



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

APLICAÇÃO DO MODELO SMAP PARA AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS: UM ESTUDO DE CASO PARA A BACIA DE CAMARGOS (MG)

Evandro Arruda De Martini

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. André Frossard Pereira de Lucena

Março de 2015

APLICAÇÃO DO MODELO SMAP PARA AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS: UM ESTUDO DE CASO PARA A BACIA DE CAMARGOS (MG)

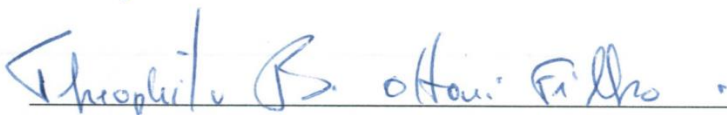
Evandro Arruda De Martini

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.


Examinado por:



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



Prof. Theophilo Benedicto Ottoni Filho, Ph.D.



Eveline Maria Vasquez Arroyo, M.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO de 2015

Martini, Evandro Arruda De

Aplicação do modelo SMAP para Avaliação de Impactos de Mudanças Climáticas: Um Estudo de Caso para a Bacia de Camargos (MG) / Evandro Arruda De Martini. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2015.

XII, 63p.: il. 29,7 cm.

Orientador: André Frossard Pereira de Lucena

Projeto de Graduação – UFRJ/Escola Politécnica/Curso de Engenharia Ambiental, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 51-59.

1. Mudanças Climáticas Globais. 2. Modelagem Hidrológica. 3. Modelo chuva-vazão SMAP. 4. Bacia do Rio Grande. I. Lucena, André Frossard Pereira de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Ambiental. III. Título.

Aos meus avós (in memoriam)

Agradecimentos

Agradeço à UFRJ e à CAPES pelo investimento de tantos anos na minha formação.

À minha mãe pelo carinho incondicional e pelo companheirismo. Ao meu pai, pioneiro nessa luta pelo meio ambiente, sempre com um olho lá no futuro. A toda minha família, de sangue e de coração, aquele abraço.

À Verônica pelo amor e por estar sempre na hora e no lugar certos. Ao Leo pelas ideias e pela coragem de seguir o seu talento. Aos colegas engenheiros ambientais pela companhia nas matérias que pareciam impossíveis, pelas viagens de campo maravilhosas e pelas cervejas tomadas. Ao Thiago, que esteve junto nas lutas da vida por tantos anos. A todos os amigos que cruzaram meu caminho no CAp, no Rio e na França, por tornarem a caminhada mais fácil e mais engraçada.

A todos os professores do CAp/UFRJ e da Engenharia Ambiental, pelos conhecimentos e valores compartilhados. Especialmente ao meu orientador André Lucena, por dar todo o apoio a essa ideia louca de prever o futuro.

Aos colegas do ONS, os hidrólogos que me ensinaram como é a modelagem na prática, e os meteorologistas que têm a ingrata tarefa de fazer chover. Especialmente ao Rogério por tantas ajudas com o SMAP. Ao CPTEC/INPE, por fornecer os dados de projeções climáticas utilizados. Aos colegas do Tamar/ICMBio, pela paixão contagiante pelo meio ambiente.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica / UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

APLICAÇÃO DO MODELO SMAP PARA AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS: UM ESTUDO DE CASO PARA A BACIA DE CAMARGOS (MG)

Evandro Arruda De Martini

Março/2015

Orientador: Prof. André Frossard Pereira de Lucena

Curso: Engenharia Ambiental

As mudanças climáticas globais, cujas evidências têm sido apontadas por diversos estudos internacionais, poderão impactar as bacias hidrográficas brasileiras, afetando os diversos usuários da água. Modelos climáticos têm sido aperfeiçoados para a geração de cenários de clima futuro. O presente trabalho apresenta uma metodologia para avaliação de impactos de mudanças climáticas em vazões, com uma aplicação ao Rio Grande, em Camargos, Minas Gerais. A metodologia utiliza o modelo hidrológico SMAP, alimentado pelas projeções climáticas do Eta-HadGEM2. Foram escolhidos dois caminhos de forçamento radiativo (RCPs) e três períodos: 1990-2000 2040-50 e 2088-98. O primeiro período foi utilizado para a avaliação do desempenho da metodologia através de comparação dos dados de precipitação calculados pelo Eta-HadGEM2 e de vazão calculados pelo SMAP com os observados no mesmo período. Os dois outros períodos foram utilizados para projeções de vazões futuras em Camargos. A metodologia pode ser adaptada para outras bacias e outros modelos climáticos. Os resultados indicam que as precipitações e vazões simuladas para o passado reproduziram razoavelmente bem a sazonalidade da região, com um período úmido e um período seco, porém os modelos superestimaram as precipitações e vazões do período seco. As projeções de vazões futuras indicam redução nas vazões médias e nas vazões representativas e não foi observada tendência significativa para as vazões máximas.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas Globais; Modelagem Hidrológica; Modelo chuva-vazão SMAP; Bacia do Rio Grande.

Abstract of Undergraduate Project presented to Escola Politécnica / UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Environmental Engineer.

USE OF THE SMAP MODEL FOR ASSESSMENT OF CLIMATE CHANGE IMPACTS: A CASE STUDY FOR THE CAMARGOS BASIN (MG – BRAZIL)

Evandro Arruda De Martini

March/2015

Advisor: Prof. André Frossard Pereira de Lucena

Course: Environmental Engineering

Global climate change, the evidences of which have been scientifically corroborated by several international studies, may cause impacts on Brazilian river basins, affecting many users of water resources. Climate models have been improved over the years for the simulation of future climate scenarios. This work presents a methodology for assessing climate change impacts on river flow and its application to Grande River at Camargos, state of Minas Gerais, Brazil. The methodology uses the hydrological model SMAP with data from climate simulations by Eta-HadGEM2. Two representative concentration pathways (RCP) were chosen as well as three time periods: 1990-2000, 2040-50 and 2088-98. The first period was used for evaluation of the methodology's performance: precipitation data from Eta-HadGEM2 and discharge data from SMAP were evaluated against observed data for the same period. The other two periods were used for projections of future discharges at Camargos. This methodology can be adapted to other basins and other climate models. The results show that simulated past precipitations and discharges reproduce reasonably well the region's seasonal cycle, with a rainy season and a dry season. However, both models overestimate precipitation and discharges in the dry season. The future discharge projections indicate a reduction in mean discharges and the characteristic discharges and no significant tendency was found for the maximum discharge.

Keywords: Global Climate Change; Hydrological modelling; SMAP rainfall-runoff model; Rio Grande's basin.

Sumário

1. Introdução	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Estrutura do Trabalho	2
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Panorama dos Recursos Hídricos no Brasil	3
2.2. Sistema Elétrico Brasileiro.....	4
2.3. Modelagem Hidrológica	6
2.4. Mudanças Climáticas Globais.....	7
2.4.1 O Quinto Relatório do IPCC e os Cenários de Forçamento Radiativo (RCP)	8
2.4.2. Modelos Climáticos de Circulação Global (<i>General Circulation Models - GCMs</i>)	10
2.4.3. Impactos de Mudanças Climáticas sobre Recursos Hídricos	12
2.4.4. Modelagem Hidrológica e Mudanças Climáticas no Brasil	15
3. Estudo de Caso: Metodologia e Base de Dados	17
3.1. Bacia do Grande e sub-bacia de Camargos	17
3.2. Metodologia	18
3.2.1. Modelo SMAP.....	19
3.2.2. Calibração do modelo SMAP	24
3.2.3. Evapotranspiração.....	26
3.2.4. Dados de Precipitação Observada e Vazão Observada.....	28
3.2.5. Dados de modelos climáticos.....	29
3.2.6. Avaliação do desempenho dos modelos no período 1990-2000.....	32
3.2.7. Geração dos cenários de vazões futuras.....	32
4. Estudo de Caso: Resultados	33
4.1. Avaliação do desempenho dos modelos.....	33
4.1.1. Precipitação.....	33
4.1.2. Curvas de Permanência de Vazão	34
4.1.3. Vazões Características.....	36
4.1.4. Distribuição Sazonal das Vazões	37
4.2. Projeções Futuras.....	39
4.2.1. Precipitação anual média e Vazão média por período	40
4.2.2. Curvas de Permanência de Vazão	42
4.2.3. Vazões Q_{90} e Q_{95}	43
4.2.5. Vazão $Q_{7,10}$	45

4.2.6. Vazões e Precipitações Máximas	47
5. Considerações Finais	48
5.1. Conclusões.....	48
5.2. Recomendações e Desenvolvimentos Futuros	49
Referências Bibliográficas	51
ANEXO I: Série de Vazões Diárias Calculadas e Observadas em Camargos entre 1990 e 2000..	60

Lista de Figuras

Figura 1: Mudanças nas temperaturas médias na superfície terrestre entre 1901 e 2012.....	7
Figura 2: Representação do efeito estufa	8
Figura 3: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Grande	17
Figura 4: Resumo da Metodologia	19
Figura 5: Esquema do modelo SMAP	20
Figura 6: Modelo SMAP após calibração.....	26
Figura 7: Área coberta pelo modelo Eta, incluindo todo o território continental brasileiro	30
Figura 8: Precipitações médias mensais, para a sub-bacia de Camargos. Média calculada entre 01/08/1990 e 30/12/2000	33
Figura 9: Curva de permanência de vazões para Camargos, de 1990 a 2000.....	35
Figura 10: Curva de permanência para Camargos, de 1990 a 2000. Destaque para os 10% de vazões mais altas.....	35
Figura 11: Vazões Médias Mensais em Camargos, de 1990 a 2000.....	37
Figura 12: Vazões diárias em Camargos em 1994 para as vazões observadas e calculadas pelo SMAP	39
Figura 13: Precipitação anual média na sub-bacia de Camargos e Vazão Média em Camargos por década para os dados do modelo Eta-HadGEM2 com cenário RCP 4.5	40
Figura 14: Precipitação anual média na sub-bacia de Camargos e Vazão Média em Camargos por década para os dados do modelo Eta-HadGEM2 com cenário RCP 8.5	41
Figura 15: Curvas de permanência das vazões em Camargos calculadas para cada período e RCP. Escala linear.	42
Figura 16: Curvas de permanência das vazões em Camargos calculadas para cada período e RCP. Escala logarítmica	43
Figura 17: Vazão Q_{90} em Camargos por década, para o RCP 4.5 e para o RCP 8.5	44
Figura 18: Vazão Q_{95} em Camargos por década, para o RCP 4.5 e para o RCP 8.5	45
Figura 19: Vazão $Q_{7,10}$ em Camargos por década, para o RCP 4.5 e para o RCP 8.5	46
Figura 20: Valores máximos por década de Precipitação diária média na sub-bacia de Camargos e de Vazão diária em Camargos	47

Lista de Tabelas

Tabela 1: Capacidade instalada prevista de Geração Elétrica no SIN, em GW	5
Tabela 2: Caminhos representativos de concentração (RCPs).....	10
Tabela 3: Variações das precipitações (modelo Eta-HadCM3) e vazões (modelo MGB-IPH) entre 1960-90 e 2070-99	16
Tabela 4: Percentagem mensal das horas anuais de luz solar, para latitude 22° Sul	27
Tabela 5: Desvio entre Evapotranspiração Potencial calculada (equação de Blaney-Criddle modificada) e observada (média histórica).....	28
Tabela 6: Postos utilizados pelo SMAP para a sub-bacia de Camargos	29
Tabela 7: Vazões características em Camargos, de 1990 a 2000	36
Tabela 8: Vazões médias mensais calculadas e observadas em Camargos, e diferença percentual entre os valores	37
Tabela 9: Vazões médias no período seco (01/05 a 30/10) de cada ano, calculadas e observadas em Camargos.....	38
Tabela 10: Precipitação anual média na sub-bacia de Camargos e Vazão Média em Camargos por década, expressas em porcentagem dos valores médios de 1990-2000	41
Tabela 11: Vazões Q_{90} e Q_{95} em Camargos, por década, para o RCP 4.5 e para o RCP 8.5.....	45
Tabela 12: Vazão $Q_{7,10}$ em Camargos por década, para o RCP 4.5 e para o RCP 8.5	46

Lista de Siglas e Abreviações

ANA - Agência Nacional de Águas

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

ETP - Evapotranspiração Potencial

GCM - General Circulation Model

GEE - Gases de Efeito Estufa

HadGEM2 - Hadley Centre Global Environmental Model version 2

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)

MGB - Modelo de Grandes Bacias

OMM - Organização Meteorológica Mundial

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

PNRH - Política Nacional de Recursos Hídricos

p.p.m. - Parte por milhão

Q_{90} , Q_{95} - Vazões características

Q_{obs} - Vazão observada (dados fluviométricos)

Q_{calc} - Vazão calculada a partir do SMAP

SIN - Sistema Interligado Nacional

SMAP - Soil Moisture Accounting Procedure (modelo hidrológico)

TR - Tempo de Recorrência

1. Introdução

Ao longo do Século XXI, as Mudanças Climáticas Globais poderão causar variações na quantidade e distribuição de precipitações, nas temperaturas médias e extremas, entre outras mudanças no regime climático (IPCC, 2013). Essas variações, por sua vez, poderão impactar as bacias hidrográficas brasileiras, gerando impactos econômicos, sociais e ambientais. No Brasil, a Política Nacional de Recursos Hídricos estabelece entre seus objetivos:

I - assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos;

(...)

