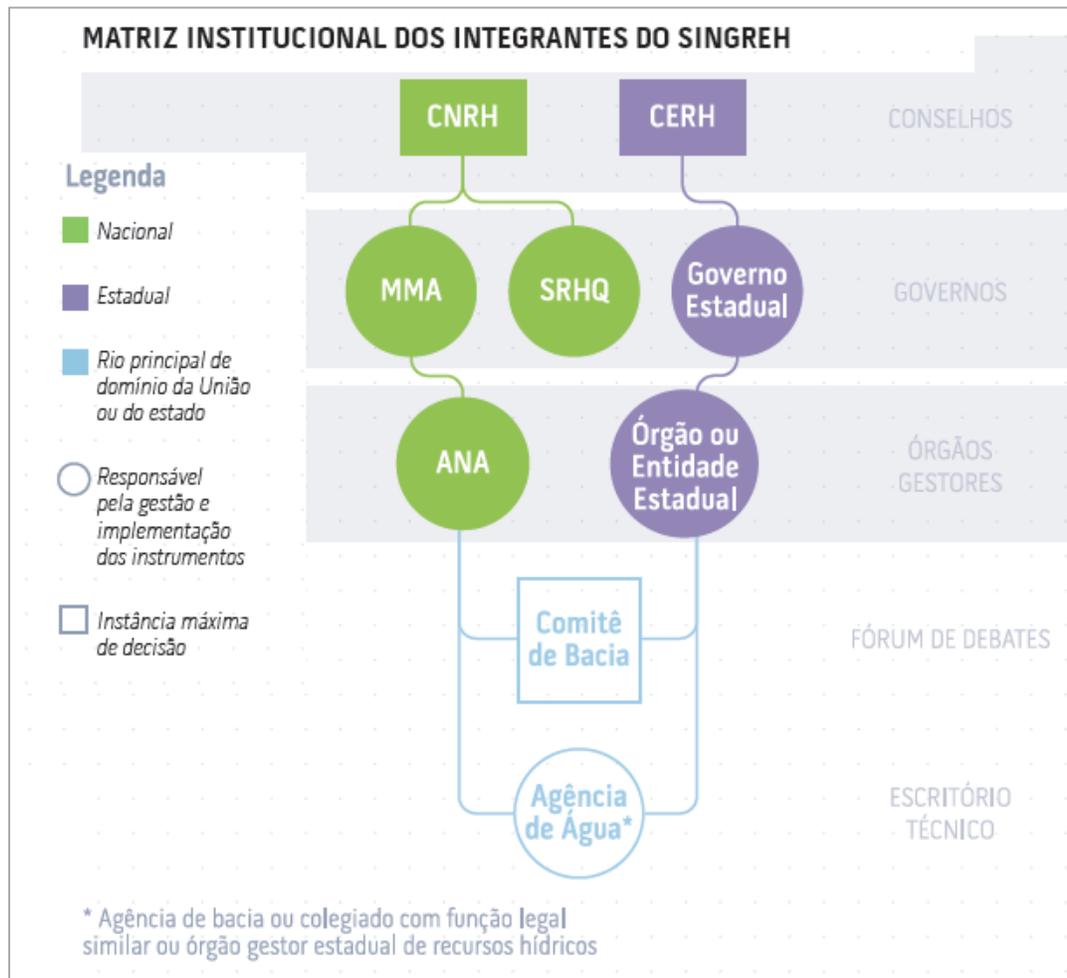


Figura 2-4: Composição institucional do SINGREH.
Fonte: ANA (2017a).

Além de executar a PNRH, o SINGREH tem como objetivo coordenar a gestão integrada das águas, arbitrar administrativamente os conflitos relativos aos recursos hídricos, planejar, regular e controlar o uso, preservação e a recuperação dos recursos hídricos, e promover a cobrança pelo uso da água (ARROYO, 2018).

Os instrumentos de gestão dos recursos hídricos apoiam o cumprimento da PNRH. Entre esses instrumentos, destacam-se os planos de recursos hídricos, a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos, a cobrança pelo uso de tais recursos, o enquadramento dos cursos de água em classes de uso e o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH).

Há certamente dificuldades em se lidar com a aplicação dos instrumentos de gestão devido ao recorte geográfico de uma bacia hidrográfica, uma vez que os recursos

hídricos exigem a gestão compartilhada com a administração pública, órgãos de saneamento, instituições ligadas à atividade agrícola, gestão ambiental, entre outros, e a cada um desses setores corresponde uma divisão administrativa certamente distinta da bacia hidrográfica (ARROYO, 2018).

2.3 Uso da água para a geração de energia elétrica

Para se obter eletricidade, a energia em suas diferentes formas deve ser transformada. Na maioria dessas transformações, a água exerce papel de destaque. Como exemplo, a água é usada para o processamento dos combustíveis (carvão, derivados de petróleo, óxidos de urânio, entre outros) e para resfriamento das turbinas na geração termelétrica. Em métodos alternativos de produção de energia, como no fraturamento hidráulico de gás de folhelho para geração termoelétrica, a água também tem papel relevante, pois é o meio utilizado para exercer pressão nas rochas, bem como para carrear os resíduos que se desprendem no processo.

Em seu Plano Decenal de Energia (PDE) 2026, EPE (2017a) já indicou um conflito entre o planejamento da localização das usinas termelétricas indicativas e situação hidrológica da região nordeste. O documento aponta para o possível agravamento do problema, tendo em vista a possibilidade de aumento crescente nos usos consuntivos da água, que não estariam ainda incluídos nos estudos de planejamento da operação do sistema (EPE, 2017a). Essa mesma questão repercutiu no setor elétrico no episódio da ação judicial movida por empresas donas de termoelétricas devido à cobrança de encargo hídrico emergencial por conta da seca (BORGES, 2017).

Contudo, dada a matriz elétrica brasileira, que se utiliza majoritariamente do recurso hídrico como fonte primária, faz-se primordial um olhar detalhado para a hidroeletricidade (EPE, 2017a). Nessa forma de geração, a energia potencial gravitacional contida na água armazenada a certa altura de queda é convertida em energia cinética, a qual, por sua vez, é convertida em energia elétrica. A complexidade da fonte hidrelétrica vai além, envolvendo questões como gerenciamento de reservatórios e usos múltiplos.

2.3.1 Participação da hidroeletricidade no contexto brasileiro

Segundo dados de 2015 apresentados em EPE (2018), o Brasil é o oitavo país com maior capacidade instalada de geração de energia elétrica do mundo, contando com um parque de 141 GW. Cerca de 92 GW desse parque advém da fonte hidroelétrica, o

que torna o país o segundo colocado mundial em capacidade instalada dessa fonte, atrás apenas da China, cujo parque hidroelétrico é de 296 GW.

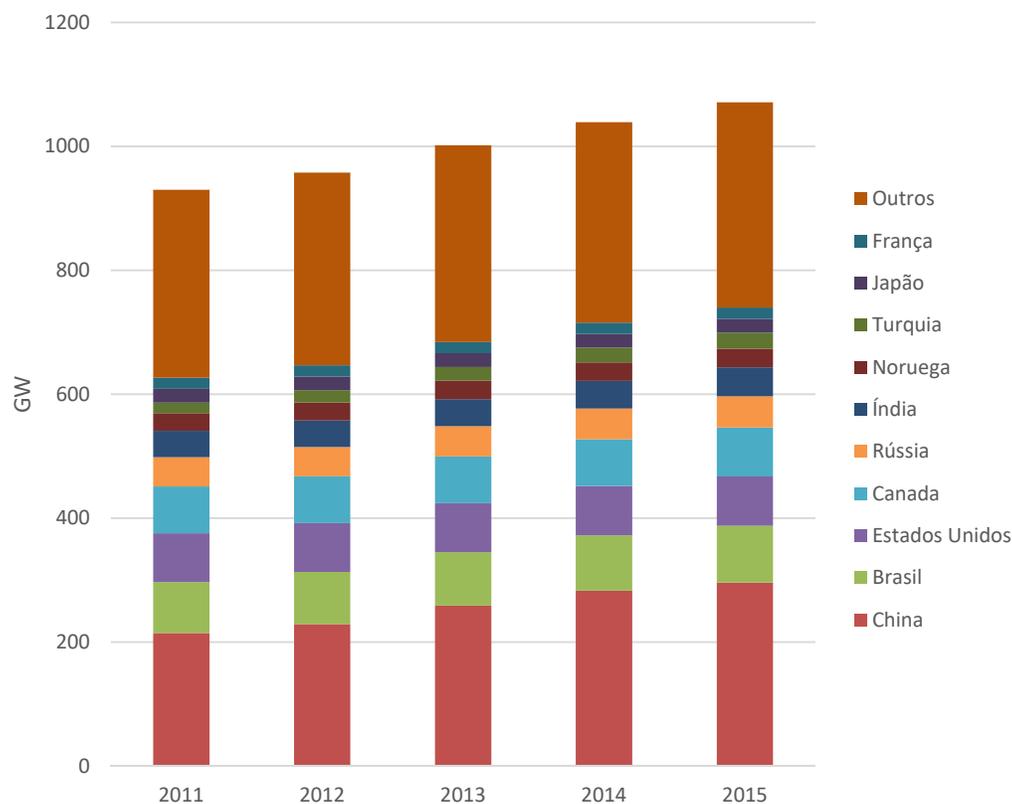


Figura 2-5: Evolução da capacidade instalada hidroelétrica no mundo (GW).
Fonte: Adaptado a partir de EPE (2018).

O Brasil possui grande disponibilidade hídrica e consegue utilizar os grandes reservatórios das usinas hidrelétricas em cascata para gerenciar a variabilidade e sazonalidade desse recurso. Os reservatórios transferem água entre períodos de maior para menor disponibilidade, aumentando, assim, a relação entre a produção média e a produção máxima, conhecida por fator de capacidade.

Com respeito ao consumo de eletricidade, o Brasil é o sétimo país do ranking mundial, respondendo por 524,6 TWh de energia consumida em 2015 (EPE, 2018).

A matriz de geração elétrica brasileira é predominantemente hidroelétrica. Essa fonte representou 60% da capacidade instalada, e 63% da geração em 2017 (EPE, 2018). A Figura 2-7 apresenta a evolução da capacidade instalada no período entre 2013 e 2017.

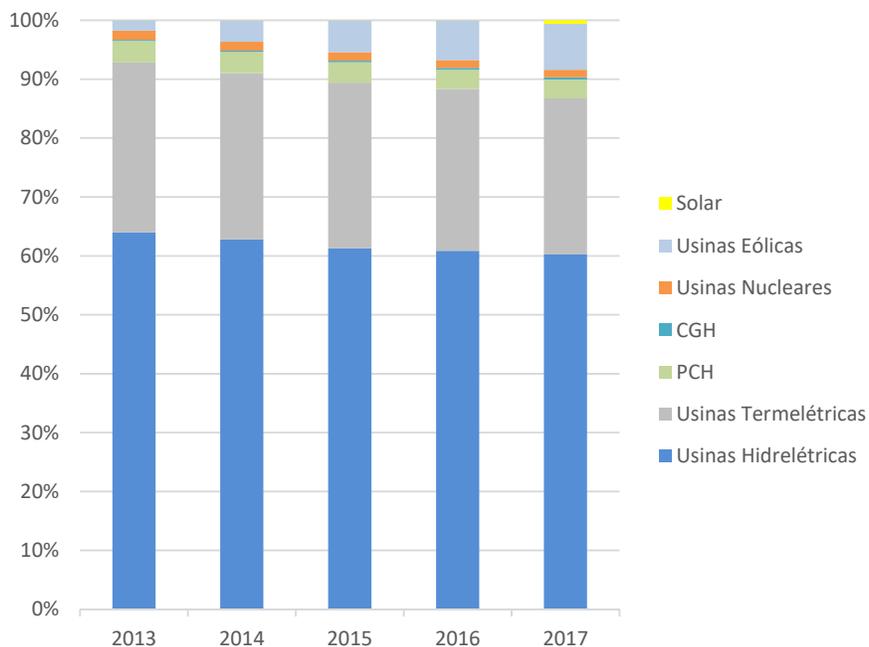


Figura 2-6: Participação por fonte na capacidade instalada brasileira (%).
 Fonte: Adaptado a partir de EPE (2018).

A Figura 2-7 apresenta a evolução da geração por fonte também no período entre 2013 e 2017.

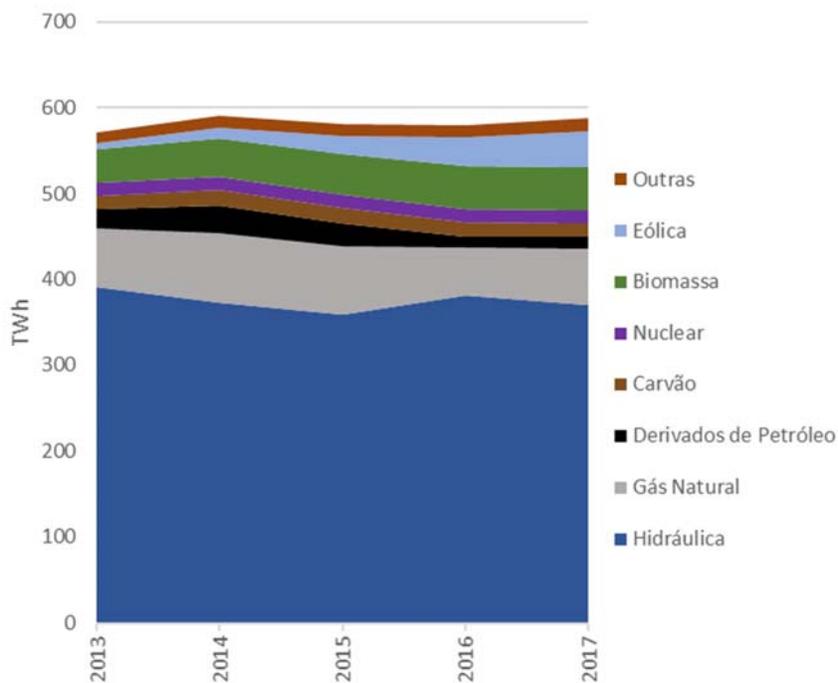


Figura 2-7: Evolução da geração elétrica por fonte no Brasil.
 Fonte: Adaptado a partir de EPE (2018).

Sendo assim, fica clara a importância da água para garantir a disponibilidade de energia elétrica no Brasil. Vale ressaltar, no entanto, que a geração hidroelétrica não consome água. Por outro lado, a otimização do uso do recurso hídrico para a geração de eletricidade indisponibiliza esse recurso para outros usos.

2.3.2 Planejamento da operação do sistema elétrico brasileiro

A energia requerida pelo Brasil é gerada e consumida através de dois tipos de sistemas: o SIN, sistema hidrotérmico de grande porte operado centralizadamente e os sistemas isolados, localizados principalmente na região amazônica, responsáveis por menos de 1% da energia requerida pelo país (ONS, 2019)s

Para fins de comercialização de energia, o SIN está dividido em quatro submercados, cujas fronteiras são definidas em função da presença de restrições relevantes de transmissão ao fluxo de energia elétrica no sistema. Os submercados são: Norte, Nordeste, Sul e Sudeste/Centro-Oeste (ANEEL, 2004). A Figura 2-8: apresenta espacialmente a divisão dos subsistemas.



Figura 2-8: Subsistemas do SIN.
Fonte: Adaptada a partir de DEVEZA (2016).

Os sistemas de potência podem ser classificados como: termelétricos, hidrelétricos, hidrotérmicos ou híbridos, dependendo do parque gerador utilizado, contemplando respectivamente só usinas térmicas, somente hidráulicas, térmicas e hidráulicas ou ainda aqueles em que as UTEs e UHEs estariam integrados com fontes eólicas, solares, baterias e sistemas de gestão de demanda (DALL'ORTO, 2017).

O sistema brasileiro é híbrido, predominantemente hidrelétrico e possui múltiplos proprietários de usinas. O despacho centralizado das usinas geradoras permite coordenar a ação de cada um dos agentes e otimizar o uso dos recursos energéticos, levando em conta a sinergia e a complementaridade entre diferentes regimes hidrológicos e orientando os intercâmbios entre as regiões do país através do sistema de transmissão (BARRAL, 2014).

O planejamento e a execução das atividades de coordenação e controle da operação, da geração e da transmissão de energia elétrica do SIN são atribuições do ONS⁶. Uma usina ser despachada centralizadamente significa que o agente gerador não tem liberdade para estabelecer sua própria estratégia operativa. Esse agente sujeita-se à estratégia determinada pelo ONS, especialmente no que se refere a quantas unidades geradoras devem ser acionadas, e quando (BARRAL, 2014).

Atualmente, o planejamento da operação do sistema busca definir uma estratégia de geração para cada uma das usinas, de forma que se alcance sistemicamente a segurança operativa e o menor custo esperado de operação para o SIN. A operação deve atender à demanda em termos de energia (produção média em um período) e de potência (especialmente horários de ponta (BARRAL, 2014).

O problema de planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos possui características que podem ser assim resumidas (DALL'ORTO, 2017):

- é acoplado no tempo, ou seja, é necessário avaliar as consequências futuras de uma decisão no presente, sendo a melhor solução o equilíbrio entre o benefício presente do uso da água e o benefício futuro de seu armazenamento;
- é dinâmico e estocástico, pois existe a irregularidade das vazões afluentes aos reservatórios, que variam sazonalmente e regionalmente;
- é acoplado no espaço, ou seja, há interdependência na operação de UHEs, pois a quantidade de água liberada em uma usina afeta a operação de outra situada a jusante devido a construção de usinas em cascata;

⁶ Lei nº 9.648/1998 e lei nº 10.848/2004.

- o valor da energia gerada por uma UHE somente pode ser medido em termos da economia resultante nos custos de geração térmica ou déficits evitados e não diretamente como uma função apenas do estado da usina;
- os objetivos de economia de operação e confiabilidade de atendimento são claramente antagônicos: a máxima utilização da energia hidrelétrica disponível a cada etapa é a política mais econômica, pois minimiza os custos de combustível; entretanto, essa política é a menos confiável, pois resulta em maiores riscos de déficits futuros; por sua vez, a máxima confiabilidade de fornecimento é obtida conservando o nível dos reservatórios o mais elevado possível; entretanto, esse modo de operação significa utilizar mais geração termelétrica e, portanto, aumentar os custos de operação; o equilíbrio entre os custos de operação e a confiabilidade é obtido através do custo do déficit, que representa o impacto econômico associado à interrupção do fornecimento.

Assim, a decisão operativa é tomada sob incerteza e, para auxiliar, diversas técnicas podem ser usadas na otimização do despacho hidrotérmico. Dentre elas, pode-se destacar a Programação Dinâmica – PD; PD Estocástica - PDE; PD Dual Estocástica – PDDE; Programação Linear – PL; PL Inteira Mista e o Método de Pontos Interiores; Programação não linear; algoritmos não lineares de fluxo de rede e mais recentemente, Algoritmos Evolucionários e Inteligência Artificial (DALL’ORTO, 2017). A PDDE será abordada em mais detalhes na seção 4.3.

Para operacionalizar o planejamento da operação, é necessário dispor de uma grande capacidade computacional. O processo decisório viabiliza-se com uso de uma cadeia de modelos computacionais e através de diferentes horizontes de planejamento da operação, de forma a reavaliar com menos incerteza as condições futuras à medida que se estreita esse horizonte (PEREIRA, 1985).

Assim, o médio prazo, com cinco anos de estudo, busca a política operativa, onde o detalhamento do sistema acaba perdendo relevância para as incertezas futuras. Já o planejamento de curto prazo (até um ano de planejamento), apresenta maior detalhamento das usinas e sistemas de transmissão e fornece as diretrizes para a programação diária (ONS, 2016; CCEE, 2019).

O ONS usa a cadeia de modelos desenvolvida pelo CEPEL, segundo a qual o Newave é o modelo de planejamento da operação de médio prazo. O Decomp cumpre o papel de modelo de planejamento da operação de curto prazo, enquanto o modelo Dessem é utilizado para dar suporte ao despacho hidrotérmico de curtíssimo prazo, em conjunto com outros modelos e ferramentas computacionais de suporte (ONS, 2016).

Vale mencionar que, na cadeia de modelos oficial do setor elétrico, para diferentes horizontes de planejamento, o nível de detalhe de representação dos reservatórios muda. No médio prazo, é utilizada a representação por reservatório equivalente, procedimento em que todo o sistema brasileiro é resumido em quatro grandes reservatórios (ONS, 2016).

Tal representação foi usada por muitos anos para contornar limitações computacionais, mas, atualmente, é considerada ultrapassada para os objetivos de representação energética (CARVALHO *et al.*, 2005; PSR, 2017b). Ao caminhar-se para uma realidade em que a representação dos usos múltiplos nos reservatórios se faz cada vez mais necessária, além de as vazões serem mais voláteis, tem-se que o sistema equivalente oferece uma falsa sensação de segurança, pois não permite a correta representação das necessidades de segurança hídrica em rios e bacias.

2.3.3 Modelagem hidrológica como insumo para a operação

Como visto na seção 2.3.1, o parque gerador de energia elétrica brasileiro é predominantemente de base hidrelétrica. Em razão dessa característica, para o planejamento e programação da operação eletroenergética do SIN, é necessária a previsão e a geração de cenários de aflúncias aos aproveitamentos hidrelétricos situados nos seus quatro subsistemas (ONS, 2018).

Por esse motivo, o ONS busca substituir seus modelos estocásticos de previsão de vazões por modelos hidrológicos, os quais consideraram a precipitação observada e prevista na bacia e a modelagem chuva-vazão. Tal processo culminou, em 2008, na entrada oficial dos modelos MGB (bacia incremental à UHE São Simão), SMAP-MEL (bacia incremental à UHE Itaipu) e Fuzzy (bacia do rio Iguaçu) para a previsão de vazões da primeira semana operativa. Após a entrada desses modelos, houve, ainda, a incorporação do modelo Neuro em parte da bacia do rio São Francisco e do modelo SMAP/ONS (adaptação feita ao modelo SMAP original), que atualmente é utilizado nas

bacias dos rios Grande, Paranaíba (a montante da UHE Itumbiara), Paranapanema e Paraná (bacia incremental à UHE Itaipu) (ONS, 2018).

Essa variedade de modelos gera dificuldades como: (i) a necessidade de manutenção de diferentes interfaces que auxiliem no processamento dos modelos; (ii) a necessidade de absorção e evolução de expertise em diversas metodologias; (iii) a dificuldade dos agentes de processar modelos distintos, com diferentes arquivos de entrada e saída e formas de pós-processamento, tornando a reprodutibilidade da previsão de vazão do ONS mais complexa e menos transparente (ONS, 2018).

Para mitigar tais dificuldades, o ONS vem adotando nos últimos anos apenas o modelo SMAP/ONS na expansão da modelagem chuva-vazão em bacias do SIN. Atualmente, 33% da previsão de Energia Natural Afluyente⁷ - ENA do SIN para a primeira semana operativa à frente já é realizada com o modelo SMAP/ONS, com perspectivas de expandir esse valor para 73% no final do ano de 2019. Além disso, o ONS já iniciou o processo de calibração desse modelo para as demais bacias do SIN (ONS, 2018).

ONS (2018) destaca os fatores que levaram à escolha do modelo SMAP/ONS como principal modelo de previsão de vazão para a próxima semana operativa:

- abordagem conceitual do processo de transformação da chuva em vazão, que permite a separação da vazão total em parcelas de escoamento superficial e de escoamento subterrâneo;
- maior facilidade de uso para horizontes superiores a uma semana;
- simplicidade e facilidade de compreensão metodológica;
- domínio de sua tecnologia e possibilidade de aprimoramento pelo ONS;
- adaptabilidade a bacias com comportamentos hidrológicos distintos;
- código aberto e livre, o que permite sua programação em diversas linguagens; e
- bons resultados na previsão de vazões em todas as bacias nas quais foi implementado.

⁷ Representa a geração média de energia, num determinado período, para cada m³/s de vazão natural afluyente no local de um aproveitamento hidrelétrico, podendo ser calculada em base diária, semanal, mensal ou anual e, também, por bacia e por subsistema.

2.3.3.1 SMAP

O modelo *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP) é um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão. Foi desenvolvido por (LOPES *et al.*, 1981), baseando-se na experiência com a aplicação do modelo Stanford Watershed IV e do modelo Mero em trabalhos realizados no Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE) (LOPES, 1999).

Além do uso já mencionado para aproveitamentos nas bacias dos rios Grande, Paranaíba, Paranapanema e Paraná, também foi usado no plano de gerenciamento integrado da sub-bacia do rio Salitre para a obtenção da disponibilidade hídrica no rio Salitre/BA, afluente do rio São Francisco a jusante do reservatório da UHE Sobradinho, segundo ONS (2018) e CUNHA (2016).

Como discutido por CUNHA (2016) o modelo SMAP possui grande amplitude de aplicação em diferentes escalas espaciais e temporais. XAVIER (2012) aplicou uma versão modificada do modelo SMAP mensal em duas sub-bacias do rio Negro, Serrinha (290.000 km²) e Caracará (120.000 km²). Com o objetivo de adaptar o SMAP a bacias de grandes dimensões, foram incluídos quatro novos parâmetros de calibração.

Mais recentemente, Silva (2018) aplicou o modelo SMAP mensal, modificado através da adição de um parâmetro de translação, no estudo de tendências climáticas e hidrológicas em bacias de interesse para o setor elétrico.

A metodologia do modelo SMAP será discutida em detalhes na seção 4.2.

2.4 Uso da água para produção agrícola

Um dos maiores desafios do século XXI é o de garantir segurança alimentar para todas as pessoas. Atualmente, existem cerca de 795 milhões de pessoas que não têm acesso a quantidades suficientes de alimento para manter níveis básicos de saúde (RODRIGUES *et al.*, 2017). Para atender a demanda mundial em 2030, estima-se que a produção atual de alimentos precisa sofrer um aumento real de 35% (EMBRAPA, 2018).

A agricultura é a principal atividade responsável pela produção de alimentos no mundo. Existem dois tipos distintos de agricultura. A produção de sequeiro fica limitada aos períodos das chuvas, havendo maior incerteza quanto ao resultado, pois é totalmente

dependente das variações climáticas. A agricultura irrigada, por sua vez, não é influenciada pela incerteza temporal e locacional das chuvas, podendo-se produzir em qualquer época do ano (POSTEL, 2000) Além disso, essa atividade representa, mundialmente e também no Brasil, em média, 70% do consumo hídrico (ANA, 2017a), conforme apresentado na Tabela 2-1.

Tabela 2-1: Demandas por finalidade no Brasil em 2016.

Usos (m3/s)	Retirada	Consumo	Retorno
Irrigação	969	745	224
Abastecimento urbano	488	98	391
Indústria	192	105	87
Abastecimento rural	34	27	7
Mineração	33	9	24
Termelétrica	216	3	213
Uso animal	165	123	42

Fonte: Adaptado de ANA (2017a).

Em termos técnicos, considera-se como irrigação: a prática de aplicar água, que não a da chuva, diretamente à superfície do solo cultivado com pastos ou culturas, em quantidades e intervalos determinados, com a finalidade de fornecer água às plantas em condições apropriadas ao seu crescimento e produção (IBGE, 2006).

Um sistema de irrigação é projetado para captar água em uma fonte, rio ou reservatório, e transportá-la até o lote agrícola, com muitas transferências de água. Portanto, o sistema abrange uma captação, uma rede de distribuição de canais ou condutos que leva a água a cada lote agrícola e ainda um sistema de rega para aplicação de água no solo. Cada uma dessas transferências envolve uma perda de água (BERNARDO, 1989).

A eficiência de irrigação é função da relação entre a quantidade de água mobilizada para a irrigação e aquela realmente incorporada ao solo. Esse valor varia em função do método de irrigação empregado. A eficiência total de irrigação é o produto das eficiências de condução, de distribuição e de aplicação, que são descritas na sequência, de acordo com BERNARDO (1989)

- **Eficiência de condução (Ec)** - representa todas as perdas que ocorrem desde a tomada d'água até os limites da área a ser irrigada. É variável em função do tipo de conduto utilizado para o transporte da água, que pode ser um canal em terra ou

revestido, ou mesmo uma tubulação. Para fins de anteprojeto, podem ser utilizados os seguintes valores:

- canais em terra - 75% para os não revestidos e 85% para os revestidos;
- tubulações - 95%.
- **Eficiência de distribuição (Ed)** - representa todas as perdas que ocorrem na distribuição de água por toda a área. Podem ser utilizados os mesmos valores referentes à eficiência de condução.
- **Eficiência de aplicação (Ea)** - representa todas as perdas que ocorrem durante a aplicação de água por toda a área. Varia de 65 a 90%, dependendo do método de irrigação empregado.

Existem diversos métodos de aplicação, que são descritos na Tabela 2-2. Não existe um método ou sistema ideal para qualquer situação, devendo haver avaliação integrada de componentes socioeconômicos e ambientais, incluindo disponibilidade e qualidade da água. Uma vez selecionados o método e o sistema mais adequados para determinado local, os equipamentos necessitam de correto dimensionamento e constante manutenção para a maximização da eficiência do uso da água (ANA, 2014).

Tabela 2-2: Descrição dos principais métodos de irrigação.

Método	Descrição
Inundação	Consiste no nivelamento do terreno para alagamento ou inundação da área de cultivo de determinadas lavouras
Sulcos	Consiste na condução e distribuição da água através de sulcos ou canais de irrigação localizados entre linhas de plantio das culturas
Aspersão (pivô central)	Método no qual a área é irrigada por sistema móvel, constituído por uma barra com aspersores, que se movimenta em torno de um ponto fixo
Aspersão (outros métodos)	Aspersores fixos e móveis, exceto pivô central
Localizado (gotejamento, microaspersão, etc.)	Condução da água por tubos, sendo a sua distribuição feita gota a gota
Outros métodos de irrigação e/ou de molhação	Regas manuais utilizando mangueiras, baldes, latões, e outros métodos, ou ainda se não utilizou nenhum método de irrigação

Fonte: IBGE (2006)

A Tabela 2-3 apresenta referências de eficiência de aplicação para diferentes métodos de irrigação agrupados de acordo com a forma de aplicação da água.

Tabela 2-3: Indicadores de eficiência de uso da água para sistemas de irrigação.

Método	Sistema de irrigação	Eficiência de aplicação (%)
Superfície	Sulcos abertos	65
	Sulcos fechados ou interligados em bacias	75
	Inundação	60
Subterrâneo	Gotejamento subterrâneo ou enterrado	95
	Subirrigação ou elevação do lençol freático	60
Aspersão	Convencional com linhas laterais ou em malha	80
	Mangueiras perfuradas	85
	Canhão autopropelido /Carretel enrolador	80
	Pivô central (fixo ou rebocável)	85
	Linear	90
Localizado	Gotejamento	95
	Microaspersão	90

Fonte: ANA (2017b)

De maneira geral, nos países em desenvolvimento, os sistemas agrícolas baseados no cultivo de sequeiro são caracterizados por baixas produtividades, comprometendo a capacidade de atender aos mercados e de garantir retornos econômicos e sociais. No entanto, a agricultura irrigada é uma prática agrícola muito mais intensiva e fortemente dependente de energia e de água, assim como demandante de cuidados quanto à manutenção da qualidade dos solos cultivados (RODRIGUES *et al.*, 2017).

A Figura 2-9 apresenta a comparação histórica entre o rendimento em condições predominantemente irrigadas e não irrigadas para as culturas de arroz, feijão e trigo, grãos de destaque na dieta brasileira, O desempenho das culturas irrigadas mostra-se entre duas a três vezes maior que o das não irrigadas (ANA, 2017b).

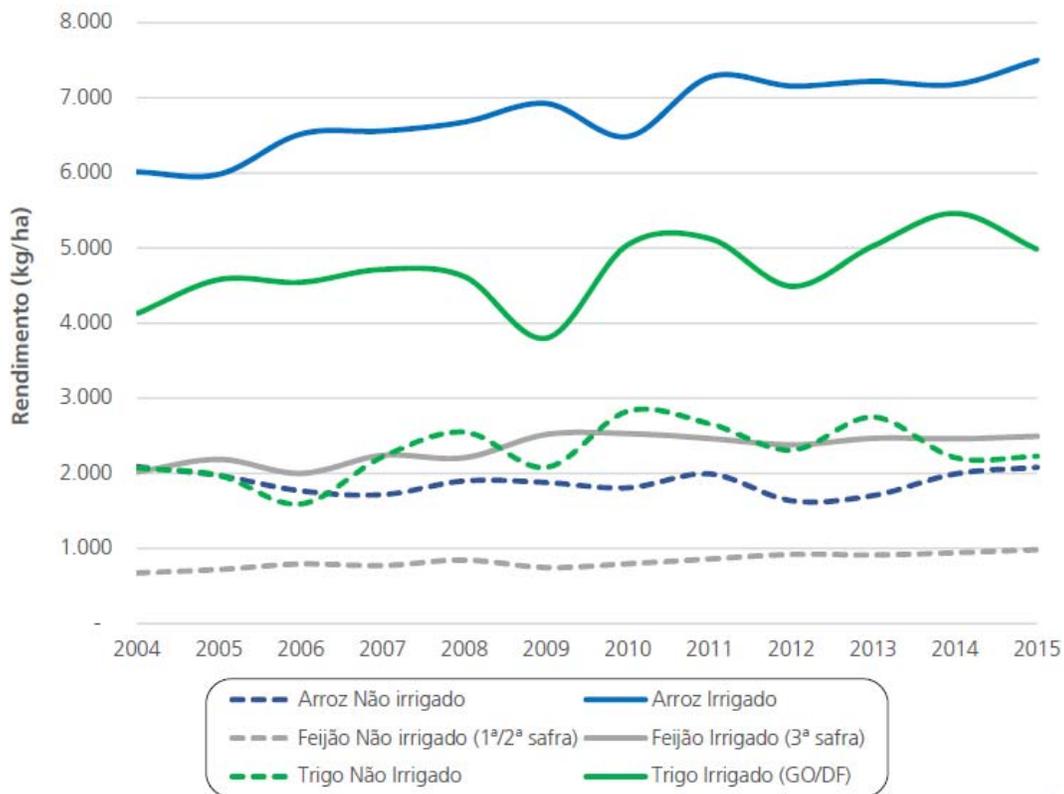


Figura 2-9: Indicadores de rendimento – arroz, feijão e trigo (2004-2015).
 Fonte: ANA (2017b)

No Brasil, dos 79,4 Mha plantados, apenas 7 Mha são irrigados – cerca de 9% da área total plantada, segundo IBGE (2017) e ANA (2017b). Além da área irrigada total, a Figura 2-10: apresenta a participação das regiões do país no período entre 1960 e 2015. É notável a redução da participação da região sul, que, inicialmente, contava com 62,7% da área irrigada, mas no final do horizonte de análise correspondia a apenas 24,4% do total. A região sudeste mostrou um crescimento expressivo, de 25,5% em 1960 para 39% em 2015. A região centro-oeste respondia por um percentual inexpressivo no início do período de análise, mas, em 2015, já correspondia a 17% da área total irrigada. A região nordeste manteve sua participação praticamente constante, respondendo por 16,8% da área irrigada em 2015. Por fim, a região norte manteve-se inexpressiva ao longo das últimas décadas (ANA, 2017b).

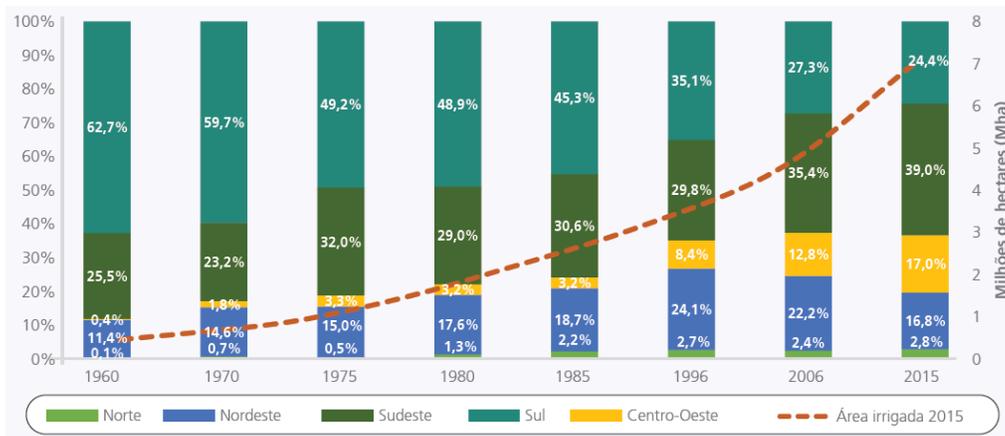


Figura 2-10: Participação regional na área irrigada (1960-2015).
Fonte: ANA (2017b).

Atender o crescimento da demanda por alimento pode ser feito por meio da expansão da área plantada e/ou por meio do aumento do rendimento das culturas. Portanto, a agricultura irrigada mostra-se essencial para que se atinja segurança alimentar e nutricional. Todavia, a disponibilidade de água passa a ser um fator limitante para viabilizá-la (RODRIGUES *et al.*, 2017).

Em 2006, foram identificados 4,45 Mha equipados para irrigação no país (ANA, 2014). A inundação (25,7% da área total) e a aspersão (54,7%) foram os métodos predominantes, sendo esta última modalidade subdividida em pivôs centrais (19,6%) e outros métodos de aspersão (35,1%) Regionalmente, verifica-se a concentração da inundação na região sul; dos pivôs centrais no Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste, e dos outros métodos de aspersão nas regiões sudeste e nordeste (ANA, 2014), conforme apresentado na Figura 2-11.

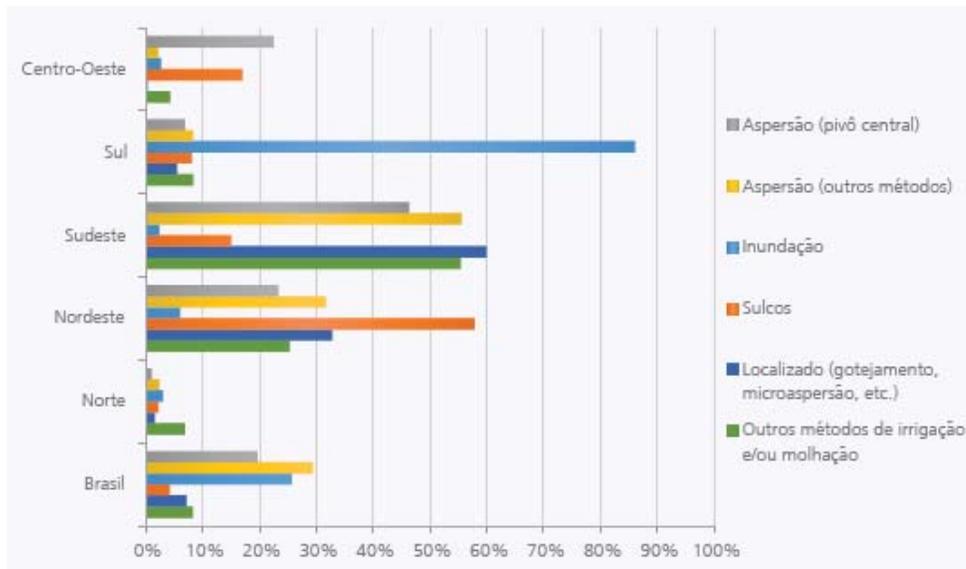


Figura 2-11: Proporção de área dos métodos de irrigação – Brasil e regiões.
 Fonte: ANA (2014)

Nas últimas décadas, observou-se expressivo aumento da agricultura irrigada no Brasil, crescendo sempre a taxas superiores às do crescimento da área plantada total. O destaque foi para a expansão dos métodos de irrigação localizada e por pivô central, conforme apontado por ANA (2015) e CHRISTOFIDIS (2018) e apontado na Figura 2-12.

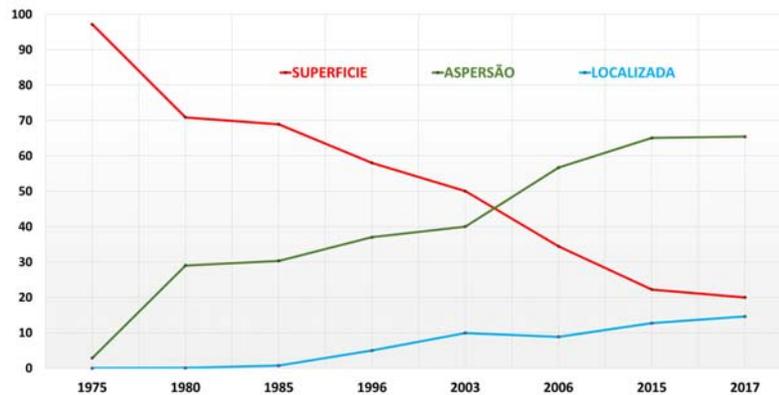


Figura 2-12: Evolução da participação dos métodos de irrigação no Brasil (%).
 Fonte: CHRISTOFIDIS (2018).

ANA (2017b) calculou o potencial de expansão da área irrigada no país segundo critérios físicos e de ocupação, chegando a um total de 76,2 Mha. A área foi dividida em três classes de aptidão. Sobre a classe de alta aptidão, foi aplicado um filtro para selecionar áreas com maior aptidão de solo e relevo, boa qualidade logística, exclusão de áreas de proteção ambiental e presença já existente da agricultura irrigada. O filtro

resultou em um potencial efetivo de 11,2 Mha. Considerando-se as limitações de implementação, no horizonte 2030, estima-se a incorporação de 3,14 Mha irrigados – média de pouco mais de 200 mil hectares ao ano –, aproximando o país da área total de 10,09 Mha irrigados. Esse incremento corresponde a um aumento de 45% sobre a área atual e ao aproveitamento de 28% do potencial efetivo estimado. A Figura 2-13 esquematiza o cálculo do potencial de expansão.



Figura 2-13: Potencial de expansão da área irrigável – Brasil.
Fonte: ANA (2017b)

2.4.1 Políticas de irrigação no Brasil

A Política Nacional de Irrigação foi instituída em 1979, através da lei nº 6.662, conhecida como *Lei de Irrigação*. Segundo RODRIGUES *et al.* (2017), essa lei possuía quatro pressupostos fundamentais:

- (i) a utilização da irrigação com a observância de sua função social, de desenvolvimento;
- (ii) servir como um instrumento que dá maior segurança às atividades agropecuárias, reduzindo o risco de intempéries climáticas;
- (iii) oferecer condições para elevar a produção e produtividade agrícola;
- (iv) atuar como meio de elaboração, financiamento, execução, operação, fiscalização e acompanhamento de projetos de irrigação.

Inicialmente o foco estava na criação dos distritos públicos de irrigação. Alguns deles, como Petrolina (PE) e Juazeiro (BA), vingaram, enquanto outros ficaram muito aquém do seu potencial, como Jaíba (MG) (KELMAN, 2009).