III - a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais (BRASIL, 1997).

A avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre as bacias hidrográficas brasileiras é essencial para o cumprimento dos objetivos citados, pois permitirá que seja feito o planejamento de longo prazo necessário para garantir a disponibilidade de água à atual e às futuras gerações, bem como a adaptação da sociedade a eventuais impactos de eventos extremos. Assim, um dos ramos mais importantes no estudo das Mudanças Climáticas Globais no Brasil é o desenvolvimento de metodologias que permitam a avaliação de seus impactos sobre os recursos hídricos.

O presente trabalho apresenta uma metodologia para avaliação de impactos de mudanças climáticas nas vazões de cursos d'água, com uma aplicação ao Rio Grande em Camargos, Minas Gerais. O Rio Grande, afluente do Rio Paraná, tem um elevado número de usinas hidrelétricas, sendo um dos mais importantes do Sistema Interligado Nacional (SIN). Além disso, na região há uma boa cobertura da bacia incremental por estações pluviométricas, facilitando a modelagem hidrológica.

1.1. Objetivos

Considerando o exposto acima, este Projeto de Graduação terá dois objetivos principais: em primeiro lugar a adaptação e aplicação de uma metodologia para avaliação de impactos de mudanças climáticas sobre as vazões de um curso d'água a partir do modelo chuva-vazão SMAP, metodologia que pode ser replicada para diferentes regiões e diversos cenários de clima futuro elaborados por modelos climáticos.

Em segundo lugar, o presente trabalho elaborará projeções de vazões futuras a partir dos dados do modelo climático Eta-HadGEM2 e do modelo hidrológico SMAP, permitindo assim apontar possíveis impactos das mudanças climáticas nas vazões diárias do Rio Grande em Camargos ao longo do Século XXI, com foco em alterações nas vazões máximas (associadas a cheias), vazões médias mensais e vazões características Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ (associadas a secas, com impactos sobre a população local e sobre a geração de energia).

1.2. Estrutura do Trabalho

Este estudo se divide em seis capítulos. Neste capítulo é feita a introdução do trabalho, são apresentados seus dois objetivos gerais e a estruturação para ele definida.

O segundo capítulo traz uma revisão bibliográfica dividida em eixos principais, de forma a contemplar o estado da arte nas diversas áreas de conhecimento que este trabalho envolve. Primeiramente é apresentado um panorama geral da gestão de recursos hídricos no Brasil, incluindo algumas definições relevantes. Também é traçado um panorama breve do setor elétrico brasileiro e da relevância das usinas hidrelétricas no país. Em seguida, são apresentadas a modelagem hidrológica, as mudanças climáticas globais, seus diferentes cenários e modelos climáticos, para finalmente serem abordados os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos, com destaque para o uso de modelos hidrológicos para avaliação de impactos de mudanças climáticas no Brasil.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia e base de dados para o estudo de caso da Bacia Incremental de Camargos, localizada no Alto Rio Grande. São descritos os modelos climáticos Eta e HadGEM2, assim como o modelo hidrológico SMAP. Enfim, são abordados os dados e métodos necessários para a realização de projeções de mudanças climáticas e a forma de avaliação de desempenho da própria metodologia.

Os resultados das rodadas dos modelos são apresentados e discutidos no quarto capítulo, que se divide em duas partes: na primeira são realizadas simulações de precipitações e vazões passadas, permitindo a avaliação da metodologia a partir da comparação com dados observados; na segunda parte são apresentados e avaliados os resultados das simulações para o futuro.

Finalmente, o quinto capítulo apresenta as conclusões gerais do estudo e recomendações para estudos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Panorama dos Recursos Hídricos no Brasil

No Brasil, a Constituição de 1988 estabelece a água como um bem público, sendo ou propriedade da União ou dos Estados (CRUZ, 2001). A Lei Federal 9433/1997 (BRASIL, 1997), que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), é o principal marco regulatório sobre a gestão das águas. A PNRH estabelece, em seu artigo 1º, os seus fundamentos:

I - a água é um bem de domínio público;

II - a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;

III - em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;

IV - a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas;

V - a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos;

VI - a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades (BRASIL, 1997).

Dentre os instrumentos da PNRH, destaca-se a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos, licença emitida pelo Estado, para que os usuários possam atender suas necessidades. A outorga, segundo SILVEIRA *et al.* (2008), é o principal instrumento para a administração da oferta da água, que se constitui na base do processo de gerenciamento de recursos hídricos. A disponibilidade hídrica é utilizada como base para emissão da outorga de uso, e deve considerar um nível de garantia compatível com a responsabilidade intrínseca do outorgante frente aos direitos concedidos aos usuários junto à outorga (CRUZ, 2001).

Os indicadores de vazão mais utilizados em projetos e emissão de outorga são a Q_{95} e a $Q_{7,10}$. O primeiro é a vazão de permanência de 95% do tempo em uma série histórica utilizada, isto é, corresponde a um patamar inferior de vazão que tem probabilidade de ser excedida, “permanece”, em 95% do tempo. O segundo indicador corresponde à vazão mínima com 7 dias de duração e 10 anos de tempo de retorno (FRANCISCO, 2004). A Agência Nacional de Águas (ANA) considera a vazão máxima outorgável de um curso d’água igual a 70% da Q_{95} , podendo variar em função das peculiaridades de cada região. Outros estados, como Paraná e Goiás, também utilizam a Q_{95} no processo de outorga (ANA, 2005). A $Q_{7,10}$ é utilizada nos

estados de São Paulo, Minas Gerais (ANA, 2005) e Rio de Janeiro (RIO DE JANEIRO, 2007). Em outros estados, outros indicadores de vazão são utilizados: na Bahia e em Sergipe, utiliza-se e Q_{90} , semelhante à Q_{95} mas com permanência em 90% do tempo (ANA, 2005). O uso da Q_{95} como disponibilidade pressupõe, a priori, aceitar o risco de que o sistema possa falhar em 5% do tempo. Esta chance de falha de 5% é sobre um intervalo de tempo igual ao tamanho da série.

Outro conceito importante na gestão de recursos hídricos é o de vazão natural, que pode ser definida como a vazão estimada para uma seção do rio sem os impactos da interferência humana na sua bacia hidrográfica (LONGHI *et al.* 2011), ou seja, sem considerar impactos antrópicos como regularização de vazões por reservatórios, desvios de água e usos consuntivos (irrigação, criação animal e abastecimentos urbano, rural e industrial). A reconstituição da vazão natural, informação básica para avaliação dos aspectos quantitativos e qualitativos da água, é uma tarefa difícil, devido às transformações que as atividades antrópicas causam à superfície do solo, afetando as condições de permeabilidade, os escoamentos superficial e subterrâneo, e também devido à rede de monitoramento, que apresenta dados insuficientes para diversas regiões do Brasil (FRANCISCO, 2004), portanto a reconstituição de vazões naturais apresenta muitas incertezas (CRUZ, 2001).

2.2. Sistema Elétrico Brasileiro

Em seu mais recente Plano Decenal de Expansão de Energia, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2013a) apresenta a previsão de expansão da demanda e da oferta de diversas fontes energéticas no período de 2013 a 2022. O Brasil ainda possui grande potencial de geração hidrelétrica a ser explorado, especialmente nas regiões Norte e Centro-Oeste, com importantes usinas projetadas podendo ser viabilizadas nos próximos anos, apesar da crescente complexidade socioambiental envolvida na aprovação dos projetos. Além disso, outras fontes renováveis de geração (eólicas, Pequenas Centrais Hidrelétricas¹ e termelétricas a biomassa) têm uma previsão de expansão média anual de 10%, com destaque para as usinas eólicas. A Tabela 1 resume as previsões da EPE para a geração de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN), no período 2013-2022.

¹ Pequenas Centrais Hidrelétricas são definidas como usinas hidrelétrica cuja capacidade instalada seja superior a 1 MW e inferior a 30 MW. Além disso, a área do reservatório deve ser inferior a 3 km² (ANEEL, 1998). A energia destas usinas não é despachada centralizadamente pelo ONS.

Tabela 1: Capacidade instalada prevista de Geração Elétrica no SIN, em GW. Adaptado de EPE (2013a)

	2012 (em GW)	2012 (em %)	2017 (em GW)	2017 (em %)	2022 (em GW)	2022 (em %)
Hidráulica (exceto PCH)	84,8	71,0	102,2	67,0	119,0	65,0
Nuclear	2,0	1,7	2,0	1,3	3,4	1,9
Térmica	17,4	14,6	21,0	13,8	22,5	12,3
PCH+Biomassa+Eólica	15,3	12,8	27,4	18,0	38,1	20,8
Total	119,5	100	152,6	100	183,1	100

Fonte: EPE (2013a)

É importante notar que a tabela acima mostra a capacidade instalada (potência) e não a energia gerada ao longo do ano. As usinas térmicas, de custo de operação mais caro, são menos utilizadas em anos de condições hidrológicas favoráveis.

Em 2012, de toda a energia elétrica gerada no Brasil, 75,2% foi de fonte hidráulica (EPE, 2013b). Essa participação representa uma queda em relação aos 84,2% de 2009, e na previsão de expansão do sistema elétrico brasileiro, a Empresa de Pesquisa Energética projeta que, em 2022, 65% da potência instalada no Sistema Interligado Nacional seja de fonte hidráulica (EPE, 2013a). Portanto, apesar dos avanços de outras fontes como o gás natural e a energia eólica, as usinas hidroelétricas continuarão sendo extremamente relevantes na matriz energética brasileira. Além disso, as usinas com reservatório têm capacidade de regularizar as vazões das bacias, permitindo assim guardar água do período chuvoso e utilizá-la para geração no período seco, ao contrário das PCHs, com baixa ou nenhuma regularização, e da energia eólica, que é intermitente, dependendo das condições de vento. Sendo assim, os reservatórios com capacidade de regularização, como os da bacia do Rio Grande, têm papel essencial na segurança operativa do SIN (ONS, 2008a), especialmente nos períodos de pico de demanda e em condições hidrológicas desfavoráveis.

O potencial hidráulico é proporcionado pela vazão e pela concentração dos desníveis existentes ao longo do curso de um rio, portanto a geração hidrelétrica depende da vazão. Assim, apesar de a energia gerada ao longo do ano por uma grande usina hidrelétrica com reservatório, como a de Camargos, depender da operação do SIN pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que tem como objetivo a redução do custo marginal de operação (SANTANA, 2013), fica claro que uma redução nas vazões resultará em uma menor produção de energia. O presente trabalho não pretende quantificar os impactos das mudanças climáticas sobre a geração de energia - ver a respeito LUCENA (2010) e SANTANA (2013) - porém as tendências de aumento ou redução das vazões futuras em uma bacia com diversos aproveitamentos hidrelétricos terão impactos diretos sobre o SIN.

2.3. Modelagem Hidrológica

A modelagem hidrológica é uma importante ferramenta que permite descrever e prever o comportamento das variáveis envolvidas no ciclo hidrológico (BAYER *et al.*, 2012). Sua importância tem crescido desde a década de 1970, junto com o crescimento exponencial da capacidade dos computadores. Dentre os modelos hidrológicos, os modelos de previsão de vazões têm uma importância significativa no gerenciamento dos recursos hídricos, permitindo gerar previsões tanto a curto quanto a longo prazo. Tais previsões, entre outras utilidades, são fundamentais para o planejamento da operação do Sistema Elétrico, que deve garantir o melhor aproveitamento dos volumes armazenados nos reservatórios das usinas hidroelétricas, levando em consideração as vazões presentes e futuras. A previsão de vazões fluviais também pode servir a vários outros setores usuários da água: irrigação, pesca, turismo, lazer, navegação, abastecimento urbano, controle de cheias. Esses setores programam suas atividades em relação à disponibilidade de recursos hídricos nas bacias hidrográficas.

Os modelos de previsão de vazões podem ser divididos em dois grupos: os modelos determinísticos, que descrevem os processos físicos a partir de equações conceituais ou empíricas, e os modelos estocásticos, que utilizam leis probabilísticas.

Dentre os modelos determinísticos, alguns são conceituais, pois utilizam as leis da física, e outros são empíricos caso sua formulação utilize funções sem nenhuma relação com os processos físicos, ficando conhecidos também como caixa-preta. Dentre os modelos conceituais, destacam-se os modelos do tipo chuva-vazão, que, como o nome indica, buscam reproduzir, através de equações matemáticas e procedimentos, a transformação chuva-vazão em uma bacia, ou seja, a transformação da água que entra no sistema como precipitação em vazão (KRAUSKOPF NETO, 2005).

Os modelos estocásticos de previsão de vazões tomam como base o histórico de afluências para um determinado local. Os modelos determinísticos, por sua vez, utilizam como entrada diversas variáveis relacionadas à bacia hidrográfica onde se desejam realizar as previsões, tentando descrever a ocorrência de precipitações, os reservatórios por onde passa a água, as condições de uso do solo na bacia e a formação das afluências propriamente ditas (GUILHON, 2002).

Os modelos também podem ser divididos entre concentrados, quando não se leva em conta a variabilidade espacial de seus dados, e distribuídos, quando as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e do tempo (GUILHON, 2002).

2.4 Mudanças Climáticas Globais

Apesar das grandes incertezas envolvidas, a partir da década de 1950, diversas mudanças climáticas têm sido observadas em diferentes regiões do planeta: a atmosfera e os oceanos se aqueceram, os níveis do mar aumentaram, e as concentrações de gases de efeito estufa (GEE)² aumentaram (IPCC, 2013). As tendências de aumento de temperatura podem ser observadas na figura 1. Nas áreas em branco da figura, não há dados suficientes.

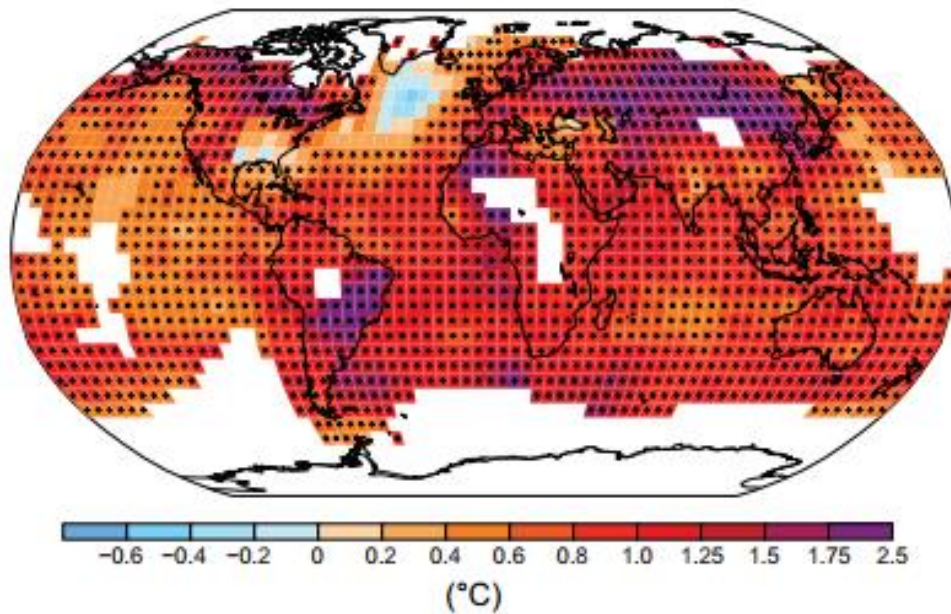


Figura 1: Mudanças nas temperaturas médias na superfície terrestre entre 1901 e 2012. (IPCC, 2013)

O primeiro estudo realizado sobre o efeito estufa foi publicado em 1824 pelo físico e matemático francês Jean Baptiste Joseph Fourier. FOURIER (1824, apud FIGUEIREDO *et al.*, 2012) diz que a atmosfera terrestre produz um efeito semelhante ao de uma estufa, aprisionando parte da energia refletida pelo planeta. Um dos primeiros a formular a hipótese do aquecimento causado pelo CO₂ foi o químico sueco Svante Arrhenius, chegando a quantificar em 1896 o aquecimento em função do aumento da concentração atmosférica de CO₂. (FIGUEIREDO *et al.*, 2012)

² Os GEE são o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), carbono-fluorados (HFCs e PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF₆) (HENRIQUES JUNIOR, 2010)

A Figura 2 representa esquematicamente o efeito estufa: a radiação solar penetra na superfície terrestre e volta ao espaço, mas parte dela é aprisionada na atmosfera devido à presença dos gases de efeito estufa.

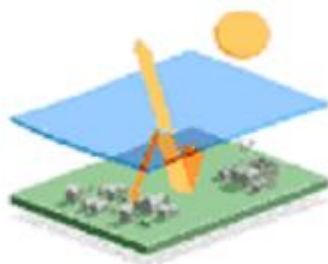


Figura 2: Representação do efeito estufa. (Adaptado de <www.centroclima.coppe.ufrj.br/new2/ini_efeito_estufa.htm>)

O efeito estufa existe no planeta independentemente da ação do homem, porém ele tem sido intensificado pelas emissões antropogênicas desde a Revolução Industrial no Século XVIII (HENRIQUES JUNIOR, 2010). O IPCC (2013) ratifica a hipótese de aquecimento global antropogênico e aponta a crescente concentração de GEE na atmosfera como o principal causador das mudanças climáticas globais.

2.4.1 O Quinto Relatório do IPCC e os Cenários de Forçamento Radiativo (RCP)

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC na sigla em inglês) é um órgão da ONU criado em 1988 com a função de avaliar o estado atual do conhecimento científico sobre mudanças climáticas e seus potenciais impactos ambientais e socioeconômicos. O IPCC baseia suas avaliações na literatura técnico-científica já publicada: ele avalia em intervalos regulares o conhecimento a respeito das mudanças climáticas. Atualmente 195 países são membros do IPCC.

O 5º Relatório (AR5 - *Fifth Assessment Report* em inglês) do IPCC consiste de três grupos de trabalho e um relatório síntese. A divisão dos grupos é a seguinte:

Grupo 1: avalia os aspectos científicos do sistema climático e suas mudanças (IPCC, 2013);

Grupo 2: avalia os impactos naturais e socioeconômicos, adaptação e vulnerabilidade (IPCC, 2014a);

Grupo 3: avalia as opções para mitigação das mudanças climáticas (IPCC, 2014b).

No presente trabalho, serão considerados apenas os dados do relatório do primeiro grupo de trabalho, publicado em 2013 (IPCC, 2013).

Até o seu 4º Relatório (AR4, publicado em 2007) os cenários do IPCC eram desenvolvidos a partir de uma série de fatores socioeconômicos que influenciam as emissões de gases de efeito estufa e geram impactos na atmosfera e nos processos climáticos. Os cenários socioeconômicos, com dados de crescimento populacional e da economia global, projeções sobre energia, indústria e transportes, eram elaborados por um grupo, em seguida outro grupo desenvolvia os cenários de emissões de CO₂, CH₄, N₂O e outros GEE, gerando assim os cenários de forçamento radiativo, com previsões sobre concentrações atmosféricas dos gases e dados sobre o ciclo do carbono no planeta (IPCC, 2000). Em seguida, cenários climáticos globais eram gerados por outro grupo, com dados previstos de temperatura, precipitação, eventos extremos entre outros, e finalmente os estudos de impactos locais, adaptação e vulnerabilidade eram realizados por equipes especializadas em recursos hídricos, ecossistemas, segurança alimentar, saúde e outros temas socioeconômicos.

Essa abordagem, dita sequencial, gerava atrasos no desenvolvimento do cenário de emissões, causados pela dificuldade na obtenção de dados de Produto Interno Bruto, crescimento populacional, usos do solo, entre outros. Mais importante, tal abordagem não permite a avaliação integrada de opções de mitigação e adaptação, uma vez que os impactos de mudanças climáticas, assim como as possíveis alternativas de adaptação, dependem de como o mundo irá evoluir em termos socioeconômicos e tecnológicos até o final do século.

Para facilitar a elaboração de cenários e seu uso em pesquisa sobre impactos e adaptação, foi criada uma outra abordagem, descrita como “paralela”, para a criação e uso de cenários (MOSS *et al.*, 2010). Ao invés de tomar como base os dados socioeconômicos detalhados, gerar cenários de emissões e em seguida cenários climáticos, a abordagem paralela começa com a identificação das características dos cenários climáticos futuros, em especial a evolução do nível de forçamento radiativo³ até 2100. Essas trajetórias de forçamento radiativo não são relacionadas a um único cenário socioeconômico ou de

³ O forçamento radiativo define-se como o aumento efetivo da radiação que incide sobre a terra, produzida por perturbações do balanço energético entre o topo da troposfera (tropopausa) e a superfície terrestre, de maneira a atingir um novo equilíbrio térmico na superfície. Tais perturbações podem ocorrer via o aumento da concentração dos GEE na atmosfera (FURTADO, 2012).

emissões: ao contrário, podem resultar de diversas combinações de projeções econômicas, tecnológicas, demográficas e políticas (MOSS *et al.*, 2010).

A comunidade científica estabeleceu quatro caminhos representativos de concentração (“*representative concentration pathways*”, RCPs na sigla em inglês). Os RCPs são chamados representativos pois cada um deles apresenta um de vários cenários possíveis que levariam às mesmas características de forçamento radiativo. Os quatro cenários são apresentados na tabela 2.

Tabela 2: Caminhos representativos de concentração (RCPs). Adaptada de MOSS *et al.* (2010)

Nome	Forçamento Radiativo	Concentração (p.p.m.)	Caminho	Modelo
RCP 8.5	> 8.5 W/m ²	> 1370 CO ₂ equiv. em 2100	Crescimento	MESSAGE
RCP 6.0	~ 6 W/m ² (estabilização após 2100)	~ 850 CO ₂ equiv. (estabilização após 2100)	Estabilização sem overshoot	AIM
RCP 4.5	~ 4.5 W/m ² (estabilização após 2100)	~ 650 CO ₂ equiv. (estabilização após 2100)	Estabilização sem overshoot	GCAM
RCP 2.6	Pico de ~ 3 W/m ² antes de 2100 e declínio	Pico de ~ 490 CO ₂ equiv. antes de 2100 e declínio	Pico e declínio	IMAGE

Com a abordagem paralela, os modelos climáticos e os socioeconômicos/de emissões são elaborados simultaneamente, e não sequencialmente, acelerando as pesquisas. Além disso, o foco em poucos RCPs, bem definidos e universalmente utilizados, diminui a necessidade de recursos computacionais (MOSS *et al.*, 2010).

2.4.2. Modelos Climáticos de Circulação Global (*General Circulation Models - GCMs*)

Modelos climáticos são a ferramenta mais importante para o estudo das mudanças climáticas e para a elaboração de projeções para o clima ao longo do Século XXI e mesmo após 2100 (IPCC, 2013; CHOU *et al.*, 2014a). Um modelo climático de circulação global - GCM (*General Circulation Model*: MOSS *et al.*, 2010; também chamado *Global Climate Model* por CHOU *et al.*, 2014) tem como função primária a descrição das dinâmicas dos componentes do sistema climático global (atmosfera, oceano, terras e gelo) e a realização de projeções baseadas em mudanças nos diversos ciclos biogeoquímicos, como os ciclos do carbono, do enxofre e do ozônio (IPCC, 2013).

Os GCMs se baseiam em leis fundamentais da natureza, como conservação da energia, da massa e do momento (IPCC, 2013). Para cada um dos quatro cenários definidos pelos RCPs, os GCMs podem ser utilizados para estimar os impactos do forçamento radiativo no clima global, como aumento de temperatura, aumento do nível dos oceanos (que ao reter mais calor se expandem), mudanças nos padrões de precipitação, derretimento de geleiras, entre outros.

As limitações dos GCMs estão ligadas às exigências consideráveis de processamento necessárias para a representação do clima de todo o planeta em um único modelo. Durante a elaboração de um GCM, é necessária a escolha de um tamanho de grade, normalmente descrito como a resolução do modelo. Modelos de resolução maior podem descrever com maior precisão os processos físicos. Além disso, o clima global contém inúmeros processos de maior ou menor importância relativa, assim, alguns processos físicos devem ser excluídos durante a elaboração do modelo, considerando as limitações de custo e de tempo.

Com o aumento da capacidade de processamento dos computadores, a tendência é que os modelos possuam um tamanho de grade horizontal cada vez mais reduzido, permitindo melhor resolução e melhor descrição dos processos físicos. Entre o 4º e o 5º relatórios do IPCC, os GCMs foram consideravelmente melhorados, principalmente em relação à precipitação, que teve um aumento na sua correlação espacial (CHOU *et al.*, 2014a).

Segundo o IPCC (2013), modelos globais com tamanho de grade de até 3,5 km já foram testados, mas só podem ser utilizados para simulações de no máximo um a dois anos nos supercomputadores mais rápidos disponíveis, porém no futuro eles poderão ser utilizados para projeções de longo prazo. O uso de modelos desta resolução trará grandes avanços, principalmente ao possibilitar a modelagem de nuvens individuais, tornando assim mais precisas as projeções de eventos extremos locais. Na prática, atualmente os GCMs mais usados têm tamanho de grade na casa das centenas de quilômetros (SANTANA, 2013, CHOU *et al.*, 2014), e o custo e o tempo de processamento para que um GCM consiga representar em detalhes a atmosfera terrestre ainda são elevados.

Para que os dados de GCMs possam ser utilizados em estudos de impactos regionais, frequentemente são utilizadas técnicas de *downscaling* para reduzir a resolução espacial ou temporal dos resultados de GCMs. O *downscaling* dinâmico é uma técnica de adensamento em que se utiliza um modelo atmosférico de resolução mais alta (modelo regional), alimentado nas suas fronteiras pelas condições do modelo global (SANTANA, 2013). Essa modelagem regional permite chegar a uma resolução espacial que possibilita uma análise hidrológica mais completa (LUCENA, 2010).