Em 2013 foi editada a lei nº 12.787, que disciplina o novo marco legal da Política Nacional de Irrigação. Os autores destacam os seguintes princípios da nova Política Nacional de Irrigação:

- (i) uso e manejo sustentável dos solos e dos recursos hídricos destinados à irrigação;
- (i) integração com as políticas setoriais de recursos hídricos, de meio ambiente, de energia, de saneamento ambiental, de crédito e de seguro rural e seus respectivos planos, com prioridade para projetos cujas obras possibilitem o uso múltiplo dos recursos hídricos;
- (ii) articulação entre as ações em irrigação das diferentes instâncias e esferas de governo e entre essas e as ações do setor privado, entre outros.

Segundo RODRIGUES *et al.* (2017), essa lei trouxe avanços importantes para o marco legal, os quais possibilitariam desenvolver a agricultura irrigada em bases sustentáveis. No entanto, até o presente momento, a lei ainda não foi regulamentada.

Além do aspecto legal, outra característica notável no Brasil é a existência de dois tipos de projetos de irrigação: públicos e privados. Em termos de magnitude de área irrigada, destacam-se os perímetros privados, no entanto, os perímetros públicos apresentam um aspecto pioneiro, pois formaram a base da expansão da irrigação privada em diversas regiões (RODRIGUES *et al.*, 2017).

Estes autores destacam, ainda, que, atualmente, a falta de mínima infraestrutura básica, especialmente energia e barragens são os principais entraves para o desenvolvimento da agricultura irrigada nas diversas regiões do Brasil.

2.4.2 Métodos para cálculo de retiradas para irrigação

Para o presente estudo, uma métrica de grande relevância é a estimativa das vazões consumidas no uso agrícola, em especial sob o ponto de vista do setor elétrico. Por esta razão, foi feita uma revisão da literatura pública para identificar as abordagens metodológicas utilizadas pelo ONS. Os documentos analisados são apresentados na Tabela 2-4.

Tabela 2-4: Abordagens do ONS para cálculo dos usos consuntivos.

Documento	Ano
Estimativas das Vazões para as Atividades de Uso Consuntivo da Água em Bacias do Sistema Interligado Nacional – SIN	2003
Carta ONS 013/340/2004	2004
Estimativas das Vazões para as Atividades de Uso Consuntivo da Água em Bacias do Sistema Interligado Nacional – SIN	2005
NT 076/2005 –Revisão 3 - Processos de Consistência e de Consolidação de Dados Hidráulicos, Hidrológicos e Hidroenergéticos	2005
Nota Técnica nº 0133/2014/ONS – Series de Vazões Naturais da Bacia do Rio São Francisco – Incorporação de Novas Estimativas de Demandas de Usos Consuntivos	2014
Carta ONS nº 0296/300/2014	2014

Com base nos documentos acima e nas bases de dados dos planos mensais de operação (PMO), disponíveis em CCEE (2018), deduz-se que o cálculo feito pelo ONS trabalha com a extrapolação das normais climatológicas⁸ e médias de longo período dos parâmetros necessários e não leva em conta a característica variável do clima. Assim, como apresentado na Figura 2-14, os perfis de demanda repetem-se, independente de aquele ser um ano com um período seco mais rigoroso ou não.

⁸ A Organização Meteorológica Mundial (OMM) define Normais como “valores médios calculados para um período relativamente longo e uniforme, compreendendo no mínimo três décadas consecutivas” e padrões climatológicos normais como “médias de dados climatológicos calculadas para períodos consecutivos de 30 anos.

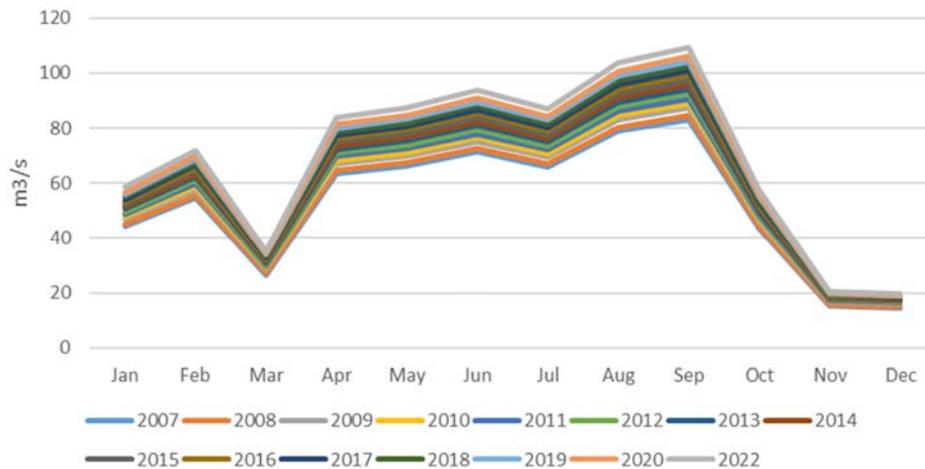


Figura 2-14: Demanda de irrigação para a UHE Sobradinho segundo PMOs.
 Fonte: Adaptado a partir de CCEE (2018).

MMA *et al.* (2011) calcularam uma matriz de coeficientes técnicos de vazões de retirada, consumo e retorno para a agricultura irrigada. O estudo trabalhou com diferentes escalas, como a malha municipal do Brasil, a base de ottobacias disponibilizada pela ANA, a Divisão Hidrográfica Nacional (DHN) e as unidades hidrográficas de referência SUB1 e SUB2 do Plano Nacional de Recursos Hídricos. O estudo englobou 59 cultivos temporários e permanentes.

Assim como os resultados obtidos em CCEE (2018), essa matriz de coeficientes possui a fragilidade de não variar de ano para ano. Ainda assim, por sua praticidade, tem sido muito utilizada desde sua publicação.

A Tabela 2-5 apresenta um levantamento das principais abordagens para cálculo de coeficientes técnicos de irrigação encontradas na literatura com base em MMA *et al.* (2011).

Tabela 2-5: Abordagens para cálculo de coeficientes técnicos no uso agropecuário.

Referência	Equações / conceitos de destaque
ENGEORPS (1998)	Coeficiente de cultura para quatro estágios de desenvolvimento; Blaney-Criddle para cálculo de evapotranspiração potencial; Para precipitação efetiva: coeficientes decrescentes por cada 25 mm de incremento de chuva mensal total.
Christofidis (1999)	Estimativa de demanda de água para irrigação no Brasil por regiões e estados; Para o cálculo da vazão de captação, basta multiplicar a área irrigada pelo indicador de água derivada dos mananciais da respectiva UF; Para o cálculo da vazão de consumo, multiplique-se a área irrigada pelo indicador de água consumida pelos cultivos, do respectivo estado da federação.
NT 007/SPR/ANA 2003	Estabelecimento de isolinhas de déficit hídrico sobre o espaço brasileiro, de modo a definir 10 classes de déficit para serem associadas às dotações unitárias de água para irrigação normalmente empregadas no país; Uso das normais de precipitação e de temperatura de estações climatológicas INMET; Evapotranspiração potencial (ETp) por Thornthwaite; Relação entre município e déficit hídrico por geoprocessamento.

Fonte: Adaptado a partir de MMA *et al.* (2011)

Um conceito fundamental, que permeia diferentes metodologias de cálculo de retiradas para irrigação, é o conceito de evapotranspiração. Devido à sua importância, ele será descrito em detalhes a seguir.

2.4.2.1 Evapotranspiração

BERNARDO (1989) definiu os diversos conceitos de evapotranspiração:

- Evapotranspiração (ET): é o processo combinado pelo qual a água é transferida da superfície terrestre para a atmosfera envolvendo a evaporação da água da superfície do solo e a água interceptada pelas plantas, e a transpiração proporcionada por elas.
- Evapotranspiração de Referência (ET₀): é a evapotranspiração de uma superfície extensiva, totalmente coberta com grama de tamanho uniforme, com 8 a 15 cm de

altura e em fase de crescimento ativo, em um solo com ótimas condições de umidade;

- Evapotranspiração Potencial da Cultura (ET_{pc}): é a evapotranspiração de determinada cultura quando se tem ótimas condições de umidade (sem restrições) e nutrientes no solo, de modo a permitir a produção potencial dessa cultura nas condições de campo, ou seja, sem restrição para a taxa de evapotranspiração;
- Evapotranspiração Real da Cultura (ET_{rc}): é a quantidade de água evapotranspirada por uma determinada cultura, sob condições normais de cultivo, isto é, sem a obrigatoriedade de o teor de umidade do solo permanecer próximo da capacidade de campo.

Com respeito à bibliografia referente à evapotranspiração, BARROS (2012) sinaliza diversos trabalhos de revisão disponíveis e apresenta de forma categorizada os métodos utilizados na estimativa da evapotranspiração de referência. Segundo o autor, as medidas diretas de evapotranspiração permitem sua determinação para uma área vegetada com bastante confiabilidade, mas necessitam de uma infraestrutura muito específica e até certo ponto muito complexa para o fim a que se propõem, além de demandarem tempo consideravelmente grande para que as medições realizadas possam ser tomadas como referência. Por essa razão, as medidas indiretas de evapotranspiração tornam-se necessárias pela sua maior facilidade de operação, podendo oferecer bons resultados quando utilizadas criteriosamente.

Dentre as medidas indiretas, a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (Food and Agriculture Organization –FAO) em seu livro 56 (Allen *et al.*, 1998) sugere uma metodologia padrão para o cálculo da evapotranspiração de referência: a equação de FAO56-Penman-Monteith (referida nesse trabalho como PM).

Apesar de atualmente a equação PM ser universalmente aceita como referência na estimativa da evapotranspiração, seu nível de exigência de dados de entrada dificulta sua aplicação, uma vez que os elementos meteorológicos requeridos nem sempre se encontram disponíveis em algumas regiões (FERNANDES, 2006; SHAHIDIAN *et al.*, 2011).

FERNANDES (2006) avaliou, em todo o território nacional, diferentes métodos empíricos de estimativa da evapotranspiração de referência, que diferem entre si em complexidade e necessidades de dados meteorológicos. O intuito foi determinar, para as

mais variadas condições climáticas do território nacional, uma classificação e ordenamento dos métodos mais confiáveis e os níveis de erro que se comete ao utilizá-los em diferentes condições, comparando-os à equação PM. Seus estudos de caso localizaram-se nas cidades fluminenses de Campos dos Goytacazes e Rio de Janeiro.

SHAHIDIAN *et al.* (2011) apresentou diversas equações que têm sido desenvolvidas para o cálculo da evapotranspiração utilizando um conjunto mínimo de parâmetros. Estas metodologias permitem calcular o consumo de água pelas plantas de forma expedita e sem grande investimento na aquisição e manutenção de estações meteorológicas. Dentre essas metodologias está a de Hargreaves-Samani (HS).

A equação HS tem produzido resultados satisfatórios ao ar livre em diversas partes do mundo, apesar da sua aparente simplicidade. O uso de lisímetros para comparar as equações de Thornthwaite, Willmott e HS nas regiões semiáridas do Irã levou à conclusão de que a equação de HS calibrada era a mais precisa. Estudos realizados na região árida de sul de Espanha compararam sete equações de ET_0 com dados de lisímetros e concluíram que a HS era a segunda melhor, depois da PM. Bom desempenho também foi constatado para a cidade de Ontário no Canadá, para o Estado da Louisiana nos Estados Unidos e para a bacia do Riacho Gameleira, no estado de Pernambuco SHAHIDIAN *et al.*, 2011, e IDE, 2013).

IDE (2013) analisou as demandas de água para irrigação em 34 comunidades de pequenos produtores rurais localizadas nas proximidades dos canais do projeto de integração do rio São Francisco. Foram testados dez métodos de estimativa de ET_0 , tendo como padrão o método de PM. O método HS apresentou a melhor performance, sendo classificado como “ótimo”. O bom desempenho do método de HS pode ser explicado pelo fato desse método ter sido originalmente desenvolvido para condições semiáridas, similar às encontradas na região de estudo. Além disso, o método apresenta, com frequência, bom desempenho na estimativa da ET_0 em períodos de tempo mensais.

Apesar disso, a literatura relata grande variabilidade de resultados em relação ao seu desempenho. IDE (2013) aponta relatos de desempenho “ruim” desse método em clima úmido, subestimando a ET_0 na Croácia e na Sérvia, bem como relata baixo desempenho desse método em diferentes localidades no estado da Bahia e em Mossoró/RN.

Há que se considerar, no entanto, que estudos têm demonstrado que o vento é uma fonte importante da variabilidade no valor da ET_0 e, como a equação HS não contabiliza o vento, diverge sensivelmente de cálculos realizados com a equação PM (SHAHIDIAN *et al.*, 2011).

3 BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

O presente capítulo apresenta o levantamento das principais características da bacia do rio São Francisco, bem como dos aspectos mais relevantes que a fizeram ser a escolhida para o estudo de caso desta pesquisa. Além das características físicas da bacia, destacam-se as atividades de geração de hidroeletricidade e produção agrícola nela realizadas, além das condições hidrológicas adversas observadas na última década.

3.1 Características gerais

O rio São Francisco nasce na serra da Canastra, em MG e percorre 2.696 km até sua foz na divisa entre AL e SE. O *Velho Chico* é um rio de extensão e impactos grandiosos, rendendo-lhe a denominação de “rio da integração nacional”. O rio dá origem à região hidrográfica⁹ de mesmo nome.

A região hidrográfica do São Francisco é formada por diversas sub-bacias que desaguam no rio São Francisco, e este, por sua vez, no oceano Atlântico, em divisa entre os estados de Alagoas e Sergipe. A região possui uma área de 638 mil km² (8% do território nacional) e engloba 503 municípios (MMA, 2006). A Tabela 3-1 apresenta sua divisão territorial dentre as unidades da Federação.

Tabela 3-1: Distribuição da região hidrográfica na divisão territorial.

UF	Área (km ²)	% área total
Bahia	307.794	48,2%
Minas Gerais	235.635	36,9%
Pernambuco	68.966	10,8%
Alagoas	14.687	2,3%
Sergipe	7.024	1,1%
Goiás	3.193	0,5%
Distrito Federal	1.277	0,2%

Fonte: MMA (2006).

⁹ Bacias hidrográficas são áreas que possuem uma única confluência (exultório) das águas sob seu domínio e são separadas topologicamente entre si pelos terrenos mais elevados (divisores de águas). Já a Região hidrográfica é o espaço territorial compreendido por uma ou mais bacias ou sub-bacias hidrográficas imediatas com características naturais, sociais e econômicas homogêneas ou similares, visando orientar o planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos. Neste trabalho, tanto os termos bacia como região hidrográfica estão sendo utilizados como referência à área de abrangência do rio São Francisco e seus afluentes.

Essa região hidrográfica está dividida em quatro regiões fisiográficas: Alto São Francisco (SFA); Médio São Francisco (SFM); Submédio São Francisco (SFSM); e Baixo São Francisco (SFB), conforme mostrado no mapa da Figura 3-1.

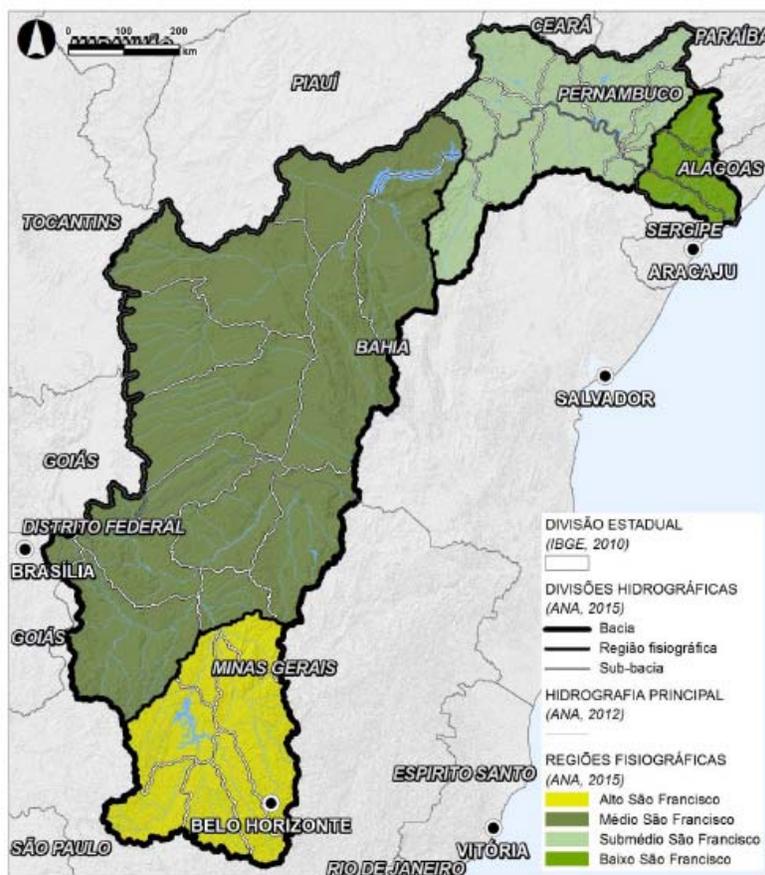


Figura 3-1: Regiões fisiográficas do São Francisco (SUB 1).
Fonte: CBHSF (2016)

A população total na região hidrográfica do São Francisco, no ano 2010, era de aproximadamente 14,3 milhões de habitantes, sendo que a população urbana representava 77,2% (CBHSF, 2016). A Tabela 3-2 apresenta a distribuição populacional.

Tabela 3-2: População da região hidrográfica do São Francisco em 2010.

Indicador	Unidade	Região Fisiográfica				Total
		SFA	SFM	SFSM	SFB	
População residente	1.000	7.156,9	3.453,9	2.274,7	1.412,5	14.298,0
População residente urbana	1.000	6.788,1	2.130,0	1.374,9	752,2	11.045,2
	%	94,8%	61,7%	60,4%	53,3%	77,2%
População residente rural	1.000	368,8	1.323,9	899,9	660,3	3.252,8
	%	5,2%	38,3%	39,6%	46,7%	22,8%
Municípios integrados na bacia	Nº	169	177	90	90	505

Fonte: CBHSF (2016).

As regiões fisiográficas são bem distintas. A Tabela 3-3 sintetiza as características físicas em cada uma delas.

Tabela 3-3: Características físicas das regiões fisiográficas.

Regiões / Características	SFA	SFM	SFSM	SFB
Altitude (m)	1600-600	2000-250	800-200	De 500 m até o nível do mar
Clima predominante	Tropical úmido e subtropical	Tropical semiárido e sub-úmido seco	Semiárido	Sub-úmido
Precipitação média anual (mm)	1600 a 1100	1400 a 600	800 - 450	500-1300
Trimestre mais chuvoso	nov-dez-jan	jan-fev-mar	jan-fev-mar	Mai-jun-jul
Trimestre menos chuvoso	jun-jul-ago	jun-jul-ago	jul-ago-set	Set-out-nov
Temperatura média (°C)	23	24	27	25
Insolação média anual (h)	2400	2600 a 3300	2800	2800
Evapotranspiração média anual (mm)	1000	1500	2000	1500
Contribuição da vazão (%)	42,2	51,4	5,7	0,7
Trimestre de maior vazão	dez-jan-fev	jan-fev-março	jan-fev-março	jan-fev-mar
Trimestre de menor vazão	jul-ago-set	ago-set-out	ago-set-out	Ago-set-out
Cobertura vegetal predominante	Cerrados e fragmentos de florestas	Cerrado, Caatinga e pequenas matas de serra	Caatinga	Caatinga, Mata Atlântica, mangues e restingas

Fonte: MMA (2015).

À montante de Xingó (no SFA, SFM e SFSM), os padrões de precipitação assemelham-se. Porém existe uma diferença marcante na ocorrência do período chuvoso no SFB (MMA, 2006).

Merece destaque, ainda, a região do semiárido, que extrapola os limites da bacia. Trata-se de um território vulnerável e sujeito a períodos críticos de prolongadas estiagens, que apresenta várias zonas geográficas e diferentes índices de aridez. As frequentes e prolongadas estiagens da região têm sido responsáveis por êxodo de parte de sua população (MMA, 2006).

A região semiárida ocupa cerca de 57% da área da bacia, abrange 218 municípios que possuem sede na bacia. Esses municípios situam-se majoritariamente na região nordeste do país, mas também se estendem por um trecho importante do norte de Minas Gerais (MMA, 2006), conforme pode ser visto na Figura 3-2.

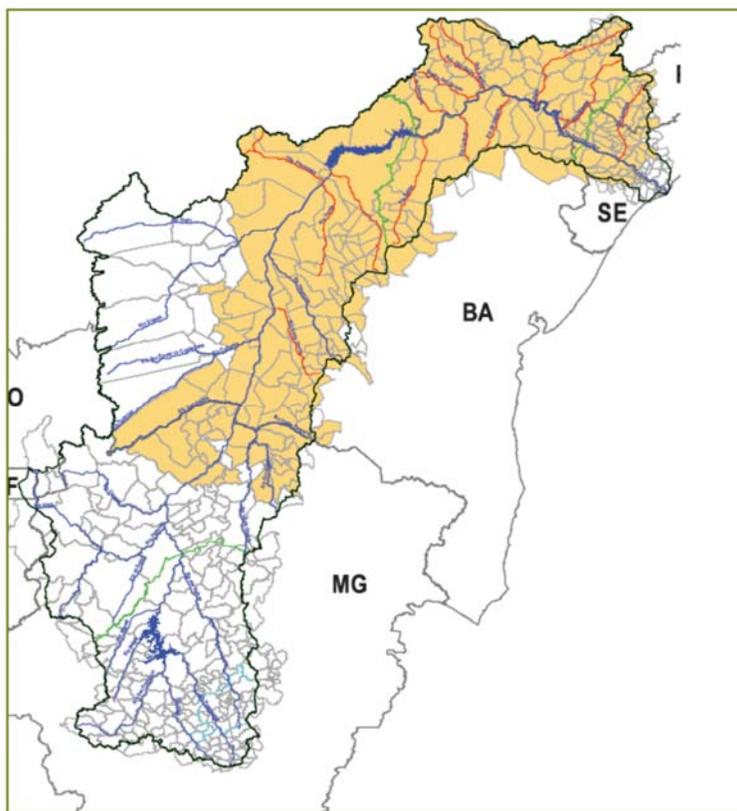


Figura 3-2: Região semiárida na bacia.
Fonte: MMA (2006).

Entre as características físicas da bacia diretamente ligadas à disponibilidade de água, vale destacar o sistema aquífero Urucuia (SAU). Esse manancial estratégico

localiza-se no oeste baiano e é responsável pela vazão de base dos principais afluentes da margem esquerda do rio São Francisco no período de estiagem. Entre eles, estão o rio Grande e o rio Corrente, principais afluentes no estado da Bahia. As bacias desses afluentes possuem grande capacidade de regularização natural por conta desse aquífero (CBHSF, 2016).

Diversos estudos tem sido realizados abordando a diversidade fisiográfica da região hidrográfica do São Francisco e suas bacias afluentes. SILVA (2004) aplicou o instrumental hidrológico do tipo chuva-vazão na avaliação da transposição e inovou ao simular seus efeitos nas regiões doadora e receptora, enfocando variáveis meteorológicas através do modelo atmosférico regional RAMS¹⁰, com destaque para os diferentes fenômenos meteorológicos atuantes na região, em especial o El Niño e La Niña. DI BELLO, 2005 abordou a questão da representatividade da umidade do solo em modelos chuva-vazão, aplicando o modelo SMAP II em estudo de caso na bacia do rio Grande. NICÁCIO (2008) avaliou o balanço de energia, umidade do solo e evapotranspiração real na região de Petrolina/Juazeiro e na bacia do rio de Ondas. A autora mapeou os fluxos energéticos à superfície, umidade do solo e evapotranspiração real diária através de sensores termais de alta e moderada resolução espacial, bem como do algoritmo SEBAL¹¹.

3.2 Usos e conflitos

Quando se contempla a história e a diversidade geográfica da bacia do rio São Francisco, percebe-se que a elaboração de uma listagem simples dos múltiplos usos de suas águas é uma tarefa árdua. Esse rio define não somente o que tecnicamente é chamado de bacia hidrográfica, mas vai muito além, criando uma identidade cultural regional que abrange diversos estados brasileiros e muitas paisagens. De forma não exaustiva, mas com o objetivo de sistematizar a análise das interferências e conflitos entre os diversos usos, a Figura 3-3 mostra esquematicamente oito classes de usos que podem ser identificados atualmente na bacia hidrográfica do rio São Francisco, descritas na sequência (CBHSF, 2014). São elas:

¹⁰ *Regional Atmospheric Modeling System*

¹¹ *Surface Energy Balance Algorithm for Land*



Figura 3-3: Usos múltiplos na bacia.
 Fonte: Adaptado de CBHSF (2014).

1. a geração de energia elétrica nas hidrelétricas da CEMIG (UHE Três Marias) e da CHESF (UHEs Sobradinho, Itaparica, Complexo Paulo Afonso, Moxotó e Xingó), mas ainda com potencial para outras usinas já projetadas, como os aproveitamentos hidrelétricos de Pedra Branca (320 MW) e Riacho Seco (240 MW) entre os reservatórios das UHEs Sobradinho e Itaparica;
2. o controle de cheias proporcionado por regras específicas de operação principalmente nos reservatórios das UHEs Três Marias e Sobradinho;
3. a navegação, administrada pela AHSFRA - Administração da Hidrovia do São Francisco, órgão de infraestrutura hidroviária, que tem como principal atribuição a prestação de serviços públicos de manutenção das condições de navegabilidade do rio São Francisco, bem como de seus afluentes navegáveis, mantendo-os em condições para a realização da navegação comercial;
4. o Projeto de Integração do São Francisco, conhecido também como a transposição do São Francisco, projeto de integração do rio São Francisco com as bacias hidrográficas do nordeste setentrional;

5. projetos de irrigação e piscicultura, públicos e privados de grande dimensão que se abastecem diretamente do rio São Francisco ou de seus afluentes principais em toda a bacia.
6. abastecimento de cidades como Pirapora e outras ao longo do rio São Francisco que se abastecem diretamente do rio, bem como fazendas e projetos agropecuários;
7. hidrógrafa ambiental, que representa as condições necessárias para manter a biodiversidade e comunidades tradicionais que dependem dos serviços ambientais proporcionados pelo rio em condições naturais para a sua subsistência e reprodução;
8. atividades que dependem dos lagos formados pelos reservatórios como o turismo, a pesca esportiva, o lazer e a piscicultura em tanques-rede dentro dos reservatórios.

A possibilidade de aumento dos conflitos pelo uso da água na região hidrográfica é cada vez maior, dada a crescente demanda por esse recurso, impondo, assim, a necessidade de se operar o sistema hídrico da bacia de forma a atender aos usos múltiplos, estabelecendo as prioridades de uso conforme preceitua a lei nº 9433/2007 (MMA, 2006).

Dada a complexidade da bacia, diversos aspectos precisam ser levados em conta para sua devida gestão: ambientais, políticos, sociais, culturais, educacionais, econômicos, legais, morais, éticos, administrativos, financeiros e técnicos. Tornam-se necessárias ações e diretrizes que articulem esses aspectos, suas atividades e procedimentos, além do comprometimento entre eles (KONRAD, 2016).

De forma a evidenciar a relação entre a estimativa de demanda para os diversos usos e o efetivamente cadastrado e outorgado, a Tabela 3-4 e a Tabela 3-5 apresentam a distribuição das outorgas de origem superficial e subterrânea, respectivamente.

A caracterização das outorgas para direito de uso de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio São Francisco tem por base as outorgas de direito de uso de recursos hídricos em corpos de água de domínio da União, emitidas pela ANA entre 2001 e 2014, os bancos de dados de outorga dos órgãos gestores estaduais e o Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal (CBHSF, 2016).

A distribuição das outorgas de origem superficial entre os diversos usos indica que o uso mais outorgado é a irrigação (76%) seguido do abastecimento público (e consumo humano, com 8%) e da indústria e mineração (3%).

Tabela 3-4: Distribuição das outorgas de origem superficial entre os diversos usos.

Finalidade	N.º outorgas	Vazão outorgada (m³/s)
Irrigação	3.765	424,1
Abastecimento público e consumo humano	559	44,1
Indústria e mineração	448	19,2
Pesca e aquicultura	24	3,5
Criação animal	88	0,3
Diluição de efluentes	51	0,4
Geração de energia	1	0,1
Outros usos e usos indeterminados	163	67,2
Total	5.100	559,1

Fonte: CBHSF (2016)

Os usos com captação subterrânea mais outorgados na bacia são a irrigação (58%), a indústria e a mineração (20%) e o abastecimento público e consumo humano, com 11%.

Tabela 3-5: Distribuição das outorgas de origem subterrânea entre os diversos usos.

Finalidade	Nº de outorgas	Vazão outorgada (m³/s)
Irrigação	1.985	43,7
Abastecimento público e consumo humano	2.677	8,3
Indústria e mineração	692	15,5
Criação animal	628	1,5
Outros usos e usos indeterminados	1.017	6,6
Total	6,999	75,6

Fonte: CBHSF (2016)

Como algumas outorgas consideram a sazonalidade, as vazões máximas outorgadas em 2014 totalizavam 723,4 m³/s (CBHSF, 2016).

A demanda total de recursos hídricos (vazão de retirada para atender os principais setores de usuários) na bacia do rio São Francisco é de 309,4 m³/s (CBHSF, 2016). A Tabela 3-6 apresenta as vazões de retirada superficiais e subterrâneas para os diferentes usos.

Tabela 3-6: Vazões de retirada dos diferentes usos consuntivos (m³/s).

Setor	Total	Superficial	Subterrânea
Abastecimento urbano	31,314	27,188	4,126
Abastecimento rural	3,720	0,000	3,719
Irrigação	244,382	233,831	10,551
Criação animal	10,210	1,186	9,024
Abastecimento industrial	19,819	15,598	4,220
Total	309,446	277,804	31,642

Fonte: CBHSF (2016)

A vazão de retirada na bacia do São Francisco é distribuída da seguinte forma: 79% para irrigação, 10% para abastecimento urbano, 7% para abastecimento industrial, 3% para criação animal e 1% para abastecimento rural. A vazão consumida é distribuída entre os diferentes usos com 90% para irrigação, 4% para criação animal, 3% para abastecimento urbano, 2% para abastecimento industrial e 1% para abastecimento rural. A irrigação é o uso predominante em todas as regiões fisiográficas, com 38% da vazão de retirada no SFA, 91% no SFM, 90% no SFSM e 85% no SFB. A vazão outorgada é cerca de 2,3 vezes maior que a demanda.

3.3 Projeto de Integração do Rio São Francisco – PISF

Desde a década de 1960, o governo brasileiro tem investido em infraestrutura para permitir o uso dos recursos hídricos na bacia do São Francisco, visando o desenvolvimento econômico da região. A transposição do São Francisco foi cogitada sistematicamente nas secas das últimas quatro décadas por Mário Andreazza (governo Figueiredo, seca entre 1979-1983), Aluizio Alves (governo Itamar, seca de 1991-1993) e durante o governo Fernando Henrique Cardoso, na seca de 1997-1999. As obras iniciaram-se em 2007, já no governo Lula. O primeiro projeto efetivo foi proposto em 1985. As principais diferenças com relação ao projeto implementado é que previa apenas um canal e volumes bombeados bem maiores que os que se consolidaram no projeto final (PSR, 2017a).

O projeto de integração do rio São Francisco com as bacias do nordeste setentrional (PISF), segundo a nomenclatura mais recente, visa assegurar a oferta de água a 12 milhões de habitantes em 390 municípios, nos estados de Pernambuco, Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2016).

O PISF é um empreendimento do Governo Federal, sob a responsabilidade do Ministério do Desenvolvimento Regional¹². Com extensão de 477 km, está organizado em dois eixos de transferência de água – norte com 260 km e leste com 217 km. A obra engloba a construção de 9 estações de bombeamento, 27 reservatórios, 4 túneis, 13 aquedutos, 9 subestações de 230 kV, e 270 km de linhas de transmissão em alta tensão. Para alcançar a ramificação necessária, o projeto conta ainda com Eixos Associados. A Figura 3-4 apresenta os eixos do PISF.



Figura 3-4: Estrutura do PISF.
 Fonte: MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL (2016)

A outorga prevê a operação das estruturas dos canais em modo dual: quando o reservatório da UHE Sobradinho estiver com armazenamento abaixo de 94% de seu volume útil, admite-se o bombeamento de 26,4 m³/s (16,4 m³/s para o eixo norte e 10 m³/s para o eixo leste, com base em demanda projetada para a região receptora no ano de 2025 para abastecimento humano e dessedentação animal). No entanto, quando o reservatório estiver com estoque acima de 94% do volume útil, permite-se o bombeamento à plena potência, resultando em uma retirada média de 117 m³/s.

¹² Anteriormente era responsabilidade do Ministério da Integração Nacional.

Simulando-se essa operação com as afluições históricas, o volume médio transposto seria inferior a 3% da afluição média da UHE Sobradinho (PSR, 2017a).

Algumas críticas podem ser feitas à forma como o projeto tem sido conduzido, de acordo com PSR (2017a) e KELMAN (2018):

- o dimensionamento não levou em conta a disponibilidade a pagar dos estados receptores, nem mesmo a expectativa de demanda considerada pelas concessionárias responsáveis pelo abastecimento;
- não houve concorrência entre operadores;
- não foi considerado um pagamento pelo custo de oportunidade para recompensar a região exportadora pelo recurso hídrico cedido;
- todos os custos de investimento ficaram a cargo do governo federal e pouco ou nenhum planejamento foi feito quanto ao custeamento da operação.

Apesar dos benefícios que o PISF trará para a região semiárida, PSR (2017a) aponta que sozinho ele não suprirá a demanda de água da população nordestina. É preciso investir em soluções complementares para a distribuição aos grandes centros urbanos, bem como em soluções para as localidades mais isoladas.

Outro ponto de atenção destacado por PSR (2017a) é que, pelo sistema de gestão proposto, o custo anual de um agricultor médio apenas com compra da água bruta disponibilizada superaria o benefício econômico da lavoura. A menos que seja subsidiada pelos estados, a transposição não viabilizaria a agricultura irrigada.

De acordo com a resolução ANA nº 2.122/2018, o início da operação comercial do PISF e conseqüentemente da cobrança de tarifa pelo serviço de adução de água bruta pelos estados devem ocorrer até o dia 31 de dezembro de 2019.

3.4 Geração de hidroeletricidade

Os principais empreendimentos de geração hidrelétrica da bacia do São Francisco são apresentados na Tabela 3-7. Juntos eles somam a capacidade instalada de 10.496 MW, cerca de 11% da capacidade instalada hidrelétrica nacional EPE (2017b). Com exceção da UHE Três Marias e Queimado, todos os demais estão no subsistema Nordeste.

Tabela 3-7: Principais aproveitamentos hidrelétricos da bacia do rio São Francisco.

UHE	Entrada em operação	Vol. útil (hm ³)	Pot. Instal. (MW)	Coef. Prod. Médio MW/m ³ /s
Três Marias	1962	15.278	396	0,40
Queimado (rio Preto)	2004	389	105	1,58
Sobradinho	1979-82	28.669	1050	0,22
Itaparica	1988-90	3.549	1500	0,44
Comp. PA-Moxotó	1955-83	158	4280	1,02
Xingó	1994-97	65	3162	1,09

Fonte: Adaptado a partir de BARRAL (2014) e EPE (2017b).

A Figura 3-5 apresenta a cascata de usinas hidrelétricas da bacia do rio São Francisco.



Figura 3-5: Representação da cascata com as principais UHEs da bacia.

Fonte: Adaptado a partir de KELMAN (2018).

3.5 Produção agrícola

Em 2013, o Brasil foi o terceiro maior produtor mundial de frutas com 37,7 milhões de toneladas, atrás apenas da China e da Índia (BANCO DO NORDESTE, 2016). Na região nordeste, apesar das restrições hídricas e de solo do semiárido, a fruticultura também se reveste de elevada importância econômica e social (CASTRO, 2013). A região responde por 27% da produção nacional de frutas, destacando-se em diversos cultivos como coco, goiaba, mamão, manga, maracujá, abacaxi e melão. A fruticultura no Nordeste respondeu, em 2014, por 25,6% do valor de produção agrícola da região, com

destaque para a banana que é a principal frutícola explorada na maioria dos estados segundo BANCO DO NORDESTE (2016).

A maior parte da produção nordestina de frutas é consumida no mercado interno; apenas uma pequena parcela é exportada. Conforme apresentado na Figura 3-6, o melão e o limão são as frutas que possuem o maior percentual de produção exportada, 39,4% e 24,0% respectivamente. A produção regional de frutas como mamão, laranja, goiaba e banana é destinada quase que totalmente ao mercado interno. Os principais destinos das frutas frescas do Nordeste no exterior são Países Baixos, Reino Unido, Espanha e Estados Unidos (BANCO DO NORDESTE, 2016).



Figura 3-6: Destino da produção nordestina de frutas em 2016.
Fonte: Adaptado a partir de BANCO DO NORDESTE (2018)

A região hidrográfica do São Francisco contempla importantes pólos de irrigação na Bahia, Pernambuco, Sergipe, Alagoas e Minas Gerais. No pólo Petrolina/PE-Juazeiro/BA, existe um empresariado agrícola detentor de capital e conhecimento, ao qual se atribui, em grande medida, o desenvolvimento da agricultura irrigada nessa área (BANCO DO NORDESTE, 2016).

Em 2012, a área irrigada na bacia era de 626.941ha, correspondendo a um aumento de 84% em relação a 2004 (CBHSF, 2016). A demanda hídrica é mais alta em particular no SFM e SFSM.

As áreas de maior prática da irrigação na bacia são: norte de Minas e oeste da Bahia, com o uso de pivôs centrais, e vale do São Francisco, com destaque para a fruticultura nos municípios de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA), como apresentado na Figura 3-7.

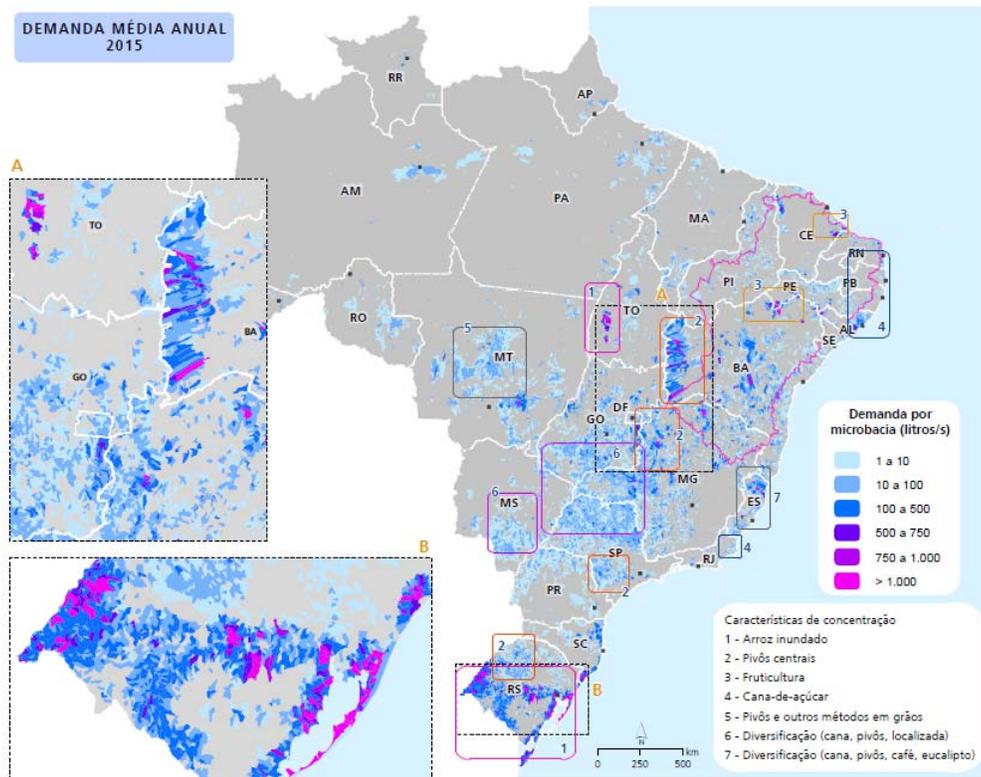


Figura 3-7: Demanda média anual por microbacia – 2015.
Fonte: ANA (2017b)

Como apontado por ANA (2017a), a demanda para irrigação é intensificada no período seco da região, em destaque na Figura 3-8.

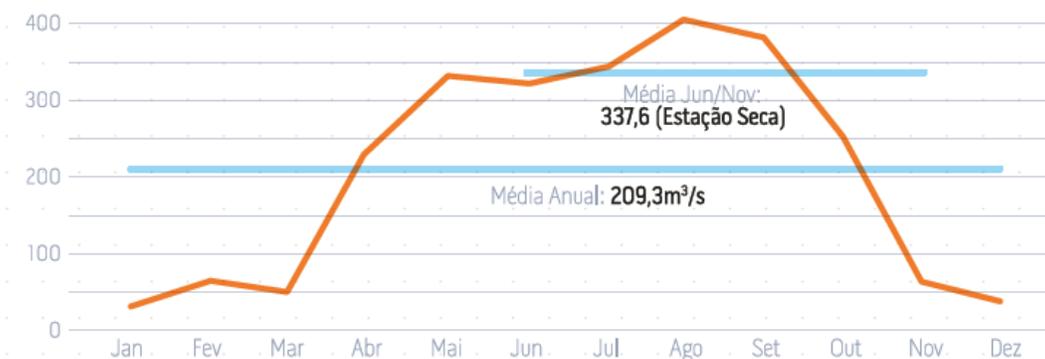


Figura 3-8: Sazonalidade de demanda para irrigação na bacia (m³/s).
Fonte: ANA (2017a).

Dado o histórico de conflitos na bacia do São Francisco, a ANA tem dedicado especial atenção para o cálculo dos usos consuntivos nessa bacia, sendo vários trechos classificados como áreas especiais de gestão dos recursos hídricos (ANA, 2013; ANA, 2017b). A agência também elaborou uma série de notas técnicas dedicadas aos usos consuntivos. Algumas delas são listadas na Tabela 3-8.

Tabela 3-8: Notas técnicas da ANA sobre usos consuntivos.

Documento	Ano
Nota Técnica nº 019/SPR2013	2013
Nota Técnica nº 041/SPR2014	2014
Nota Técnica nº 56/2015/SPR	2015

Na divisão hidrográfica nacional, a bacia do São Francisco destaca-se por ter a segunda maior área ocupada por pivôs (384,1 mil ha), atrás apenas do Tocantins-Araguaia (ANA, 2014). A Figura 3-9 apresenta as áreas com maior concentração de pivôs centrais no país.