2.4.3. Impactos de Mudanças Climáticas sobre Recursos Hídricos

A variabilidade climática tem sido frequentemente estudada como um processo estacionário (suas propriedades estatísticas são consideradas constantes ao longo do tempo), enquanto as mudanças climáticas são processos não-estacionários (CALLAWAY, 2004). Normalmente, pressupõe-se no planejamento da operação e expansão de sistemas energéticos que variáveis climáticas são estacionárias (LUCENA, 2010). Porém, ao longo do Século XXI, as mudanças climáticas globais poderão afetar a média e a distribuição da temperatura e da precipitação, tornando os modelos estocásticos (baseados no histórico) e estacionários pouco adequados para gerar cenários de longo prazo. Por outro lado, modelos não-estacionários, com variáveis climáticas, podem gerar cenários futuros com características de precipitação, temperatura, escoamento ou evapotranspiração diferentes das observadas na série histórica, podendo contribuir para o projeto de estruturas como barragens, reservatórios e estruturas para controle de cheias (TRAMBLAY *et al.*, 2012).

O quinto relatório do IPCC (2013) afirma, com base em ampla revisão de literatura, ser virtualmente certo (99 a 100% de probabilidade) que a troposfera vem esquentando desde meados do Século XX. Cada uma das três últimas décadas teve temperaturas médias globais sucessivamente mais quentes do que qualquer década antecedente desde 1850 (IPCC, 2013).

Em relação às precipitações, o IPCC aponta um nível de certeza menor. No hemisfério norte extratropical⁴, há uma alta confiança de que houve mais áreas onde a frequência e a intensidade de precipitações extremas aumentaram, desde 1951, do que áreas onde as mesmas diminuíram. Para o resto do planeta, o IPCC (2013) faz a mesma afirmação, mas com baixo nível de confiança.

WESTRAL *et al.* (2013) analisaram dados de precipitação máxima anual de 8326 estações em todo o planeta entre 1900 e 2009, e apontam tendências estatisticamente significantes, com cerca de dois terços das estações mostrando aumentos dos valores. Para cada grau kelvin de aumento na temperatura global, a maior precipitação anual teve um aumento mediano de 7,7%: uma correlação estatística significativa (WESTRAL *et al.*, 2013).

O IPCC (2013) aponta com uma confiança média que a influência antropogênica contribuiu para uma maior intensidade de altas precipitações na segunda metade do Século XX.

⁴ Latitudes acima do trópico de Câncer

Para as médias anuais globais de precipitação, o IPCC (2013) aponta uma relação aproximadamente linear entre a precipitação global e a temperatura global. Dependendo dos cenários de forçamento radiativo, o aumento previsto nas precipitações globais é de 1 a 3% a cada grau Celsius de aumento na temperatura média global. Esses resultados são consistentes com um aumento na evapotranspiração global, causado pelas maiores temperaturas. Por outro lado, em escala regional, mudanças mais relevantes para mais ou para menos são possíveis, causadas tanto por mudanças na circulação atmosférica global quanto por mudanças locais, por exemplo no uso do solo.

Em relação a mudanças na ocorrência de secas, há um nível de confiança muito menor. Secas são fenômenos complexos que envolvem diversas variáveis como precipitação, evapotranspiração, umidade do solo e vento. O IPCC (2013) aponta baixa confiança na detecção e atribuição de mudanças na ocorrência global de secas desde meados do Século XX.

Em algumas regiões do planeta, o tempo de recorrência (TR) de eventos extremos de precipitação já tem aumentado significativamente, como no estado americano de Maine, onde uma precipitação com TR de 50 anos no período de 1950-1980 passou a ter TR de 12 anos no período de 1981-2010 (DANDY, 2013). Na Inglaterra e no País de Gales, em 2000 ocorreu a maior enchente observada em um outono desde 1766. PALL *et al.* (2011) utilizaram um modelo atmosférico de previsão por conjunto (*ensemble*) para verificar se a enchente podia ser atribuída às mudanças climáticas globais de origem antrópica. O modelo gerou milhares de cenários a partir de duas condições distintas: a primeira com os dados atmosféricos observados de 1900 a 2000, e a segunda representando uma condição hipotética sem emissão antropogênica de gases de efeito estufa ao longo do Século XX. Em nove a cada dez resultados dos conjuntos de simulações, o modelo a partir de condições realísticas apresentou risco de enchentes 20% maior do que o modelo sem emissões. Em dois a cada três resultados, o risco era 90% maior, apontando portanto as mudanças climáticas globais como causa provável da enchente observada.

VOGEL (2011) aponta um aumento no número de cheias nas últimas décadas em diversas localidades dos Estados Unidos, principalmente áreas urbanas, e conclui que a não estacionariedade das cheias pode resultar de mudanças climáticas, de uso de solo e de usos das águas. As prováveis interações entre os três processos dificultam a atribuição das tendências a uma causa específica.

Com as mudanças climáticas, eventos extremos como enchentes e furacões podem se tornar mais frequentes em determinadas regiões e a necessidade de mudanças na infraestrutura para proteger a população exige planejamento de longo prazo e comunicação entre engenheiros, *stakeholders* e comunidades (DANDY, 2013). Assim, projeções climáticas de

eventos extremos futuros também têm um papel importante, permitindo adaptações da sociedade. Porém, eventos extremos são difíceis de serem modelados, pois fenômenos como fortes precipitações são locais, e seus valores são diluídos em um modelo de baixa resolução (KAMIGUCHI *et al.*, 2006). Segundo DASTAGIR (2014), os modelos que têm conseguido reproduzir bem as intensidades observadas de precipitações extremas são aqueles com resolução menor ou igual a 50 km.

Os efeitos das mudanças climáticas podem variar enormemente de um local para outro: na Noruega, por exemplo, a maioria dos cenários aponta maiores médias anuais de precipitação e de temperatura, levando a um aumento do potencial de geração hidroelétrica e redução na demanda por aquecimento (SELJOM *et al.*, 2011). Por outro lado, na Zâmbia, no sul da África, as mudanças climáticas e o aumento de usos consuntivos da água devem reduzir gradualmente o potencial hidroelétrico da bacia do rio Zambeze, tanto para as usinas existentes como para as projetadas para o futuro (YAMBA *et al.*, 2011).

Os impactos positivos e negativos das mudanças climáticas globais sobre o setor energético foram discutidos em SCHAEFFER *et al.* (2012), sob a ótica a oferta e da demanda e também em relação a outros aspectos como o transporte e a infraestrutura de energia, assim como efeitos indiretos a partir de outros setores econômicos. Em relação às fontes de energia, os autores discutem os impactos de mudanças climáticas sobre energias renováveis, como hidrelétrica, eólica, solar, biomassa, assim como sobre a exploração de combustíveis fósseis. Especificamente em relação à hidroeletricidade, os autores ressaltam que as variações naturais do clima já têm grande influência sobre o planejamento e operação desta fonte de energia, devido à dependência do ciclo hidrológico. Mudanças nas condições climáticas poderão aumentar ainda mais as incertezas sobre a energia gerada em sistemas hidroelétricos, o que é especialmente importante em países como o Brasil e a Noruega, onde esta é a principal fonte de energia elétrica: nesses países os aproveitamentos hidroenergéticos devem ser operados de forma mais conservadora para garantir o suprimento constante de energia elétrica, especialmente nos horários de pico de consumo. Por outro lado, no Brasil, a transmissão de energia entre regiões distantes, com características climáticas diferentes, ajuda a otimizar a operação do sistema ao compensar variações sazonais específicas.

GOLOMBEK *et al.* (2011) escolhem três impactos principais das mudanças climáticas na geração de energia elétrica:

- a) Mudanças na demanda de energia devido a mudanças na demanda por aquecimento e refrigeração,

b) Mudanças no potencial hidroelétrico devido a mudanças de precipitação e temperatura, e

c) Mudanças na geração térmica devido à maior temperatura da água para resfriamento, reduzindo a eficiência de usinas termoelétricas.

Os autores apontam outro efeito provável das mudanças climáticas, a mudança nos regimes de ventos impactando a geração eólica, porém consideram que as incertezas neste processo são tão grandes que ainda não é possível modelá-lo.

Dentre os efeitos apontados por GOLOMBEK *et al.* (2011), o presente trabalho se restringirá ao segundo, efeito da maior importância no Brasil, tendo em vista a predominância da hidroeletricidade na matriz energética e a grande variabilidade climática de um país de dimensões continentais.

2.4.4. Modelagem Hidrológica e Mudanças Climáticas no Brasil

No Brasil, alguns trabalhos já foram publicados associando modelos hidrológicos a cenários de mudanças climáticas, para algumas das principais bacias do país.

TOMASELLA *et al.* (2009) estudaram os impactos de mudanças climáticas na bacia do rio Tocantins, com dados do modelo regional Eta e do modelo global HadCM3, que foram utilizados como dados de entrada do modelo hidrológico MGB (Modelo de Grandes Bacias). As principais conclusões são uma redução de vazões médias em todas as sub-bacias, com o período mais crítico correspondendo ao final do Século XXI, e uma redução no armazenamento subterrâneo de água, afetando fortemente os aquíferos sedimentares.

NÓBREGA *et al.* (2010 apud SANTANA *et al.*, 2011) avaliaram, para a bacia do rio Grande, entre os estados de Minas Gerais e São Paulo, a questão da incerteza nas previsões de clima futuro. Os dados para o futuro gerados por seis modelos climáticos de circulação global foram utilizados para alimentar o modelo hidrológico MGB-IPH. Os resultados variam entre aumentos e reduções de vazão, dependendo do modelo climático adotado.

SANTANA *et al.* (2011) utilizaram dados do modelo regional Eta, operado pelo CPTEC/INPE, a partir do *downscaling* de cenários do modelo global HadCM3, para gerar cenários de vazão para a da bacia do rio São Francisco, utilizando o modelo hidrológico MGB-IPH. Os autores dividiram os cenários em períodos de 30 anos: 2010-2040, 2040-2070 e 2070-2099, e também geraram um cenário passado, de 1960 a 1990, para comparação e validação com os dados observados. Foram utilizados dois cenários de emissões do 4º Relatório do IPCC, um mais otimista (B2), e um mais pessimista (A2), com emissões mais elevadas e maiores alterações no clima global. Os resultados apontam uma tendência a precipitações e vazões mais baixas no final do Século XXI. A tabela 3 apresenta as variações percentuais, entre os

períodos de 1960-1990 e 2070-2099 das precipitações médias na bacia do São Francisco, e das vazões em diferentes trechos do rio, de montante a jusante. Com exceção da vazão em Três Marias gerada em um dos cenários, todas as outras vazões apresentaram queda.

Tabela 3: Variações das precipitações (modelo Eta-HadCM3) e vazões (modelo MGB-IPH) entre 1960-90 e 2070-99. Elaboração própria, baseado em SANTANA *et al.* (2011)

Variação (1960-1990 a 2070-99)	Cenário B2 (otimista)	Cenário A2 (pessimista)
Variação nas precipitações médias na bacia	-10% a -15%	-20% a -25%
Variação nas vazões em Três Marias	+ 2,32%	-25,91%
Variação nas vazões em Sobradinho	-11,83%	-34,71%
Variação nas vazões na Foz do São Francisco	-15,56%	-38,44%

As vazões da tabela 3 correspondem ao percentil de 90%, ou seja, à vazão Q_{90} , aquela que é excedida em 90% do tempo. Portanto, os resultados são preocupantes, pois apontam para uma queda nas vazões asseguradas em uma região que já sofre com a escassez hídrica e depende fortemente do rio São Francisco.

Dentre os impactos causados pela redução de vazões apontada por SANTANA *et al.* (2011), SANTANA (2013) se concentra nos impactos na produção de energia em Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs). Com uma metodologia semelhante à descrita anteriormente, incluindo o ajuste de um modelo hidrológico (Modelo de Grandes Bacias – MGB) na bacia do São Francisco, alimentado pelas projeções climáticas futuras para a região, o estudo conclui que as PCHs garantirão no final do Século XXI cerca de 30% de energia a menos, se comparadas à geração assegurada atual, chegando a quase 50% de redução no pior caso (SANTANA, 2013).

Ao contrário dos trabalhos citados nesta seção, que utilizaram os cenários de emissões do 4º Relatório do IPCC, o presente trabalho utilizou os RCPs, do 5º e mais recente relatório do IPCC. Ademais, o estudo de caso aqui apresentado avalia a região hidrográfica de Camargos na bacia do Rio Grande, para a qual ainda não há estudos detalhados disponíveis.

3. Estudo de Caso: Metodologia e Base de Dados

3.1. Bacia do Grande e sub-bacia de Camargos

A Bacia Hidrográfica do Rio Grande está localizada na Região Hidrográfica Paraná que, em conjunto com as Regiões Hidrográficas Paraguai e Uruguai, compõe a Bacia do Prata. Abrange área de drenagem de 143.437,79 km², dos quais 86.345,43 km² (60,2%) estão no estado de Minas Gerais e o restante no estado de São Paulo (IPT, 2008).

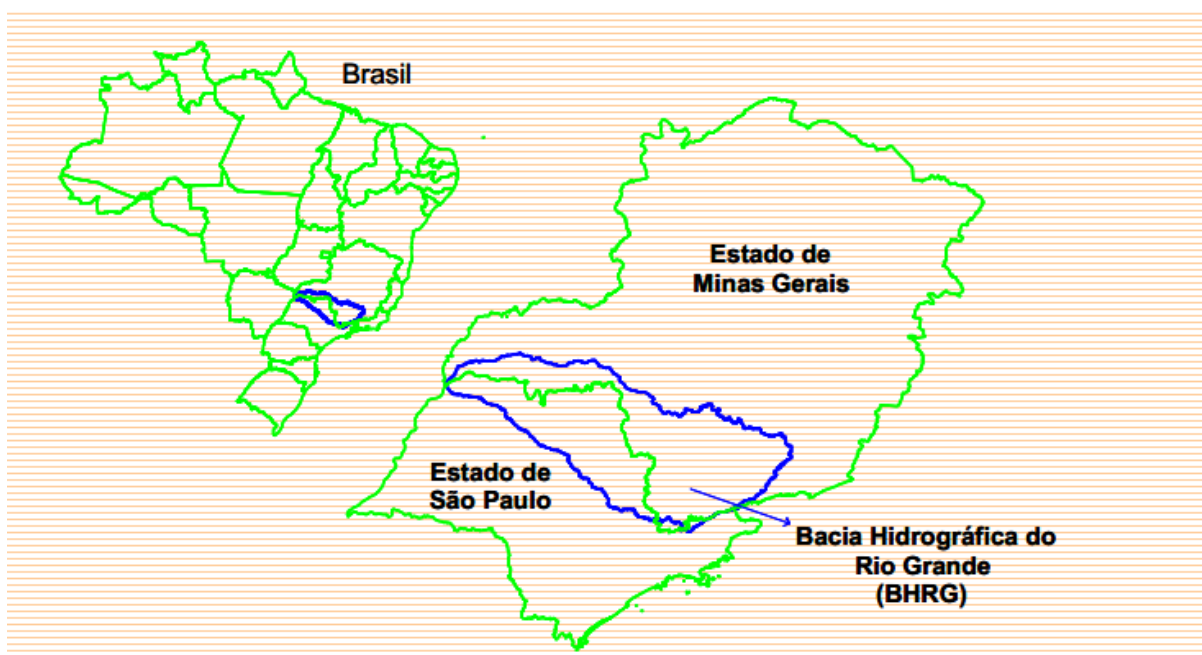


Figura 3: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Grande (IPT, 2008)

O Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Grande, com área de atuação nos Estados de Minas Gerais e São Paulo, foi instituído em 2010 pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH, 2010). Os comitês de bacia fazem parte da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída em 1997, mas seus instrumentos têm demorado a ser implementados nas diferentes bacias brasileiras. A PNRH estabelece a bacia hidrográfica como unidade de gestão dos recursos hídricos (BRASIL, 1997), e os comitês de bacia têm importância especial em bacias que atravessam dois ou mais estados, como é o caso da bacia do Rio Grande.

A bacia do rio Grande é uma bacia estratégica em relação à energia armazenada, pois possui atualmente doze barragens em cascata, listadas de montante a jusante: Camargos, Itutinga, Funil, Furnas, Mascarenhas de Moraes, Estreito, Jaguará, Igarapava, Volta Grande, Porto Colômbia, Marimondo e Água Vermelha; além de parte do reservatório de Ilha Solteira (IPT, 2008). Grande parte das barragens citadas tem reservatórios com capacidade de

regularização plurianual das vazões, que permitem a geração de energia elétrica ao longo do ano, incluindo no período seco e em anos de hidrologia desfavorável, tendo também um papel importante no controle de cheias. Os rios Grande e Paranaíba formam, ao se encontrarem, o rio Paraná, onde se localiza a usina de Itaipu, a segunda maior usina hidrelétrica do mundo em potência instalada, superada apenas pela de Três Gargantas na China. É importante ressaltar que, embora a usina chinesa tenha potência total de 22.500 MW e Itaipu tenha 14.000 MW (TORINO *et al.*, 2014), a usina brasileira ainda é a que mais gera energia por ano no mundo, graças à regularização feita nos reservatórios a montante (UHE, 2013).

A área de captação, ou bacia incremental, da Usina Hidrelétrica de Camargos é uma sub-bacia da bacia do Rio Grande com área de drenagem de 6.280 km². A sub-bacia localiza-se no sul do estado de Minas Gerais, próximo aos municípios de São João Del Rei e Barbacena. Seus dois principais cursos d'água são o próprio rio Grande, que tem sua nascente na região, e o rio Aiuruoca. O relevo da região é predominantemente montanhoso, com declividades consideráveis. Quanto às precipitações, a região tem dois períodos bem marcados: o período seco, aproximadamente de maio a outubro, e o período chuvoso de novembro até abril. (EUCLYDES *et al.*, 2006)

Além da importância do Rio Grande descrita acima, outro fator foi importante para a escolha da área de estudo: na região há um número de estações pluviométricas suficiente para a cobertura da bacia incremental, ao contrário de outras regiões do país, onde a escassez de dados dificulta a modelagem hidrológica. A Organização Meteorológica Mundial (OMM) recomenda, para regiões planas de zonas temperadas, mediterrâneas e tropicais, a densidade mínima de uma estação por 600 a 900 km² (OLIVEIRA, 2008). Essa densidade é necessária para que haja uma cobertura adequada da bacia incremental, possibilitando a obtenção de dados hidrológicos confiáveis (GUILHON, 2002).

3.2. Metodologia

A metodologia deste trabalho é semelhante às utilizadas por TOMASELLA *et al.* (2009), SANTANA *et al.* (2011), e SANTANA (2013) para simular os impactos das mudanças climáticas em outras bacias do Brasil, porém com algumas diferenças, a principal delas sendo o uso do modelo SMAP, enquanto os trabalhos citados acima utilizaram o modelo MGB para a previsão de vazões. Outra diferença relevante é o uso de cenários baseados nos RCPs, que se tornaram padrão no estudo de mudanças climáticas nos últimos anos (IPCC, 2013; MOSS *et al.*, 2010). A metodologia é resumida no fluxograma da Figura 4, que mostra os dados de entrada dos SMAP

– precipitação e evapotranspiração potencial (ETP) – e os dados de saída – vazão natural em Camargos.

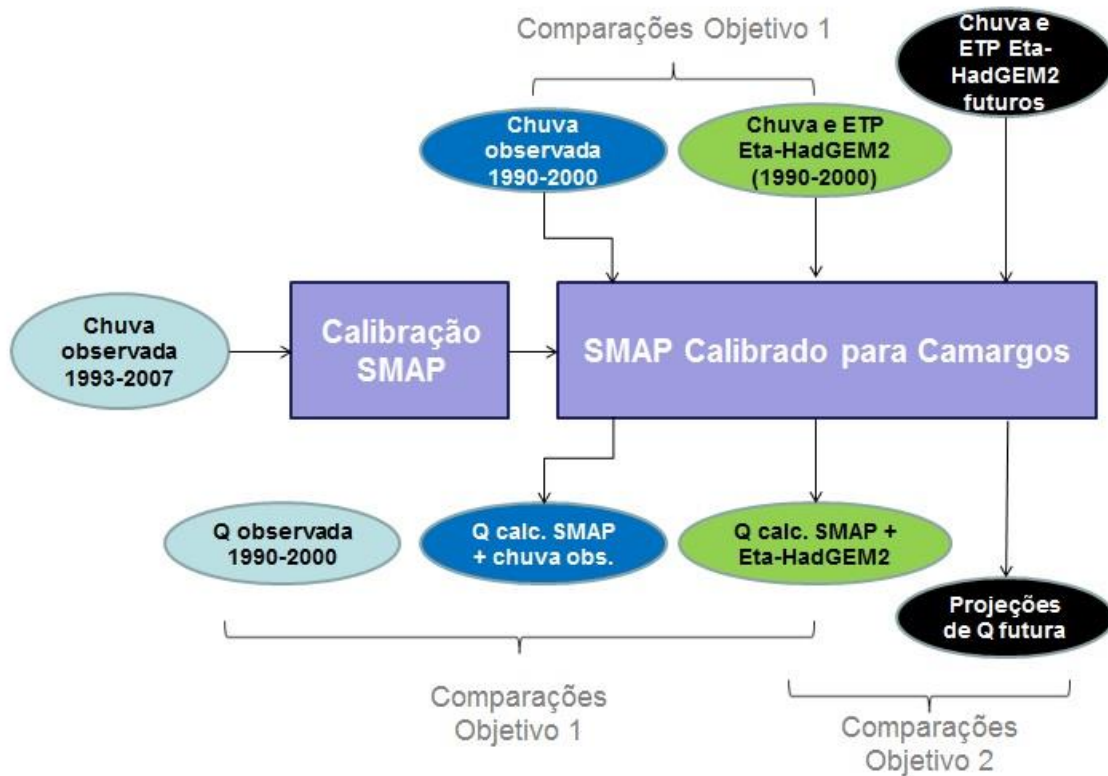


Figura 4: Resumo da Metodologia (Elaboração Própria)

3.2.1. Modelo SMAP

O modelo hidrológico SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) é um modelo determinístico conceitual e concentrado, do tipo chuva–vazão (características definidas na seção 2.3 sobre Modelagem Hidrológica), desenvolvido pela equipe do engenheiro João Eduardo Lopes e apresentado em Lopes *et al.* (1982). O modelo é usado para calcular a vazão natural em cursos d’água, ou seja, a vazão sem os impactos da interferência humana na sua bacia hidrográfica (LONGHI *et al.* 2011).

O modelo é constituído por três reservatórios lineares que reproduzem o comportamento da superfície, do solo e do subsolo. As variáveis de entrada para sua calibração são a precipitação prevista, a precipitação observada e a vazão observada. O modelo utiliza a distribuição espacial e temporal da precipitação observada dos postos para calcular a precipitação média na bacia. Parte da precipitação não infiltra no solo e gera o escoamento direto, sendo representada no reservatório de superfície, em função da constante de recessão superficial ($K2t$). A parte restante da precipitação vai para o reservatório do solo e uma parte desta esco para o reservatório do subsolo, em função dos seguintes parâmetros:

capacidade de campo (Capc), saturação do solo (Str) e capacidade de recarga do subsolo (Crec). O escoamento de base é gerado a partir do reservatório do subsolo, em função da constante de recessão diária do subsolo (Kkt). Finalmente, a vazão diária do curso d'água é então calculada através da equação 3.1:

$$Q_{(i)} = \frac{(Ed_{(i)} + Eb_{(i)}) \times Ad}{86,4} \quad (3.1)$$

Onde:

- $Q_{(i)}$ – Vazão calculada (m^3/s);
- $Ed_{(i)}$ – Escoamento direto (mm);
- $Eb_{(i)}$ – Escoamento de base (mm);
- Ad – Área de drenagem da bacia (km^2);

A figura 5 apresenta um esquema do modelo SMAP, com seus três reservatórios:

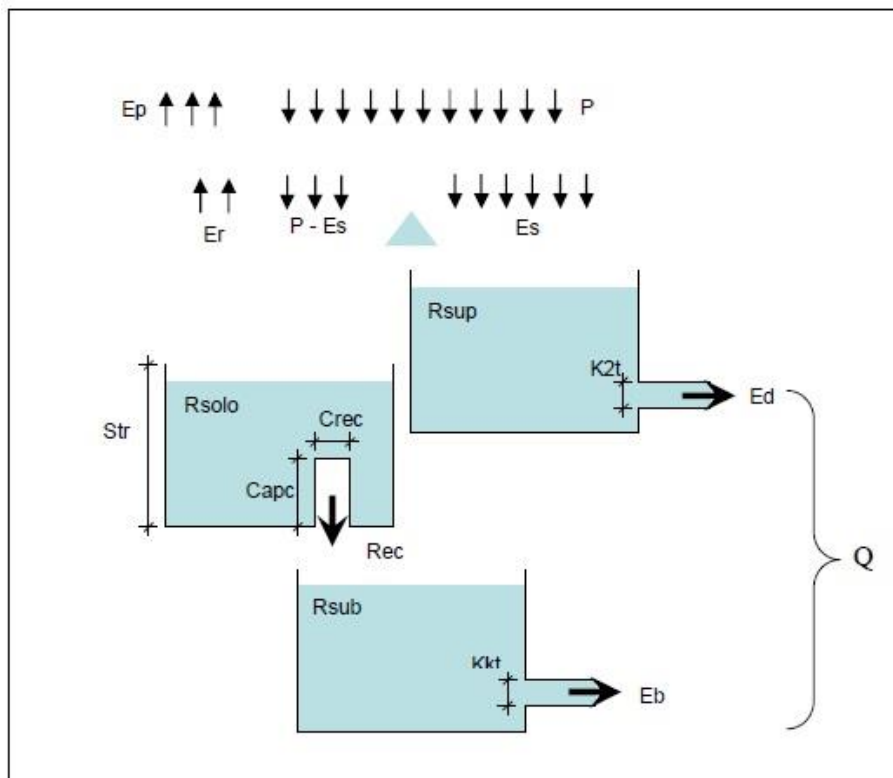


Figura 5: Esquema do modelo SMAP (NOLASCO, 2009)

A variação dos níveis dos reservatórios segue as equações 3.2:

$$Rsolo_{(t)} = Rsolo_{(t-1)} + P_{(t)} - Es_{(t)} - Er_{(t)} - Rec_{(t)}$$

$$Rsup_{(t)} = Rsup_{(t-1)} + Es_{(t)} - Ed_{(t)}$$

$$Rsub_{(t)} = Rsub_{(t-1)} + Rec_{(t)} - Eb_{(t)}$$

(3.2)

Onde:

- $Rsolo_{(t)}$ – reservatório do solo no instante de tempo t (mm);
- $Rsup_{(t)}$ – reservatório da superfície da bacia no instante de tempo t (mm);
- $Rsub_{(t)}$ – reservatório do subsolo no instante de tempo t (mm);
- $P_{(t)}$ – precipitação média na bacia no instante de tempo t (mm);
- $Es_{(t)}$ – escoamento superficial no instante de tempo t (mm);
- $Ed_{(t)}$ – escoamento direto no instante de tempo t (mm);
- $Er_{(t)}$ – evapotranspiração real no instante de tempo t (mm);
- $Rec_{(t)}$ – recarga subterrânea no instante de tempo t (mm);
- $Eb_{(t)}$ – escoamento básico (mm) no instante de tempo t;
- Q – vazão de escoamento;
- t: Instante de tempo.