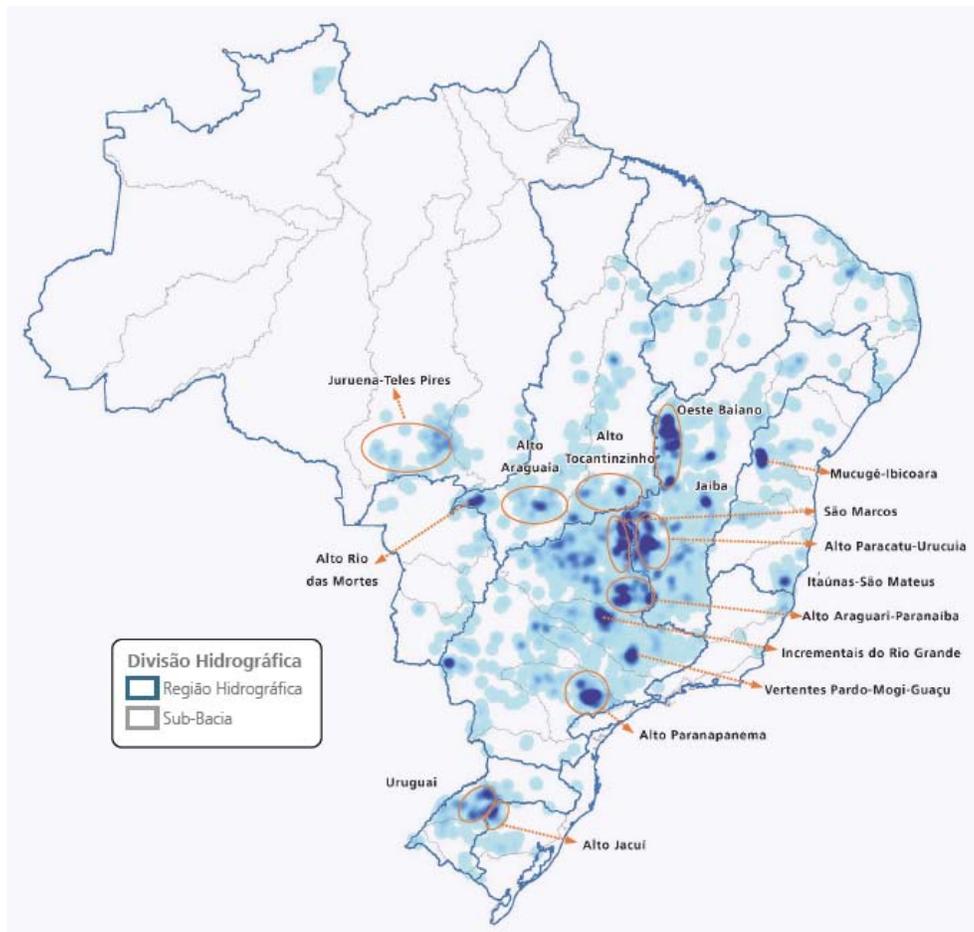


Figura 3-9: Principais pólos nacionais de irrigação por pivôs centrais.
 Fonte: ANA (2014).

Uma tecnologia que tem grande potencial para auxiliar na identificação de culturas e no cálculo do consumo de água para irrigação é o sensoriamento remoto. As atividades de interpretação visual ou automatizada de imagens de satélite para identificação de áreas irrigadas e estimativa direta de consumo de água pela irrigação são as de maior potencial de aplicação (ANA, 2017b).

As séries históricas de imagens já disponíveis permitem a definição de critérios objetivos para identificação de áreas irrigadas e reservatórios associados. Esse método já foi aplicado por ANA (2014) e GUIMARÃES *et al.*, (2014) no monitoramento de pivôs centrais de irrigação no território nacional.

Uma outra forma possível para estimar o consumo de água para a atividade agrícola é utilizar o consumo de energia elétrica regulado na faixa de consumo rural (tarifa verde). Essa conversão pode ser feita pela aplicação da fórmula geral da potência da

bomba hidráulica. Observa-se, na Figura 3-10, que as estimativas mensais de vazão a partir do consumo de energia (mínima, máxima e adotada) são muito próximas das vazões efetivas informadas pelo usuário entre maio de 2015 e novembro de 2016 (ANA, 2017b).

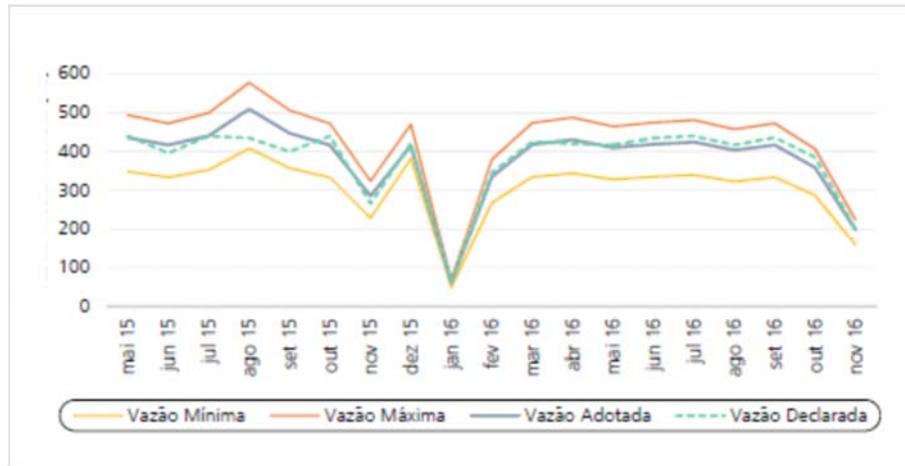


Figura 3-10: Estimativas da vazão mensal a partir do consumo de energia e vazão declarada - perímetro Lagoa Grande (MG) em m³/s.

Fonte: ANA (2017b).

ANA e ANEEL editaram a resolução conjunta nº 05/2016 com o objetivo de aprimorar tanto a regulação da água quanto a de energia elétrica. A resolução estabelece condições e procedimentos a serem observados pelas distribuidoras no fornecimento de informações de unidades consumidoras que desenvolvam atividades de irrigação ou aquicultura. Os dados, no entanto, são restritos (ANA, 2017b).

Os dados obtidos para a realização desse trabalho dizem respeito à toda a área de concessão da distribuidora, não sendo possível fazer a separação por bacias hidrográficas. Ainda assim, algumas conclusões já podem ser tiradas.

Para um exercício com os dados da distribuidora Coelba, que atende o estado da Bahia, a área de interesse seria a intercessão entre a área de concessão (em verde) e os municípios da bacia (contorno em linhas pretas), de acordo com a Figura 3-11. No entanto, a análise possível diz respeito ao consumo de energia de toda a área em verde.



Figura 3-11: Área da bacia do São Francisco atendida pela Coelba.

Os resultados mostram um crescimento médio de 148% do consumo de energia de consumidores irrigantes entre 2006 e 2015 (Figura 3-12). No entanto, a área equipada para irrigação nesse estado no mesmo período só apresentou crescimento de 61%, conforme a Tabela 3-9. Como a confiabilidade dos dados de consumo de eletricidade é bem maior, há um indicativo claro de que as estimativas de áreas destinadas à irrigação precisam ser aprimoradas. Como sugestão, para trabalhos futuros, pode-se utilizar os dados da Base de Dados Geográfica da Distribuidora (BDGD), que pode ser solicitada via Sistema de Informação Geográfica Regulatório (SIG-R) da ANEEL.

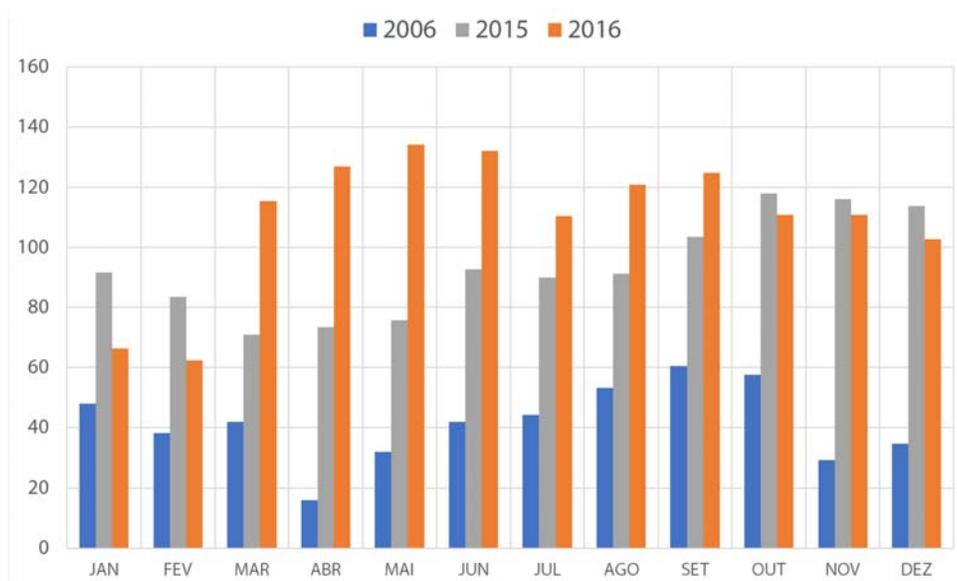


Figura 3-12: Consumo energético de irrigantes da Coelba em anos selecionados (GWh).
Fonte: Adaptado a partir de ANEEL (2017)

A Tabela 3-9 permite verificar a evolução da área ocupada por irrigação em estados selecionados e no Brasil no período entre 1970 e 2015. Considerando o período 2006-2015, a área irrigada cresceu 5% a.a. na BA, manteve-se constante em PE, cresceu 8% a.a em MG e 4% a.a. considerando-se todo o território nacional.

Tabela 3-9: Área equipada para irrigação (1970-2015)

UF	1970	1975	1980	1985	1996	2006	2015
BA	27.042	41.007	70.603	107.055	209.705	312.668	504.781
PE	19.002	34.553	65.039	83.457	118.400	152.917	146.169
MG	57.474	138.533	162.773	194.619	322.679	530.042	1.082.373
Tot.	795.250	1.086.830	1.481.220	1.959.825	3.121.642	4.545.533	6.954.710

Fonte: ANA (2017b)

3.6 Condições adversas

Desde 2010, a bacia do São Francisco vem enfrentando condições hidrológicas adversas, com vazões e precipitações abaixo da média, com consequências nos níveis de armazenamento de seus reservatórios. Esse fenômeno, que é frequente na região, agravou-se devido ao forte El Niño de 2015-2016, que elevou a temperatura no continente e na superfície do mar. Em 2015, cerca de 1.192 municípios brasileiros foram atingidos por condições de seca, a maior parte deles localizados no semiárido nordestino (AZEVEDO *et al.*, 2018).

Entre 2014 a 2017, foram registradas as menores vazões naturais médias anuais no reservatório da UHE Sobradinho desde 1931 (Figura 3-13).

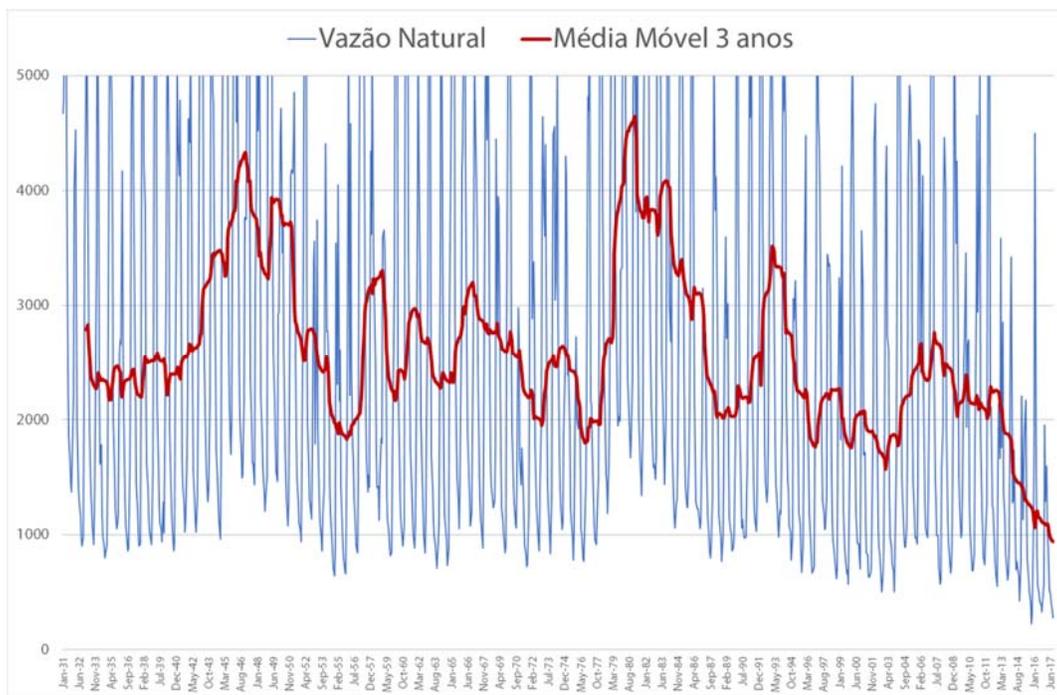


Figura 3-13: Vazões naturais (m^3/s) na UHE Sobradinho (1931-2017).
Fonte: PSR (2018).

De modo a preservar o estoque de água disponível nos reservatórios da bacia do São Francisco, nesta situação de crise recente, a ANA vem autorizando a redução da vazão mínima defluente abaixo de $1.300 \text{ m}^3/\text{s}$ (valor mínimo em situações de normalidade) tanto na UHE Sobradinho quanto na UHE Xingó desde a resolução ANA nº 442/2013, quando o piso caiu para $1.100 \text{ m}^3/\text{s}$. Com a resolução ANA nº 206/2015, em abril, foram mantidos os $1.100 \text{ m}^3/\text{s}$, mas o documento permitiu a redução para $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ nos períodos de carga leve: dias úteis e sábados de 0h a 7h e durante todo o dia aos domingos e feriados. Em 29 de junho de 2015, a resolução ANA nº 713/2015 reduziu o patamar mínimo para $900 \text{ m}^3/\text{s}$. A redução para $800 \text{ m}^3/\text{s}$ deu-se com a publicação da resolução ANA nº 66, em 28 de janeiro de 2016 e este piso foi adotado até 31 de outubro do mesmo ano. O patamar de $700 \text{ m}^3/\text{s}$ foi estabelecido com a resolução ANA nº 1.283 e mantido até abril pela resolução ANA nº 224/2017. Em seguida, a resolução ANA nº 742/2017, reduziu a defluência mínima média diária para $600 \text{ m}^3/\text{s}$, admitindo a prática de $570 \text{ m}^3/\text{s}$ de vazão instantânea (a cada medição) até 30 de novembro de 2017. A resolução ANA nº 1291/2017 reduziu o valor de média diária para $550 \text{ m}^3/\text{s}$ e instantânea para $523 \text{ m}^3/\text{s}$. A Figura 3-14 ilustra as intervenções regulatórias feitas pela ANA entre 2013 e 2017.

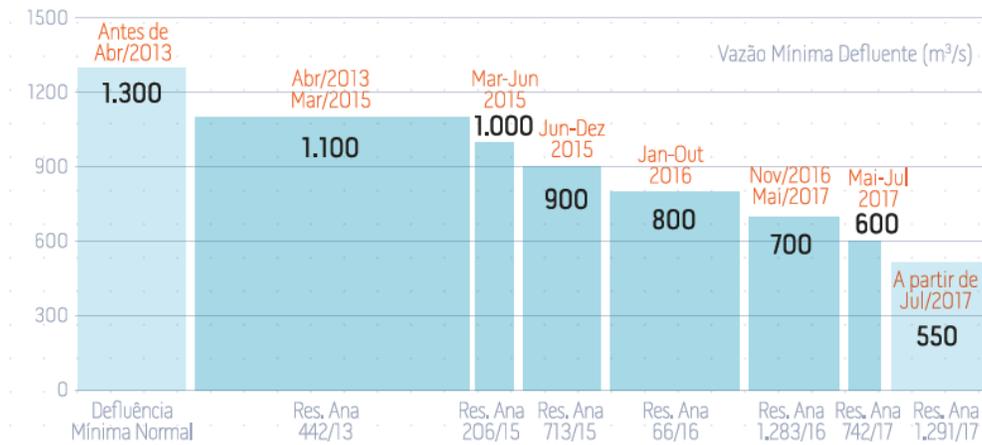


Figura 3-14: Redução das vazões defluentes das UHEs Sobradinho e Xingó.
Fonte: ANA (2017a)

A Figura 3-15 mostra a evolução do armazenamento dos reservatórios da bacia (com capacidade de regularização) em função das reduções aplicadas.



Figura 3-15: Evolução do volume de reservatórios na bacia do São Francisco.
Fonte: ANA (2017a)

Uma análise em termos energéticos também aponta para a anomalia da redução de vazões. Comparando-se a ENA média decadal para o subsistema NE desde 1931, observa-se que as últimas três décadas são as menores do histórico.

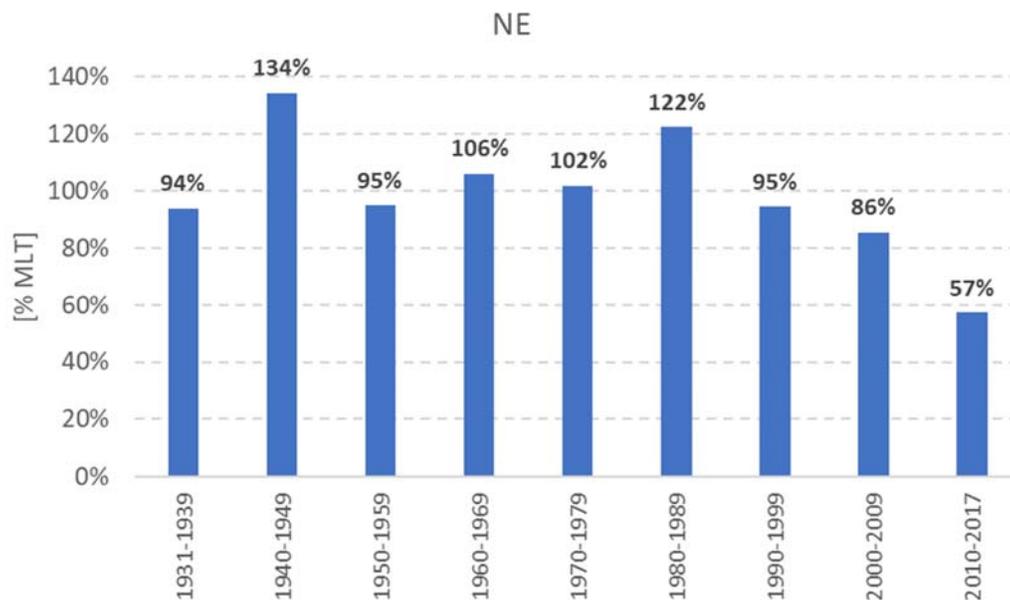


Figura 3-16: Relação entre ENA média por década e MLT para o subsistema NE.
Fonte: PSR (2018).

O tema foi amplamente discutido em SOUZA e ARAUJO (2013), ARAÚJO *et al.* (2013) e PSR (2013), indicando grande probabilidade de que tenha havido uma mudança estrutural nas vazões do São Francisco a partir do ano de 1993.

Com respeito às possíveis causas dessa diminuição de vazões, a precipitação sozinha não explicaria a redução na série de vazões. Assim, a hipótese mais provável seria o efeito de ligações não contabilizadas para irrigação (PSR, 2013). O aprimoramento do cálculo da demanda para irrigação e o estudo detalhado das anomalias apresentadas ficam como recomendações para trabalhos futuros.

4 PROPOSTA METODOLÓGICA

Tendo em vista o caráter emergente da abordagem conceitual do nexo água-energia-alimento e seu potencial para o aprimoramento da operação de sistemas hidrotérmicos, este capítulo apresenta uma proposta metodológica incorporar a variabilidade climática na demanda de água para irrigação e indica como avaliar os impactos dessa contribuição para a operação de sistemas hidrotérmicos.

Essa proposta baseia-se na premissa de que a demanda por água dos cultivos depende apenas das características do solo e do cultivo e da pluviometria da região. Assim, em um ano úmido, de alta pluviometria e vazão nos rios, a demanda de água para irrigação será menor que em um ano seco, de baixa pluviometria e baixa vazão. Dessa forma, a necessidade de retirada dos reservatórios pode aumentar consideravelmente em um ano seco, concomitantemente à diminuição da disponibilidade de água nos reservatórios. Esse conceito pode ser visualizado na Figura 4-1.

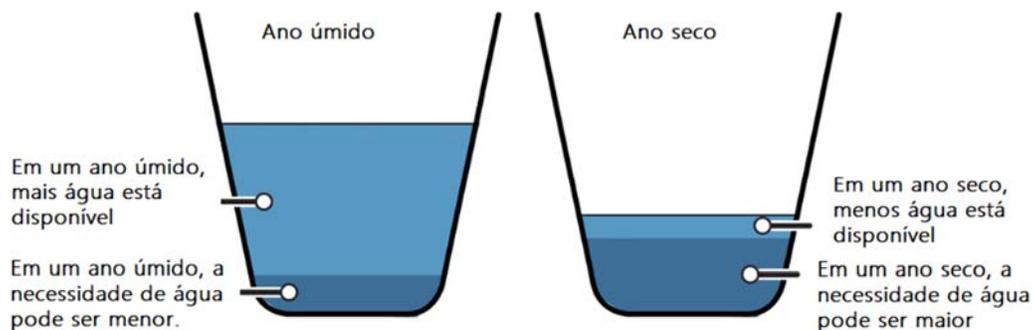


Figura 4-1: Impacto da variabilidade climática na demanda de água.
Fonte: adaptado de MURRAY-DARLING BASIN AUTHORITY (2019)

Para quantificar os efeitos dessa variabilidade climática na operação de sistemas hidrotérmicos, considerando-se os requerimentos de dados de entrada para os modelos usualmente utilizados, faz-se necessário aportar, para cada estágio de estudo e para cada reservatório analisado, as demandas para irrigação e as vazões naturais disponíveis. A Figura 4-2 apresenta de forma simplificada os dados de entrada e saída (caixas) e os modelos de processamento (hexágonos).

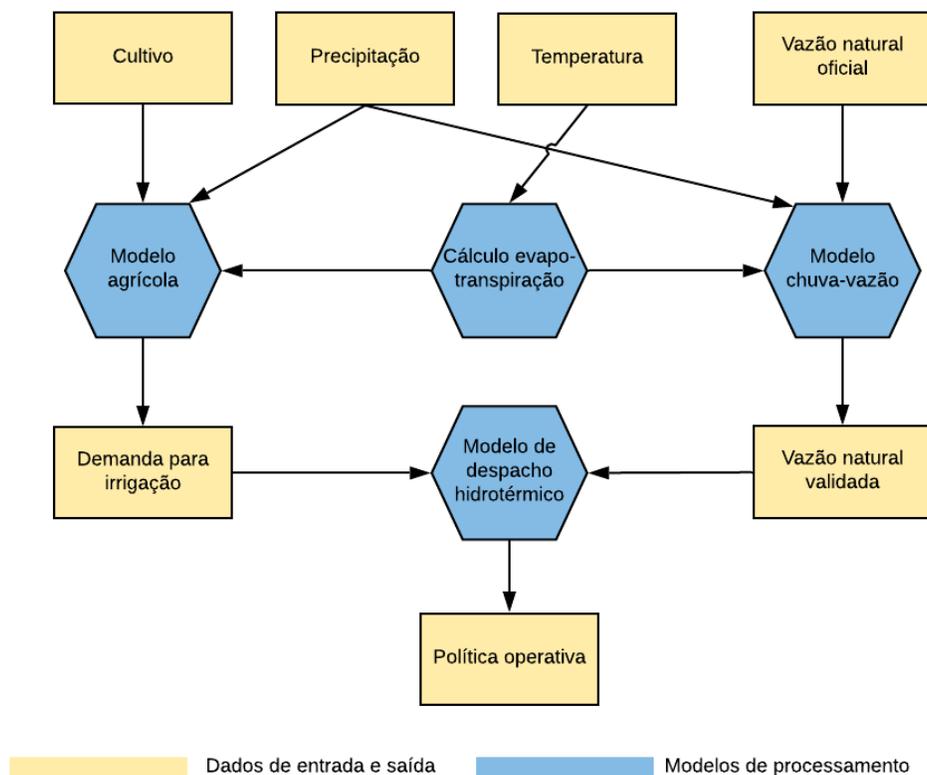


Figura 4-2: Proposta metodológica.

A demanda de água para irrigação depende do cultivo que está sendo analisado, pois cada cultivo apresenta uma característica diferente com relação ao consumo hídrico necessário para seu crescimento.

As variáveis climáticas são determinantes no processo de evapotranspiração, no qual o solo e a vegetação transferem água para a atmosfera. Por outro lado, a vazão disponível nos rios e afluente aos reservatórios também é definida pelo clima (especialmente pela precipitação) e pelo solo, que determinam as parcelas de escoamento superficial e subterrâneo.

A demanda para irrigação e a vazão natural¹³ compreendem os dados de entrada mais importantes do modelo de despacho hidrotérmico para a análise aqui proposta. Ou seja, a partir das características dos cultivos, da precipitação, da temperatura e da vazão

¹³ As vazões naturais representam aquelas vazões que seriam observadas numa determinada seção do rio caso não existissem ações antrópicas a montante, isto é, usos consuntivos e usos não consuntivos que acarretam alterações no regime fluvial.

natural histórica, é possível avaliar a sensibilidade de uma política operativa de um modelo de despacho hidrotérmico.

O uso do modelo chuva-vazão faz-se necessário para garantir que as vazões naturais imputadas sejam coerentes com as demandas de irrigação. Se a hipótese da coerência for comprovada, pode-se usar diretamente as vazões naturais oficiais como dado de entrada nas etapas seguintes do estudo.

Para implementação da metodologia proposta, foram utilizados os seguintes modelos:

- modelo agrícola - modelo desenvolvido neste trabalho, que calcula o balanço hídrico mensal para cultivos determinados;
- modelos chuva-vazão - modelo SMAP na sua configuração mensal básica;
- modelo de despacho hidrotérmico - modelo SDDP, baseado em programação dinâmica dual estocástica e com representação individualizada de reservatórios.

A seção 4.1 apresenta o modelo agrícola, a seção 4.2 apresenta o modelo SMAP, a seção 4.3 apresenta o modelo SDDP e a seção 4.4 apresenta o procedimento de estudo proposto, envolvendo esses três modelos.

4.1 Modelo agrícola

O modelo agrícola tem como objetivo estimar a quantidade requerida pela cultura em determinado mês, de modo a não limitar seu crescimento e sua produção sob as condições climáticas locais, ou seja, é a quantidade de água necessária para atender a evapotranspiração e a lixiviação dos sais do solo¹⁴ (LIMA *et al.*, 2003). A diferença entre a água disponível por precipitação efetiva e o requerimento da planta deve ser suprida por irrigação artificial. O resultado do modelo, portanto, são coeficientes técnicos de retirada para cada mês e para cada cultivo que está em um determinado tipo de solo. Esses coeficientes são obtidos em função do balanço hídrico das áreas irrigadas, dos aspectos inerentes à espécie cultivada e ao tipo de irrigação e das condições de manejo aplicadas. A Figura 4-3 mostra, de forma esquemática, as diferentes necessidades de uma planta ao

¹⁴ Sem causar perdas de nutrientes pelo seu carreamento para zonas impróprias do solo.

longo de seu desenvolvimento, bem como fatores externos que influenciam a demanda para irrigação.

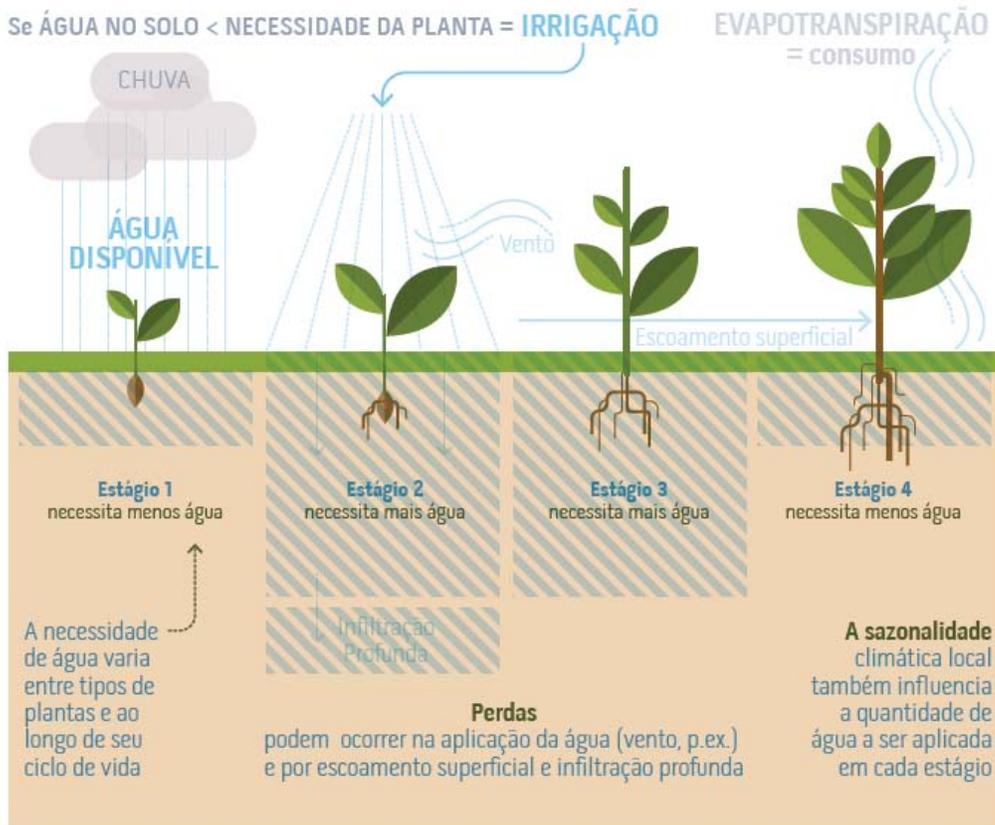


Figura 4-3: Representação esquemática dos processos relacionados à irrigação.
Fonte: ANA (2017a).

Usualmente, os métodos para estimativa da quantidade de água demandada para a irrigação baseiam-se em recorrência estatística dos dados climatológicos. Ou seja, baseiam-se em meses e em anos típicos. Como visto na seção 2.4.2, é comum, no Brasil, o uso dos dados das normais climatológicas. Para finalidades com, por exemplo, projetar sistemas de irrigação, essa abordagem pode ser coerente, pois, com determinada probabilidade, o sistema estará adequado para a variabilidade climática que se apresente. No entanto, para a tomada de decisão quanto à operação dos reservatórios, considerar efetivamente os dados dos diferentes meses reduz imprevistos na operação e, portanto, se mostra mais adequado.

Sendo assim, para atingir o propósito de representar mensalmente a real demanda hídrica dos cultivos das áreas de estudo, desenvolveu-se um modelo próprio,

implementado no software R. A Equação (1) representa o balanço hídrico calculado a cada estágio para cada cultivo.

$$\begin{aligned} & \text{Demanda para irrigação} & (1) \\ & = (ETrc - Pef) * \frac{10000}{Ei * 24 * 3600 * Ndias} \end{aligned}$$

em que:

ETrc evapotranspiração real da cultura,

Pef precipitação efetiva;

Ei eficiência de irrigação;

Ndias número de dias no mês.

A evapotranspiração de referência (ET_0) representa a demanda evaporimétrica da atmosfera. Para fins de irrigação, é necessário o conhecimento da evapotranspiração real da cultura (ETrc), que pode ser obtida em função da evapotranspiração de referência, de características da cultura e de condições de umidade do solo. BERNARDO (1989) e LIMA *et al.* (2003) consideram um coeficiente de solo (K_s), adimensional no cálculo de ETrc. No entanto, optou-se por não utilizar tal coeficiente no presente trabalho, pois a escala de estudo de uma simulação de sistemas hidrotérmicos implicaria grande variabilidade dos solos sob consideração, aumentando as incertezas e agregando pouco valor ao estudo. Assim, tem-se:

$$ETrc = ET_0 * Kc \quad (2)$$

em que:

Kc coeficiente da cultura, adimensional;

Os valores de Kc variam com o tipo de cultura, estágio de desenvolvimento, comprimento do ciclo vegetativo da cultura e as condições climáticas. Quanto maior for a demanda evapotranspirométrica local, e quanto maior a sensibilidade da planta ao estresse hídrico, maior será o valor de Kc (LIMA *et al.*, 2003). Para cada cultivo, a literatura oferece diferentes tabelas com valores de Kc para cada estágio de desenvolvimento. Em modelagens mais simplificadas, como a do presente trabalho, é

comum utilizar um único valor do K_c ponderado pela duração de cada estágio do ciclo da cultura.

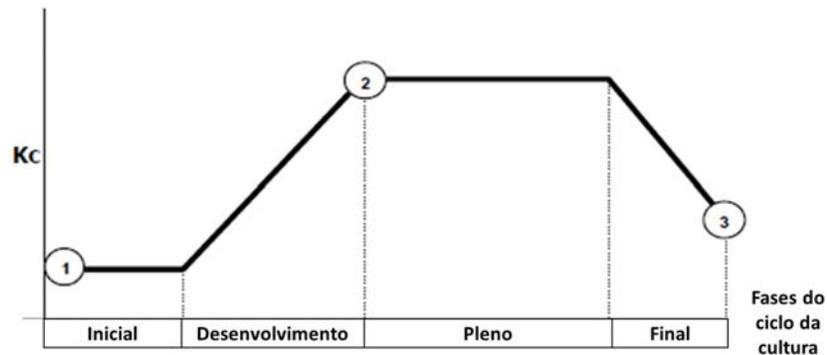


Figura 4-4: Valores de K_c conforme o estágio do ciclo de uma cultura.

Fonte: Adaptado de MMA *et al.* (2011)

Como já mencionado, precipitação efetiva (P_{ef}), para a prática da irrigação, é a fração da precipitação que é utilizada pela cultura para atender à sua demanda evapotranspirométrica. Em outras palavras, é a precipitação total menos a parte que é interceptada antes de atingir o solo, a que escoia superficialmente ou subsuperficialmente, a que percola abaixo do sistema radicular e a que evapora rapidamente na zona superficial do solo (LIMA *et al.*, 2003)

A eficiência de irrigação pode ser definida como a relação entre a quantidade de água requerida pela cultura e a quantidade total aplicada pelo sistema para suprir essa necessidade. Quanto menores as perdas de água devido ao escoamento superficial, à evaporação, à deriva e à drenagem profunda, maior será a eficiência de irrigação de um sistema.

Os arquivos de dados de entrada para o modelo agrícola desenvolvido organizam-se da seguinte forma:

- localidades – uma localidade é uma região, que pode ser um perímetro de irrigação, um município, um estado etc. Possui vários lotes, um posto de ET_0 e um posto de precipitação associado;
- lotes - um lote é caracterizado por apenas uma cultura e uma área ocupada a cada mês. Está situado dentro de uma localidade;
- precipitação - séries temporais de precipitação para cada posto;

- culturas – dados das culturas;
- calendário de áreas - séries temporais de áreas ocupadas por cada lote;
- temperatura máxima – séries temporais de temperaturas máximas para cada posto;
- temperatura mínima - séries temporais de temperaturas mínimas para cada posto;
- ET_0 - séries temporais de ET_0 produzidas pelo modelo e por ele também utilizadas como dado de entrada;
- eficiências – eficiências dos métodos de irrigação.

As seções 4.1.1 e 4.1.2, na sequência, apresentam, em detalhes, os procedimentos de cálculo empregados para se obter, respectivamente, as variáveis evapotranspiração e precipitação efetiva.

4.1.1 Evapotranspiração

A fração da radiação extraterrestre que efetivamente atravessa as nuvens e chega à superfície da Terra é a fonte principal de energia para a evapotranspiração. Inicialmente com base em estudos empíricos na Califórnia, Hargreaves publicou uma equação para a previsão da ET_0 baseada apenas em temperatura média e radiação solar. Em estudos posteriores, no entanto, evoluiu-se para uma representação a partir da diferença entre as temperaturas máximas e mínimas diárias (HARGREAVES e SAMANI, 1982).

O princípio é que, em condições de céu sem nuvens, a atmosfera é transparente à radiação solar incidente, levando T_{max} a ser elevada, enquanto que as temperaturas noturnas serão baixas devido à radiação de comprimento de onda longa. Por outro lado, em condições de céu encoberto, T_{max} será mais baixa porque uma parte da radiação solar incidente não atingirá o solo, enquanto que as temperaturas noturnas serão relativamente mais elevadas pelo fato de as nuvens limitarem as perdas de energia através da radiação de comprimento de onda longa (HARGREAVES e SAMANI, 1982).

Com base nesse princípio, HARGREAVES e SAMANI (1985) desenvolveram uma equação simples que necessita apenas da temperatura do ar e coeficientes dependentes da latitude do local e época do ano. Essa equação, que contabiliza o efeito da nebulosidade e da umidade sobre a radiação solar recebida, de forma indireta, ficou conhecida como a equação de Hargreaves-Samani e é expressa na Equação (3) (SHAHIDIAN *et al.*, 2011) conforme

$$ET_0 = 0,0135K_T(T + 17,78)(T_{max} - T_{min})^{0,5}R_a \quad (3)$$

onde:

ET_0 evapotranspiração de referência (mm/dia);

K_T coeficiente empírico (adimensional);

T_{max} temperatura máxima (°C);

T_{min} temperatura mínima (°C);

R_a radiação extraterreste (mm/dia);

A radiação extraterreste (R_a) pode ser obtida através de tabelas ou calculada. Para o coeficiente empírico, K_T , recomenda-se a utilização do valor 0,162 para regiões interiores, onde predominam massas terrestres, e 0,190 para regiões costeiras, onde as massas de ar são influenciadas pelas massas de água (SHAHIDIAN *et al.* 2011).

4.1.2 Precipitação efetiva

O termo precipitação efetiva (P_{ef}) tem diferentes interpretações, nas diferentes especialidades¹⁵, sendo, na agricultura, definida como a parte da precipitação que fica armazenada no solo até a profundidade efetiva das raízes das plantas e assim disponível para os cultivos. É a diferença entre a precipitação total e as diferentes perdas como escoamento superficial, percolação além da zona radicular do solo e evaporação da água interceptada pela vegetação (BARBOSA *et al.*, 2005). É um importante conceito em regiões onde se pratica irrigação, pois a P_{ef} deve ser levada em conta na contabilização da quantidade de água aplicada à cultura.

OTTONI FILHO (2018), com base em experiências de campo, propôs a seguinte abordagem para cálculo da precipitação efetiva como:

$$P_{ef} = \frac{Pt}{2} \quad (Pt > 150mm) \quad (4)$$

$$P_{ef} = Pt \quad (Pt < 150mm) \quad (5)$$

onde:

¹⁵ Em hidrologia, o conceito de precipitação efetiva é a parcela da chuva que se transforma em escoamento superficial depois que o solo atinge o ponto de saturação (TUCCI, 2012).

Pef	Precipitação efetiva (mm/mês);
Pt	Precipitação total (mm/mês).

4.2 Modelo físico chuva-vazão SMAP

O processo de transformação chuva-vazão neste trabalho foi simulado através da versão mensal do modelo *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP) (LOPES *et al.*, 1981), que é constituída de dois reservatórios matemáticos (Rsolo e Rsub). O Rsolo representa a zona não saturada, enquanto o Rsub representa a zona saturada.

A diferença entre a precipitação (P) e evapotranspiração (Er) define a quantidade de água disponível para infiltração ou escoamento superficial. A capacidade de saturação (Sat) na zona não saturada do solo define se há escoamento superficial, e a umidade regula o nível do reservatório não saturado. O coeficiente de recarga (Rec) regula a transferência de água entre os dois reservatórios, e uma constante de decaimento (K) define o quanto de água formará o escoamento de base. A Figura 4-5 ilustra a estrutura da versão mensal do modelo SMAP.

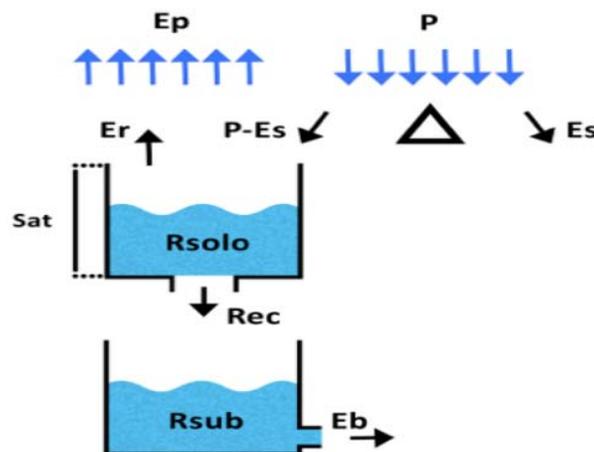


Figura 4-5: Estrutura da versão mensal do SMAP.
Fonte: ÁVILA (2013)

As variáveis de estado são atualizadas a cada mês segundo as equações (6) e (7) em que

$$R_{solo_{i+1}} = R_{solo_i} + P - Es - Er - Rec \quad (6)$$

$$R_{sub_{i+1}} = R_{sub_i} + Rec - Eb \quad (7)$$

em que:

R_{solo}	reservatório do solo (zona aerada);
R_{sub}	reservatório subterrâneo (zona saturada);
P	precipitação;
E_s	escoamento superficial;
E_r	evapotranspiração de referência;
Rec	recarga subterrânea;
E_b	escoamento de base;

Para a inicialização, tem-se

$$R_{solo_1} = Tu_{in} \cdot Sat \quad (8)$$

$$R_{sub_1} = \frac{E_{bin}}{\frac{1-K}{Ad \cdot 2630}} \quad (9)$$

em que:

$Tu_{(in)}$	teor de umidade (inicial) do solo (adimensional);
E_{bin}	escoamento de base inicial (m ³ /s);
Ad	área de drenagem (km ²).