As variáveis de estado iniciais são os níveis dos três reservatórios. As equações 3.3 descrevem os níveis iniciais dos reservatórios:

$$Rsolo_{(0)} = \frac{Tuin}{100} \times Str$$

$$Rsup_{(0)} = \frac{Supin}{(1 - 0,5^{1/K2t}) Ad} \times 86,4$$

$$Rsub_{(0)} = \frac{Ebin}{(1 - 0,5^{1/K2t}) Ad} \times 86,3$$

(3.3)

Onde:

T_{uin} : teor de umidade inicial (%);

E_{bin} : vazão básica inicial (m^3/s);

S_{upin} : vazão superficial inicial (m^3/s);

A_d : área de drenagem (km^2);

K_{kt} : constante de recessão do escoamento básico (dias);

K_{2t} : constante de recessão do escoamento superficial (dias);

S_r : capacidade de saturação do solo (mm).

O teor de umidade inicial do solo deve ser arbitrado, com base na hidrologia local. Como o teor de umidade no período úmido pode variar bastante, o modelo inicia sempre no dia 01/08 do primeiro ano, no período seco, quando o teor de umidade varia menos, e o seu valor inicial será arbitrado como 20% (ONS, 2008b).

A comunicação entre os três reservatórios segue as equações de transferência definidas por Lopes *et. al* (1982), que representam matematicamente fenômenos físicos. Na primeira etapa do cálculo, é feita uma comparação entre a precipitação média e a abstração inicial. Caso a precipitação seja maior que a abstração, o escoamento superficial será gerado conforme a equação 3.4. Caso contrário, o modelo não gera, para aquele dia, nenhum escoamento superficial.

Se $P_{(t)} > A_i \rightarrow S = S_r - R_{solo}_{(t-1)}$

$$E_{S(t)} = \frac{(P_{(t)} - A_i)^2}{P_{(t)} - A_i + S}$$

(3.4)

Se $P_{(t)} \leq A_i \rightarrow E_{S(t)} = 0$

Onde:

S_r : capacidade de saturação do solo (mm)

A_i : abstração inicial (mm)

$E_{S(t)}$: escoamento superficial no instante de tempo t (mm);

Em seguida, o modelo compara a diferença entre a precipitação média e o escoamento superficial com a evapotranspiração potencial. Caso a diferença seja maior que a evapotranspiração potencial, o valor da evapotranspiração real, no dia t , será o mesmo da

evapotranspiração potencial. Caso contrário, o valor da evapotranspiração é calculado através da equação 3.5.

$$\begin{aligned} \text{Se } (P_{(t)} - Es_{(t)}) > ETP_{(t)} &\rightarrow Er_{(t)} = ETP_{(t)} \\ \text{Se } (P_{(t)} - Es_{(t)}) \leq ETP_{(t)} &\rightarrow Er_{(t)} = (P_{(t)} - Es_{(t)}) + (ETP_{(t)} - (P_{(t)} - Es_{(t)})) \times Tu_{(t)} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Onde:

- $ETP(t)$ – evapotranspiração potencial (mm/dia);
- $Tu_{(t)} = \frac{Rsolo_{(t-1)}}{Str}$

Na terceira etapa, para o cálculo da recarga subterrânea, inicialmente o valor do reservatório do solo é comparado com o produto da capacidade de campo pela capacidade de saturação do solo. Caso o valor do produto seja maior do que o do reservatório do solo, não será gerada recarga subterrânea naquele dia. Caso contrário, a recarga é calculada conforme a equação 3.6.

$$\begin{aligned} \text{Se } Rsolo_{(t-1)} > \frac{Capc}{100} \times Str &\rightarrow Rec_{(t)} = \frac{Crec}{100} \times Tu_{(t)} \times (Rsolo_{(t-1)} - \frac{Capc}{100} \times Str) \\ \text{Se } Rsolo_{(t-1)} \leq \frac{Capc}{100} \times Str &\rightarrow Rec_{(t)} = 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Onde:

- $Crec$: parâmetro de recarga subterrânea (%)
- $Capc$: capacidade de campo (%)

As etapas seguintes definem os valores diários de escoamento direto e escoamento básico. Os valores são definidos em função dos respectivos reservatórios, superficial e subterrâneo, e das respectivas constantes de recessão, conforme as equações 3.7 e 3.8.

$$Ed_{(t)} = Rsup_{(t-1)} \times \left(1 - 0,5^{1/K2t}\right) \quad (3.7)$$

$$Eb_{(t)} = Rsub_{(t-1)} \times \left(1 - 0,5^{1/Kkt}\right) \quad (3.8)$$

Onde:

- $K2t$: constante de recessão do escoamento superficial (dias)

Kkt: constante de recessão do escoamento básico (dias)

Após a definição dos parâmetros das equações de transferência, os mesmos são aplicados nas equações que redefinem os valores dos reservatórios. Os valores definidos para escoamento superficial e escoamento básico serão utilizados para o cálculo da vazão diária.

O modelo SMAP foi aplicado com sucesso em diversas bacias brasileiras. No ONS, o modelo vem sendo utilizado desde 2008, em combinação com o modelo estocástico multivariado “MEL”, para a previsão de vazões uma semana à frente da bacia incremental da usina de Itaipu, no rio Paraná.

Posteriormente, o ONS desenvolveu a aplicação deste modelo às bacias dos rios Grande, Paranapanema e Paranaíba. Dentre as vantagens comparativas deste modelo que levaram à sua escolha pelo ONS, pode-se citar o bom desempenho encontrado tanto na fase de testes quanto na operacionalização, a facilidade na obtenção de dados de entrada para as bacias citadas acima, e a facilidade de entendimento da metodologia e do funcionamento do modelo, permitindo a realização de ajustes quando necessário (ONS, 2008b).

3.2.2. Calibração do modelo SMAP

Para utilizar o modelo SMAP, é necessário inicialmente realizar sua calibração, que consiste no ajuste dos parâmetros do modelo. Para tal, foram utilizados dados históricos de vazão em Camargos e de precipitação na bacia incremental. O período utilizado para a calibração foi de 01/08/1993 a 31/12/2007, tendo sido escolhido devido à maior quantidade de dados pluviométricos nesse período. É importante que o período comece na época de estiagem, pois nos períodos secos, os valores de Tuin e Supin (teor de umidade inicial e escoamento superficial inicial, respectivamente: ver mais informações na seção 3.2.1) são baixos, facilitando o início da calibração, enquanto no período úmido estes mesmos valores podem variar bastante.

Os parâmetros de calibração foram otimizados a partir da planilha em Excel criada por J.E. Lopes, onde os parâmetros Str, K2t, Crec, Capc e Kkt foram definidos de forma automática através da ferramenta *Solver*. A otimização da planilha buscou a minimização da soma dos coeficientes de eficiência e de erro relativo.

Soma = Coeficiente Eficiência + Coeficiente de Erro Relativo

O coeficiente de eficiência varia entre $-\infty$ e 1 e é medido através da relação entre o somatório do quadrado da diferença entre a vazão observada e a vazão calculada sobre o

somatório do quadrado da diferença entre a vazão observada e a vazão média observada, conforme demonstrado na equação 3.9:

$$C. \text{ eficiência} = \frac{\sum(\text{obs} - \text{calc})^2}{\sum(\text{obs} - \overline{\text{obs}})^2} \quad (3.9)$$

O coeficiente de erro relativo também varia entre $-\infty$ e 1 e é calculado através da fórmula 3.10:

$$C. \text{ erro} = 1 - \frac{\sum|\text{calc} - \text{obs}|}{\frac{\text{obs}}{n}} \quad (3.10)$$

Onde,

calc: vazão calculada;

obs: vazão observada;

n: número de vazões calculadas.

O primeiro coeficiente dá um maior peso para os desvios para altas vazões (que são mais raras, mas podem ter altos valores absolutos) enquanto o segundo coeficiente enfatiza os desvios para vazões baixas (vazões do período de estiagem).

Os pesos dos postos pluviométricos são estabelecidos pela ferramenta *Solver* do Excel, também de forma a minimizar a soma dos coeficientes descritos acima.

Os parâmetros *Str*, *K2t*, *Crec*, *Capc* e *Kkt*, *Ebin*, *Supin* também são determinados pela ferramenta *Solver*. Após nove iterações, os parâmetros encontrados foram os apresentados na Figura 6.

	A	BBB	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX
1																			Calibração:	Início	Fim	
2																				01/08/1993	31/12/2007	
3																				Objetivo	0,2025	
4																				1-MAPE	0,8625	
5																				C.E. =	0,8514	
6																				C.P. =	-15401	
7																				1-(MAE/8m)	0,8453	
8																				Sign Test	-1753	
9																						
10																						
11																						
12																						
13																						
14																						
15																						
16																						
17																						
18																						
19																						
20																						
21																						
22																						
23																						
24																						
25																						
26																						
27																						
28																						
29																						
30																						
31																						
32																						
33																						
34																						
35																						
36																						
37																						
14																						

Figura 6: Modelo SMAP após calibração (Elaboração própria)

Na Figura 6, os parâmetros definidos pela ferramenta Solver estão nas células em vermelho. Aparecem ainda outros aspectos do SMAP que não foram usados neste trabalho: o 4º Reservatório (cujos parâmetros aparecem nas células BQ3, BQ4 e BQ5) é usado para bacias com significativas planícies de inundação onde são verificados extravasamentos das margens, o que não é o caso do Alto Rio Grande.

Além disso, existem mais dois coeficientes: *Pcof*, de ajuste da chuva média da bacia e *Ecof*, de ajuste da evaporação média da bacia. *Pcof* é multiplicado pela Precipitação Média Diária, sendo usado para minimizar o erro total das precipitações, principalmente em caso de má qualidade dos dados. Como não é o caso da sub-bacia de Camargos, o valor do *Pcof* foi fixado como 1. Já o *Ecof* é multiplicado pela Evapotranspiração Real: neste caso, os dados disponíveis são menos confiáveis, é o *Ecof* foi utilizado, tendo sido encontrado o valor de 1,008 através da ferramenta *Solver*.

3.2.3. Evapotranspiração

A evapotranspiração potencial (ETP) é definida como a quantidade de água transferida à atmosfera por evaporação e transpiração, na unidade de tempo de uma superfície extensa e completamente coberta por vegetação de porte baixo e sem restrições de umidade do solo, ou

seja, em condições ideais (KOBAYAMA & VESTENA, 2006). A evapotranspiração real é aquela que ocorre nas condições reais de fatores atmosféricos e umidade do solo.

Existem diversos métodos para estimar a evapotranspiração potencial (ETP). O Método de Blaney-Criddle foi elaborado em 1950, e posteriormente modificado em 1975. Por depender apenas das temperaturas médias mensais e da latitude, é um método recomendado quando há poucos dados de campo disponíveis. Outros métodos comumente utilizados exigem outros dados de campo: o Método de PENMAN, por exemplo, utiliza a velocidade média diária do vento, dado que não foi obtido para a região estudada. Também foi testado o método de Thorntwaite (FERNANDES *et al.*, 2006), outro método que exige poucos dados de campo, mas o ajuste foi consideravelmente pior do que o observado com a equação de Blaney-Criddle.

O método de Blaney-Criddle calcula a evapotranspiração mensal de uma cultura de referência a partir da equação 3.11 (PITA, 2011):

$$ETP = (0,457 T + 8,13) \cdot P \quad (3.11)$$

Em que:

ETP = evapotranspiração potencial de referência, em mm/mês;

T = temperatura média mensal, em °C ;

P = percentagem mensal das horas anuais de luz solar.

Os valores de P variam em função da latitude local e, para a sub-bacia de Camargos, localizada em torno da latitude 22° Sul, utilizaram-se os valores da tabela 4.

Tabela 4: Percentagem mensal das horas anuais de luz solar, para latitude 22° Sul. (BERNARDO, 1986)

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
9,35	8,12	8,59	7,86	7,75	7,33	7,62	7,95	8,11	8,83	8,97	9,42

Foi utilizada a equação de Blaney-Criddle para os dados médios de temperatura na região do estudo (média histórica mensal entre 1960 e 1990), e os dados de saída foram razoavelmente próximos dos dados de evapotranspiração médios na bacia, no mesmo período, em posse do ONS, como pode-se observar na tabela 5.