O SMAP mensal é composto de quatro funções de transferência:

$$E_s = Tu^{P_{es}} \cdot P \quad (10)$$

$$E_r = Tu \cdot E_p \quad (11)$$

$$Rec = C_{rec} \cdot Tu^4 \cdot R_{solo} \quad (12)$$

$$E_b = (1-K) \cdot R_{sub} \quad (13)$$

em que:

$$Tu = \frac{R_{solo}}{Sat} \quad (14)$$

São quatro os parâmetros do modelo:

Sat	capacidade de saturação do solo (mm);
Pes	parâmetro de escoamento superficial (adimensional);
Crec	coeficiente de recarga (adimensional), está relacionado ao movimento da água na zona insaturada do solo e, portanto, é função do tipo do solo;
K	constante de recessão (mês ⁻¹)

As unidades dos parâmetros são ajustadas da seguinte forma:

$$K = 0,5 \frac{1}{Kkt} \quad (15)$$

O parâmetro Kkt é expresso em número de meses necessários para que a vazão básica seja reduzida à metade de seu valor. Os parâmetros Crec e Tu são multiplicados por 100. O eventual transbordo do reservatório do solo é transformado em escoamento superficial.

O modelo contém ainda uma rotina de atualização prévia do teor de umidade, de forma que, a cada intervalo de tempo, é acrescentada uma parcela de precipitação do mês, de forma a utilizar o teor de umidade médio do mês em questão. Essa rotina melhora sensivelmente os resultados, principalmente em regiões de grande variabilidade no regime pluviométrico.

Os dados de entrada do modelo são uma série mensal de precipitação, uma série mensal de evapotranspiração e uma série de vazões naturais previamente calculadas. O modelo é inicializado através da umidade do solo (Tuin) e do escoamento de base (Ebin).

Dos quatro parâmetros da versão mensal do modelo SMAP, apenas o nível de saturação (Sat), o escoamento superficial (Pes) e o coeficiente de recarga (Crec) são utilizados na calibração automática.

A constante de recessão Kkt foi ajustada manualmente após ter-se atingido um ajuste razoável dos três parâmetros listados acima, pois ela não apresenta sensibilidade às funções objetivo. Este ajuste foi feito observando-se o hidrograma, buscando-se aproximar as vazões simuladas das observadas através da verificação dos trechos de recessão.

Para inicialização do modelo, foi utilizada a premissa de que o nível inicial do reservatório é próximo de zero, e, por essa razão, a calibração foi iniciada no mês de setembro, fim do período de estiagem.

As faixas de variação dos parâmetros considerados foram as seguintes:

$$400 < Sat < 5000 \quad (16)$$

$$0,1 < Pes < 10 \quad (17)$$

$$0 < Crec < 70 \quad (18)$$

$$1 < Kkt < 6 \quad (19)$$

A calibração do SMAP foi feita de forma automática através da ferramenta de otimização Solver, do Microsoft Excel. O cálculo da vazão é dado pela Equação (20):

$$Q = (Es + Eb) \frac{Ad}{2630} \quad (20)$$

O desempenho de cada simulação foi verificado a partir de medidas estatísticas listadas abaixo.

- a) Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (CNS): varia entre $-\infty$ e 1. Valores próximos da unidade indicam elevada associação entre os dados observados e calculados, representando um bom ajuste do modelo às vazões observadas. O valor zero (0) é obtido quando a variância dos resíduos é igual à variância das observações, o que seria equivalente a dizer que o modelo não é melhor que um modelo de somente um parâmetro que previsse a média das observações para todos os passos de tempo. Valores negativos indicam que o desempenho do modelo é pior do que esse modelo de somente um parâmetro. Devido à sua formulação, o CNS é mais sensível aos desvios nas vazões mais elevadas.

$$CNS = \frac{\sum(Qobs_t - \overline{Qobs})^2 - \sum(Qobs_t - Qcalc_t)^2}{\sum(Qobs_t - \overline{Qobs})^2} \quad (21)$$

em que:

- $Qobs_t$ vazão observada no mês t (m³/s);
 \overline{Qobs} média das vazões observadas no período (m³/s);
 $Qcalc_t$ vazão calculada no mês t (m³/s).

b) Percentual do módulo do erro médio relativo (e)

$$e = \frac{1}{n} \cdot \sum \frac{|Qcalc - Qobs|}{Qobs} \cdot 100 \quad (22)$$

c) Coeficiente de determinação (R^2)

$$R^2 = (p)^2 = \frac{\sum(Qobs_t - \overline{Qobs})(Qcalc_t - \overline{Qcalc})}{\sqrt{\sum(Qobs_t - \overline{Qobs})^2} \cdot \sqrt{\sum(Qcalc_t - \overline{Qcalc})^2}} \quad (23)$$

em que:

- $Qobs_t$ vazão observada no mês t (m³/s);
 \overline{Qobs} média das vazões observadas no período (m³/s);
 $Qcalc_t$ vazão calculada no mês t (m³/s);
 \overline{Qcalc} média das vazões calculadas no período (m³/s);

d) Raiz do erro quadrático médio (root-mean-square error, RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Qobs_t - Qcalc_t)^2}{n}} \quad (24)$$

em que:

- $Qobs_t$ vazão observada no instante t (m³/s);
 $Qcalc_t$ vazão calculada no instante t (m³/s);

e) Coeficiente de eficiência

É possível ainda fazer uma combinação de coeficientes. Nesse caso, foram combinados o CNS e o e , com o objetivo de melhor representar os meses de menores vazões. Portanto, essa nova métrica passa a variar entre 0 e 2.

$$\text{Coeficiente de eficiência} = \text{CNS} + (1 - e) \quad (25)$$

4.3 Modelo de despacho SDDP

Para simular o despacho hidrotérmico do SIN, foi utilizado o modelo probabilístico comercial SDDP¹⁶ de otimização/simulação operativa de sistemas hidrotérmicos. Ele foi desenvolvido no início da década de 1990 (PEREIRA e PINTO, 1991) e vem sendo aplicado em estudos para diversos agentes do setor elétrico, bem como por operadores de sistemas centralizados em mais de 70 países. O modelo é utilizado para estudos operativos de curto, médio e longo prazo, calculando a política operativa estocástica de mínimo custo de um sistema hidrotérmico.

A metodologia originada no modelo SDDP é a chamada Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE), também conhecida por *Stochastic Dual Dynamic Programming* (SDDP, na sigla em inglês), que dá nome ao modelo. A PDDE também é utilizada nos modelos computacionais de despacho do ONS e no cálculo dos preços pela CCEE com a utilização dos modelos Newave e Decomp. No entanto, diferentemente dos modelos oficiais do sistema brasileiro, o modelo SDDP é capaz de abordar em detalhe as características físicas, operativas e comerciais do sistema brasileiro através da representação individualizada de usinas hidrelétricas, o que ganha ainda mais importância no contexto donexo água-energia-alimento.

Em sistemas hidrotérmicos, pode-se utilizar a energia armazenada dos reservatórios de água para atender a demanda, substituindo, assim, a geração dispendiosa das unidades termelétricas. Entretanto, a quantidade de água afluente aos reservatórios é desconhecida, pois depende basicamente das chuvas que ocorrerão no futuro. Além disso, a capacidade de armazenamento nos reservatórios é limitada e é necessário respeitar as restrições hidráulicas associadas aos usos múltiplos da água (PEREIRA, 1985).

Esse fato introduz uma relação entre a decisão de operação e as consequências futuras dessa decisão. A cada etapa do planejamento, é preciso tomar a decisão entre consumir parte do volume útil de um reservatório (deplecioná-lo) para incrementar a geração hidrelétrica ou guardar essa água e incrementar a geração termelétrica complementar. A combinação dessas possibilidades de decisão dá origem ao chamado dilema do operador, que é ilustrado na Figura 4-6:.

¹⁶ Proprietário da consultoria brasileira PSR.

Se for tomada a decisão de deplecionar um reservatório hoje e, no futuro, vier um período úmido capaz de recuperar o volume que foi consumido, essa decisão foi correta. Ou seja, evitou-se o consumo de combustível para geração termelétrica. Se, por outro lado, a decisão tivesse sido acionar a termelétrica e guardar energia equivalente em água no reservatório, o cenário de vazões acima do esperado levaria a vertimentos. Essa água previamente guardada seria desperdiçada, e os consumidores, ao final, teriam arcado com o desnecessário custo do combustível da geração termelétrica passada.

No entanto, suponha que, no futuro, ao invés de um período muito chuvoso, ocorresse uma estiagem, com vazões afluentes abaixo da média (seca). Nesse caso, se a decisão original fosse de deplecionar o reservatório, então seria necessário compensar as baixas aflúncias despachando não só a térmica que teria sido ligada para poupar água no passado, mas também outras mais caras. No balanço final, teria custado mais ao consumidor, e ainda haveria um risco maior de déficit. Olhando para trás, teria sido acertado não gastar o volume útil do reservatório, acionando a termelétrica mais barata.



Figura 4-6: Processo de decisão em um sistema hidrotérmico.

Fonte: DAVID e MOROMISATO (2012)

Uma função de custo imediato (FCI) é associada à decisão de acionar a geração termelétrica no presente, enquanto uma função de custo futuro (FCF) representa a expectativa de despacho termelétrico nos estágios futuros (ou, eventualmente, custo de déficit). Quanto menor o volume armazenado nos reservatórios no último estágio do horizonte analisado, menor o valor da função de custo imediato e maior a de custo futuro.

O ponto ótimo se dá quando o custo total (imediato + futuro) é minimizado, o que ocorre quando as derivadas dessas duas funções se igualam em módulo.

O objetivo do despacho hidrotérmico, portanto é determinar uma política para utilização da água nos reservatórios que minimize o valor esperado do custo operativo total (custo de combustível mais as penalizações por racionamento) durante todo o período de estudo.

O enfoque utilizado no modelo SDDP está baseado na representação analítica da função de custo futuro. O esquema da PDDE não requer a discretização prévia do espaço de estados, característica que atenua o esforço computacional requerido da recursão do esquema PD estocástico original.

A Figura 4-7: ilustra esquematicamente as funções de custo imediato, futuro e total, em função do volume de armazenamento final dos reservatórios.

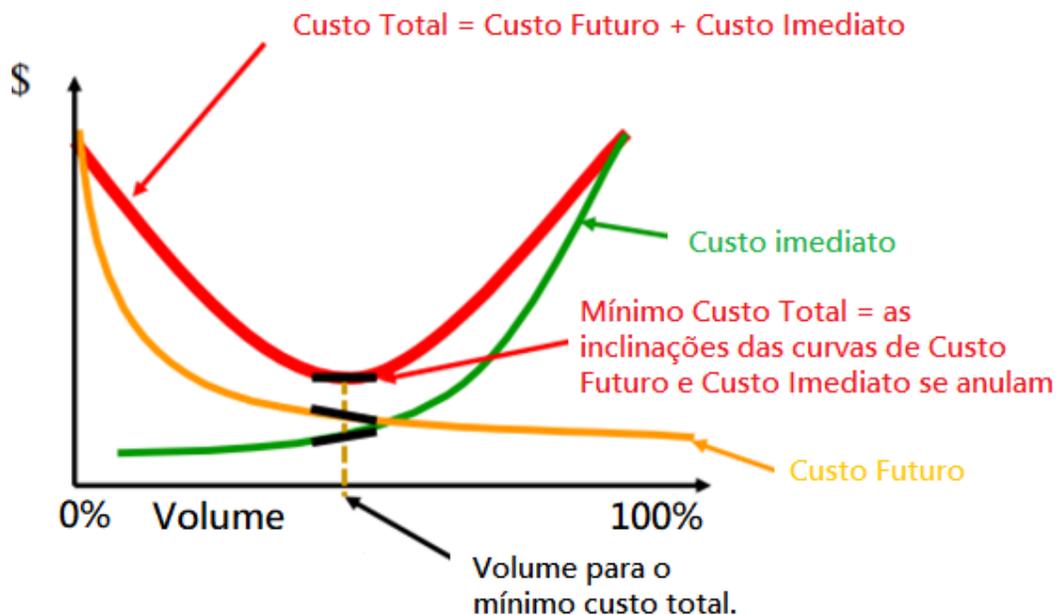


Figura 4-7: Ponto ótimo da função de custo total.
Fonte: PEREIRA (2006).

As derivadas de cada função têm significados importantes para os estudos de planejamento. A derivada da função de custo futuro é o custo incremental futuro para certo volume armazenado e é chamada de “valor da água”. Ela permite compreender qual seria o efeito econômico sobre cada usina ocasionado pela diminuição da vazão afluente,

por efeito de desvio a montante. Ou ainda, qual seria o efeito econômico da retirada de um metro cúbico de um reservatório qualquer. A derivada da função custo imediato é o custo incremental de suprimento do sistema por geração de usinas não hidráulicas, ou seja, é o custo incremental de geração das UTEs, importação de energia e o custo de déficit, necessário para se atingir certo volume armazenado. A derivada da função de custo total representa o custo marginal de operação no período de planejamento, em função do volume armazenado (DALL'ORTO, 2017). A Figura 4-8: ilustra as duas funções.

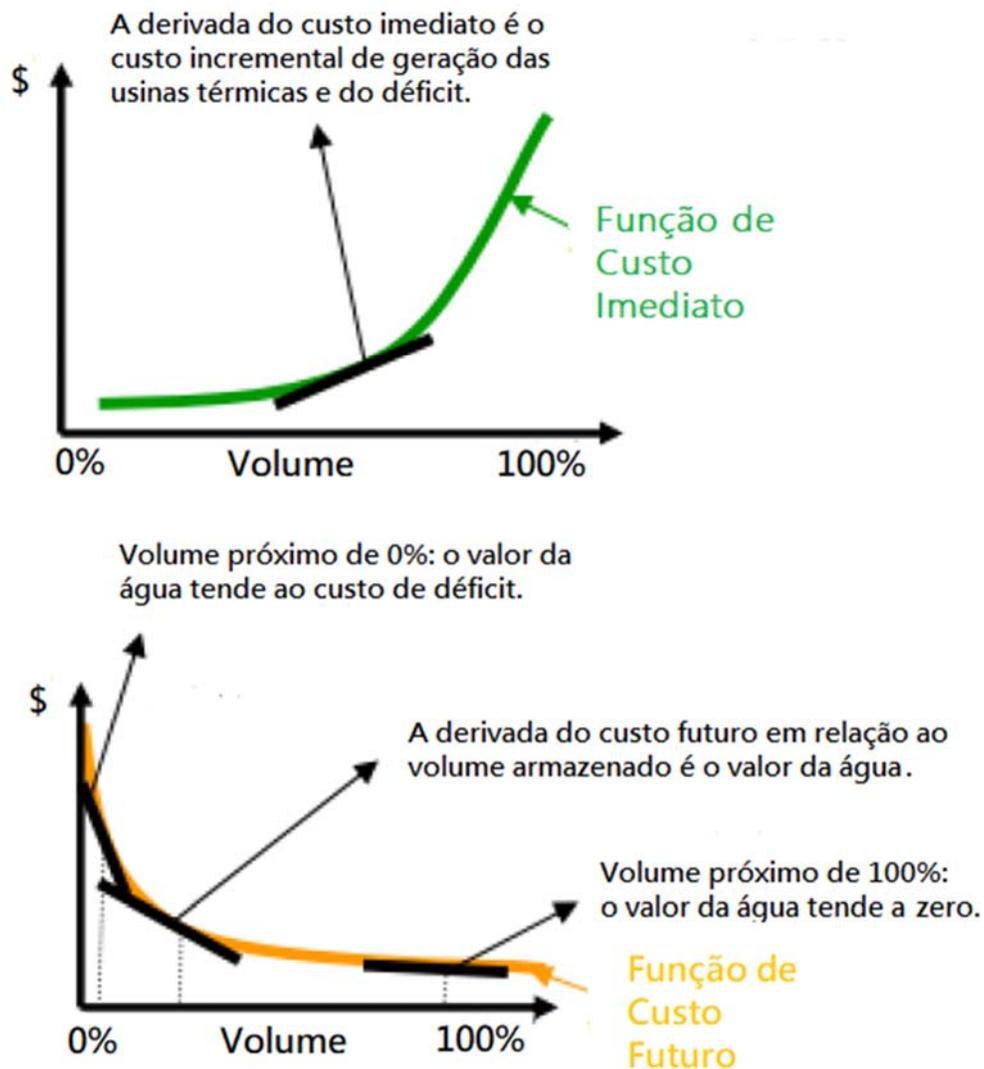


Figura 4-8: Significado das derivadas das funções de custo futuro e imediato.
 Fonte: PEREIRA (2006).

A seguir, é apresentada a formulação para o despacho hidrotérmico de uma etapa.

A função objetivo do despacho hidrotérmico é minimizar a soma dos custos imediatos e futuros segundo

$$Z = \min \sum c_j g_{tj} + \alpha_{t+1}(v_{t+1}) \quad (26)$$

onde:

c_j : custo imediato da térmica j (custo operacional térmico)

g_{tj} geração da térmica J, na etapa t

$\alpha_{t+1}(v_{t+1})$: custo futuro

v_{t+1} : vetor dos níveis de armazenamento do reservatório no final da etapa.

A cada estágio, o somatório da geração de cada sistema, mais o fluxo energético entre o sub-sistemas deve igualar a demanda energética de cada sub-sistema, de forma tal que o valor esperado do custo de operação seja minimizado.

As restrições operacionais básicas são o balanço hídrico, os limites de armazenamento e turbinamento, limites de geração térmica e o atendimento à demanda.

A equação do balanço hídrico é diretamente afetada pela representação da irrigação. Por essa razão, será detalhadamente apresentada a seguir.

$$\begin{aligned} v_{t+1}(i) = & v_t(i) + a_t(i) - \varepsilon(v_t(i)) - u_t(i) - s_t(i) \\ & - r_t(i) + \delta r_t(i) + \sum_{m \in I_U(i)} u_t(m) + \sum_{m \in I_S(i)} s_t(m) \end{aligned} \quad (27)$$

para $i = 1, \dots, I$

onde,

i: índice das usinas hidrelétricas

I: conjunto de usinas hidrelétricas

$V_{t+1}(i)$: volume armazenado na usina i no final da etapa t

$V_t(i)$: volume inicial da usina i no início da etapa t

$a_t(i)$: afluência natural que chega na usina i durante a etapa t

$\varepsilon(v_t(i))$ volume evaporado na usina i durante a etapa t

$u_t(i)$: volume turbinado durante a etapa t

$S_t(i)$: volume vertido na usina i durante a etapa t

$r_t(i)$ volume retirado da usina i (irrigação) na etapa t

$\delta r_t(i)$ violação da irrigação da usina i na etapa t

$I_U(i)$ conjunto de usinas que turbinam para a usina i

$I_S(i)$ conjunto de usinas que vertem para a usina i

Os valores da irrigação serão subtraídos no balanço hídrico da usina. Uma variável de folga permite a flexibilização no atendimento dos valores de irrigação. A variável de folga que representa a violação da irrigação $\delta r(i)$ tem seus limites estabelecidos pelos valores informados para a irrigação de cada etapa, ou seja

$$\delta r_t(i) \leq r_t(i) \quad \text{para } i = 1, \dots, I \quad (28)$$

A função objetivo penaliza essas variáveis de folga (violação de irrigação) de acordo com a Equação (29). Essa equação utiliza como critério que a penalidade é 10% maior que o custo do déficit energético. Em outras palavras, é mais barato cortar a carga do que violar a restrição.

$$\mu_r(i) = 1,1 \times \text{custo de déficit} \times \left[\sum_{m \in J(i)} \rho(v_t(m)) \times \delta r_t(m) \right] \quad (29)$$

onde:

$\mu_r(i)$ valor da penalidade devido à irrigação na usina i

$J(i)$ conjunto de usinas a jusante da usina i

$\rho(v_t(m))$ coeficiente de produção da usina m na etapa t , calculado em função do volume do reservatório

4.4 Procedimento de estudo

O procedimento de estudo proposto, de forma genérica, visa comparar resultados de simulações da operação de um sistema hidrotérmico composto por múltiplos reservatórios. Tal operação é definida através de uma política operativa, que, por sua vez, foi determinada de forma estocástica. Para representar a estocasticidade, utiliza-se a técnica de horizonte rolante para construir os diversos cenários utilizados.

Na presente metodologia, as variáveis que sofrem mudança conforme o cenário são a vazão e a retirada para irrigação em cada reservatório. Portanto, cada cenário é diferenciável através de:

- sua vazão afluente;
- sua retirada para irrigação.

Os demais dados do sistema hidrotérmico permanecem constantes para todos os cenários, conforme a Figura 4-9.

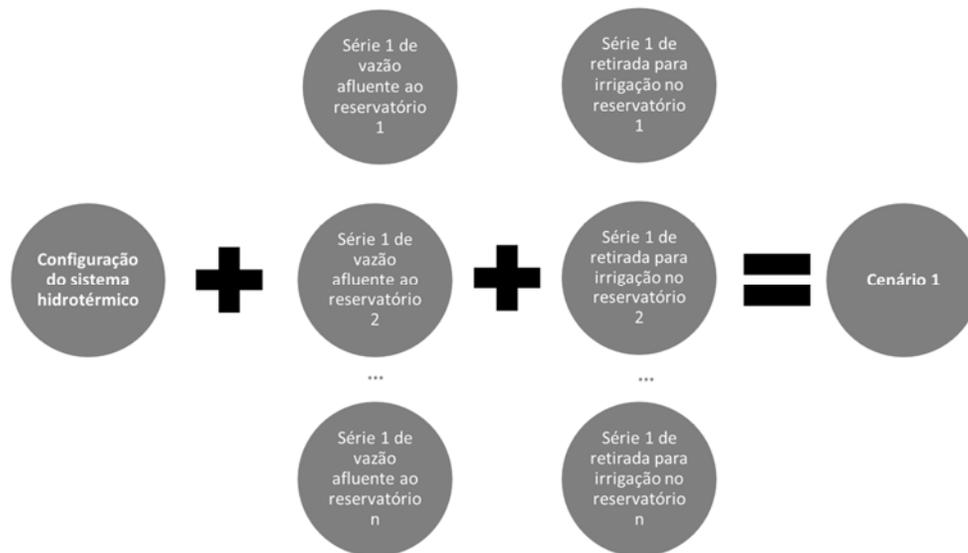


Figura 4-9: Esquematização da construção de um cenário de estudo.

Assim, partindo-se de uma série histórica (de vazão ou de retirada para irrigação), a construção das séries que configurarão os diversos cenários ocorre da seguinte forma:

- define-se o horizonte do estudo;
- toma-se como ponto de partida o mês inicial da série histórica;

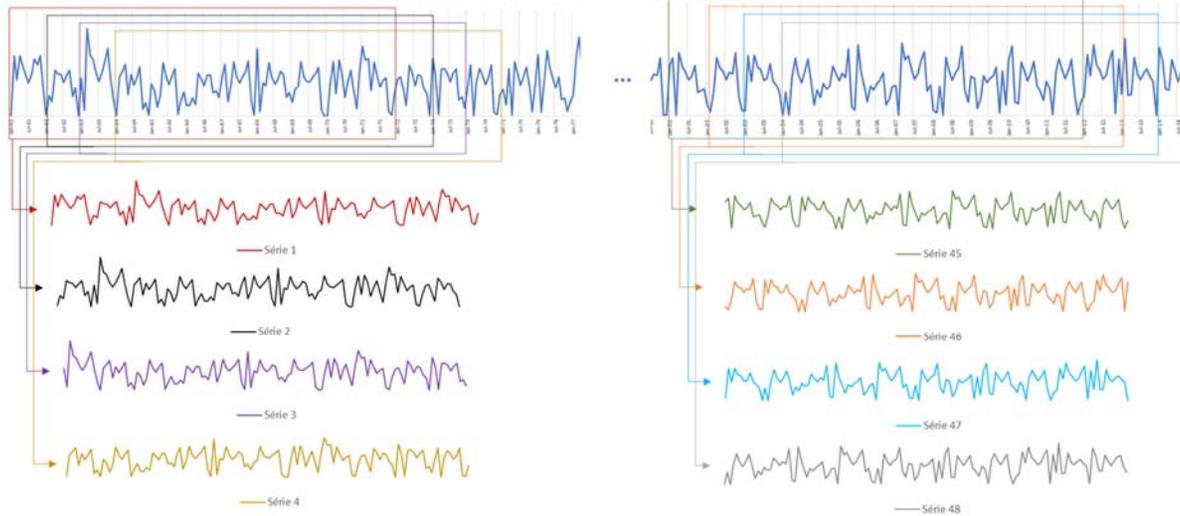
- toma-se como ponto de chegada o mês final da série histórica;
- considera-se o intervalo do horizonte de estudo como uma janela que avança progressivamente na série histórica;
- partindo-se do ponto de partida, move-se a janela um ano por vez, até que se atinja o ponto de chegada.

A Figura 4-10 esquematiza a construção de séries através de um horizonte rolante de 11 anos e uma série histórica de jan/1961 a dez/2014..

Série temporal histórica completa



Aplicação de horizonte rolante de 11 anos para criação das séries que configurarão os cenários



Sobreposição de um subconjunto das séries geradas

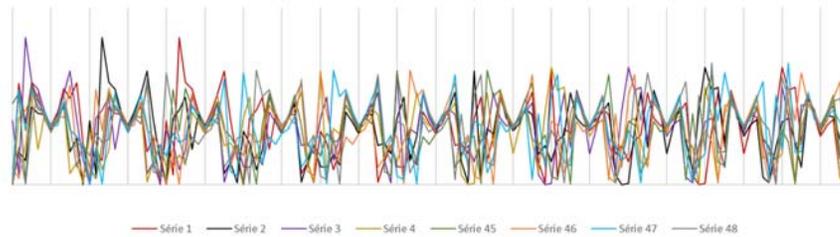


Figura 4-10: Construção de séries via horizonte rolante para compor cenários para a política operativa estocástica.

A seguir, são descritos os passos que compõem o procedimento de estudo proposto:

1. Ajusta-se (calibração e validação) o modelo SMAP, para cada reservatório de interesse, usando as vazões, precipitações e temperaturas históricas;
2. Utilizam-se os dados de precipitação e temperatura e os parâmetros do modelo SMAP, calibrado no passo 1, para gerar uma série de vazão natural para cada reservatório de interesse (aplicação do SMAP);
3. Compara-se a série de vazão gerada pelo SMAP com a série da base de dados oficial do ONS para cada reservatório, de forma a testar a hipótese da existência de viés nos dados de vazão oficiais;
4. Constroem-se as séries de vazões afluentes a cada reservatório de interesse através de horizonte rolante;
5. Utilizam-se os dados de precipitação e temperatura e uma configuração de lavoura de referência para calcular as retiradas mensais históricas para irrigação em cada reservatório de interesse;
6. Constroem-se as séries de retirada para irrigação referentes a cada reservatório de interesse através de horizonte rolante;
7. Calcula-se a mediana dos valores históricos de retirada para irrigação de cada mês como forma de aproximar os valores calculados pelo ONS, que são obtidos de forma média¹⁷ (vide seção 2.4.2). Constrói-se uma única série a ser repetida nos diversos cenários;
8. Otimiza-se a operação do SIN com o modelo de despacho probabilístico SDDP, utilizando-se uma configuração estática¹⁸ e o horizonte de 11 anos¹⁹. Os cenários são compostos pela série de retiradas para irrigação calculada no passo 7 e as séries de afluência construídas no passo 4;
9. Simula-se a operação do sistema supondo-se a repetição da série de retiradas medianas (passo 7) e as séries de afluências construídas no passo 4. Simula-se

¹⁷ Isso foi feito porque os dados de demanda para irrigação do ONS só foram obtidos a partir de 2006.

¹⁸ Utiliza-se uma configuração energética estática do SIN para o modelo SDDP de modo a não representar no estudo crescimento do mercado, motorizações ou manutenções de usinas.

¹⁹ Os quatro primeiros anos são descartados, pois servem para que o modelo perca o efeito das condições iniciais de armazenamento. Os quatro últimos anos também são descartados, pois representam o efeito de esvaziamento dos reservatórios no final do horizonte. Os três anos do meio são os anos de interesse para as análises.

novamente com séries de retiradas que preservam a variação climática, calculadas no passo 6. Para ambas as simulações, utiliza-se a função de custo futuro calculada no passo 8;

10. Repete-se os passos 5-9 supondo que as áreas irrigadas foram multiplicadas sucessivamente por fatores determinados de acordo com o estudo de caso.

A Figura 4-11 apresenta, de forma resumida, o procedimento metodológico proposto.

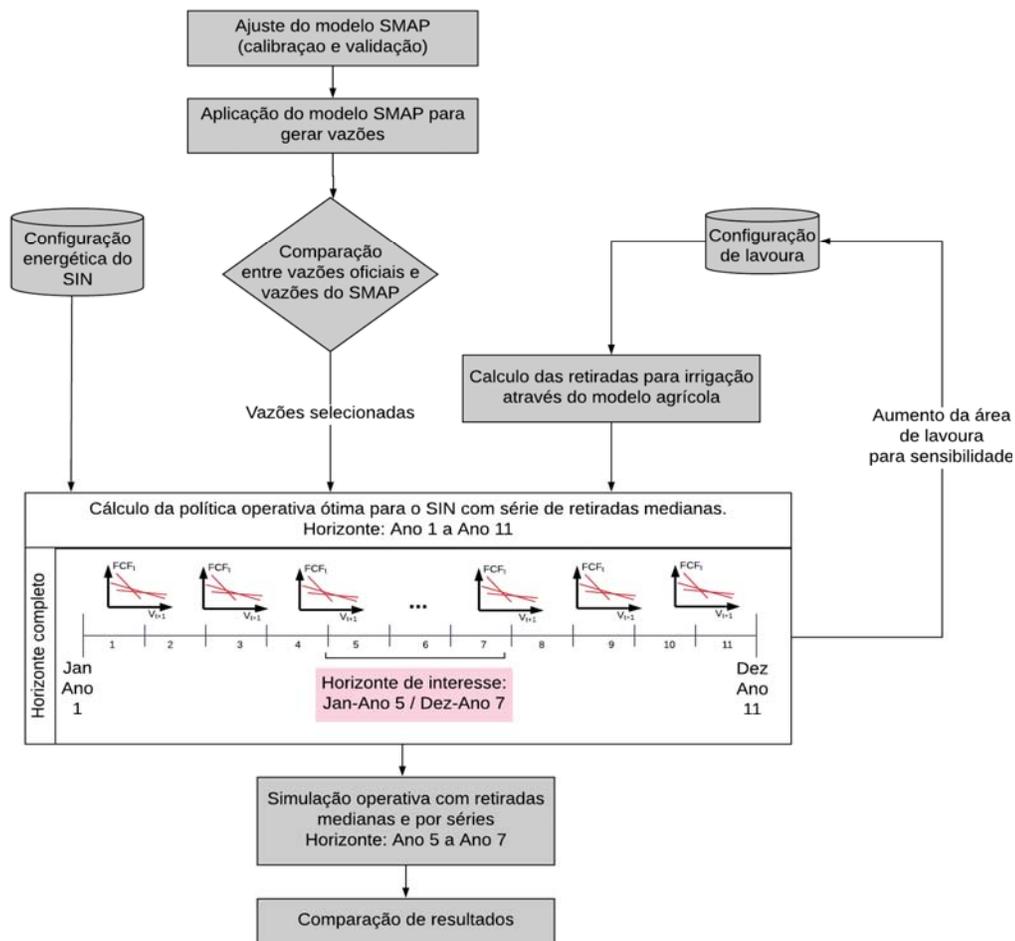
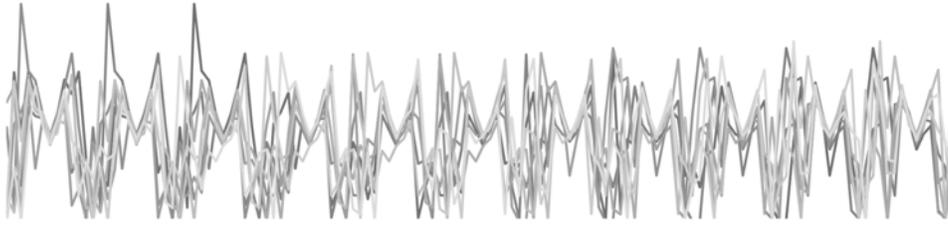


Figura 4-11: Procedimento metodológico.

A Figura 4-12 representa de forma esquemática os passos 6 e 7.

Representação esquemática de um conjunto de séries de retirada para irrigação.



Representação em destaque (vermelho) para a série construída a partir da mediana dos valores mensais de retirada para irrigação.

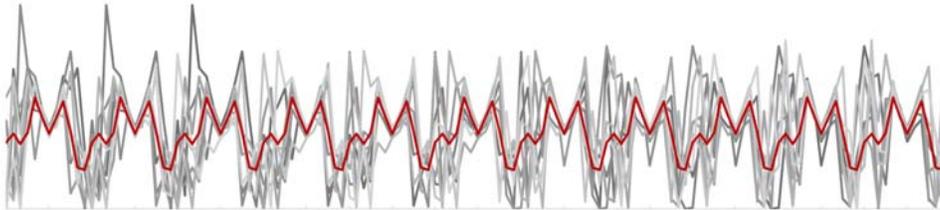


Figura 4-12: Representação esquemática dos passos 6 e 7.

5 ESTUDO DE CASO

O presente capítulo apresenta as fontes e os tratamentos efetuados nos dados relativos ao estudo de caso da bacia do São Francisco. Apresentam-se também os resultados obtidos através da metodologia proposta e as discussões correlatas.

5.1 Descrição do estudo de caso

Para a aplicação do procedimento proposto na seção 4.4, foram consideradas as divisões territoriais tipo SUB1 do Plano Nacional de Recursos Hídricos (SFA, SFM e SFMS) e as três principais hidrelétricas com reservatório da bacia do São Francisco, a saber: Três Marias, Sobradinho e Itaparica.

O modelo chuva-vazão foi construído com base no conceito de área de drenagem total, que é a área desde a nascente do rio até o ponto de análise. Já o modelo agrícola foi desenvolvido com base no conceito de área de drenagem incremental, que é a área de drenagem entre dois pontos de análise. A Figura 5-1 apresenta as áreas totais e incrementais utilizadas em cada um dos modelos, bem como a localização das UHEs do estudo de caso.

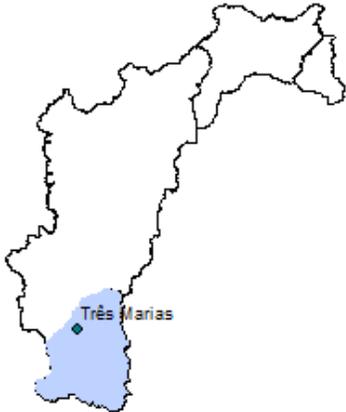
Modelo agrícola	Modelo chuva-vazão
SFA	SFA
	
SFM	SFM
	
SFSM	SFSM
	

Figura 5-1: Divisões espaciais utilizadas no estudo.

5.2 Dados de entrada

Os dados de entrada apresentados abaixo foram utilizados para alimentar os três modelos descritos no Capítulo 4.

5.2.1 Precipitação

Os dados dos postos pluviométricos selecionados foram obtidos através do sistema HidroWeb, disponibilizado pela ANA, e do BDMEP disponibilizado por INMET (2018). A seleção foi feita a partir da análise de consistência descrita no Apêndice A.

O preenchimento das falhas foi realizado utilizando-se o pacote MICE da linguagem R (BUUREN e GROOTHUIS-OUDSHOORN, 2011), descrito em detalhes no Apêndice A. O cálculo da precipitação total média mensal foi feito pelo método de Thiessen²⁰. Para o modelo agrícola, esse método foi aplicado para as áreas incrementais de cada sub-bacia, enquanto que, para o modelo chuva-vazão, foi aplicado para as áreas acumuladas das sub-bacias.

A Figura 5-2 apresenta a distribuição espacial dos postos pluviométricos operados pela CPRM no período 1961-2006. As informações desses postos pluviométricos encontram-se no Apêndice B.

²⁰ Para o cálculo da precipitação média em uma determinada área, atribui pesos diferentes para cada posto pluviométrico, de acordo com a área de influência de cada posto.

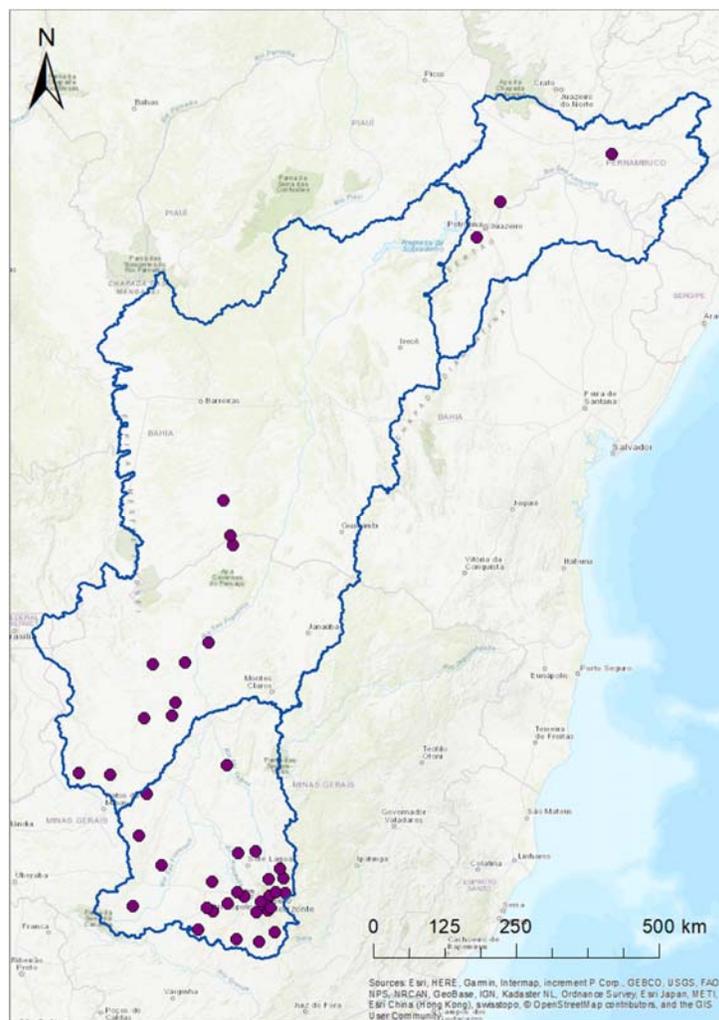
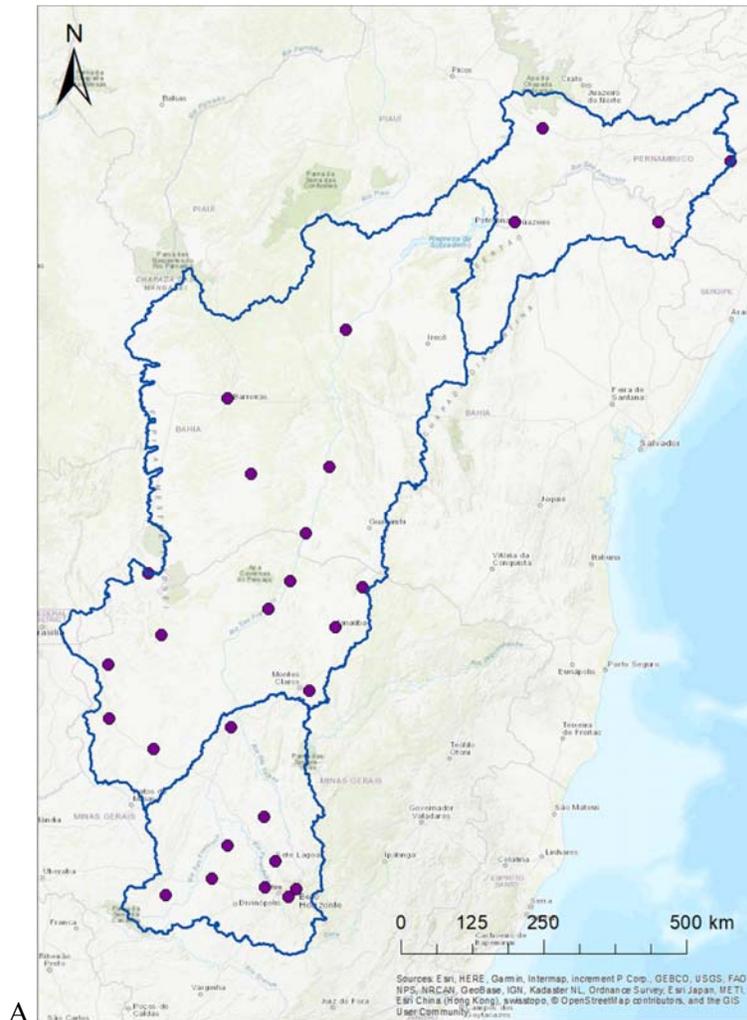


Figura 5-2: Postos pluviométricos operados pela CPRM. Período 1961-2006.

A Figura 5-3 apresenta a distribuição espacial dos postos pluviométricos operados pelo INMET considerados no período 2007-2014. As informações desses postos pluviométricos encontram-se no Apêndice B.



A

Figura 5-3: Postos pluviométricos operados pelo INMET. Período 2007-2014.

Conforme descrito por LIMA *et al.* (2003), na maioria das áreas irrigadas nas regiões áridas e semiáridas, considera-se a precipitação total como a efetiva, pois a magnitude da precipitação efetiva é pouco significativa. Porém, dado que a bacia em estudo possui áreas com características climáticas diversas, adotou-se como precipitação efetiva para cálculo da demanda agrícola a proposta metodológica de OTTONI FILHO (2018).

Para os dados de entrada do modelo SMAP, as precipitações foram computadas de forma a considerar as áreas de drenagem acumuladas desde a cabeceira da bacia até o exutório da sub-bacia avaliada. Já para o modelo agrícola, a precipitação total calculada levou em conta apenas a área de drenagem incremental de cada sub-bacia. Essa diferenciação foi necessária porque os dados de calibração do modelo chuva-vazão são

referentes às áreas totais, enquanto os dados de área cultivada que basearam o modelo agrícola são referentes às sub-bacias específicas.

5.2.2 Temperatura

Os dados de temperatura máxima e mínima das estações meteorológicas consideradas foram obtidos no banco de dados BDMEP disponibilizado por INMET (2018). O preenchimento das falhas também foi realizado utilizando-se o método MICE. A Figura 5-4 apresenta a distribuição espacial dos postos de temperatura utilizados. As informações desses postos pluviométricos encontram-se no Apêndice B.

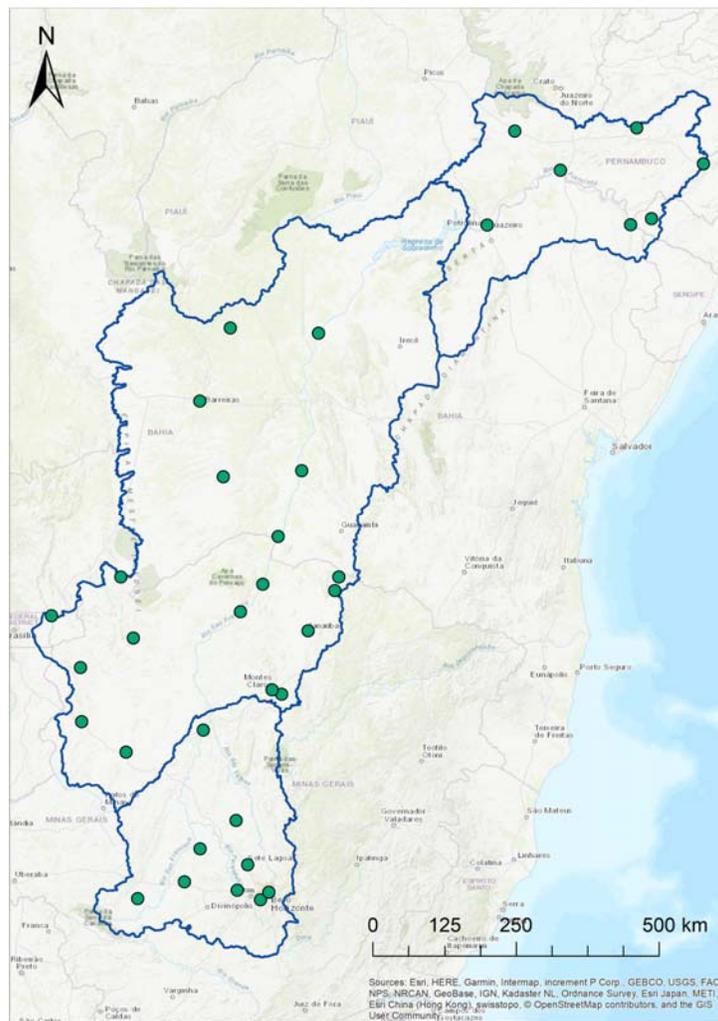


Figura 5-4: Distribuição espacial dos postos de temperatura utilizados.

5.2.3 Vazão natural

As vazões naturais reconstituídas pelo ONS foram obtidas da base de dados da EPE para cálculo da garantia física. O período utilizado foi 1931-2014. Segundo essa base

de dados, como pode ser observado na Figura 5-5, no período de ajuste, a UHE Itaparica, com relação à UHE Sobradinho, contava com 32% de vazões incrementais negativas. Essas vazões incrementais negativas foram corrigidas manualmente (considerado incremental nula entre as UHEs Sobradinho e Itaparica), de modo a possibilitar o ajuste do modelo SMAP.

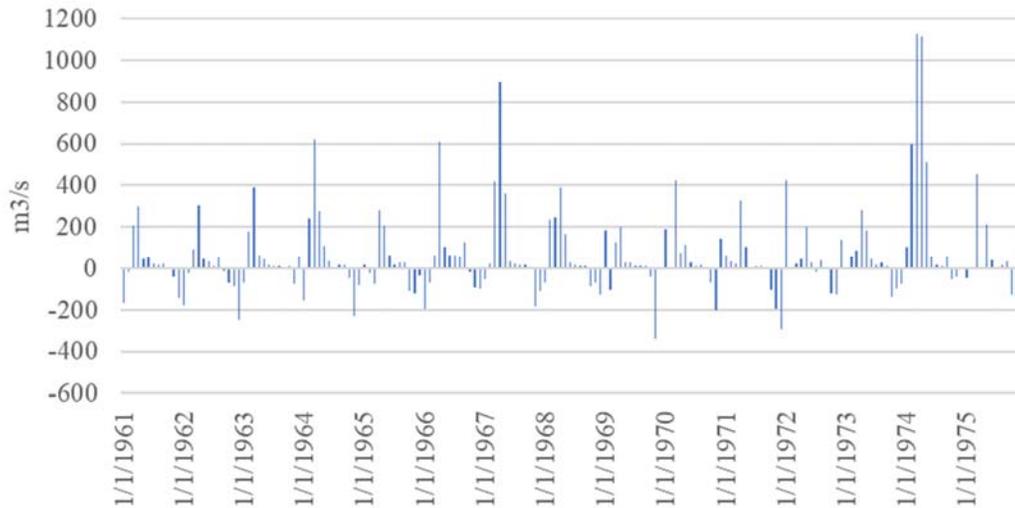


Figura 5-5: Vazões incrementais na UHE Itaparica entre 1961 e 1975.

Semelhantemente, no período de aplicação do modelo SMAP, a UHE Itaparica também contava com incrementais negativos em 25% dos meses, conforme Figura 5-6.

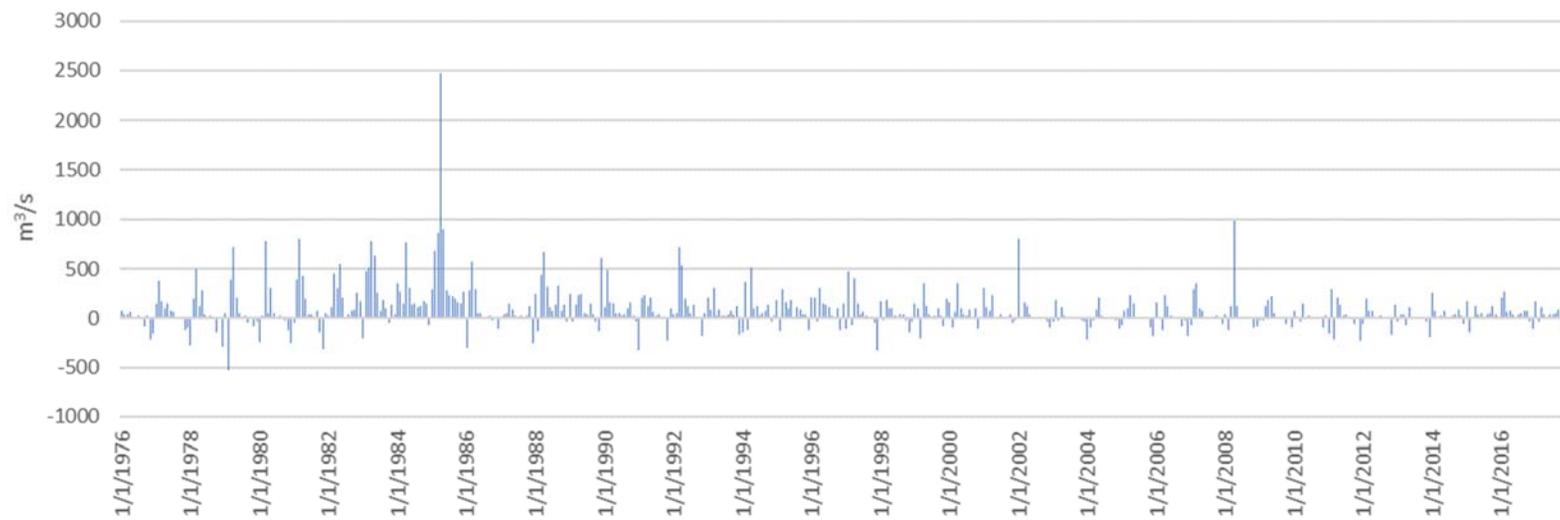


Figura 5-6: Vazões incrementais na UHE Itaparica entre 1976 e 2017.

5.2.4 Características dos lotes

MMA *et al.* (2011) caracterizaram, em seu estudo, um total de 59 cultivos espalhados pelas ottobacias do país. No entanto, sabe-se que um pequeno número desse total representa a maior parte da retirada de água para irrigação. Por essa razão, dadas as sub-bacias da região hidrográfica do São Francisco, foram selecionados os cultivos mais representativos para serem modelados neste trabalho (definição dos lotes). A Figura 5-7 apresenta o fluxograma desse procedimento.



Figura 5-7: Fluxograma de definição dos lotes de interesse.

No SFA, a cana-de-açúcar sozinha representa 80% da retirada, conforme Figura 5-8.

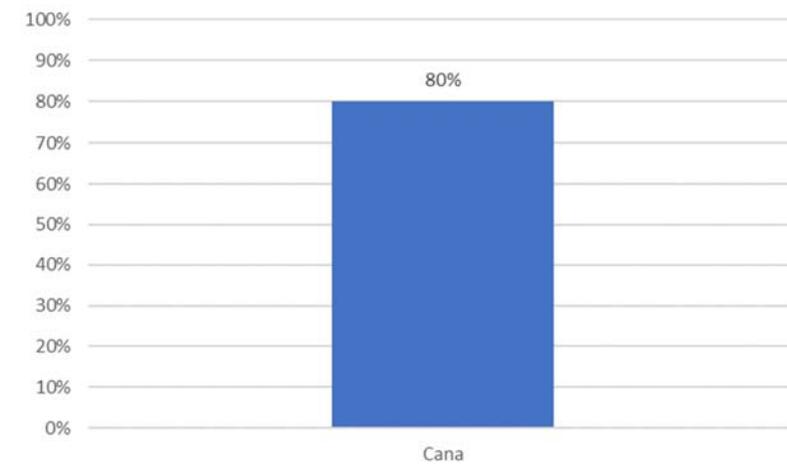


Figura 5-8: Seleção de cultivo por participação na retirada para irrigação no SFA. Fonte: Adaptado a partir de MMA *et al.* (2011).

A Figura 5-10 apresenta o resultado da ordenação das culturas representativas das maiores vazões de retirada no SFM. Chama atenção a participação da cana-de-açúcar, respondendo por 25% das retiradas.

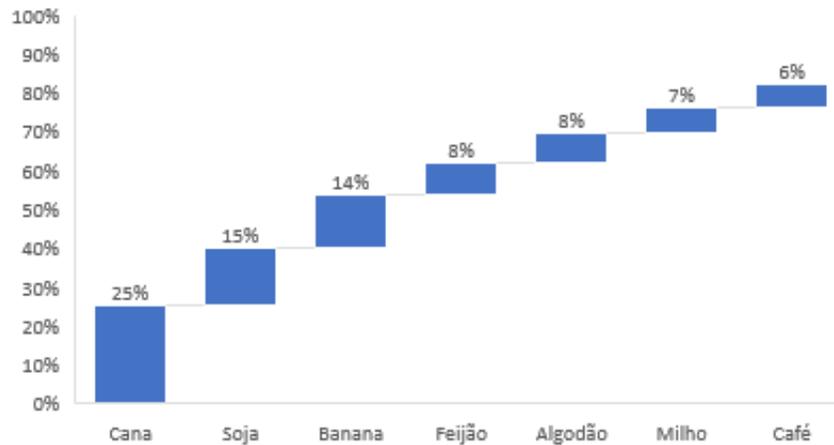


Figura 5-9: Seleção de cultivos por participação na retirada para irrigação no SFM.
 Fonte: Adaptado a partir de MMA *et al.* (2011).

A Figura 5-10 apresenta o resultado da ordenação das culturas representativas das maiores vazões de retirada no SFSM. Vale destacar o papel da cana-de-açúcar, que além de ter importâncias nas sub-bacias de montante, no SFSM também tem papel de destaque, representando 23% das retiradas.

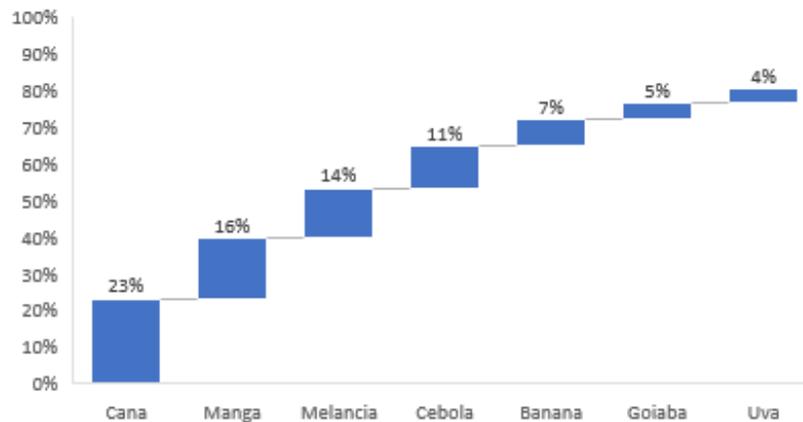


Figura 5-10: Seleção de cultivos por participação na retirada para irrigação no SFSM.
 Fonte: Adaptado a partir de MMA *et al.* (2011).

A Tabela 5-1 apresenta as características dos cultivos selecionados em cada localidade (lotes). Para todos os lotes, as eficiências de condução e distribuição consideradas foram 85%. Através da modelagem em detalhes das culturas responsáveis por 80% da retirada, pôde-se alcançar proporcionalmente o equivalente a 100% de retirada.

Tabela 5-1: Características dos lotes.

Localidade	Cultura	Método de irrigação	Eficiência de aplicação (%)	Kc ponderado
SFA	Cana	Aspersão	85	0,87
SFM	Cana	Aspersão	85	0,87
	Soja	Aspersão	85	0,83
	Banana	Localizada	90	1,11
	Feijão	Superficial/Aspersão	75	0,94
	Algodão	Aspersão	85	0,82
	Milho	Superficial/Aspersão	75	0,91
	Café	Localizada	90	0,90
SFSM	Cana	Aspersão	85	0,87
	Manga	Localizada	90	0,90
	Banana	Localizada	90	1,11
	Cebola	Superficial/Aspersão	75	0,99
	Melancia	Superficial/Aspersão	75	0,74
	Goiaba	Aspersão	85	1,00
	Uva	Localizada	90	0,59

Fonte: Adaptado a partir de MMA *et al.* (2011) e SILVA (2015).

Como o ciclo das culturas temporárias varia ao longo do ano, as áreas irrigadas destinadas a cada cultivo em cada SUBI também podem variar. No caso do SFA, como apenas a cana-de-açúcar foi representada, a área permaneceu constante em 31.316 ha em todos os meses. A Figura 5-11 mostra a variação da área irrigada por cultivo no SFM.

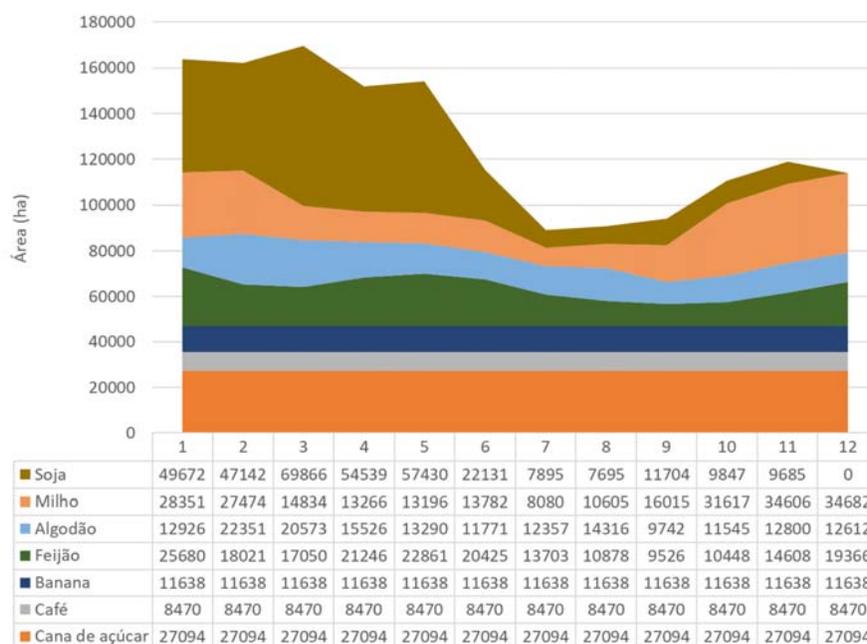


Figura 5-11: Área ocupada pelos cultivos representados no SFM.

Fonte: Adaptado a partir de MMA *et al.* (2011).

A Figura 5-12 mostra a variação da área irrigada por cultivo no SFSM.

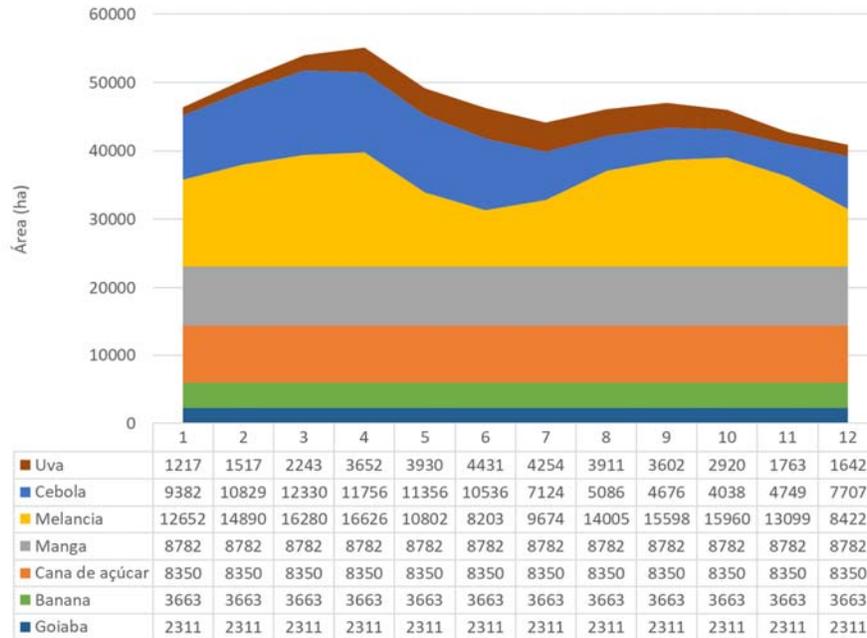


Figura 5-12: Área ocupada pelos cultivos representados no SFSM.
Fonte: Adaptado a partir de MMA *et al.* (2011).

5.2.5 Modelagem energética

Como a finalidade das simulações de despacho hidrotérmico deste trabalho é avaliar o impacto de diferentes demandas de irrigação, optou-se por fazer um estudo estático para uma configuração oferta-demanda equilibrada. Dessa forma, a evolução da demanda ou da disponibilidade de oferta, bem como os cronogramas de manutenção e as variações de restrições operativas não impactarão o estudo.

A base de dados utilizada foi a *Revisão Ordinária de Garantia Física de Energia das Usinas Hidrelétricas – UHEs Despachadas Centralizadamente no Sistema Interligado Nacional - SIN* (EPE, 2017b) convertida para o modelo SDDP a partir do modelo Newave. As aflúncias consideradas foram as da base de dados, de acordo com a avaliação dos resultados do modelo SMAP. Para que os cenários de vazões fossem concomitantes com as séries de retiradas para irrigação, o ano inicial de hidrologia considerado foi 1961. Dessa forma, o CMO resultante sofreria redução em relação ao do estudo da EPE, pois o período de 1931 a 1960 contém o período crítico do sistema. Para manter o CMO coerente com o estudo da EPE, a demanda considerada foi incrementada em 3%.

A Tabela 5-2 apresenta a demanda utilizada em todos os casos analisados para esta dissertação.

Tabela 5-2: Demanda energética (GWh) - Brasil.

	NORDESTE	NORTE	SUDESTE	SUL	TOTAL
Jan	9761	5243	37222	11688	63914
Fev	9139	4793	36382	11213	61527
Mar	10521	5332	39830	11648	67331
Abr	9920	5280	39450	11531	66181
Mai	10178	5359	36779	10511	62827
Jun	9593	5055	35018	10690	60356
Jul	9806	5219	36027	10354	61405
Ago	9929	5484	36434	10285	62132
Set	9785	5273	35467	9696	60220
Out	10493	5534	39327	10682	66036
Nov	10260	5307	37506	10548	63621
Dez	10616	5403	38419	11293	65731

Fonte: Adaptado a partir de EPE (2017b).

O custo do déficit energético considerado foi de R\$ 4.650/MWh²¹. A taxa de desconto utilizada foi de 8%. Foi utilizada a opção de vazões históricas com 48 séries *forward* para cálculo da política operativa do algoritmo SDDP.

À título de análise de sensibilidade, o passo dez do procedimento descrito na seção 4.4 foi realizado para avaliar uma retirada de irrigação amplificada 100 e 200%. Esses fatores foram selecionados com base nas taxas de crescimento anuais da área irrigada por UF apresentas na Tabela 3-9. O caso a1.0 considerou a área de irrigação de referência. O caso de sensibilidade com duplicação da área irrigada foi chamado a2.0. Ele equivaleria à demanda de irrigação atual (2019). Já o caso a4.0 apresenta uma área irrigada quatro vezes maior que a considerada em 2006, o que seria equivalente à realidade em 2030, caso as taxas de crescimento anuais do período 2006-2015 se mantivessem constantes e fosse feita uma média entre as três sub-bacias analisadas.

Partindo-se de cada configuração de área (a1.0, a2.0 e a3.0), o procedimento da seção 4.4 foi aplicado, de modo a obter-se duas simulações operativas com 48 cenários cada (caso Séries e Caso Medianas). Em ambas as simulações, as séries de vazões utilizadas são as mesmas. No entanto, o chamado Caso Séries contém séries de demandas

²¹ EPE-DEE-RE-092/2016-r0

de irrigação diferentes entre si, enquanto o Caso Medianas contém em todos os cenários a mesma série de demanda para irrigação construída através dos valores das medianas de cada mês. Assim, os resultados energéticos serão apresentados sempre em termos da diferença (delta) entre o Caso Séries e o Caso Medianas. A Figura 5-13 resume os casos analisados.



Figura 5-13: Nomenclatura dos casos de sensibilidade.

5.3 Resultados

Nesta seção são apresentados e descritos os principais resultados gerados pelos modelos.

5.3.1 Modelo agrícola

Tanto para o modelo agrícola quanto para o SMAP é necessário calcular inicialmente a evapotranspiração. Através da equação HS, esta foi calculada para as sub-bacias de interesse. A Figura 5-14 apresentam a validação desses resultados em termos de evapotranspiração total anual média em comparação com dados do SisEvapo²², estando a evapotranspiração calculada sempre entre a potencial e a real disponíveis no SisEvapo.

²² Sistema de Avaliação da Evaporação Líquida dos Reservatórios

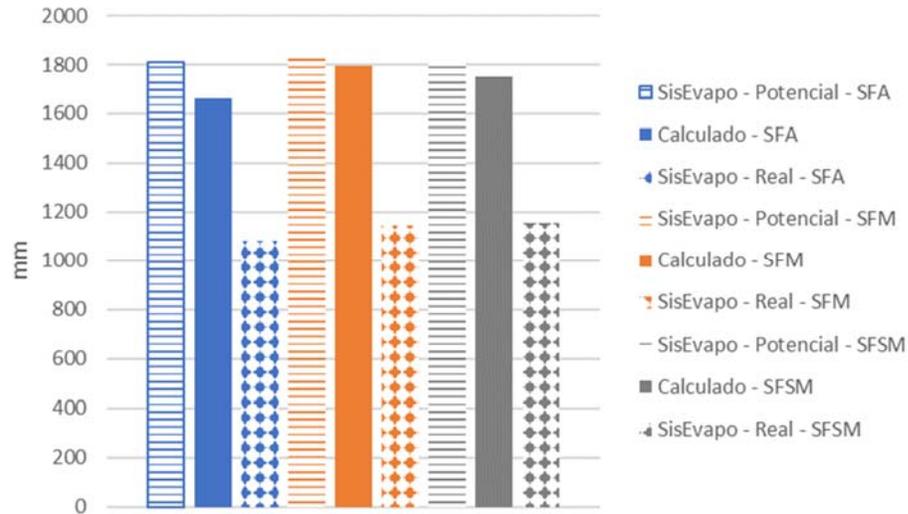


Figura 5-14: Evapotranspiração média total anual.

A Figura 5-15 apresenta a variação da evapotranspiração média mensal calculada.



Figura 5-15: Variação da evapotranspiração média mensal calculada.

O gráfico *box plot* da Figura 5-16 apresenta a distribuição das séries de demanda de irrigação geradas a partir da metodologia proposta para o SFA. Observa-se maior variabilidade nos meses de fevereiro, setembro e outubro. Nos meses de junho, julho e agosto, a amplitude interquartílica é consideravelmente menor, porém os dados se mostram negativamente assimétricos, estando a mediana bem próxima do terceiro quartil. Também é grande a quantidade de *outliers* nesses meses. A análise da Figura 5-15 sugere que esse padrão de amplitude das variabilidades pode ser explicado pela alta

evapotranspiração. A retirada absoluta mínima observada foi 0 m³/s e a máxima foi 43 m³/s, ocorrida no mês de setembro. A retirada em média foi 15 m³/s e o desvio padrão variou entre 5 e 12 m³/s, sendo menor nos meses mais secos (vide Tabela 3-3).

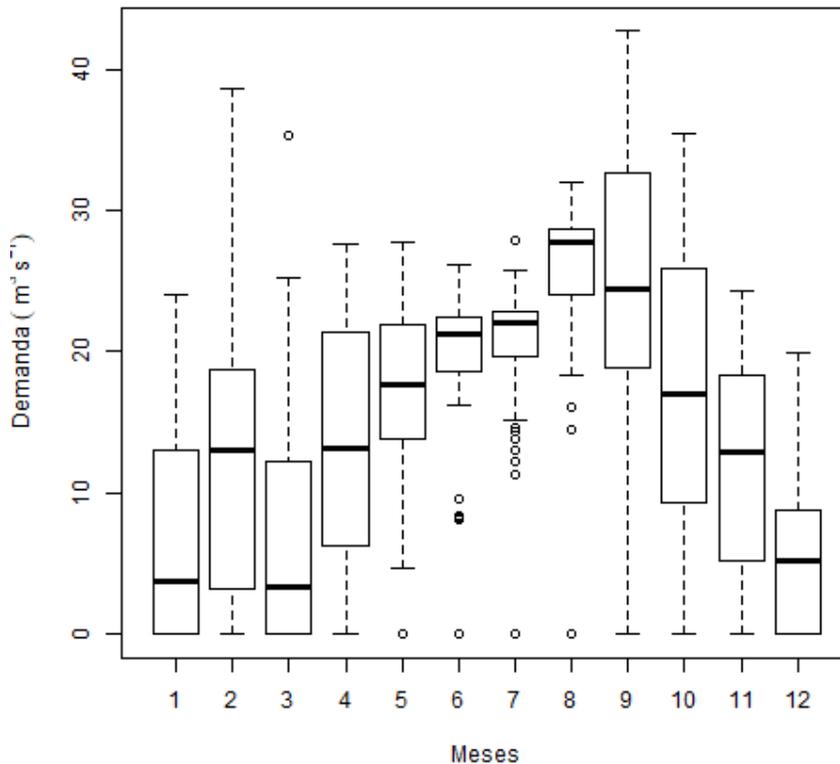


Figura 5-16: Séries de demanda de irrigação (SFA).

O *box plot* da Figura 5-17 apresenta as séries de demanda de irrigação gerados a partir da metodologia proposta para o SFM. O valor mínimo de retirada foi 0 m³/s, porém este valor só foi observado em meses úmidos.

No mês de setembro, o mínimo observado em todas as séries foi 111 m³/s, o maior valor mínimo de todos os meses. Nesta sub-bacia, as maiores variabilidades ocorrem nos meses de fevereiro e março, sendo o valor máximo absoluto observado em fevereiro (296 m³/s). Mais uma vez observa-se que os valores mais extremos ocorrem nos meses mais de maior evapotranspiração. A variabilidade nos meses de junho, julho e agosto é muito baixa, sendo o desvio padrão nesses meses abaixo de 30 m³/s. Nota-se mais uma vez grande quantidade de *outliers*. O maior desvio padrão ocorre no mês de março, sendo de 80 m³/s. A retirada em média foi 107 m³/s.

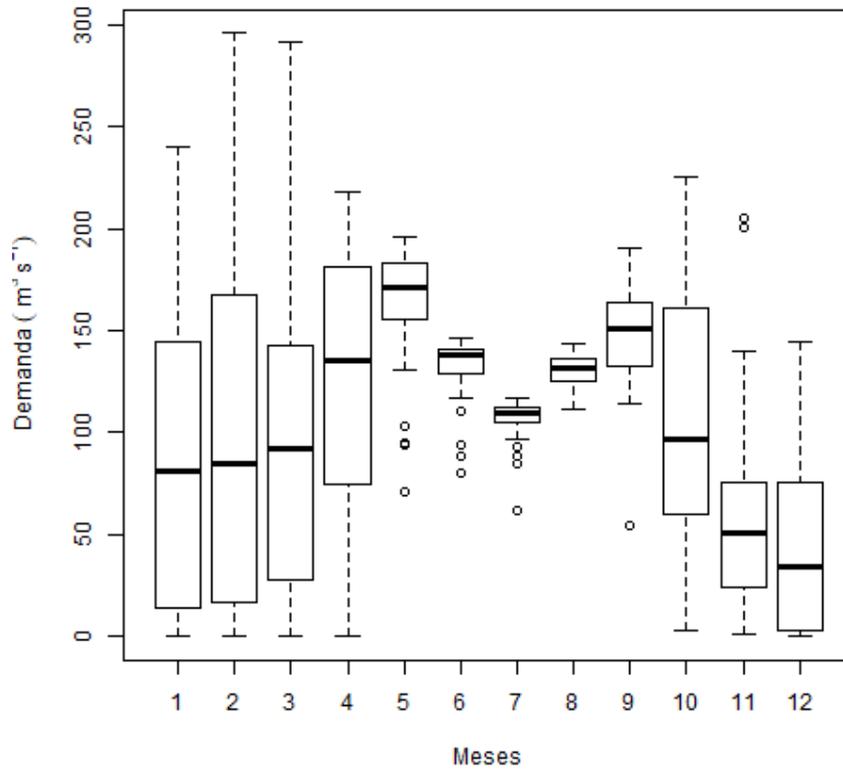


Figura 5-17: Séries de demanda de irrigação (SFM).

O *box plot* da Figura 5-18 apresenta as séries de demanda de irrigação gerados a partir da metodologia proposta para o SFSM. O valor mínimo de retirada foi 0 m³/s, também observado em meses úmidos. O mês de setembro também apresentou o maior valor de retirada mínima, sendo 41 m³/s. Nesta sub-bacia, o valor máximo obtido também se deu no mês de fevereiro, sendo 72 m³/s. Observa-se que as amplitudes de variação são grandes nos quatro primeiros meses do ano. Os valores de medianas mais altas ocorrem de agosto a outubro. O maior desvio padrão ocorre mais uma vez no mês de março, sendo de 21 m³/s. A retirada em média foi 38 m³/s.

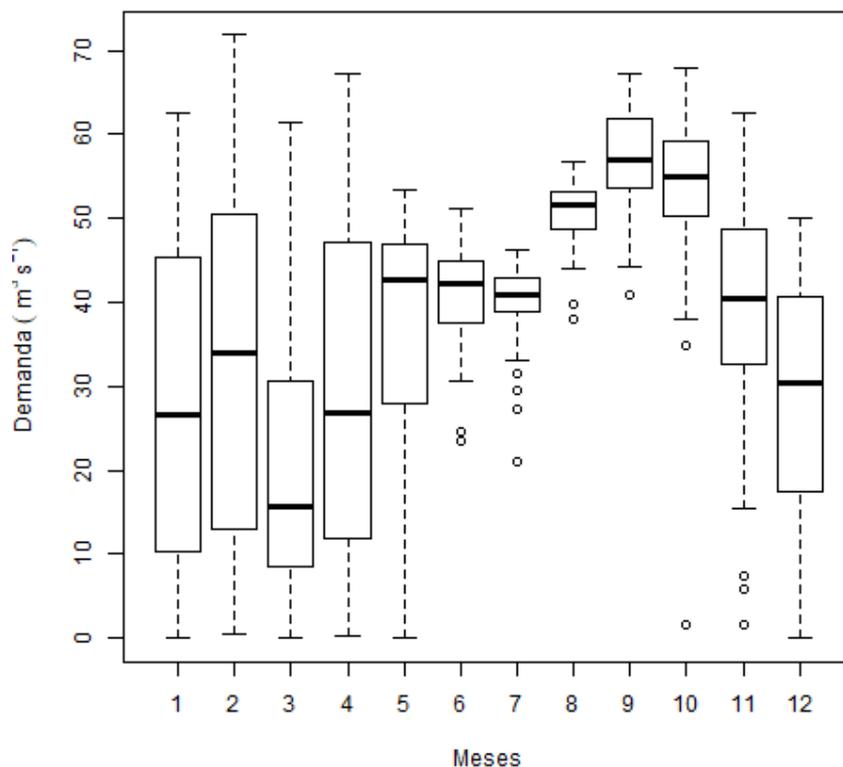


Figura 5-18: Séries de demanda de irrigação (SFSM).

Uma outra forma de observar a variabilidade dessas séries é através da ordenação das demandas para irrigação em cada mês. Para facilitar a visualização, os gráficos foram separados por reservatório e por quadrimestre.

A Figura 5-19 apresenta a distribuição de probabilidades das séries referentes à UHE Três Marias. O comportamento nos meses de janeiro e março é semelhante, pois ambos possuem deltas majoritariamente positivos. Fevereiro e abril também guardam semelhanças, devido aos valores extremos de suas distribuições. Enquanto fevereiro apresenta o maior extremo positivo, em $62,1 \text{ hm}^3$, abril possui o maior extremo negativo, em $-34,3 \text{ hm}^3$. No segundo quadrimestre, o mês de maio se destaca, por apresentar maior probabilidade de deltas positivos. O mês com maior desvio padrão é outubro, com 27 hm^3 . Nos demais meses, os deltas são majoritariamente negativos. No terceiro quadrimestre, o comportamento dos meses é bem semelhante e igualmente distribuído em torno do delta nulo. Portanto, os meses mais úmidos tendem a ter uma demanda de irrigação maior, enquanto os mais secos possuem com grande probabilidade uma demanda significativamente menor que a mediana.

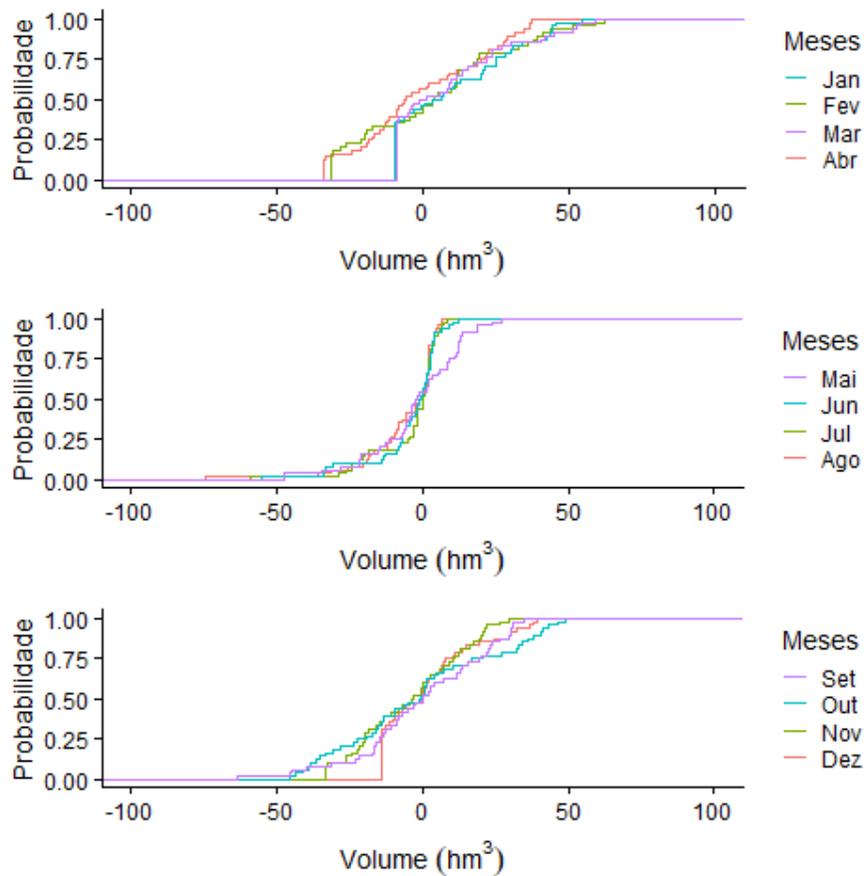


Figura 5-19: Distribuição das demandas de irrigação na UHE Três Marias

A Figura 5-20 apresenta a distribuição de probabilidades das séries referentes à UHE Sobradinho. Assim como na UHE Três Marias, o comportamento dos quadrimestres reflete uma dispersão positiva maior no início do ano, seguida de uma dispersão negativa grande nos meses mais secos e uma dispersão equalitária no final do ano. Fevereiro é o mês com maior delta de retiradas positivas, sendo 510 hm³. O mês de abril apresenta o menor delta negativo, com -350 hm³. O mês com maior desvio padrão é janeiro, com 205 hm³.

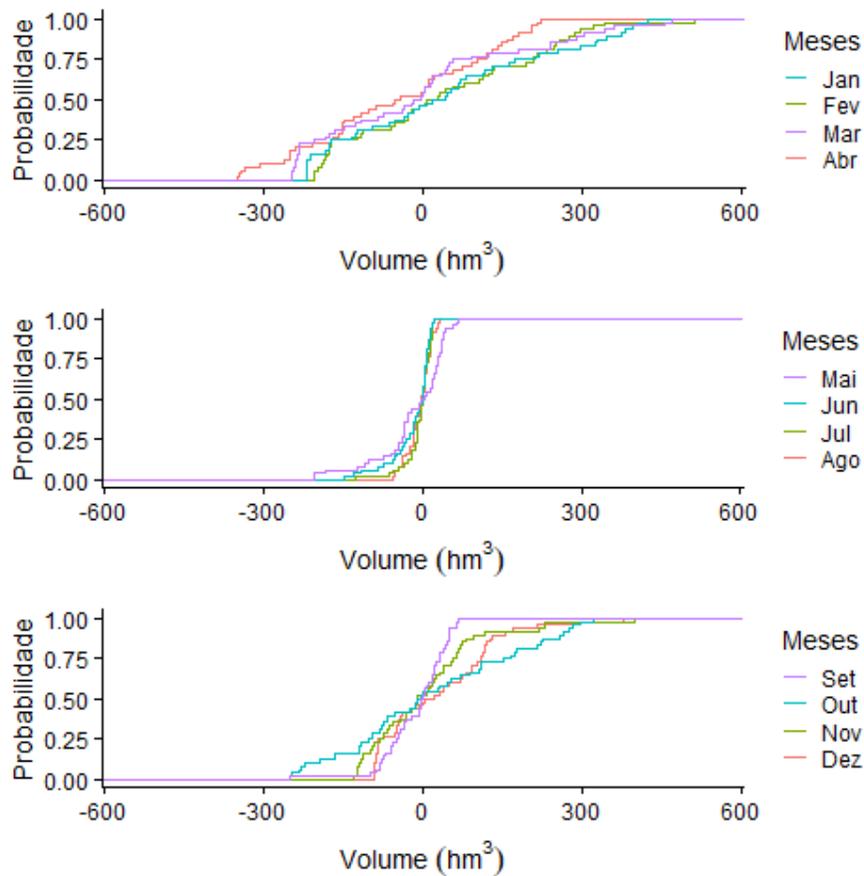


Figura 5-20: Distribuição das demandas de irrigação na UHE Sobradinho.

A Figura 5-21 apresenta a distribuição de probabilidades das séries referentes à UHE Itaparica. Os limites da distribuição aumentaram para o reservatório da UHE Sobradinho, porém voltam a diminuir para o da UHE Itaparica. Isso se deve ao tamanho da área irrigada. Os meses mais úmidos possuem um comportamento semelhante, sendo o mês de março aquele que, com maior probabilidade, possui deltas de demanda positivos. O maior delta ocorre nesse mês, sendo 134 hm³. Já o menor delta ocorre mais uma vez em outubro, sendo -143 hm³. O mês com maior desvio padrão é abril, com 54 hm³. Observa-se mais uma vez o comportamento característico dos três quadrimestres.

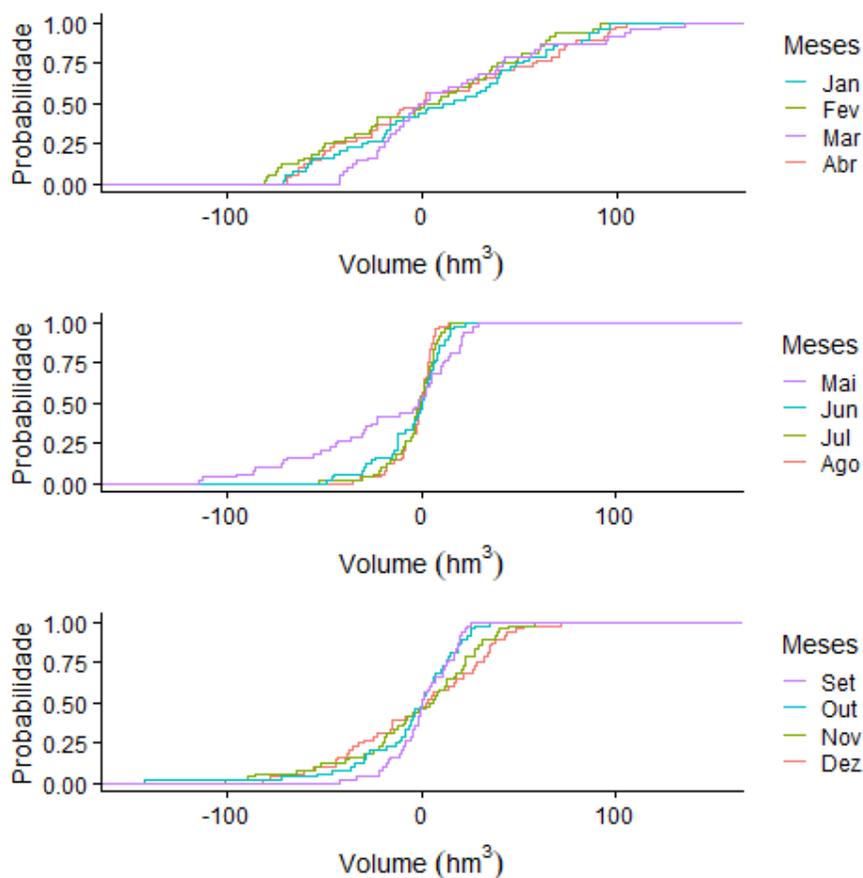


Figura 5-21: Distribuição das demandas de irrigação na UHE Itaparica.

Através do cálculo das medianas das demandas de irrigação em cada mês, obteve-se um perfil de retiradas, que serve como *proxy* para o que o ONS usa na operação do sistema. Esse perfil calculado para cada hidrelétrica de interesse é comparado com outras referências, todos com base no ano de 2006. A referência chamada “Matriz” diz respeito ao estudo “Desenvolvimento de matriz de coeficientes técnicos para recursos hídricos no Brasil” elaborado por MMA *et al.* (2011), enquanto NT 019/2013 se refere à nota técnica apresentada em ANA (2013). A referência Oficial foi obtida somando-se as demandas retiradas das usinas de cada sub-bacia disponíveis em CCEE (2018). Os resultados são apresentados na parte inferior dos três gráficos na sequência. Complementarmente, na parte superior dos gráficos, apresenta-se a média da precipitação mensal na sub-bacia. As escalas dos gráficos variam para sub-bacia.