Tabela 5: Desvio entre Evapotranspiração Potencial calculada (equação de Blaney-Criddle modificada) e observada (média histórica). (Elaboração própria, a partir de dados internos do ONS)

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
ETP _{calc} (mm) (Blaney-Criddle)	5,25	5,09	4,79	4,32	3,91	3,68	3,65	3,96	4,31	4,70	5,03	5,18
ETP _{obs} (mm) (Média Histórica)	4,94	5,18	4,61	3,83	3,23	2,9	3,35	4,35	4,57	4,81	4,87	4,65
Desvio	+6%	-2%	+4%	+13%	+21%	+27%	+9%	-9%	-6%	-2%	+3%	+11%

Na Tabela 5, o desvio foi calculado como $(ETP_{calc} - ETP_{obs}) / ETP_{obs}$. Pode-se observar que o método de Blaney-Criddle estima razoavelmente bem a evapotranspiração local, com menor precisão no período seco, levando em conta que a evapotranspiração potencial de referência é igual à evapotranspiração potencial local.

O modelo SMAP normalmente utiliza dados médios mensais de evapotranspiração, com base em séries históricas. Neste estudo, foram utilizados os dados de saída de temperatura dos modelos climáticos globais (descritos abaixo, em 3.3) como dados de entrada da equação de Blaney-Criddle (3.11). Foi utilizado o mesmo processo de cálculo da evapotranspiração potencial para os dados futuros e para os dados passados (de 1990 a 2000).

Cabe lembrar o papel da Evapotranspiração Potencial no SMAP: ela é utilizada para o cálculo da Evapotranspiração Real (E_r , descrita na equação 3.5), que por sua vez é utilizada para o cálculo da vazão diária.

3.2.4. Dados de Precipitação Observada e Vazão Observada

Os dados pluviométricos utilizados neste trabalho foram obtidos no Sistema de informações Hidrológicas da ANA (www.hidroweb.ana.gov.br). Foram utilizadas treze estações pluviométricas, resultando em uma densidade, para a sub-bacia de Camargos, de uma estação para 483 km², ou seja, o número de estações é superior ao mínimo recomendado pela OMM. A tabela 6 apresenta os postos pluviométricos utilizados pelo SMAP para a bacia incremental de Camargos. A partir destes dados, o SMAP calcula a precipitação média na bacia. Neste trabalho, considerando que os dados são da série consistida pela ANA, e de boa qualidade, a precipitação média é calculada normalmente pelo SMAP como a média aritmética dos 13

postos. Em outros casos, como a previsão de vazões a curto prazo, com dados recentes, muitas vezes não consistidos e/ou de baixa qualidade, o SMAP pode dar pesos diferentes para os postos pluviométricos, podendo inclusive não considerar os dados de algum posto, de forma a minimizar a soma dos coeficientes de erro, como descrito na seção 3.2.2.

Tabela 6: Postos utilizados pelo SMAP para a sub-bacia de Camargos. (Adaptado de NOLASCO, 2009)

Posto	Código	Longitude (WGS-84)	Latitude (WGS-84)
Aiuruoca	2144018	-44,6014	-21,9786
Alagoa	2244065	-44,6369	-22,1700
Andrelândia	2144019	-44,3122	-21,7458
B.Jardim	2144001	-44,1939	-21,7806
Carrancas	2144038	-44,6433	-21,4842
Carvalhos	2144025	-44,4636	-21,9981
Faz.Laranjeiras	2144021	-44,3531	-21,6708
Faz.Paraíba	2144022	-44,3547	-21,7458
M. de Deus	2144007	-44,3267	-21,4925
Ponte Costa	2244057	-44,4083	-22,1269
S.Vicente	2144010	-44,4389	-21,6992
SE Itutiga	2144039	-44,6297	-21,2978
Vila Rio das Mortes	2144024	-44,3289	-21,1894

Os dados fluviométricos, correspondentes à vazão natural do Rio Grande na Usina Hidrelétrica de Camargos, são fornecidos pelo ONS, e estão disponíveis na internet, no endereço eletrônico <www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx>, que inclui também a metodologia utilizada para a reconstituição das vazões naturais na Atualização de Séries Históricas de Vazões - Período 1931 a 2013 (ONS, 2014).

3.2.5. Dados de modelos climáticos

Os dados utilizados para a elaboração dos cenários deste trabalho são os dados de saída de um modelo climáticos de circulação global - GCM - que, após um *downscaling* por um modelo regional, podem ser usados como dados de entrada do modelo hidrológico SMAP.

O modelo climático utilizado será o HadGEM2 - Hadley Centre Global Environmental Model version 2. Ele começa sua simulação em 1850 e é rodado em supercomputadores para cada ano até 2005; a partir de 2006, as simulações usam os cenários baseados em caminhos representativos de concentração (RCPs na sigla em inglês, descritos na seção 2.4.1),

geralmente estabilizando em 2100. O HadGEM2 é descrito em detalhes por CHOU *et al.* (2014a): ele modela o sistema atmosférico do planeta com uma representação do ciclo do carbono e da química da atmosfera.

Os dados do HadGEM2 passaram por um *downscaling* realizado pelo CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) utilizando o modelo de circulação regional Eta, que tem uma resolução de 20 km e cobre a maior parte da América do Sul e América Central, como pode-se ver na Figura 7 (CHOU *et al.*, 2014a). O CPTEC/INPE vem usando o Eta desde 1997 como modelo de previsão de tempo e desde 2002 como modelo do clima sazonal. A versão climática sazonal do modelo foi adaptada para executar integrações com intervalos de tempo decadal, com o foco em cenários de mudanças climáticas (SANTANA, 2013). As fronteiras laterais são adaptadas a cada 6 horas na simulação, com base no HadGEM2. (CHOU *et al.*, 2014a) A combinação dos dois modelos, Eta e HadGEM2, também será chamada Eta-HadGEM2 neste trabalho.

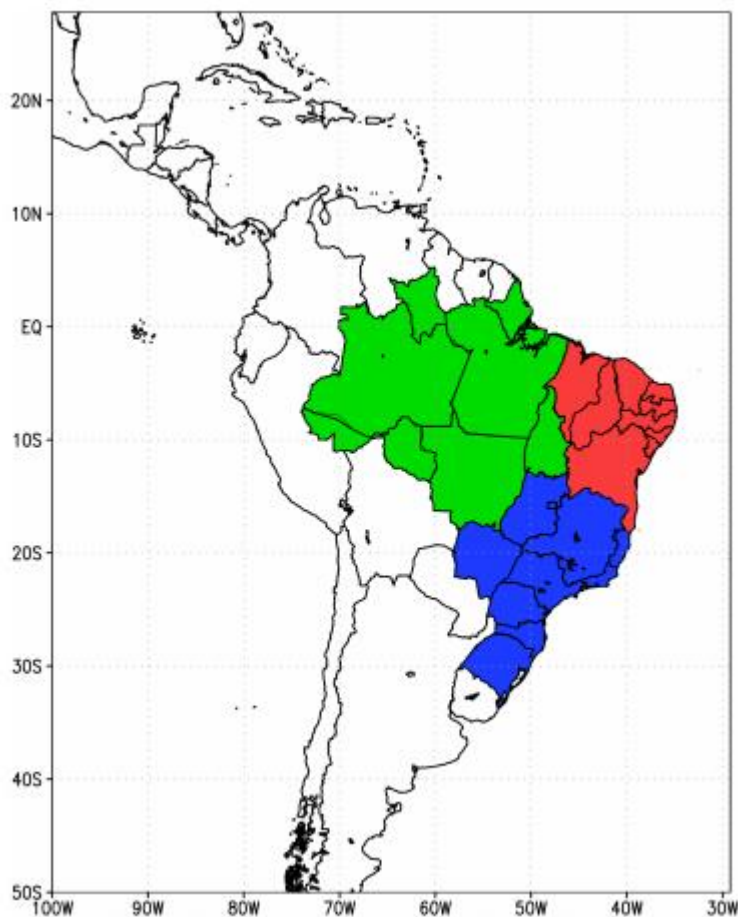


Figura 7: Área coberta pelo modelo Eta, incluindo todo o território continental brasileiro (CHOU *et al.*, 2014a)

Na figura 7, o território brasileiro é dividido por CHOU *et al.* (2014a) em três regiões, sendo que a Bacia do Rio Grande se encontra na região Centro-Sul, em azul no mapa.

Os modelo climático HadGEM2 foi rodado em supercomputadores com as condições futuras descritas nos cenários de forçamento radiativo (RCPs, descritos na seção 2.4.1). Neste trabalho, serão utilizados os resultados dos modelos em dois cenários: o RCP 4.5 e o RCP 8.5. Os dois cenários foram escolhidos por apresentarem dois caminhos diferentes para o forçamento radiativo no planeta até 2100. O cenário 8.5 é o mais pessimista dos quatro: como visto na seção 2.4.1, ele apresenta uma concentração de mais de 1370 p.p.m. de CO₂ equivalente em 2100 e com tendência de que este valor continue crescendo após 2100. Portanto, trata-se de um cenário de poucas ações para redução das emissões de GEE ao longo do Século XXI. Por outro lado, o cenário 4.5 é, dos quatro, o segundo mais otimista: ele considera uma concentração de 650 p.p.m. de CO₂ equivalente em 2100, e com tendência de estabilização deste valor após 2100 (Moss *et al.*, 2010). Ambos os cenários incluem não somente o forçamento radiativo projetado para 2100, mas também os valores intermediários de forçamento radiativo desde o presente até o final da rodada do modelo, e as influências do forçamento radiativo sobre o clima global.

O modelo HadGEM2 usa um calendário de 360 dias por ano, considerando cada mês com 30 dias, incluindo fevereiro. Assim, foram necessárias pequenas modificações nos dados de vazão observada, para que eles pudessem ser utilizados também em um calendário de 360 dias, permitindo a comparação dos dados observados em 1990-2000 com as vazões previstas pelo modelo HadGEM2 para o mesmo período. As seguintes modificações foram feitas:

- Vazões desprezadas: as dos dias 31 dos meses de maio a dezembro. E, em anos bissextos, as do dia 31/01.
- Vazões deslocadas em anos não bissextos: as dos dias 31/01 a 28/02 foram deslocadas um dia para frente, tornando-se as dos dias 01/02 a 29/02.
- Vazões deslocadas em todos os anos: as dos dias 01/03 a 31/03 foram deslocados um dia para trás, tornando-se as dos dias 30/02 a 30/03

Nos cenários futuros, não houve necessidade de tais modificações, pois não houve dados observados e foi usado sempre o calendário de 360 dias.

Os dados do Eta-HadGEM2 para a região da sub-bacia de Camargos foram cedidos pelo CPTEC/INPE para a realização deste trabalho. Como os dados Eta-HadGEM2 tem um tamanho de grade de 20km, e os postos pluviométricos estão associadas a coordenadas mais detalhadas de latitude e longitude, algumas aproximações foram feitas por arredondamento. Por

exemplo, para o posto de B. Jardim, de coordenadas WGS-84 de latitude -44,1939 e longitude -21,7806 foram utilizados os dados calculados pelo Eta-HadGEM2 para o ponto de coordenadas -44,20 de latitude e -21,80 de longitude.

3.2.6. Avaliação do desempenho dos modelos no período 1990-2000

A comparação entre os resultados gerados pelo SMAP para um período passado (tanto com os dados de chuva observados como com os do Eta-HadGEM2) e as vazões observadas no mesmo período é importante, pois a partir dela é possível avaliar se o método proposto, utilizando os dados de saída do Eta-HadGEM2 e a evapotranspiração potencial mensal calculada pela equação de Blaney-Criddle, consegue representar as vazões do Rio Grande e suas variações sazonais. Esta comparação será realizada para o período de 01/08/1990 a 30/12/2000⁵. A partir das séries de vazões são analisados os resultados, com curvas de permanência e destaque para as vazões máximas, médias, Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$.

3.2.7. Geração dos cenários de vazões futuras

Com os principais dados de entrada do modelo hidrológico SMAP (precipitação diária e evapotranspiração potencial diária), será possível realizar simulações de vazão para o Rio Grande em Camargos, em duas projeções climáticas futuras diferentes: RCP 4.5 e RCP 8.5.

Serão gerados cenários para os seguintes períodos de dez anos: 01/08/2040 a 30/12/2050, e de 01/08/2088 a 30/12/2098.⁶

O SMAP fornece como dados de saída as vazões diárias em Camargos, com valores inteiros, em metros cúbicos por segundo. A partir das séries de vazões são analisados os resultados, com curvas de permanência e destaque para as vazões máximas, médias, Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$. Será considerada a trajetória do comportamento das vazões, desde a década de 1990 a 2000 (para a qual serão consideradas as vazões calculadas pelo SMAP, e não as observadas), passando pela década de 2040-50, e terminando na década de 2088-98. Para as projeções futuras, serão considerados dois cenários, baseados nos RCPs 4.5 e 8.5.

⁵ Os anos do modelo HadGEM2 terminam no dia 30/12

⁶ O modelo HadGEM2 só tem dados até novembro de 2099, por isso foi utilizado o período que termina em 30/12/2098.

4. Estudo de Caso: Resultados

A avaliação dos resultados das rodadas do SMAP foi dividida em duas seções: inicialmente será avaliado o desempenho dos modelos na simulação do clima passado e das vazões observadas), a partir da comparação com dados pluviométricos e fluviométricos. Em seguida, serão apresentadas as projeções dos modelos Eta-HadGEM2 e SMAP para o futuro: para cada um dos dois RCPs, será considerada a trajetória do comportamento das vazões em três períodos: de 1990 a 2000 (para a qual serão consideradas as vazões calculadas pelo SMAP, e não as observadas), de 2040 a 2050, e de 2088 a 2098.