A Figura 5-22 apresenta a comparação para a retirada na área do SFA, atribuída ao reservatório da UHE Três Marias. Observa-se que a retirada em todas as referências acompanha o perfil da precipitação média. Sendo os meses de agosto e setembro os de

maiores picos de retirada. Esses são também os meses do final do período seco para as sub-bacias em análise. As retiradas calculadas pelo método proposto, aqui sumarizadas pelo valor da mediana das 48 séries em cada mês, se mostra maior que as demais referências em praticamente todos os meses. Os valores são semelhantes ou menores que as referências nos meses mais úmidos e cerca de duas a três vezes maiores nos meses mais secos. Anualmente, em média, a retirada é de 15 m³/s no método proposto neste trabalho, 8 m³/s nos dados oficiais, 8 m³/s no estudo da Matriz e 5 m³/s na NT 019/2013. Como a área irrigada nesta sub-bacia foi considerada constante, fica bem clara a complementariedade entre as médias de demanda de irrigação e precipitação.

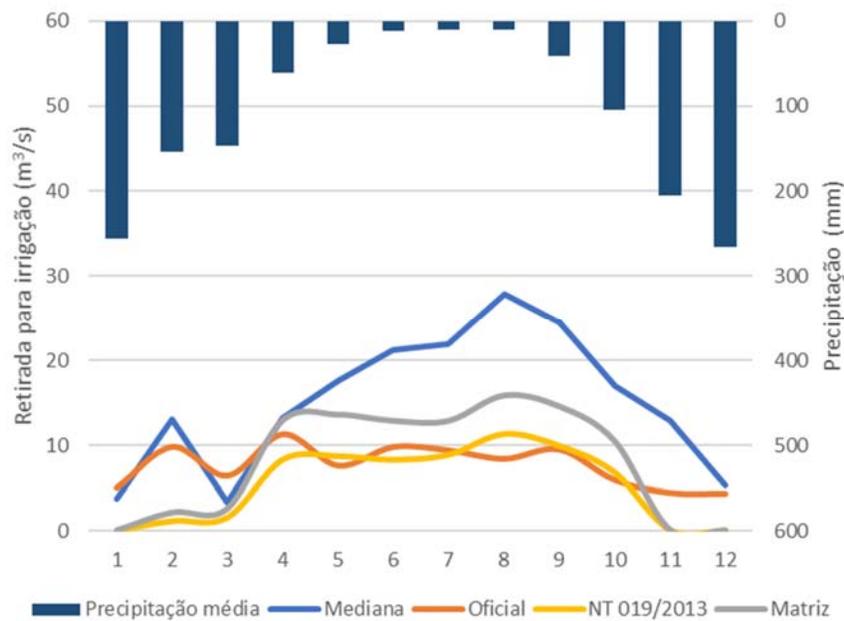


Figura 5-22: Perfil de retiradas para irrigação na UHE Três Marias.

A Figura 5-23 apresenta a comparação para a retirada na área do SFM, atribuída ao reservatório da UHE Sobradinho. Anualmente, em média, a retirada é de 106 m³/s no método proposto neste trabalho, 53 m³/s nos dados oficiais, 32 m³/s no estudo da Matriz e 55 m³/s na NT 019/2013. Nesta sub-bacia, a demanda de retirada calculada neste trabalho é maior que as demais referências em todos os meses. Observam-se picos de retirada nos meses de maio e setembro. Chama atenção a acentuada queda das demandas nos meses secos de junho e julho, o que aparentemente não condiz com o perfil da precipitação. No entanto, como apresentado na Figura 5-11, há uma queda vertiginosa da área irrigada para cultivo de soja nesses meses, o justifica tal comportamento. Devido à

escala de retiradas na UHE Sobradinho ser maior que nos demais reservatórios, este é o resultado mais significativo em termos de impacto para toda a bacia.

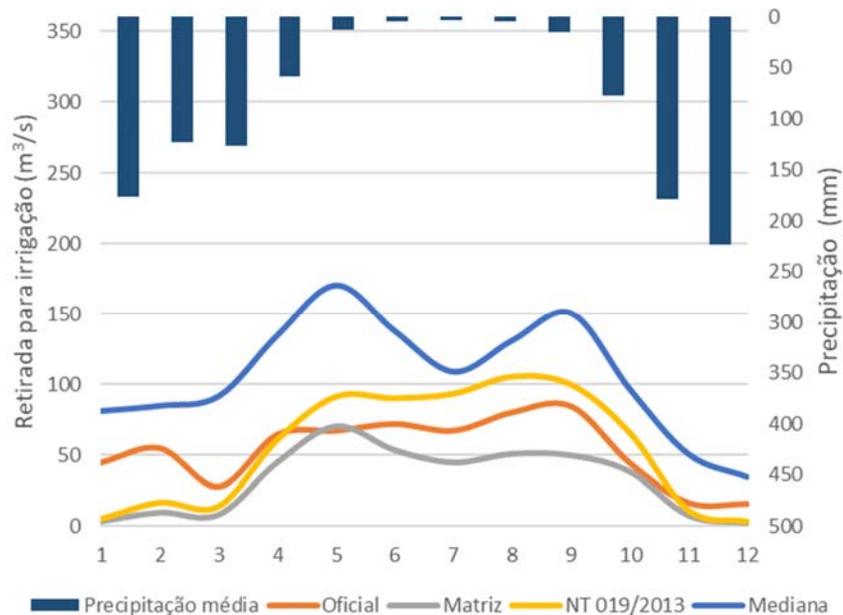


Figura 5-23: Perfil de retiradas para irrigação na UHE Sobradinho.

A Figura 5-24 apresenta a comparação para a retirada na área do SFMS, atribuída ao reservatório da UHE Itaparica. Nesta sub-bacia, diferentemente das demais, a retirada calculada pela metodologia proposta se mostra muito semelhante às demais referências. Anualmente, em média, a retirada é de 39 m³/s no método proposto neste trabalho, 46 m³/s nos dados oficiais, 29 m³/s no estudo da Matriz e 39 m³/s na NT 019/2013. Mais uma vez se observa a complementariedade entre a precipitação e a demanda de irrigação. Destaque deve ser dado ao mês de março, cuja precipitação média de 80 mm é consideravelmente maior que a dos demais meses, o que se reflete na menor demanda de retirada do ano típico. Mais uma vez, no final do período seco, observa-se aumento das retiradas. Isso condiz também com o pequeno aumento da área irrigada de referência que havia sido apresentado na Figura 5-12.

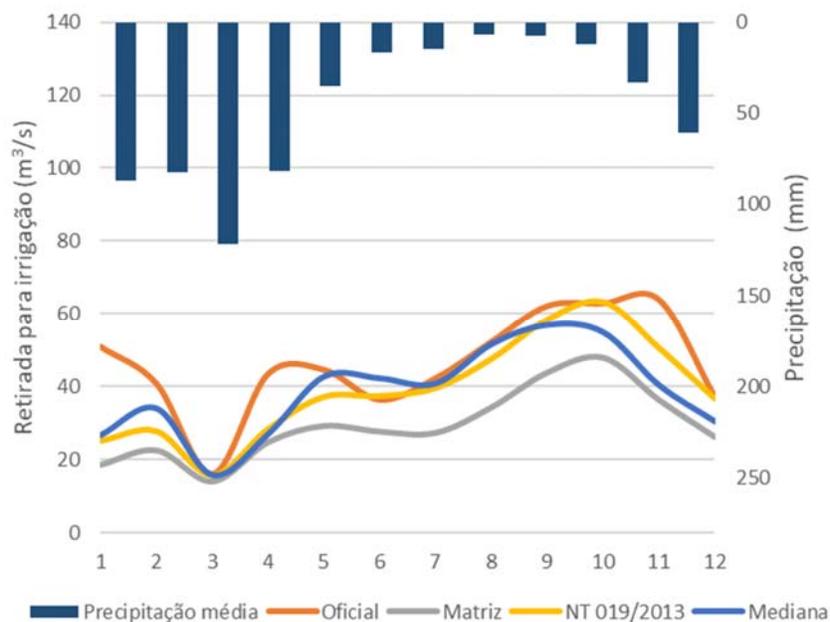


Figura 5-24: Perfil de retiradas para irrigação na UHE Itaparica.

Tomando como base os cultivos efetivamente modelados (referentes a 80% da retirada), a Figura 5-25 apresenta a média mensal de vazão de retirada por cultivo representado no SFM. Observa-se que a cana e a soja são os cultivos responsáveis pelas maiores retiradas, especialmente no mês de maio. Os meses de novembro e dezembro são claramente os de menor retirada em média. Destaca-se a significativa redução das retiradas para cultivo de soja. Esse resultado é coerente com a redução da área irrigada destinada à soja, conforme apresentado na seção 5.2.4.

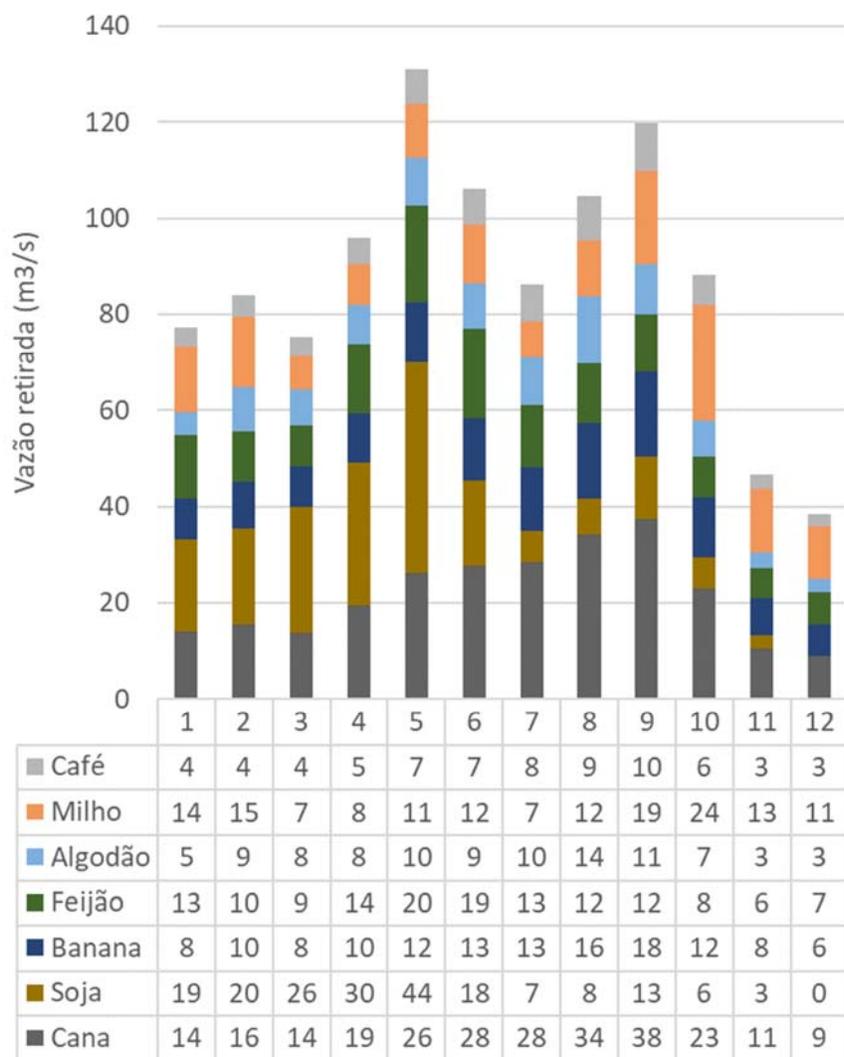


Figura 5-25: Perfil de retiradas médias para irrigação na UHE Sobradinho por cultivo.

A Figura 5-26 apresenta a média mensal de vazão de retirada por cultivo representado no SFSM. A retirada é bem distribuída entre melancia, cana, manga e cebola. Os meses de agosto, setembro e outubro são os de maior retirada, sendo notável o crescimento da retirada para o cultivo da melancia. Esse crescimento se dá pela área irrigada destinada à melancia, mas também pelo clima, haja vista que no período entre janeiro e março a área irrigada para este cultivo é semelhante, porém a retirada é bem menor (seção 5.2.4).

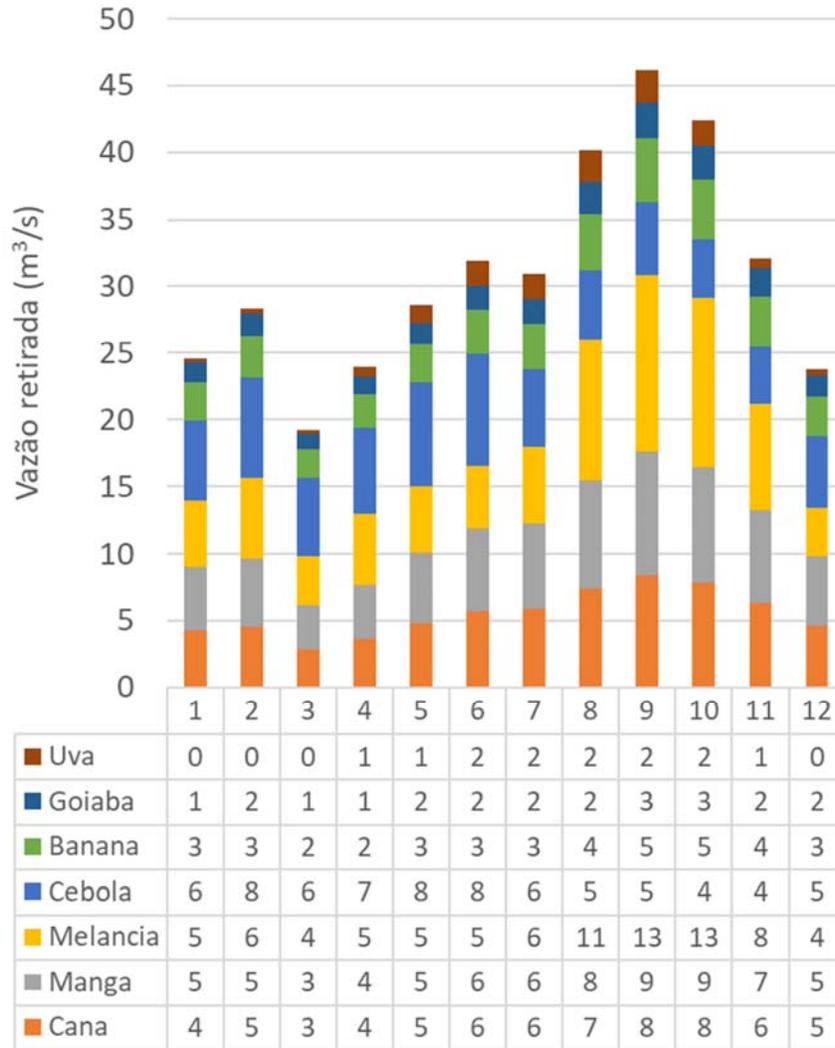


Figura 5-26: Perfil de retiradas médias para irrigação na UHE Itaparica por cultivo.

5.3.2 Modelo chuva-vazão

Neste estudo de caso, o modelo SMAP foi calibrado e validado para os três principais reservatórios da bacia: Três Marias, Sobradinho e Itaparica. Eles representam as regiões SUB1 de interesse, respectivamente: SFA, SFM e SFSM.

O período de calibração foi de setembro de 1961 até agosto de 1971 e o período de validação de setembro de 1971 a agosto de 1975. Esse período foi escolhido devido à disponibilidade de dados de precipitação e temperatura (cujo início se deu em 1961) e ao início das atividades de produção agrícola irrigada, que se deu pós 1975. Dessa forma, o ajuste do modelo não foi afetado por usos consuntivos significativos. Após o ajuste, seguindo-se a premissa de que as condições de uso do solo se mantiveram constantes na bacia, os parâmetros ótimos foram aplicados para cálculo das vazões naturais para o

período 1975-2017. Nesta fase de aplicação, não são utilizadas as métricas de avaliação, pois, em teoria, as vazões naturais são desconhecidas. Aqui, as vazões da fase de aplicação serão apresentadas juntamente com as vazões da base oficial do ONS a título de comparação. A Tabela 5-3 apresenta de forma resumida os períodos de análise.

Tabela 5-3: Períodos de análise do modelo SMAP.

Ajuste		
Calibração	Validação	Aplicação
Set/61-Ago/71	Set/71-Ago/75	Set/75-Dez/17

Para a UHE Itaparica, como os dados de vazão do ONS possuíam 32% de incrementais negativas no período de ajuste (calibração + validação), nos meses em que isso ocorria, a vazão considerada para essa UHE foi igual à da UHE Sobradinho (vide seção 5.2.3).

A Tabela 5-4 mostra de maneira resumida os resultados de calibração, validação e aplicação do modelo SMAP.

Tabela 5-4: Métricas de avaliação do modelo SMAP.

UHE	Três Marias		Sobradinho		Itaparica	
Período	Calib Set/1961	Valid Set/1971	Calib Set/1961	Valid Set/1961	Calib Set/1961	Valid Set/1971
	–	–	–	–	–	–
	Ago/1971	Dez/1975	Ago/1971	Dez/1975	Ago/1971	Dez/1975
Coef. Eficiência	1,6191	1,4850	1,5366	1,3193	1,6662	1,3395
R2	0,8770	0,7307	0,7796	0,7995	0,8477	0,7910
RMSE (m³/s)	203	238	860	948	709	941
Vazão média observada (m³/s)	648	667	2542	2526	2621	2526
Desvio padrão vazões observadas (m³/s)	571	455	1759	1511	1813	1511
Vazão média calculada (m³/s)	609	644	2404	3027	2539	2983
Desvio padrão vazões calculadas (m³/s)	525	425	1764	1801	1674	1805

A Tabela 5-5 apresenta os parâmetros calibrados do modelo SMAP para cada uma das hidrelétricas de interesse. Durante o ajuste do SMAP, foram observados melhores resultados ao se considerar como dado de entrada uma precipitação média ponderada entre a precipitação do mês em questão e a do mês anterior. Assim, foi incluído um parâmetro adicional para a ponderação temporal da precipitação.

Tabela 5-5: Conjunto de parâmetros ajustados para o modelo SMAP.

Parâmetros ajustados	Três Marias	Sobradinho	Itaparica
Sat (mês ⁻¹)	1465	2300	2973
Pes (adimensional)	2.68	3.45	2.73
Crec (adimensional)	10	6	8
K (m ⁻¹)	4	6	6
Tuin (adimensional)	40	40	40
Ebin (m ³ /s)	155	936	958
Peso do mês anterior (%)	36	68	74

A Figura 5-27 apresenta os resultados para o período de calibração da UHE Três Marias. A escala foi mantida a mesma para todos os gráficos referentes a essa UHE. O coeficiente de eficiência ótimo foi 1,62 e o R² 0,88. O RMSE foi de 203 m³/s, cerca de um terço da vazão média calculada, que foi 609 m³/s, (94% da vazão média observada). O desvio padrão foi 525 m³/s, menor que o observado de 571 m³/s. Durante a calibração, observa-se que o ajuste dos vales ficou bastante aderente aos dados observados, enquanto alguns dos picos foram subestimados

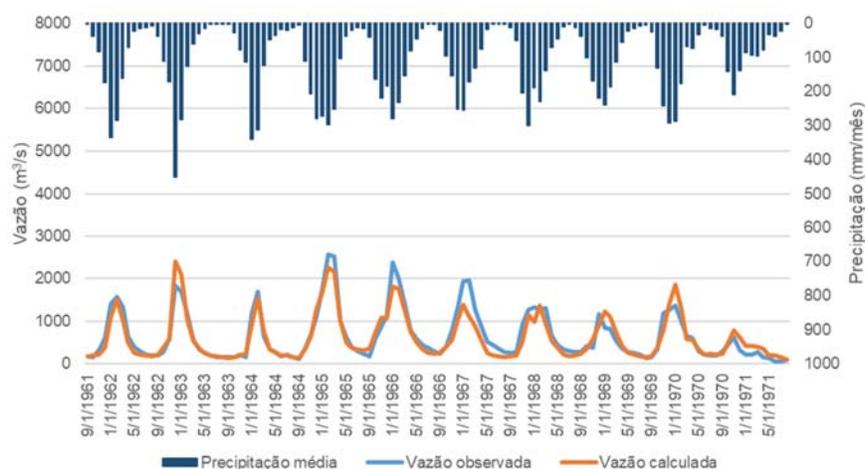


Figura 5-27: Período de calibração para a UHE Três Marias (SFA).

A Figura 5-28 apresenta os resultados para o período de validação da UHE Três Marias. O coeficiente de eficiência obtido foi 1,49 e o R² 0,73. O RMSE foi de 238 m³/s,

pouco maior que o período de calibração. A vazão média calculada foi 644 m³/s, (97% da vazão média observada). O desvio padrão foi 425 m³/s, menor que o observado de 455 m³/s. Neste período, as vazões foram mais baixas em relação ao período de calibração. Apesar de o modelo não responder tanto à maior chuva do início do período, ele termina a fase de validação com vazões muito similares às de referência.

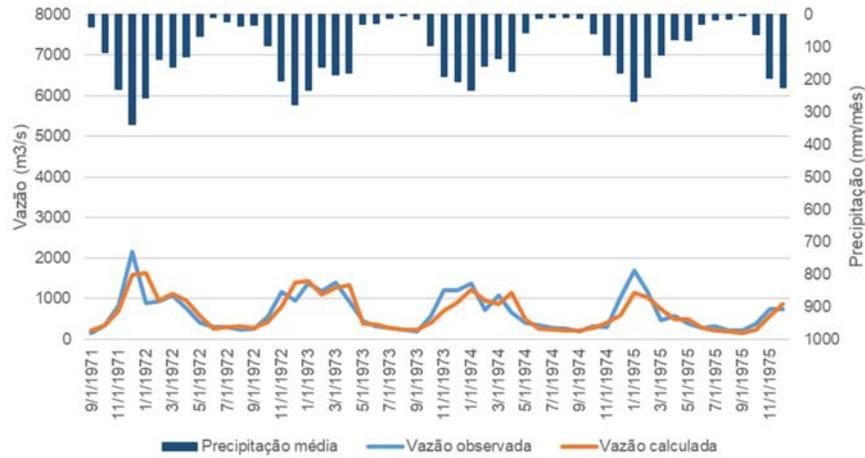


Figura 5-28: Período de validação para a UHE Três Marias (SFA).

A Figura 5-29 apresenta os resultados da aplicação do SMAP para a UHE Três Marias. De forma geral, a representação dos períodos mais secos é muito semelhante aos dados oficiais, enquanto os picos mais altos não foram tão bem representados.

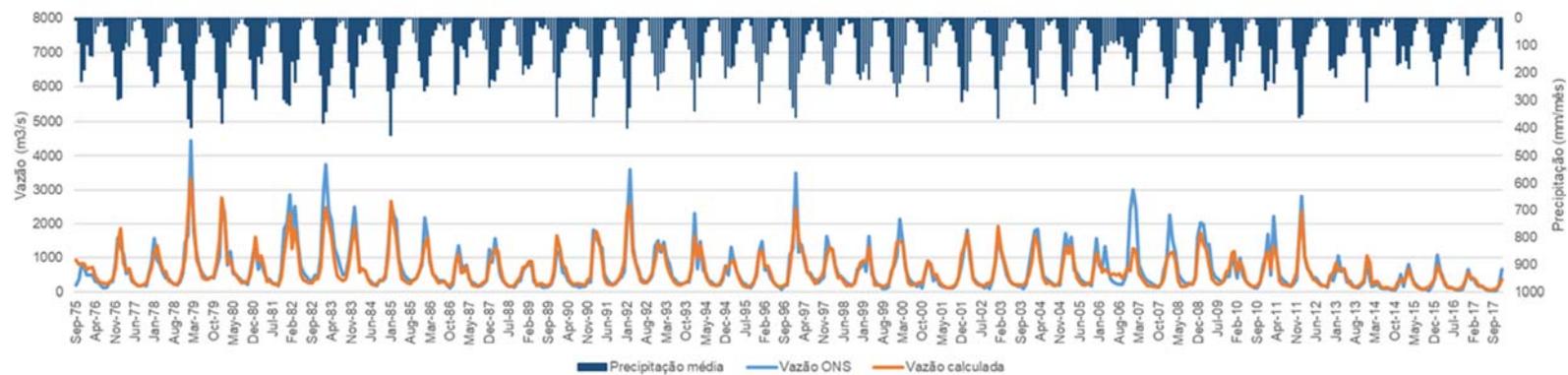


Figura 5-29: Período de aplicação para a UHE Três Marias (SFA)

A Figura 5-30 apresenta os resultados para o período de calibração da UHE Sobradinho. A escala foi mantida a mesma para todos os gráficos referentes a essa UHE. O coeficiente de eficiência ótimo foi 1,54 e o R^2 0,78. O RMSE foi de 860 m³/s, cerca de 36% da vazão média calculada, que foi 2404 m³/s, (95% da vazão média observada). O desvio padrão foi 1764 m³/s, pouco maior que o observado de 1759 m³/s.

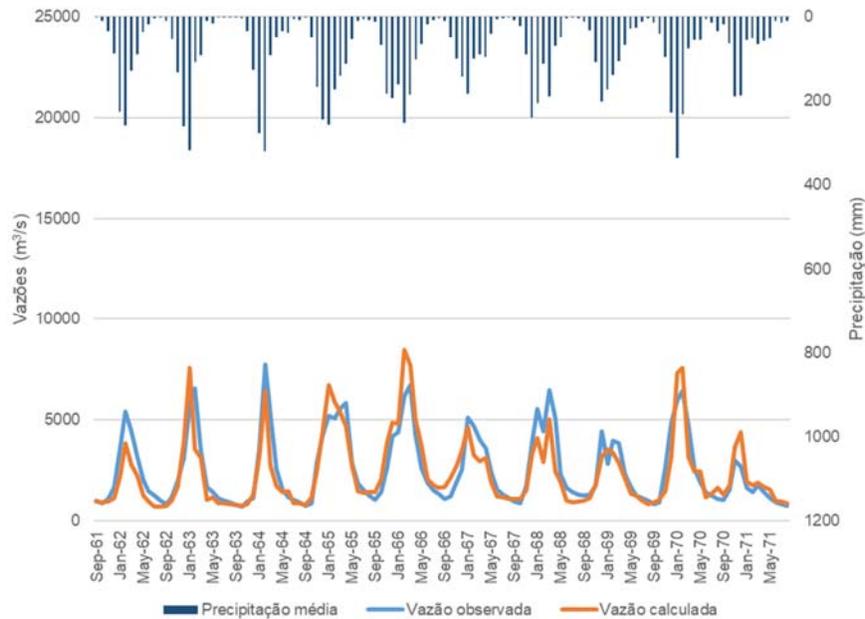


Figura 5-30: Período de calibração para a UHE Sobradinho (SFM).

A Figura 5-31 apresenta os resultados para o período de validação da UHE Sobradinho. O coeficiente de eficiência obtido foi 1,32 e o R^2 0,80. O RMSE foi de 948 m³/s, maior que o do período de calibração. A vazão média calculada foi 3027 m³/s, (20% acima da vazão média observada). O desvio padrão foi 1801 m³/s, maior que o observado de 1511 m³/s. Observa-se da figura que alguns picos foram superestimados, porém os meses secos estão bem representados.

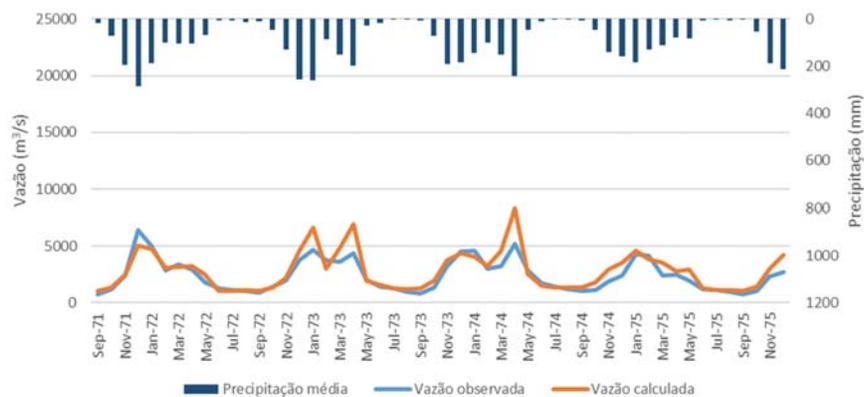


Figura 5-31: Período de validação para a UHE Sobradinho (SFM).

A Figura 5-32 apresenta os resultados da aplicação do SMAP para a UHE Sobradinho. Observa-se que, do final da década de 1970 até o meado da década de 1990, o modelo SMAP resultou em vazões consideravelmente maiores que as da base de dados oficial. Na sequência, os valores ficaram muito semelhantes, sendo a representação dos meses mais secos bem condizente com os valores oficiais. No período mais recente, conhecido como mais seco, a variabilidade das vazões calculadas diminuiu, observando-se menos picos.

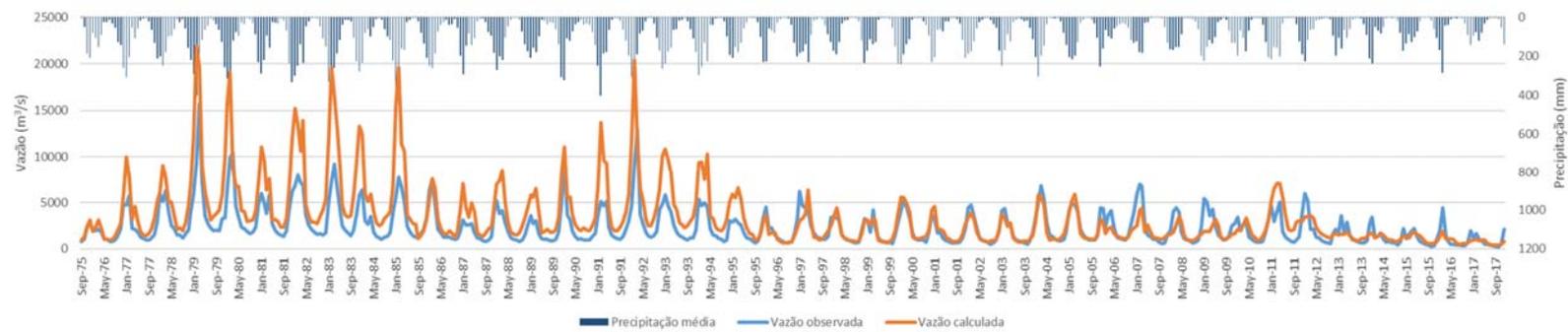


Figura 5-32: Período de aplicação para a UHE Sobradinho (SFM).

A Figura 5-33 apresenta os resultados para o período de calibração da UHE Itaparica. A escala foi mantida a mesma para todos os gráficos referentes a essa UHE. O coeficiente de eficiência ótimo foi 1,67 e o R^2 0,85. O RMSE foi de 709 m³/s, cerca de 28% da vazão média calculada, que foi 2539 m³/s, (97% da vazão média observada). O desvio padrão foi 1674 m³/s, menor que o observado de 1813 m³/s. Observa-se da figura que a aderência dos valores calculados é bem grande, notando-se apenas algumas diferenças nas representações dos picos.

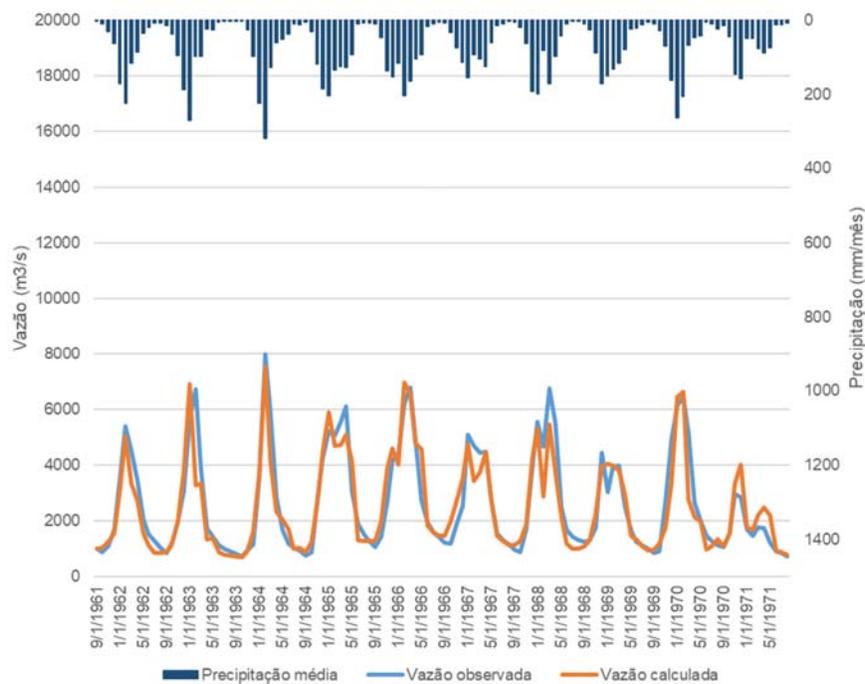


Figura 5-33: Período de calibração para a UHE Itaparica (SFSM).

A Figura 5-34 apresenta os resultados para o período de validação na UHE Itaparica. O coeficiente de eficiência obtido foi 1,34 e o R^2 0,79. O RMSE foi de 941 m³/s, maior que o do período de calibração. A vazão média calculada foi 2983 m³/s, (18% acima da vazão média observada). O desvio padrão foi 1805 m³/s, maior que o observado de 1511 m³/s. Da figura, observa-se superestimação dos picos e certa discrepância das vazões no final do período de aplicação.

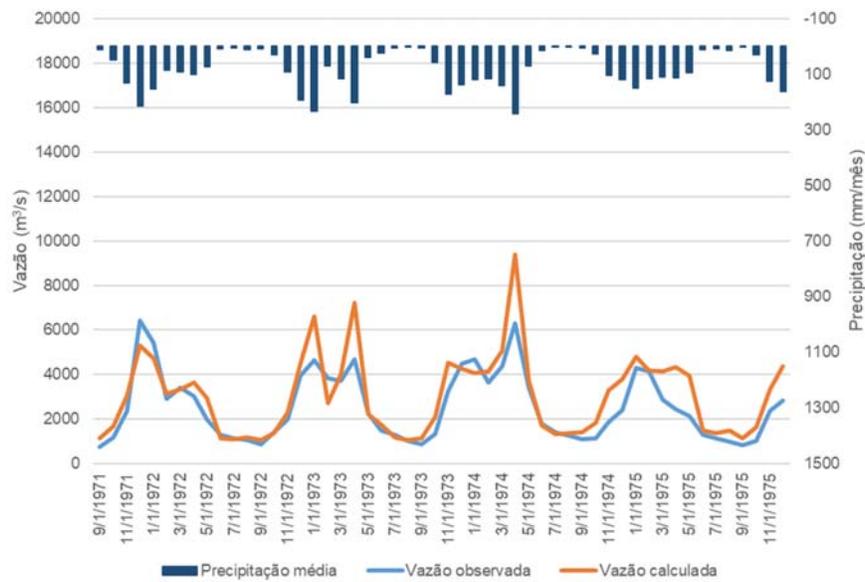


Figura 5-34: Período de validação para a UHE Itaparica (SFSM).

A Figura 5-35 apresenta os resultados da aplicação do SMAP para a UHE Itaparica. Entre o final da década de 70 e o da década de 80, observa-se significativas diferenças nos picos calculados pelo modelo SMAP e os disponíveis na base de dados oficial. O mesmo pode ser observado no meado da década de 2000. No final do horizonte, observam-se vazões bem menores que no início do período de aplicação, o que se deve à diminuição das chuvas observadas.

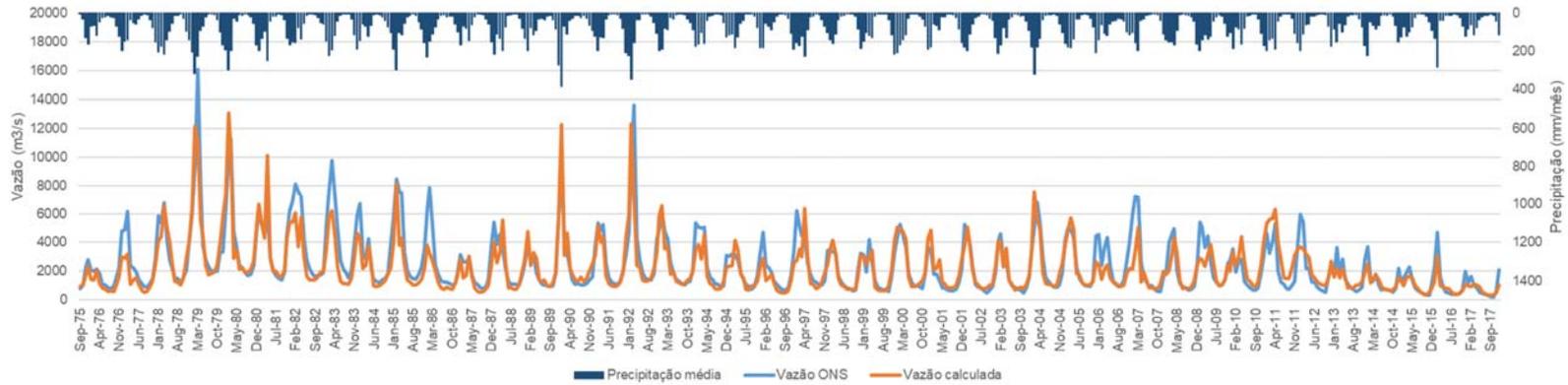


Figura 5-35: Período de aplicação para a UHE Itaparica (SFSM).

A Figura 5-26 apresenta as vazões incrementais entre as UHEs Sobradinho e Itaparica no período de aplicação. Para esse período, 76% das vazões naturais incrementais na UHE Itaparica são negativas.

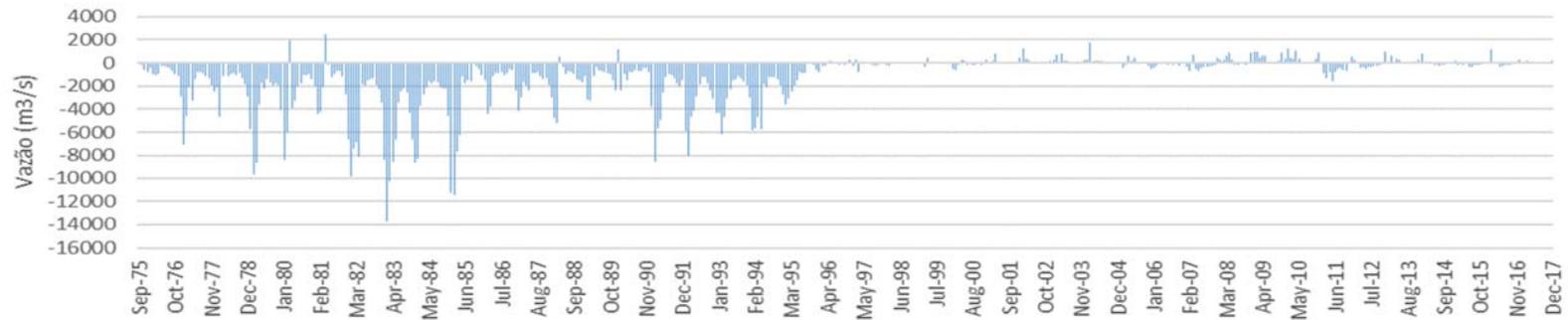


Figura 5-36: Vazões incrementais entre as UHEs Sobradinho e Itaparica.

A partir dos resultados da aplicação do modelo SMAP, não foi possível comprovar a hipótese de existência de viés nas vazões naturais oficiais.

5.3.3 Modelo de despacho

Conforme a disponibilidade de dados e a metodologia descrita na Figura 4-10, a criação de séries pelo método do horizonte rolante foi feita a partir de 1961 até 2014 com horizontes de 11 anos. Utilizou-se como ponto de partida a série histórica de vazão da base de dados da EPE e a série gerada pelo modelo agrícola. Assim, foram geradas 48 séries de vazão e 48 séries de demandas de irrigação para a criação de 48 cenários de estudo. Como mencionado na seção 5.3.2, o procedimento foi feito para as UHEs Três Marias, Sobradinho e Itaparica.

O caso base utilizado para o cálculo da política operativa foi composto pela repetição dos valores das medianas de cada mês (caso Medianas). Ele corresponde a uma representação pobre da irrigação. Para representar a variabilidade da demanda de irrigação, o caso Séries utilizou-se da política operativa do caso Medianas, porém contou com as 48 séries mencionadas acima para a realização das simulações operativas, conforme esquema da Figura 4-11.

Dado que os dois casos iniciam o período de análise com o mesmo volume inicial em seus reservatórios e que a diferença entre eles está apenas na demanda de retirada para irrigação, é interessante analisar os seguintes resultados:

- Volume armazenado no final do período seco do SIN em cada reservatório de estudo;
- Valor da água nos reservatórios de estudo;
- Benefícios e prejuízos para o setor elétrico;
- Energia armazenada em todo o SIN

Como foram utilizadas 48 séries, é válido também analisar as distribuições de probabilidade dos resultados encontrados. Assim é possível identificar se o comportamento de uma série é atípico ou comum. **Os resultados serão sempre apresentados em forma de delta, calculado pela diferença entre o valor no caso Séries e o valor correspondente no caso Medianas.**

A primeira avaliação consistiu em multiplicar o valor da água no reservatório em questão pelo volume no final de novembro do terceiro ano de análise (final do período seco do SIN)²³. A escolha desse instante de tempo permite avaliar o efeito cumulativo de retiradas que estão ora acima e ora abaixo das retiradas consideradas na otimização da política operativa. Ou seja. O modelo enfrenta imprevistos consecutivos a cada mês, pois está preparado para uma retirada (mediana) e é exposto a uma retirada diferente. Os valores de cada série são apresentados de forma ordenada, gerando uma distribuição de probabilidades.

A Figura 5-37 apresenta a diferença entre o caso Séries e o caso Medianas do produto (valor da água * volume) para o reservatório da UHE Três Marias. Observa-se que com maior probabilidade os valores se concentram em torno de um delta monetário nulo. No entanto, há casos extremos, nos quais esse delta pode chegar a -432 R\$ Milhões e +144 R\$ Milhões. O desvio padrão é de 75 R\$ Milhões.

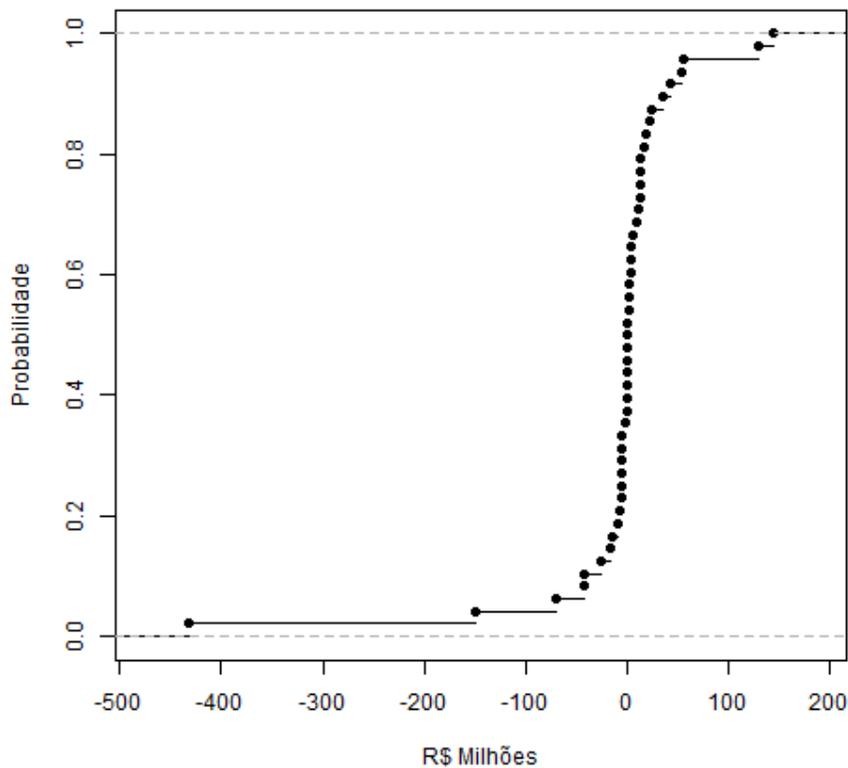


Figura 5-37: Delta de valoração da água – UHE Três Marias.

²³ Para essa abordagem, assume-se que o valor marginal da água é o mesmo para todas as unidades de volume presentes no reservatório.

A Figura 5-38 apresenta a diferença entre o caso Séries e o caso Medianas do produto (valor da água * volume) para o reservatório da UHE Sobradinho. Observa-se que a probabilidade de os valores se concentrarem em torno de um delta monetário nulo diminui. Nos casos extremos, esse delta pode chegar a -359 R\$ Milhões e +247 R\$ Milhões. O desvio padrão é de 81 R\$ Milhões.

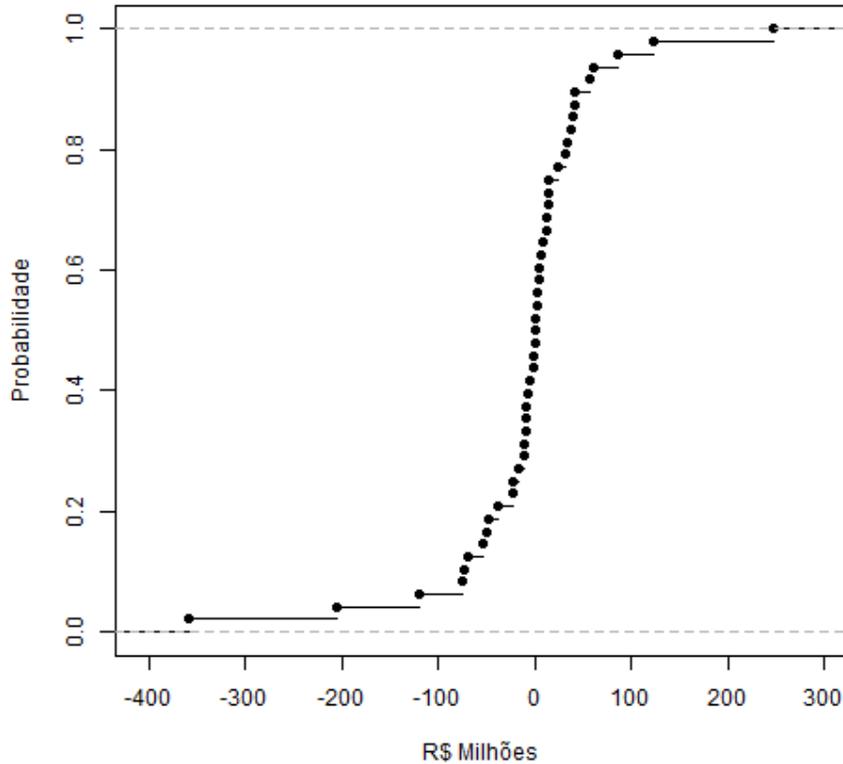


Figura 5-38: Delta de valoração da água – UHE Sobradinho.

A Figura 5-39 apresenta a diferença entre o caso Séries e o caso Medianas do produto (valor da água * volume) para o reservatório da UHE Itaparica. Observa-se que com maior probabilidade os valores se concentram em torno de um delta monetário nulo. No entanto, há casos extremos, nos quais esse delta pode chegar a -12 R\$ Milhões e 41 R\$ Milhões. O desvio padrão é de 8 R\$ Milhões.

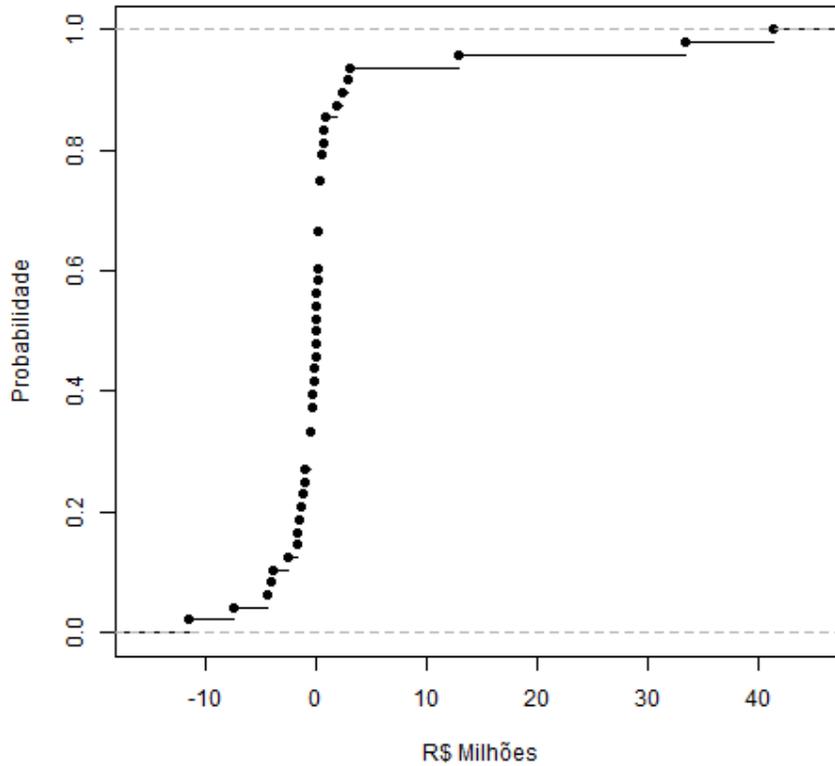


Figura 5-39: Delta de valoração da água – UHE Itaparica.

As variações de demanda de irrigação por mês foram apresentadas na seção 5.3.1. Aqui elas são apresentadas de forma acumulada no final do período seco (novembro). A Figura 5-40 apresenta a distribuição de probabilidade das retiradas acumuladas para o reservatório da UHE Três Marias. O delta mínimo é de -288 hm^3 , enquanto o delta máximo de 178 hm^3 . O desvio padrão é de aproximadamente 78 hm^3 .

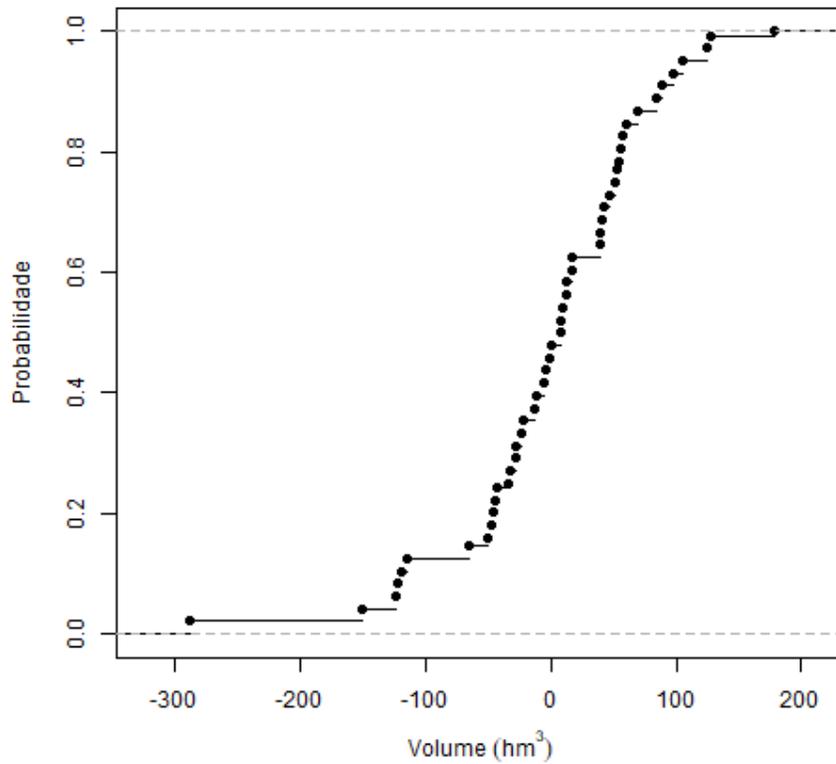


Figura 5-40: Delta de retiradas para irrigação – UHE Três Marias.

A Figura 5-41 apresenta a distribuição de probabilidade das retiradas acumuladas para o reservatório da UHE Sobradinho. O delta mínimo é de -1054 hm^3 , enquanto o delta máximo de 1041 hm^3 . O desvio padrão é de aproximadamente 461 hm^3 .

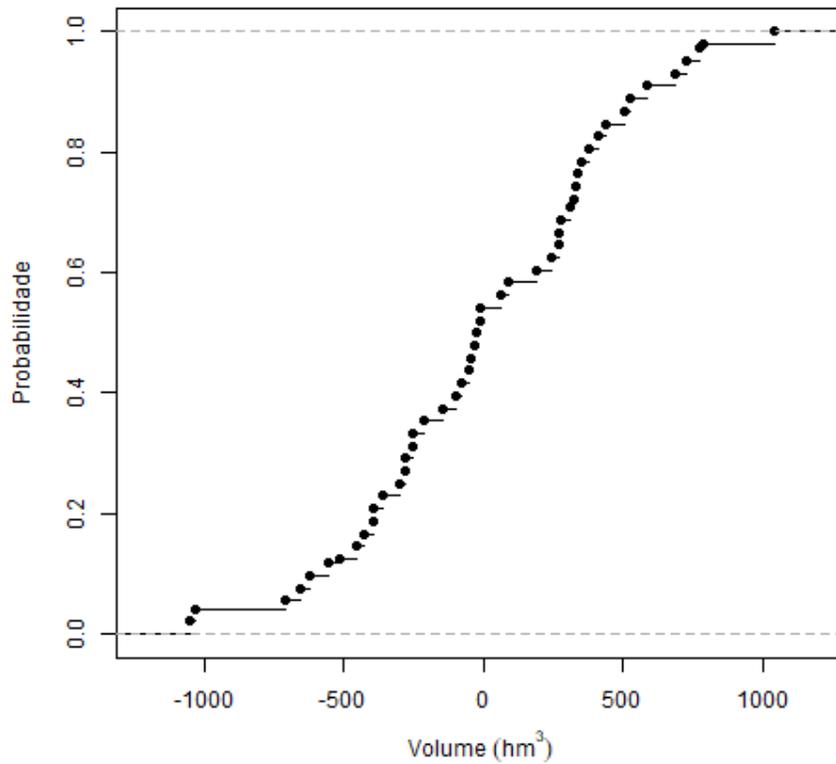


Figura 5-41: Delta de retiradas para irrigação – UHE Sobradinho.

A Figura 5-42 apresenta a distribuição de probabilidade das retiradas acumuladas para o reservatório da UHE Itaparica. O delta mínimo é de -307 hm^3 , enquanto o delta máximo de 395 hm^3 . O desvio padrão é de aproximadamente 151 hm^3 .

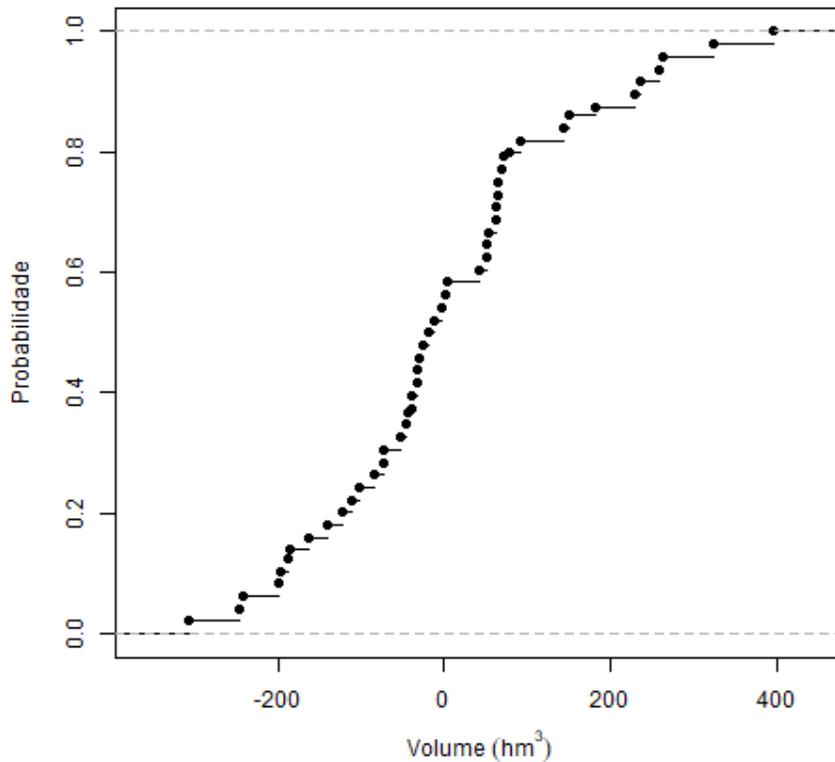


Figura 5-42: Delta de retiradas para irrigação – UHE Itaparica

A Figura 5-43 apresenta o delta de energia armazenada em todo o sistema. Esse resultado é interessante por dois motivos. Primeiro porque considera o sistema como um todo, incluindo suas capacidades de intercâmbio entre subsistemas. Segundo porque um volume grande em um reservatório de baixa queda, ou em final de cascata, tem menos importância energética que em um reservatório de alta queda ou cabeceira. Observa-se da figura que os deltas variam de -1300 GWh a 540 GWh. A mediana possui valor de -90 GWh e o desvio padrão é de 435 GWh.

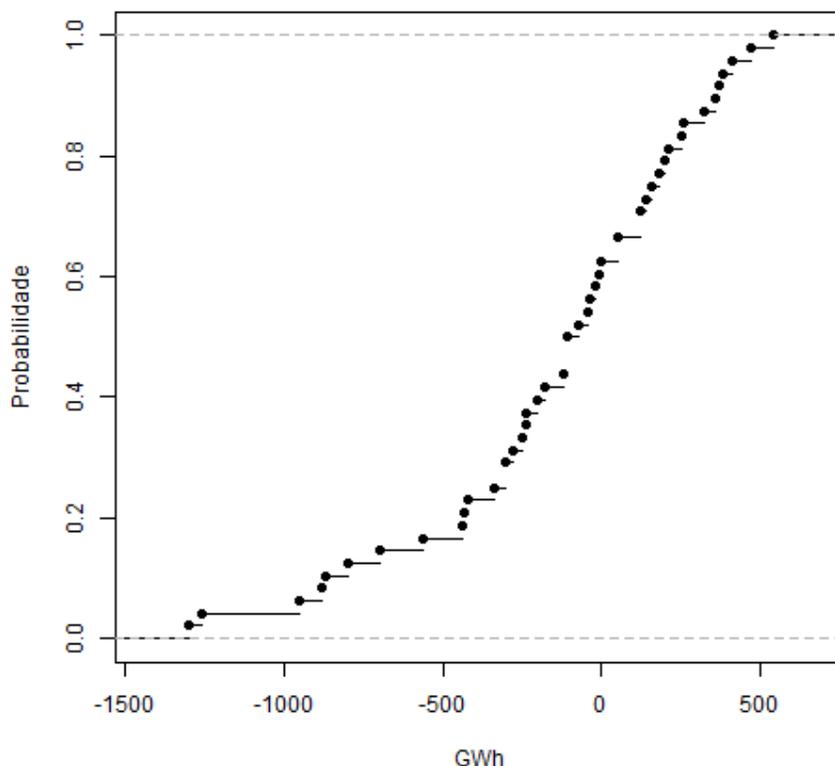


Figura 5-43: Delta de energia armazenada no SIN.

Na sequência serão apresentados os resultados da análise de sensibilidade realizada através do aumento da área irrigada em duas (caso a2.0) e quatro vezes (caso a4.0), vide Figura 5-13. Para facilitar a comparação, os resultados das retiradas de referência e dos casos de sensibilidade serão apresentados lado a lado para cada reservatório.

A Figura 5-44 compara os deltas de valoração da água nos três casos analisados para o reservatório da UHE Três Marias. Observa-se que, com o aumento da área irrigada, e conseqüentemente dos volumes retirados, os deltas de valoração se tornam mais extremos, especialmente no sentido de benefício econômico para o setor elétrico. Ou seja, como a cauda negativa da distribuição é mais longa que a positiva, isso mostra que, quando a representação simplificada da irrigação leva à superestimação dos custos operativos (benefício para o setor elétrico), os montantes são maiores do que quando essa diferença de representação traz um prejuízo. No entanto, a probabilidade de ocorrerem prejuízos é maior do que a de ocorrerem benefícios nos casos a2.0 e a4.0. No caso a2.0, o delta mínimo é de -352 R\$ Milhões, enquanto o delta máximo é de 103 R\$ Milhões. Já

no caso a4.0, o delta mínimo é de -992 R\$ Milhões, enquanto o delta máximo é de 313 R\$ Milhões.

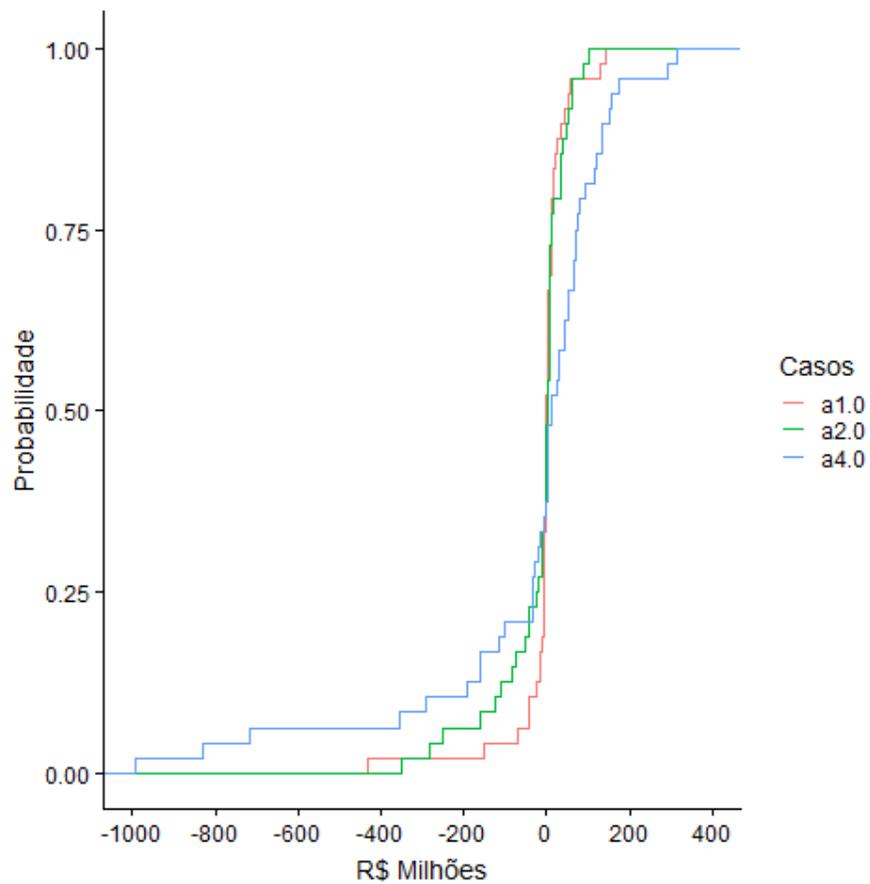


Figura 5-44: Comparação dos deltas de valorização da água – UHE Três Marias.

A Figura 5-45 compara os deltas de valorização da água nos três casos analisados para o reservatório da UHE Sobradinho. O comportamento é semelhante ao reservatório da UHE Três Marias, sendo que os valores extremos são maiores. No caso de sensibilidade a2.0, o delta mínimo é de -359 R\$ Milhões, enquanto o delta máximo é de 247 R\$ Milhões. Já no caso a4.0, o delta mínimo é de -1606 R\$ Milhões, enquanto o delta máximo é de 788 R\$ Milhões.

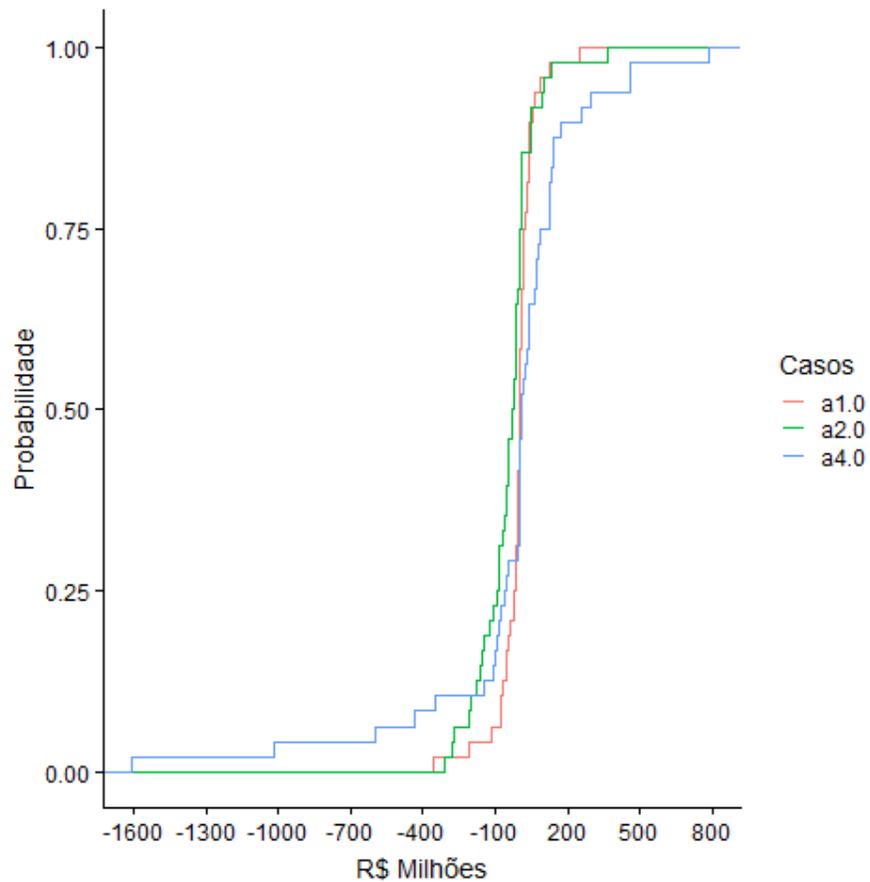


Figura 5-45: Comparação dos deltas de valorização da água – UHE Sobradinho.

A Figura 5-46 compara os deltas de valorização da água nos três casos analisados para o reservatório da UHE Itaparica. Neste reservatório, o comportamento é diferente dos dois de montante. Isso porque os valores do caso de sensibilidade a2.0 são mais extremos que os do caso a4.0. No caso a2.0, o delta mínimo é de -215 R\$ Milhões, enquanto o delta máximo é de 223 R\$ Milhões. Já no caso a4.0, o delta mínimo é de -107 R\$ Milhões, enquanto o delta máximo é de 124 R\$ Milhões.

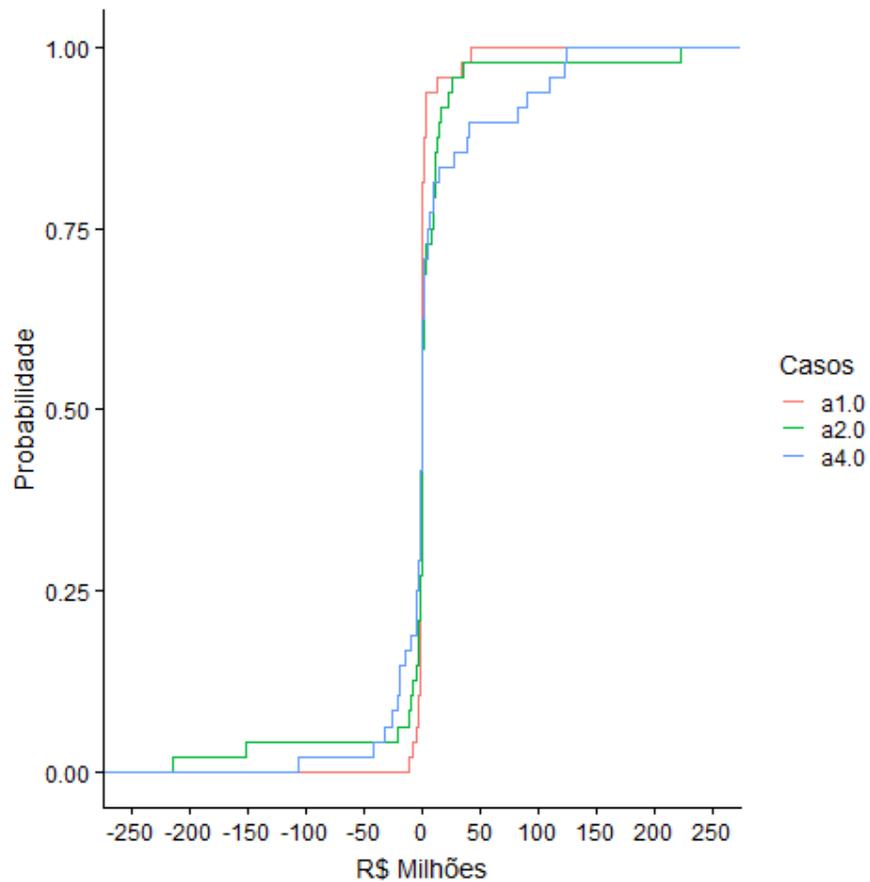


Figura 5-46: Comparação dos deltas de valoração da água – UHE Itaparica.

Somando-se o delta de valoração em cada reservatório em cada série é possível obter o prejuízo ou benefício total para o setor elétrico devido à representação simplificada das retiradas para irrigação. A Figura 5-47 apresenta a distribuição desses resultados. No caso de referência, o delta mínimo é de -309 R\$ Milhões, enquanto o delta máximo é de 156 R\$ Milhões. No caso a2.0, o delta mínimo é de -474 R\$ Milhões, enquanto o delta máximo é de 305 R\$ Milhões. Já no caso a4.0, o delta mínimo é de -1476 R\$ Milhões, enquanto o delta máximo é de 547 R\$ Milhões.

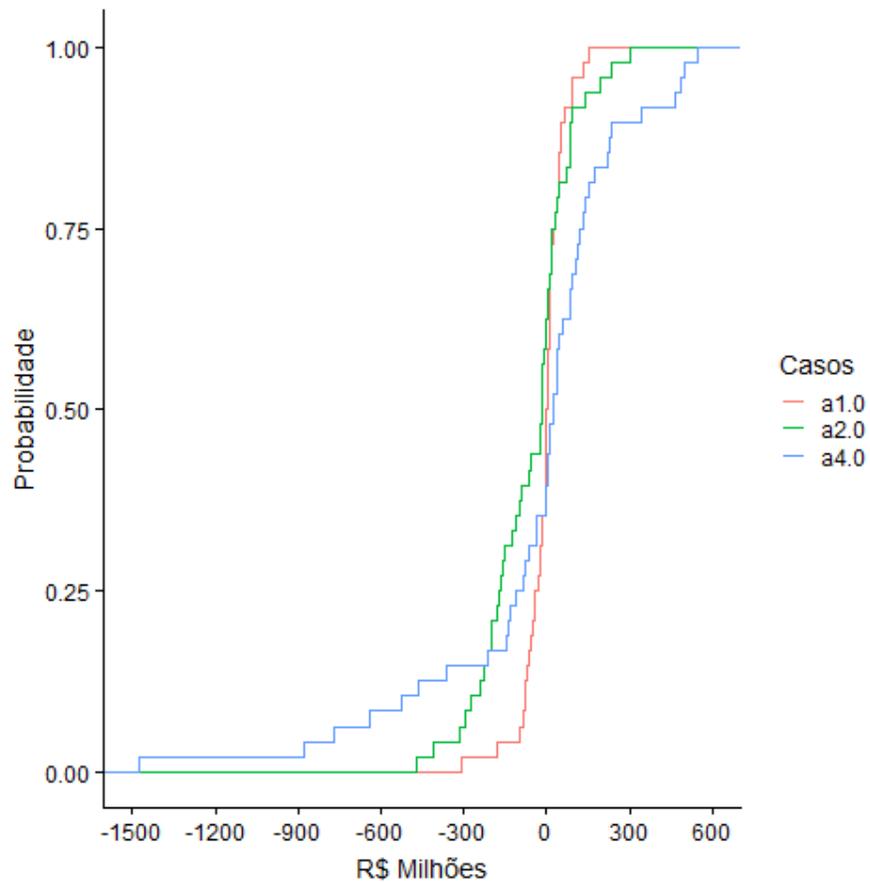


Figura 5-47: Distribuição dos benefícios e prejuízos para o setor elétrico.

A Figura 5-48 apresenta a comparação dos deltas de retiradas acumuladas no final do período seco para o reservatório da UHE Três Marias entre os casos de sensibilidade. Enquanto no caso de referência (a1.0) os deltas extremos variam de -288 a 178 hm³, no caso a2.0 esses limites se amplificam um pouco, variando de -576 a 357 hm³. Já no caso a4.0, os limites são ainda mais extremados, alcançando de -1153 a 713 hm³. O desvio padrão dos três casos é, respectivamente 78, 157 e 313 hm³.

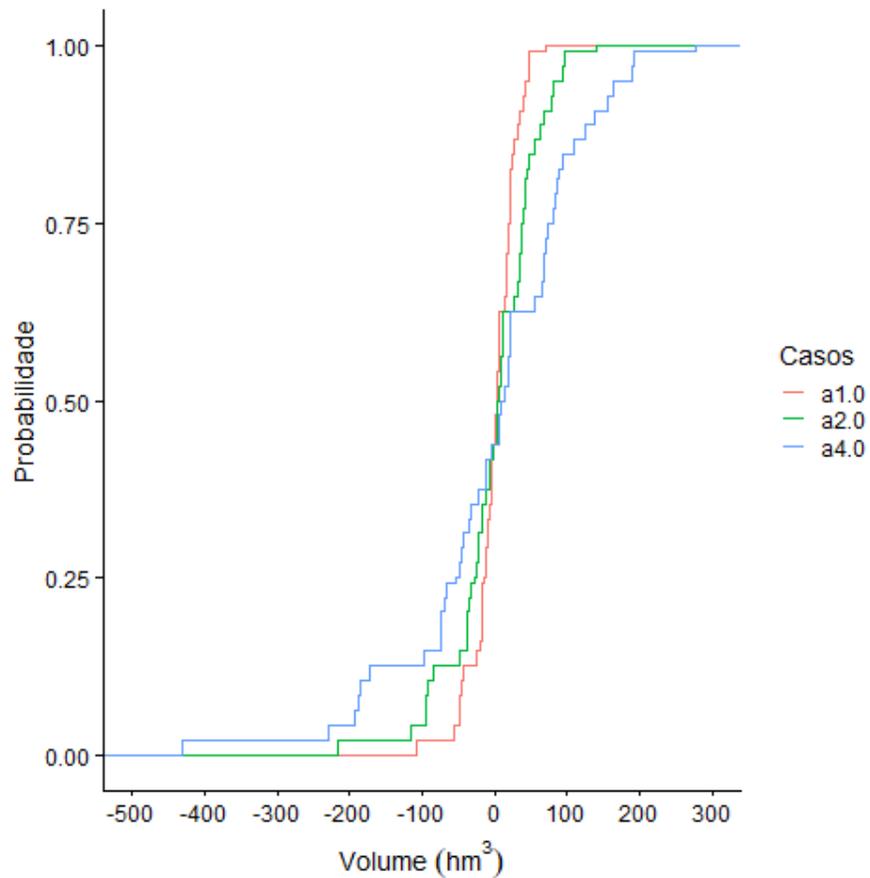


Figura 5-48: Comparação dos deltas de retirada acumulada – UHE Três Marias.

A Figura 5-49 apresenta a comparação dos deltas de retiradas acumuladas para o reservatório da UHE Sobradinho entre os casos de sensibilidade. No caso a1.0, os deltas extremos variam de -1054 a 1041 hm³, no caso a2.0 esses limites se amplificam um pouco, variando de -2109 a 2082 hm³. Já no caso a4.0, os limites são ainda mais extremados, alcançando de -4218 a 4165 hm³. Nesse reservatório, a probabilidade de se encontrarem deltas próximos de zero diminui consideravelmente. O desvio padrão dos três casos é, respectivamente 461, 921 e 1842 hm³.

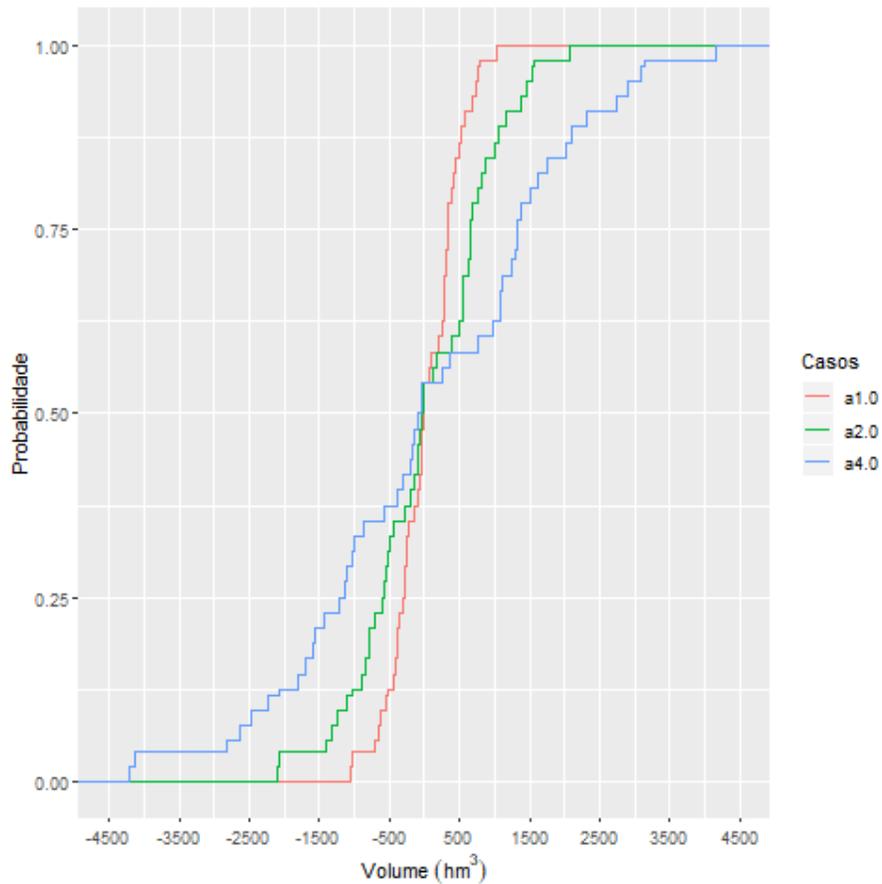


Figura 5-49: Comparação dos deltas de retirada acumulada – UHE Sobradinho.

A Figura 5-50 apresenta a comparação dos deltas de retiradas acumuladas para o reservatório da UHE Itaparica entre os casos de sensibilidade. No caso a1.0, os deltas extremos variam de -307 a 395 hm^3 , no caso a2.0 esses limites se amplificam um pouco, variando de -615 a 789 hm^3 . Já no caso a4.0, os limites são ainda mais extremados, alcançando de -1229 a 1578 hm^3 . Nesse reservatório, a probabilidade de se encontrarem deltas próximos de zero também é pequena. O desvio padrão dos três casos é, respectivamente 151, 301 e 602 hm^3 .

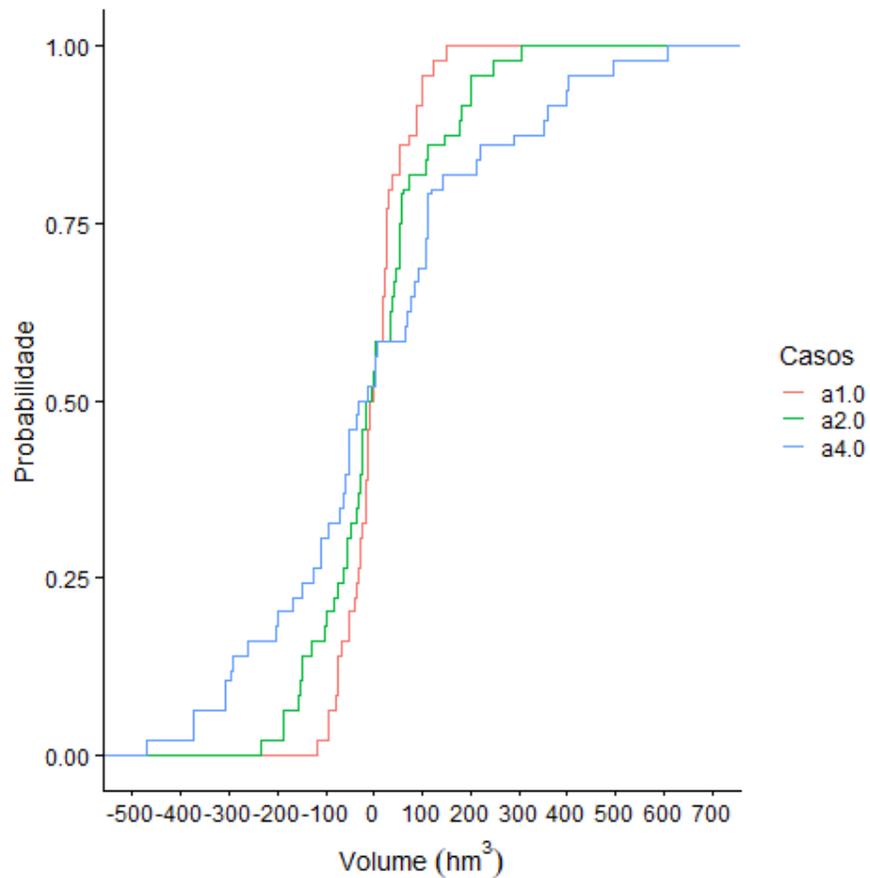


Figura 5-50: Comparação dos deltas de retirada acumulada – UHE Itaparica.

A Figura 5-51 apresenta a comparação dos deltas de energia armazenada no SIN nos casos de sensibilidade. No caso a1.0, a energia armazenada no SIN chega a variar de -1300 a 540 GWh. No caso a2.0 esses valores variam entre -2310 e 1540 GWh. Já no caso a4.0, variam de -3950 a 2440 GWh. O desvio padrão dos casos é, respectivamente, 435, 862 e 1514 GWh.

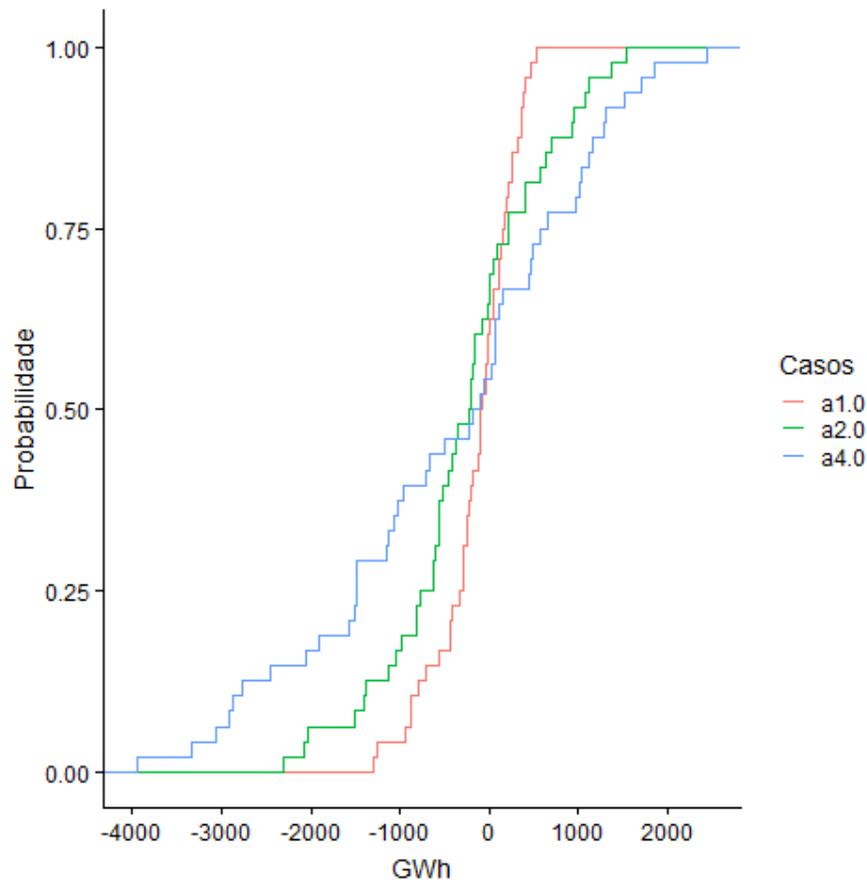


Figura 5-51: Comparação dos deltas de energia armazenada no SIN.

5.4 Discussão dos resultados

Nesta seção o arcabouço teórico é discutido em função do estudo de caso realizado. Adicionalmente, os aspectos mais relevantes dos resultados apresentados na seção 5.3 são retomados.

Este trabalho se propôs a avaliar o nexos água-energia-alimento no contexto da operação do SIN, um sistema hidrotérmico de grande porte. A metodologia proposta baseou-se no conceito de que, em um ano com baixa pluviosidade, além da diminuição da vazão afluente aos reservatórios, ocorre aumento na demanda para irrigação, gerando uma penalização dupla para os geradores hidrelétricos.

Quantificou-se o impacto da melhor representação da irrigação sobre a alocação ótima de água através do modelo de otimização SDDP. Esse modelo busca minimizar os custos totais de operação de um sistema hidrotérmico, levando em conta a evolução do nível de armazenamento dos reservatórios do sistema. Portanto, as decisões de alocação

de água para geração de energia ou para manutenção de estoque são cruciais para a função objetivo.

Através de um modelo agrícola desenvolvido para esse trabalho, calculou-se a demanda de irrigação condicionada à precipitação (variando por mês e ano). Utilizando esse dado como entrada para o modelo SDDP, comparou-se com uma operação caracterizada por uma sazonalidade constante. Utilizaram-se concomitantemente vazões coerentes com as precipitações históricas.

A bacia do São Francisco destaca-se no cenário nacional pela diversidade de atividades que utilizam seu recurso hídrico, bem como pelos crescentes conflitos que envolvem seus usuários. Em especial, destaca-se o conflito entre o setor irrigante, responsável por considerável uso consuntivo e o setor elétrico, principal influenciador das decisões de operação dos reservatórios. Neste contexto, esta bacia foi selecionada como estudo de caso, pois permite explorar as interrelações entre o uso da água para a geração de energia e para a produção de alimentos.

Cabe destacar, no entanto, que diferentemente do contexto global, em que segurança alimentar é um pilar fundamental do nexos, no caso da bacia do São Francisco a produção de alimentos tem um papel mais crucial para o desenvolvimento econômico da região do que para a sobrevivência da população. Como apresentado na seção 3.5, a região Nordeste é responsável por 27% da produção nacional de frutas, que por sua vez é a terceira maior produção mundial (BANCO DO NORDESTE, 2016).

Durante a realização desta pesquisa, foi realizada uma visita à região de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA), a fim de melhor compreender os impactos de restrições de uso da água para os irrigantes da região. Foi possível apreciar a infraestrutura de alguns perímetros públicos de irrigação e a dinâmica de funcionamento de um empreendimento âncora. O caso visitado foi o da indústria Agrovale de açúcar, etanol e bioeletricidade, localizada no perímetro público Tourão, em Juazeiro.

A Agrovale ocupa uma área de 14.000 ha, 98% da área total do perímetro. Atuante desde a década de 70 e atualmente com cerca de 5.000 funcionários, exerce influência que permite negociar junto à Codevasf infraestrutura de canais e bombas que beneficiam

também os cerca de 400 demais irrigantes do perímetro. Além de garantir representação para o Tourão nas reuniões semanais de avaliação da bacia do rio São Francisco²⁴.

Durante a visita, foi possível acompanhar o processo de irrigação através de diferentes tecnologias em diversos cultivos. A Figura 5-52 apresenta uma lavoura de cana irrigada por sulcos.



Figura 5-52: Visita à lavoura de cana (Método de sulcos - Perímetro Tourão).

Fonte: Acervo pessoal.

Em conversas com os irrigantes dos perímetros e profissionais da área agrícola, notou-se apreensão com relação a medidas de restrição dos usos consuntivos, como o Dia do Rio²⁵, que suspendeu as captações no leito do São Francisco às quartas-feiras. Também foi notada mobilização de instituições financeiras preocupadas com os efeitos de um possível agravamento dessas restrições sobre a produtividade das lavouras por elas

²⁴ Essas reuniões ocorrem toda segunda-feira através de vídeo conferência. Participam representantes de diversas instituições, como a ANA, o ONS, a CHESF, o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (CBHSF), a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (Antaq), prefeitos, irrigantes, entre outros.

²⁵ Resolução ANA nº 2.219, de 11 de dezembro de 2017.

financiadas. Essa realidade tem incentivado a busca por conhecimento técnico e tem ressaltado a importância de medições hidrológicas de qualidade.

Tanto a análise de campo como os dados de entrada obtidos para o modelo agrícola mostram grande variação intra-anual de ciclo das culturas, fazendo com que a área irrigada varie ao longo dos meses. Adicionalmente, a sazonalidade climática implica em grande variabilidade das retiradas para irrigação de ano para ano, como foi apresentado na seção 5.3.1. Observa-se que essa variabilidade é maior nos meses chuvosos e se reduz consideravelmente nos meses mais secos (junho a agosto). Um fator que contribui para isso é a redução da evapotranspiração nesses meses, conforme Figura 5-15.

Com o objetivo de avaliar o impacto da melhor representação da irrigação sobre as decisões operativas de despacho do SIN, foi possível avaliar as variações de volumes destinados à irrigação em cada cenário. Observa-se que existe um padrão que se repete para os três reservatórios analisados (Três Marias, Sobradinho e Itaparica). O comportamento dos quadrimestres reflete uma dispersão positiva maior no início do ano, seguida de uma dispersão negativa grande nos meses mais secos e uma dispersão homogênea no final do ano.

A hipótese inicial de que as vazões naturais oficiais poderiam não estar bem calculadas não foi comprovada, pois o cálculo de vazões naturais pelo modelo SMAP, quando comparadas às vazões oficiais, mostrou coerência suficiente para que os dados oficiais fossem utilizados. Dessa forma, foi possível analisar de forma mais clara os impactos exclusivos da melhor representação da irrigação.

No entanto, como comentado anteriormente, os dados de entrada do modelo chuva-vazão para a UHE Itaparica possuíam 32% de vazões incrementais negativas no período de ajuste. Apesar da correção feita para ajuste do modelo e do bom resultado das métricas de avaliação, os resultados gerados no período de aplicação contam com 76% de vazões incrementais negativas. Por essa razão, optou-se por considerar para esta UHE as mesmas vazões naturais da UHE Sobradinho, ou seja, vazões incrementais nulas. Assim, deixa-se como recomendação para estudos futuros uma modelagem chuva-vazão com dados diários e com rigorosa análise de consistência, de modo a corrigir esta falha da base de dados oficial.

Os resultados do modelo de despacho se focaram na comparação entre um caso em que a irrigação é representada de forma simplificada (caso Medianas) e um em que ela é representada seguindo a variabilidade climática de cada ano do horizonte (caso Séries). As variáveis analisadas foram o volume armazenado no final do período seco do SIN em cada reservatório de estudo; o valor da água nos reservatórios; os benefícios e prejuízos para o setor elétrico; e a energia armazenada em todo o SIN. Todos esses resultados foram obtidos para três configurações de lavoura, que representam respectivamente as realidades de 2006 e 2019 e uma projeção para 2030.

Observa-se que, com o aumento da área irrigada, e conseqüentemente dos volumes retirados, os deltas de valoração tornam-se mais extremos, especialmente no sentido de benefício econômico para o setor elétrico. Ou seja, o padrão dos três reservatórios mostra a cauda negativa da distribuição mais longa que a positiva, significando que, quando a representação simplificada da irrigação superestima os custos operativos, os montantes são maiores do que quando ela subestima. No entanto, a probabilidade de ocorrerem subestimativas é maior do que a de ocorrerem superestimativas (casos a1.0 e a4.0). Somando-se os três reservatórios, a Figura 5-48 mostra que as superestimativas podem variar de 309 R\$ Milhões a 1476 R\$ Milhões, enquanto as subestimativas variam de 156 R\$ Milhões a 547 R\$ Milhões, dependendo da configuração de lavoura selecionada.

A variação da energia armazenada no SIN mostra que esta pode sofrer uma redução que alcança de 1300 até 3950 GWh ou ainda um acréscimo que vai de 540 a 2440 GWh, conforme variação da configuração de lavoura. Ou seja, na configuração de lavoura referente a 2030, o acréscimo em energia armazenada pode chegar a 4% da energia armazenável máxima do subsistema NE.

Do estudo realizado pode-se concluir que uma melhor representação da agricultura em um modelo de despacho de sistemas hidrotérmicos permite maior previsibilidade para a operação dos reservatórios. Dessa forma, evitam-se eventos imprevistos na operação, ainda que estes possam vir a trazer um benefício econômico momentaneamente. Sob o enfoque donexo água-energia-alimento, tal representação joga luz sobre o pilar de produção de alimentos e o traz para a modelagem de forma detalhada. Assim, os *trade-offs* de alocação da água podem ser mais bem considerados, aprimorando a tomada de decisão.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo contém as conclusões acerca das contribuições da metodologia proposta, bem como a identificação das limitações do presente estudo e as sugestões para trabalhos futuros.

6.1 Conclusões

O presente trabalho avaliou o nexo água-energia-alimento no âmbito da operação do SIN. Analisou-se o estudo de caso da bacia do rio São Francisco, que possui grande parte de sua área caracterizada pelo clima semiárido. O tema é especialmente relevante nessa bacia porque tem se intensificado o conflito entre os setores usuários, com destaque para a irrigação e o setor elétrico, que geram maior valor agregado por volume de água utilizado.

A contribuição original desse trabalho é fornecer uma ferramenta replicável, baseada na metodologia do nexo água-energia-alimento, capaz de avaliar os impactos econômicos e energéticos em sistemas hidrotérmicos devidos à alocação de água para a produção agrícola segundo a variação mensal das condições climáticas.

Na metodologia proposta, cada pilar do nexo foi levado em conta através da integração de três modelos: um modelo agrícola, um modelo chuva-vazão (SMAP) e um modelo de probabilístico de otimização de despacho hidrotérmico (SDDP).

Com respeito ao modelo agrícola, seus resultados foram considerados satisfatórios, pois foi observada a complementariedade entre a demanda de irrigação e a precipitação para diferentes cultivos nas sub-bacias analisadas.

Com relação ao modelo SMAP, os resultados de sua aplicação se mostraram satisfatórios para as três sub-bacias analisadas. A hipótese inicial de que as vazões naturais oficiais poderiam não estar bem calculadas não foi comprovada, pois o cálculo de vazões naturais pelo modelo SMAP, quando comparadas às vazões oficiais, mostrou coerência suficiente para que os dados oficiais fossem utilizados.

Com base nos resultados do modelo SDDP, concluiu-se que, quando a precária representação da irrigação superestima os custos operativos, os montantes são maiores do

que quando ela subestima. No entanto, a probabilidade de subestimação é maior do que a de superestimação na maioria dos casos analisados.

A análise de sensibilidade realizada através do aumento da área irrigada confirmou o resultado do caso de referência e mostrou que os montantes de benefícios e prejuízos ficam mais extremos.

Através de visita de campo, identificaram-se as percepções dos habitantes da bacia sobre as restrições de uso da água. A redução da disponibilidade hídrica nos últimos anos tem promovido maior engajamento dos setores usuários, bem como de instituições financeiras que atuam na região. Como resultado, tem crescido a busca por conhecimento técnico e o reconhecimento da importância de medições hidrológicas de qualidade.

6.2 Limitações e recomendações

Como limitações do estudo, pode-se destacar o uso de uma configuração de área irrigada fixa por sub-bacia, bem como a representação de apenas 12 dos cultivos existentes na bacia do São Francisco. Recomenda-se que estudos futuros aprimorem a representação da área irrigada para uma configuração dinâmica no tempo. Uma linha de pesquisa promissora nesse quesito é o sensoriamento remoto, permitindo a identificação de cultivos através de imagens de satélite e o cálculo de suas demandas de suprimento hídrico.

Um dos resultados parciais foi o ajuste do modelo chuva-vazão SMAP para as UHEs Três Marias, Itaparica e Sobradinho. Os parâmetros obtidos podem servir como ponto de partida para estudos futuros nas sub-bacias da região hidrográfica do São Francisco. Porém, a versão empregada do modelo foi a mensal. Estudos futuros poderiam aplicar a versão diária do modelo. No entanto, isso requereria elevada carga de processamento de dados hidrológicos, haja vista que o modelo é bastante sensível aos dados de entrada.

Identificou-se, também, que as vazões naturais incrementais entre a UHE Sobradinho e a UHE Itaparica são negativas em elevada proporção dos meses do histórico. Recomenda-se uma rigorosa análise de consistência de modo a corrigir essa falha da base de dados oficial.

Sabe-se que as vazões naturais observadas nas últimas duas décadas no subsistema Nordeste estão muito abaixo da média histórica. O presente estudo limitou-se a avaliar a coerência nas vazões utilizadas, porém não analisou as causas da redução. Recomenda-se, portanto, estudos sobre retiradas clandestinas (através de sensoriamento remoto ou mesmo de consumo de energia elétrica por irrigantes), mudanças estruturais, não estacionariedade das precipitações, mudança do uso do solo na bacia, entre outros.

Outra limitação foi a não consideração do benefício para os irrigantes que usam a água da bacia. Recomenda-se a incorporação dessa variável de forma endógena em modelos de despacho, considerando-se a produtividade, o preço de mercado e os custos de produção dos diferentes cultivos.

Por fim, recomenda-se como desenvolvimento futuro a ampliação do escopo deste estudo, incluindo outras bacias hidrográficas. Nesse contexto, como a demanda elétrica utilizada considera todo o SIN, a inclusão de dados climáticos de várias bacias gera a oportunidade de considerar a relação entre temperatura e demanda elétrica no modelo SDDP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBRECHT, T. R.; CROOTOF, A.; SCOTT, C. A. "The Water-Energy-Food Nexus: A systematic review of methods for nexus assessment." **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 4, p. 43002, 2018.

Allen, R.G.; Pereira, L. S.; Raes, D. *et al.* "Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements." **Irrigation and drainage paper 56**. Rome, Italy, 1998.

ANA. **Evolução da rede hidrometeorológica nacional**. 2007.

ANA. **Nota Técnica nº 019/2013/SPR-ANA Estimativa de consumos médios mensais à montante da bacia hidrográfica de usinas hidrelétricas (UHEs) situadas nas bacias hidrográficas dos rios São Francisco e rio Parnaíba.**, 2013.

ANA. **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil**, 2014.

ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos: informe 2015**, 2015.

ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017**, 2017a.

ANA. **Atlas Irrigação: Uso da Água na Agricultura Irrigada**, 2017b.

ANA. **HIDROWEB - Sistema de Informações Hidrológicas**, 2019. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>>. Acesso em: 18 fev. 2019

ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 109**, 2004.

ANEEL. **Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição - ANEEL**, 2017. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita>>. Acesso em: 29 set. 2017

ARAÚJO, A. A. *et al.* **Análise de estacionaridade de séries hidrológicas na bacia do rio São Francisco e usos consuntivos a montante da UHE Sobradinho**, 2013.

ARROYO, E. **Incorporação do nexa energia-água em um modelo de**

otimização da expansão do sistema energético brasileiro. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.

ÁVILA, M. V. DE A. **Avaliação do impacto de mudanças climáticas na hidrologia em duas bacias hidrográficas na Região Nordeste e possíveis implicações para alocação de água.** Trabalho de Conclusão de Curso, UFCE, Fortaleza, CE, Brasil, 2013.

AZEVEDO, S. C. DE *et al.* "Analysis of the 2012-2016 drought in the northeast Brazil and its impacts on the Sobradinho water reservoir." **Remote Sensing Letters**, v. 9, n. 5, p. 438–446, 2018.

BANCO DO NORDESTE. **Comportamento recente da fruticultura nordestina : área, valor da produção e comercialização.** Caderno Setorial ETENE, 2016.

BANCO DO NORDESTE. **Fruticultura na área de atuação do BNB.** Caderno Setorial ETENE, 2018.

BARBOSA, F. C.; TEIXEIRA, A. DOS S.; GONDIM, R. S. "Espacialização da evapotranspiração de referência e precipitação efetiva para estimativa das necessidades de irrigação na região do Baixo Jaguaribe - CE." **Revista Ciência Agronômica**, v. 36, n. 1, p. 24–33, 2005.

BARRAL, T. V. **Hidrogramas ambientais para o baixo rio São Francisco: avaliação de impactos sobre a geração hidrelétrica.** Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.

BARROS, V. R. **Avaliação da Evapotranspiração utilizando o algoritmo SEBAL e Imagens Landsat5 – TM – Estudo de Caso: Bacia do Rio Piabanha, RJ.** Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.

BAZILIAN, M. *et al.* "Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach." **Energy Policy**, v. 39, n. 12, p. 7896–7906, 2011.

BELLEZON, R. **Water-energy-food nexus of sugarcane ethanol production in the state of Goiás, Brazil: an analysis with regional inputoutput matrix.** Dissertação

de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 5.ed ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 1989.

BORGES, A. "EDP e Eneva vão à justiça contra cobrança de taxa emergencial por seca." **O Estado de S. Paulo**, 2017.

BRASIL, 1997. Lei Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989.

BUUREN, S. VAN; GROOTHUIS-OUDSHOORN, K. MICE: Multivariate Imputation by Chained Equations in R. **Journal of Statistical Software**, v. 45, n. 3, 2011.

Byers, E. "Tools for tackling the water-energy-food nexus." **Change Adaptation Socioecol. Syst.** v. 2 pp. 112–114, 2015

CARVALHO, A. R. L. **Reservatórios de regularização de usinas hidrelétricas: contribuição para uma matriz energética mais limpa**. Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.

CASTRO, C. N. DE. **A agricultura no nordeste brasileiro: oportunidades e limitações ao desenvolvimento**. Rio de Janeiro, Brasil, 2013. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/5592/1/BRU_n08_agricultura.pdf>.

CBHSF. **Concepção de uma estratégia robusta para a gestão dos usos múltiplos das águas da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco: Cenários**, 2014.

CBHSF. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco 2016-2025**, 2016.

CCEE. **Câmara de Comercialização de Energia Elétrica**. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/aceso_rapido_header_publico_nao_logado/biblioteca_virtual?palavrachave=Conjunto%20de%20arquivos%20para%20c%C3%A1culo&_afLoop=258174774818067&_adf.ctrl-state=1c13j58t93_120>. Acesso em: 29 out. 2018.

CHRISTOFIDIS, D. **Agricultura irrigada no mundo e no Brasil: Situação Atual e Perspectivas Futuras**. 2018.

CUNHA, T. M. **Metodologia para a previsão de vazões mensais na bacia do rio Paranaíba utilizando o modelo conceitual SMAP e redes neurais artificiais**. Trabalho de Conclusão de Curso, UFF, Niterói, RJ, Brasil, 2011.

CUNHA, T. M. **Modelagem Hidrológica Em Regiões Pouco Monitoradas Com Suporte De Umidade Do Solo - Estudo De Caso: Bacia Do Alto Rio De Contas/Ba E Bacia Experimental De Caetitê/Ba**. Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

DALL'ORTO, C. E. R. C. **Análise da Redução do Horizonte de Planejamento da Operação no Modelo Computacional de Médio Prazo**. UNIFEI, Itajubá, MG, Brasil, 2017.

DEVEZA, A. C. P. **Análise dos benefícios da eficiência energética para o setor elétrico brasileiro**. Trabalho de Conclusão de Curso, POLI/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

DI BELLO, R. C. **Análise do Comportamento da Umidade do Solo no Modelo Chuva-Vazão SMAP II – Versão com Suavização Hiperbólica. Estudo de Caso: Região de Barreiras na Bacia do rio Grande – BA**. Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.

EMBRAPA. **Visão 2030 - O futuro da agricultura brasileira**, 2018.

ENDO, A. et al. "Methods of the water-energy-food nexus." **Water**, v. 7, n. 10, pp. 5806–5830, 2015.

EPE. **Plano Decenal de Energia 2026 - Cap 3: Geração de Energia Elétrica**, 2017a.

EPE. **Base de dados: Revisão Ordinária de Garantia Física de Energia das Usinas Hidrelétricas – UHEs Despachadas Centralizadamente no Sistema Interligado Nacional - SIN**, 2017b.

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**, 2018.

FAO. **The Water-Energy-Food Nexus at FAO: Concept Note**, 2014.

FERNANDES, L. C. **Avaliação de diversas equações empíricas de evapotranspiração. Estudo de caso: Campos dos Goytacazes e Ilha de Fundão-RJ**. Dissertação de M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z. A." Reference Crop Evapotranspiration from Temperature." **Applied Engineering in Agriculture**, n. 1, p. 96–99, 1985.

GALAITSI, S.; HUBER-LEE, A. **Where is the added value?** SEI, 2018.

GUIMARÃES, D. P.; LANDAU, E. C.; SOUSA, D. L. DE. **Agricultura irrigada e estiagem na bacia do rio São Francisco**. Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto - GEONORDESTE., 2014.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of the Irrigation & Drainage Division - ASCE**, n. 108, p. 225–230, 1982.

HOFF, H. **Understanding the Nexus. Background Paper for the Bonn2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus**. Stockholm Environment Institute, 2011.

IBGE. **Tabela 1618: Área plantada, área colhida e produção, por ano da safra e produto das lavouras**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1618>>. Acesso em: 13 jan. 2019.

IBGE, I. B. DE G. E E. **Censo Agropecuário 2006: Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação**, 2006.

IDE, A. K. **Calculo da evapotranspiração de referência e da necessidade de irrigação ao longo do Projeto de Integração do Rio São Francisco**. Dissertação de M.Sc., UnB, Brasília, DF, Brasil, 2013.

INMET. **BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa do INMET**, 2018. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>>. Acesso em: 7 set. 2018.

KELMAN, J. **Desafios do regulador**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Synergia

Editora, 2009.

KELMAN, J. **The Brazilian San Francisco River Basin Narrative**. Artigo apresentado na disciplina gestão de Recursos Hídricos - Estudos de caso. PEC, COPPE, UFRJ, 2018

KEVANY, K., SIEBEL, M., HYDE, K *et al.* Water, women, waste, wisdom and wealth e harvesting the confluences and opportunities. **Journal of Cleaner Production**. 2013.

KONRAD, M. R. **Apropriação dos recursos hídricos no caso da transposição do rio São Francisco**. USP. São Paulo, SP, Brasil, 2016.

LIMA, J. E. F. W.; FERREIRA, R. S. A.; CRUZ, H. P. "Estimativa da redução da capacidade de geração de energia devido ao uso de água para irrigação na bacia do rio São Francisco." In: FREITAS, M. A. V. DE (Ed.). **O Estado das Águas no Brasil - 2001-2002**. 1. ed. Brasília, Brasil: ANA, 2003. pp. 165–178.

LOPES, J. E. G.; BRAGA JÚNIOR, B. P. F. CONEJO, J. G. L. **Simulação hidrológica: aplicação de um modelo simplificado**. III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Fortaleza, CE, Brasil, 1981

LOPES, J. E. G. **Modelo SMAP: Soil Moisture Accounting Procedure**, 1999.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Integração do Rio São Francisco**, 2016. Disponível em: <<http://www.mi.gov.br/web/projeto-sao-francisco/licenciamento-ambiental>>. Acesso em: 17 nov. 2016.

MMA. **Caderno da região hidrográfica do São Francisco**, 2006.

MMA. **Projeto de Revitalização da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**, 2015. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/PRSF/_arquivos/diag.pdf>

MMA; FBB; FUNABRE. **Desenvolvimento de matriz de coeficientes técnicos para recursos hídricos no Brasil: Produto 6 – Relatório Final dos Coeficientes Técnicos de Recursos Hídricos das Atividades Industrial e Agricultura Irrigada**. v. 6, 2011.

MOHTAR, R. H. "Water, Energy, and Food: The Ultimate Nexus." **Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering**, Second Edition, p. 108–112, 2012.

MOLINAS, P. **Usos múltiplos na bacia do rio São Francisco**, 2013.

MURRAY-DARLING BASIN AUTHORITY. **Water markets and trade**. Disponível em: <<https://www.mdba.gov.au/managing-water/water-markets-and-trade>>. Acesso em: 12 jan. 2019.

NICÁCIO, R. M. **Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do rio São Francisco**. Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

ONS, **Procedimentos de Rede – Submódulo 18.2 Relação dos sistemas e modelos computacionais – rev. nº 2016.12**, 2016.

ONS, **Procedimentos de Rede – Submódulo 7.2 Planejamento anual da operação energética – rev. nº 2017.12**, 2017.

ONS. **Generalização do modelo SMAP/ONS para previsão de vazões no âmbito do SIN**. 2018.

ONS. **Sobre o ONS: Sistemas Isolados**, 2019 Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/sistemas-isolados>>. Acesso em: 13 jan. 2019.

OTTONI FILHO, T. **Comunicação pessoal**, 2018.

PEREIRA, M. V. F. "Optimal Scheduling of Hydrothermal Systems – An Overview", **IFAC Proceedings Volumes**, ISSN: 1474-6670, Vol: 18, Issue: 7, Page: 1-9, 1985

PEREIRA, A. F. S. **Planejamento da Operação Energética e da Manutenção no Sistema Hidrotérmico de Potência Brasileiro**. Unicamp, Campinas, SP, Brasil, 2006.

PEREIRA, M. V. F.; PINTO, L. M. V. G. "Multi-stage stochastic optimization applied to energy planning", **Mathematical Programming**, v. 52, n. 1–3, p. 359–375, 1991.

POSTEL, S. **Redesigning irrigated agriculture**, 2000.

PSR. "O que está acontecendo na região nordeste?" **Energy Report**, n. 83, 2013.

PSR. "Desencalhando o modelo do setor elétrico: usos múltiplos da água." **Energy Report**, n. 107, 2015.

PSR. "Navegando as tempestades e consertando modelo setorial." **Energy Report**, n. 120, 2016.

PSR. "A corrida para a reforma do setor elétrico: foi dada a largada?" **Energy Report**, n. 126, 2017a.

PSR. "Gás para crescer: harmonização do setor elétrico e de gás natural." **Energy Report**, n. 118, 2017b.

PSR. **Comunicação pessoal**, 2018.

RODRIGUES, L. N.; DOMINGUES, A. F.; CHRISTOFIDIS, D. Agricultura Irrigada e Produção Sustentável de Alimento. In: Rodrigues, L. N.; Domingues, A. F. **Agricultura irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável**. Brasília, DF, Brasil: [s.n.]. p. 21–108.

SHAHIDIAN, S.; SERRALHEIRO, R.; TEIXEIRA, J. **Utilização da equação de Hargreaves Samani para o cálculo da ETo em estufas**. VI Congresso Ibérico de

AgroIngeniería. 2011. Disponível em: <<http://rdpc.uevora.pt/handle/10174/3091>>
Acesso em: 18 dez. 2018.

SILVA, A. P. L. M. **Avaliação hidrológica e meteorológica para a transposição de águas da bacia do rio São Francisco**. Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

SILVA, F. B. **Consumo de água em culturas cultivadas em perímetros irrigados na bacia do São Francisco: relações de equivalência e influência na produção de energia elétrica**. Dissertação de M.Sc., UFV, Viçosa, MG, Brasil, 2015.

SILVA, W. L. **Características Climáticas e Hidrológicas, Tendências Detectadas e Cenários Futuros para o Setor Elétrico Brasileiro**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.

SOUZA, S. A. DE; ARAUJO, A. A. **Análise de estacionaridade das séries hidrometeorológicas localizadas na bacia do rio São Francisco**, 2013.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre, RS, Brasil: Editora da Universidade, 2012.

Xavier, L. N. R. **Modelagem Hidrológica com o Aporte de Dados da Missão Espacial GRACE: Aplicação a Bacias Brasileiras**. Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.

UNITED NATIONS. **World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables**World Population Prospects, 2017. Disponível em: <https://esa.un.org/unpd/wpp/publications/files/wpp2017_keyfindings.pdf> Acesso em: 10 mar. 2019.

US-EU ENERGY COUNCIL. **Workshop on Understanding the water-energy nexus: inetgrated water and power system modelling**. 2015.

VÁSQUEZ P., I.L.; DE ARAUJO, L.M.N.; MOLION, L.C.B. *et al.* "Historical analysis of interannual rainfall variability and trends in southeastern Brazil based on observational and remotely sensed data", **Climate Dynmics**, Volume 50, Issue 5–6, pp 2283–2283, 2018

WBCSD. Water, Food and Energy Nexus Challenges Genebra, Suíça, 2014.

World Economic Forum. **Water Security: The Water-Food-Energy-Climate Nexus**, Washington, DC, Island Press, 2011.

YAGI MOROMISATO, G. D. **Programação Dinâmica Aplicada ao Cálculo da Energia Firme de Usinas Hidrelétricas**. Juíz de Fora, MG, Brasil: UFJF, 2012.

APÊNDICE A

A seleção dos postos pluviométricos foi iniciada com o download dos dados de precipitação mensal de todos os postos inseridos na bacia do rio São Francisco, nos bancos de dados da CPRM/ANA (HidroWeb) e do INMET (BDMEP).

A partir deste referencial, foram selecionados os postos com os maiores registros históricos, e menor percentual de falhas no período 1961-2017. O preenchimento das falhas foi realizado utilizando-se o pacote MICE (*Multivariate Imputation by Chained Equation*) da linguagem R (BUUREN; GROOTHUIS-OUDSHOORN, 2011). O método busca preencher os dados faltantes preservando a estatística original do conjunto de dados, utilizando, no preenchimento, para isso correlações entre as séries dos postos. O processo pode ser resumido em quatro passos:

1. Substitua os dados faltantes de cada estação de medição pela média sem considerar dados faltantes;
2. Para cada série (estação de medição) H_i , estime o seguinte modelo de regressão usando a média para substituir os dados faltantes

$$H_i = \alpha_0 + \sum_{j, j \neq i} \alpha_j H_j + \epsilon, \quad \epsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (30)$$

3. Com o modelo estimado, gere para cada série uma nova estimativa (que é diferente da média) para os dados faltantes.
4. Após algumas iterações, os valores que substituem os dados faltantes devem convergir e esse valor é a melhor estimativa possível para os dados faltantes.

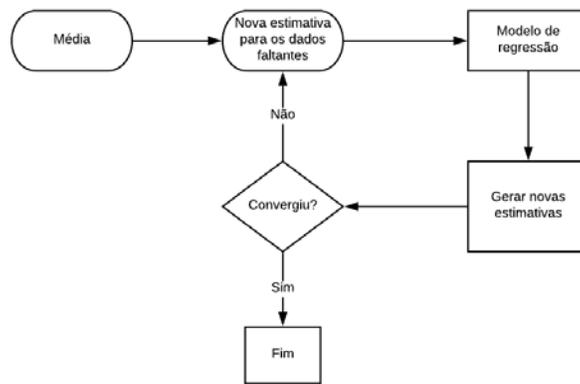


Figura A-1: Representação da metodologia do pacote MICE.

Com um conjunto de dados consolidado mediante o preenchimento de falhas, iniciou-se a análise de consistência por meio de gráficos de dupla massa. O método consiste em elaborar uma curva duplo acumulativa relacionando os totais mensais acumulados do posto a consistir (nas abscissas) e a média acumulada dos totais mensais de todos os postos da região (nas ordenadas).

Essa curva é hipoteticamente considerada homogênea do ponto de vista hidrológico. Quando os valores se alinham segundo uma única reta, fica comprovada a homogeneidade dos dados disponíveis em um posto com relação às observações registradas nos outros postos da bacia.

A Figura A-2 apresenta um exemplo de posto pluviométrico desconsiderado da análise, em função do procedimento de análise de consistência, por apresentar mudanças na inclinação da reta em vários momentos do histórico.

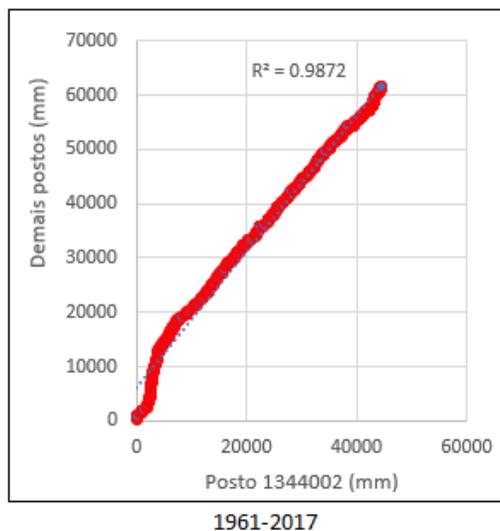


Figura A-2: Exemplo de análise de dupla massa de posto pluviométrico desconsiderado.

Ao analisar os postos operados pela CPRM/ANA, percebe-se uma mudança na inclinação da reta no período mais recente em alguns deles, ilustrada na Figura A-3.

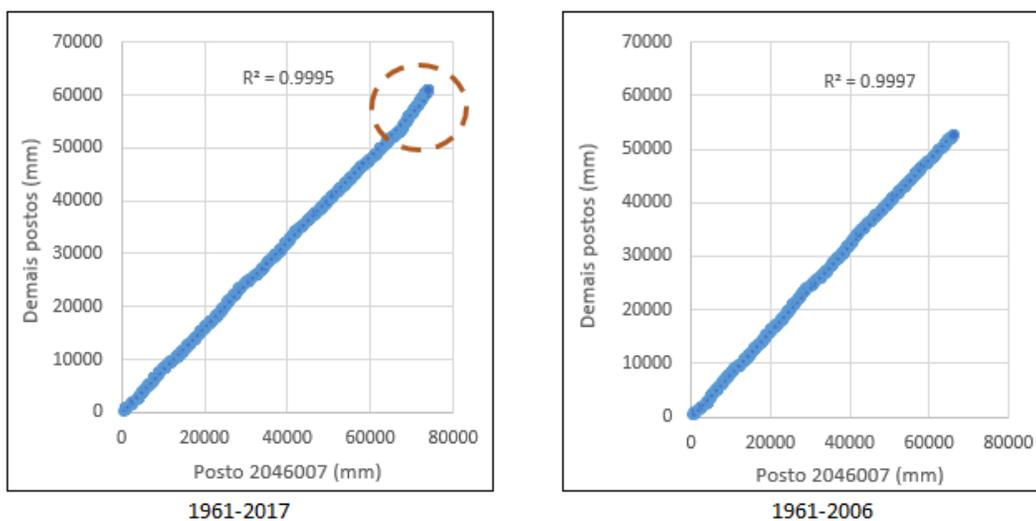


Figura A-3: Gráfico de dupla massa do posto 2046007 para o período 1962-2017 (esquerda) e 1961-2006 (direita).

No período 2007-2017, percebe-se uma mudança na inclinação da reta. Por esse motivo, optou-se por utilizar os postos operados pelo INMET nesse período, uma vez que não apresentam tal alteração.

APÊNDICE B

A Tabela B- 1 apresenta as características dos postos pluviométricos considerados no período 2007-2014.

Tabela B- 1: Postos pluviométricos operados pelo INMET - período 2007-2014.

Código	Nome	Lat	Lon	UF	SUB1
83632	IBIRITE	-20.01	-44.05	MG	SFA
83587	BELO HORIZONTE	-19.93	-43.93	MG	SFA
83586	SETE LAGOAS	-19.46	-44.25	MG	SFA
83582	BAMBUI	-20.03	-45.00	MG	SFA
83581	FLORESTAL	-19.88	-44.41	MG	SFA
83570	POMPEU	-19.21	-45.00	MG	SFA
83536	CURVELO	-18.75	-44.45	MG	SFA
83533	BOM DESPACHO	-19.68	-45.36	MG	SFA
83483	PIRAPORA	-17.35	-44.91	MG	SFA
83481	JOAO PINHEIRO	-17.73	-46.17	MG	SFM
83479	PARACATU	-17.24	-46.88	MG	SFM
83452	JURAMENTO	-16.77	-43.66	MG	SFM
83428	UNAI	-16.36	-46.88	MG	SFM
83408	CARINHANHA	-14.28	-43.76	BA	SFM
83395	JANAUBA	-15.80	-43.29	MG	SFM
83388	MONTE AZUL	-15.16	-42.86	MG	SFM
83386	JANUARIA	-15.45	-44.00	MG	SFM
83384	ARINOS	-15.91	-46.10	MG	SFM
83334	FORMOSO	-14.93	-46.25	MG	SFM
83288	BOM JESUS DA LAPA	-13.26	-43.41	BA	SFM
83286	CORRENTINA	-13.33	-44.61	BA	SFM
83236	BARREIRAS	-12.15	-45.00	BA	SFM
83179	BARRA	-11.08	-43.16	BA	SFM
82986	PAULO AFONSO	-9.36	-38.21	BA	SFSM
82983	PETROLINA	-9.38	-40.48	PE	SFSM
82890	ARCOVERDE	-8.41	-37.08	PE	SFSM
82753	OURICURI	-7.90	-40.04	PE	SFSM

Fonte: INMET (2018)

A Tabela B-2 apresenta as informações dos postos pluviométricos considerados no período 1961-2006.

Tabela B-2: Postos pluviométricos operados pela CPRM - período 1961-2006.

Código	Nome	Lat	Lon	UF	SUBI
2044007	ENTRE RIOS DE MINAS	-20.6611	-4.0706	MG	SFA
2044009	FAZENDA CAMPO GRANDE	-20.6253	-4.4333	MG	SFA
2043013	CONGONHAS - LINIGRAFO	-20.5219	-43.83	MG	SFA
2045005	LAMOUNIER	-20.4722	-5.0361	MG	SFA
2044008	MELO FRANCO	-20.1978	-4.1208	MG	SFA
2044003	CARMO DO CAJURU	-20.1922	-4.7936	MG	SFA
2043002	LAGOA GRANDE (MMV)	-20.1792	-3.9428	MG	SFA
2043004	RIO DO PEIXE (MMV)	-20.1378	-3.8925	MG	SFA
2044006	DIVINÓPOLIS	-20.1369	-4.8919	MG	SFA
2046007	FAZENDA AJUDAS	-20.1017	-46.055	MG	SFA
2044002	ITAÚNA - MONTANTE	-20.0714	-4.5703	MG	SFA
2044012	IBIRITÉ	-20.0428	-4.0433	MG	SFA
1944004	PONTE NOVA DO PARAOPEBA	-19.9556	-4.3067	MG	SFA
1943022	CAIXA DE AREIA	-19.945	-3.9125	MG	SFA
1943010	CAETÉ	-19.9006	-3.6675	MG	SFA
1943006	SABARÁ	-19.8931	-43.815	MG	SFA
1944007	FAZENDA ESCOLA FLORESTAL	-19.8797	-4.4217	MG	SFA
1944011	JAGUARUNA - JUSANTE	-19.7281	-4.8067	MG	SFA
1943009	VESPASIANO	-19.6872	-3.9208	MG	SFA
1943023	TAQUARAÇU	-19.6639	-3.6881	MG	SFA
1943004	JABOTICATUBAS	-19.5206	-3.7444	MG	SFA
1945019	DORES DO INDÁIA (CVSF)	-19.4686	-5.6017	MG	SFA
1944010	HORTO FLORESTAL	-19.2681	-4.4017	MG	SFA
1944024	FAZENDA VARGEM BONITA	-19.2372	-4.1231	MG	SFA
1845014	TIROS	-18.9997	-5.9661	MG	SFA
1845013	SÃO GONÇALO DO ABAETÉ	-18.3436	-5.8367	MG	SFA
1846016	PONTE FIRME	-18.0339	-6.4194	MG	SFM
1846015	VAZANTE	-18.005	-6.9111	MG	SFM
1744010	LASSANCE	-17.89	-4.5767	MG	SFA
1745000	CAATINGA	-17.1458	-5.8803	MG	SFM
1745001	CACHOEIRA DO PAREDÃO	-17.1111	-5.4378	MG	SFM
1645007	PORTO ALEGRE	-16.9069	-5.3825	MG	SFM
1645005	VILA URUCUIA	-16.3003	-5.7422	MG	SFM
1645003	BARRA DO ESCURO	-16.2686	-5.2378	MG	SFM
1544012	SÃO FRANCISCO	-15.9494	-4.8681	MG	SFM
1444001	CAPITÃNEA	-14.4231	-4.4836	MG	SFM
1444017	FAZENDA PORTO ALEGRE	-14.2683	-4.5217	BA	SFM
1344013	GATOS	-13.7106	-4.6325	BA	SFM
940018	CAMPO DOS CAVALOS	-9.5597	-0.6467	BA	SFSM
840015	LAGOA GRANDE	-8.9989	-0.2731	PE	SFSM
838002	AÇUDE SERRINHA	-8.2397	-8.5278	PE	SFSM

Fonte: HidroWeb ANA (2019).

A Tabela B-3 apresenta as informações dos postos de temperatura considerados.

Tabela B-3: Postos de temperatura utilizados – período 1961-2014.

Código	Nome	Lat	Lon	UF	SUB1
83632	IBIRITE	-20.01	-44.05	MG	SFA
83587	BELO HORIZONTE	-19.93	-43.93	MG	SFA
83586	SETE LAGOAS	-19.46	-44.25	MG	SFA
83582	BAMBUI	-20.03	-45.00	MG	SFA
83581	FLORESTAL	-19.88	-44.41	MG	SFA
83570	POMPEU	-19.21	-45.00	MG	SFA
83536	CURVELO	-18.75	-44.45	MG	SFA
83533	BOM DESPACHO	-19.68	-45.36	MG	SFA
83483	PIRAPORA	-17.35	-44.91	MG	SFA
83481	JOAO PINHEIRO	-17.73	-46.17	MG	SFM
83479	PARACATU	-17.24	-46.88	MG	SFM
83452	JURAMENTO	-16.77	-43.66	MG	SFM
83437	MONTES CLAROS	-16.68	-43.84	MG	SFM
83428	UNAI	-16.36	-46.88	MG	SFM
83408	CARINHANHA	-14.28	-43.76	BA	SFM
83395	JANAUBA	-15.80	-43.29	MG	SFM
83389	MOCAMBINHO	-15.08	-44.01	MG	SFM
83388	MONTE AZUL	-15.16	-42.86	MG	SFM
83386	JANUARIA	-15.45	-44.00	MG	SFM
83384	ARINOS	-15.91	-46.10	MG	SFM
83338	ESPINOSA	-14.91	-42.80	MG	SFM
83334	FORMOSO	-14.93	-46.25	MG	SFM
83288	BOM JESUS DA LAPA	-13.26	-43.41	BA	SFM
83286	CORRENTINA	-13.33	-44.61	BA	SFM
83236	BARREIRAS	-12.15	-45.00	BA	SFM
83179	BARRA	-11.08	-43.16	BA	SFM
83076	STa R DE CASSIA IBIPETUBA	-11.01	-44.51	BA	SFM
82989	AGUA BRANCA	-9.28	-37.90	AL	SFSM
82986	PAULO AFONSO	-9.36	-38.21	BA	SFSM
82983	PETROLINA	-9.38	-40.48	PE	SFSM
82890	ARCOVERDE	-8.41	-37.08	PE	SFSM
82886	CABROBO	-8.51	-39.33	PE	SFSM
82753	OURICURI	-7.90	-40.04	PE	SFSM

Fonte: INMET (2018).