4.1. Avaliação do desempenho dos modelos

4.1.1. Precipitação

Os dados de precipitação do Eta-HadGEM2 para o período de 01/08/1990 a 30/12/2000 na bacia incremental de Camargos foram comparados com os dados observados, mais especificamente, com a precipitação média diária na sub-bacia de Camargos, calculada pela média aritmética dos 13 postos pluviométricos utilizados pelo SMAP para a sub-bacia. A Figura 8 apresenta as precipitações mensais médias, isto é, a média do total de precipitação acumulada a cada mês.

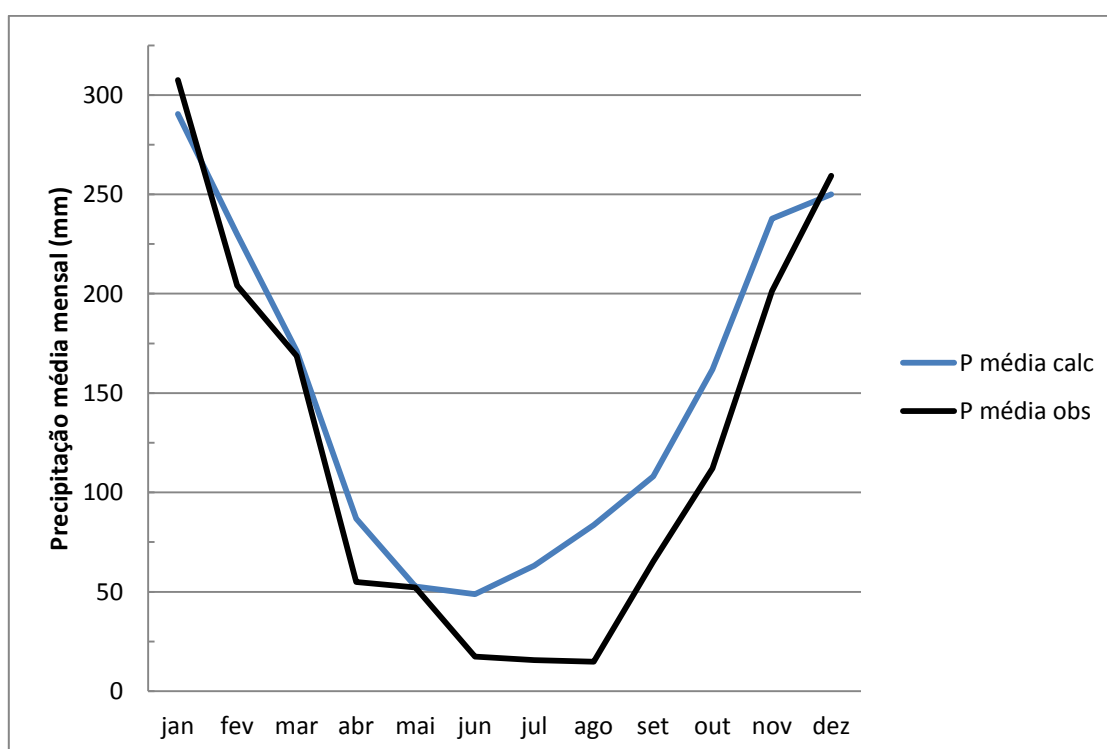


Figura 8: Precipitações médias mensais, para a sub-bacia de Camargos. Média calculada entre 01/08/1990 e 30/12/2000 (Elaboração própria)

Segundo EUCLYDES *et al.* (2006), o período chuvoso na Bacia do Rio Grande vai de novembro até abril, o que é corroborado pelo gráfico de precipitação média mensal observada na sub-bacia do Grande, com exceção do mês de abril, que apresentou média de chuva acumulada de menos de 1/3 daquela de março (168,6 mm em março e 55,0 mm em abril). As precipitações calculadas pelo Eta-HadGEM2 reproduzem razoavelmente bem a sazonalidade da região, porém no período seco, de junho a outubro, o Eta-HadGEM superestima consideravelmente as precipitações. O caso mais extremo é o do mês de agosto: a precipitação média mensal observada foi de 14,8 (ou seja, menos de 0,5 mm por dia em média), enquanto o HadGEM2 chegou à média mensal de 83,7 mm. Essa superestimação das precipitações no período seco pelo Eta-HadGEM2 também é observada, em um período mais amplo (1961-1990), por CHOU *et al.* (2014a) para toda a região Centro-Sul do Brasil (isto é, a região em azul na figura 7). A superestimação das precipitações no período seco se reflete em uma superestimação das vazões, como será visto nas próximas seções.

4.1.2. Curvas de Permanência de Vazão

As vazões naturais calculadas pelo SMAP a partir dos dados do Eta-HadGEM2 foram comparadas com as vazões naturais observadas diariamente em Camargos. As curvas de permanência de vazões, calculada pelo SMAP e observada (dados fluviométricos), são mostradas na Figura 9, assim como, com destaque para o 10% de vazões mais altas, na Figura 10.

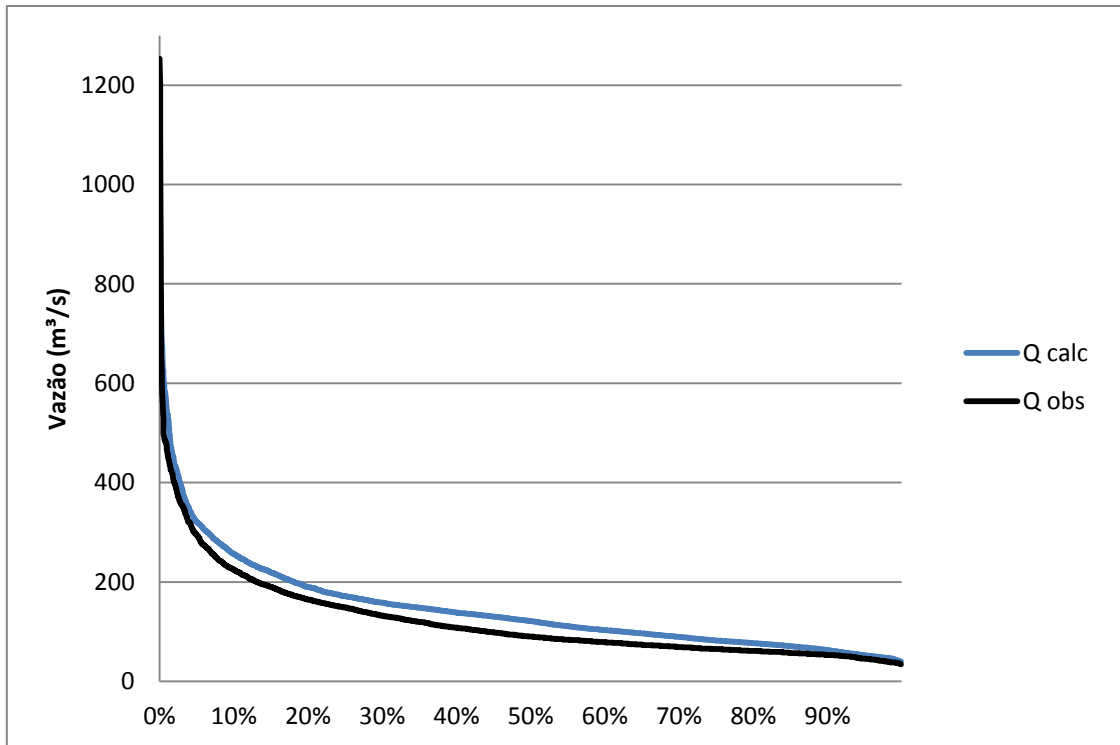


Figura 9: Curva de permanência de vazões para Camargos, de 1990 a 2000 (Elaboração própria)

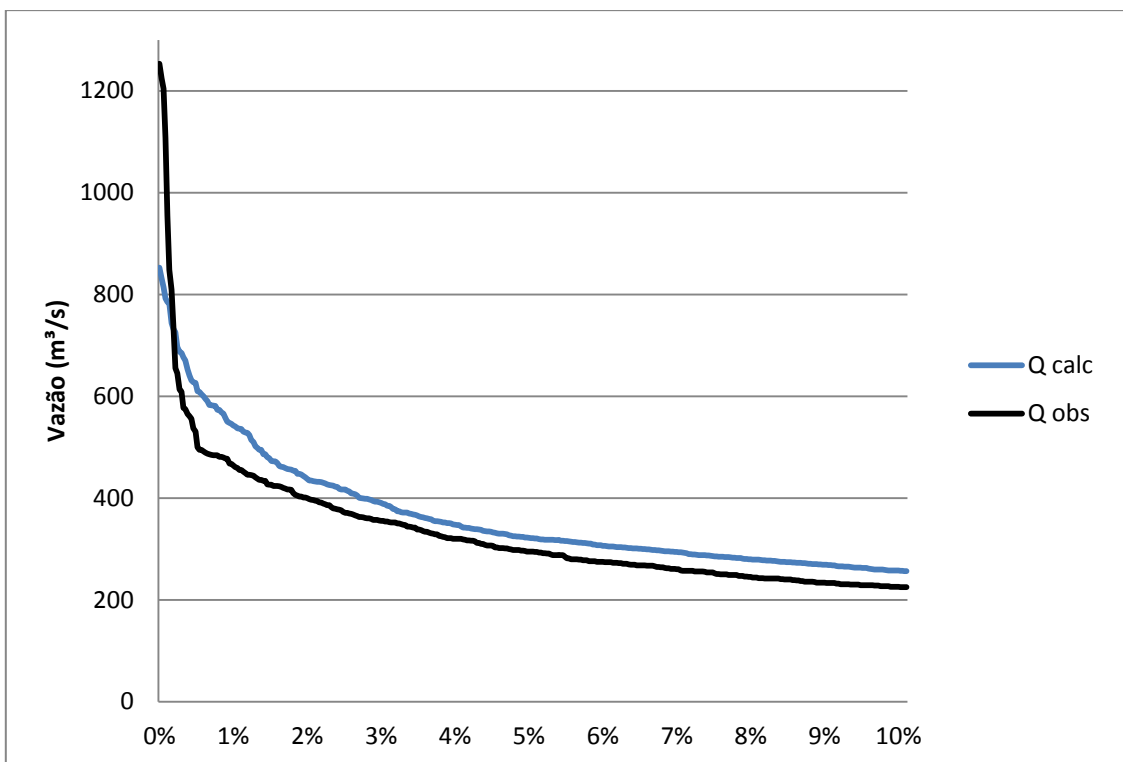


Figura 10: Curva de permanência para Camargos, de 1990 a 2000. Destaque para os 10% de vazões mais altas (Elaboração própria)

De forma geral, as curvas de permanência das vazões observadas e calculadas estão bem próximas, porém as vazões calculadas pelo SMAP são maiores do que as observadas, ao longo de toda a curva, com exceção dos oito maiores valores de vazão (para um período total de 3747 vazões diárias). Em outras palavras, os dados calculados pelo SMAP apresentam uma tendência a superestimar as vazões, o que também será observado na seção seguinte.

4.1.3. Vazões Características

A comparação das vazões características Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ observadas no período de 1990-2000 com as vazões calculadas pelo SMAP a partir das precipitações observadas e com as vazões calculadas pelo SMAP a partir das precipitações fornecidas pelo Eta-HadGEM2 também aponta uma superestimação das vazões calculadas a partir dos dados do modelo climático. A exceção é a vazão máxima, em que as vazões calculadas foram menores do que a observada no período. As vazões máximas, Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ para o período de 01/08/1990 a 30/12/2000 são mostradas na Tabela 7.

Tabela 7: Vazões características em Camargos, de 1990 a 2000. Elaboração própria.

Vazões (m ³ /s)	1990 observado (dados pluviométricos)	1990 SMAP + dados pluviométricos	1990 SMAP + Eta-HadGEM2
$Q_{m\acute{a}x}$	1253	1190	852
Q_{90}	53	53	63
Q_{95}	46	47	52
$Q_{7,10}$	36	34	42

É importante notar que a vazão máxima observada em Camargos em 1992, de 1253 m³, correspondeu a grandes enchentes em Ribeirão Vermelho, cidade a jusante de Camargos, causando a destruição de uma ponte ferroviária sobre o rio Grande (ONS, 2013). De fato, trata-se da maior vazão de toda a série de 81 anos (de 1932 a 2013) que está disponível no site citado na seção 3.2.1. Assim, é normal que este pico de vazão se situe acima das previsões do SMAP a partir dos dados pluviométricos, e bastante acima das previsões do SMAP+Eta-HadGEM2, tendo resultado de precipitações excepcionalmente elevadas, difíceis de serem modeladas pelo modelo climático. A alta correlação entre as vazões Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ calculadas pelo SMAP a partir dos dados históricos de precipitação na bacia e as vazões históricas observadas indica que o SMAP consegue reproduzir as condições físicas da bacia estudada. Nas seções seguintes, a vazão calculada considerada será sempre aquela que utiliza as simulações do Eta-HadGEM2.

4.1.4. Distribuição Sazonal das Vazões

A distribuição sazonal das vazões calculadas pelo SMAP para o período 1990-2000 seguiu a distribuição real na bacia, com um período seco no meio do ano. Porém, as vazões dos meses mais secos tenderam a ser superestimadas pelo SMAP, como pode-se ver na Figura 11 e na Tabela 8.

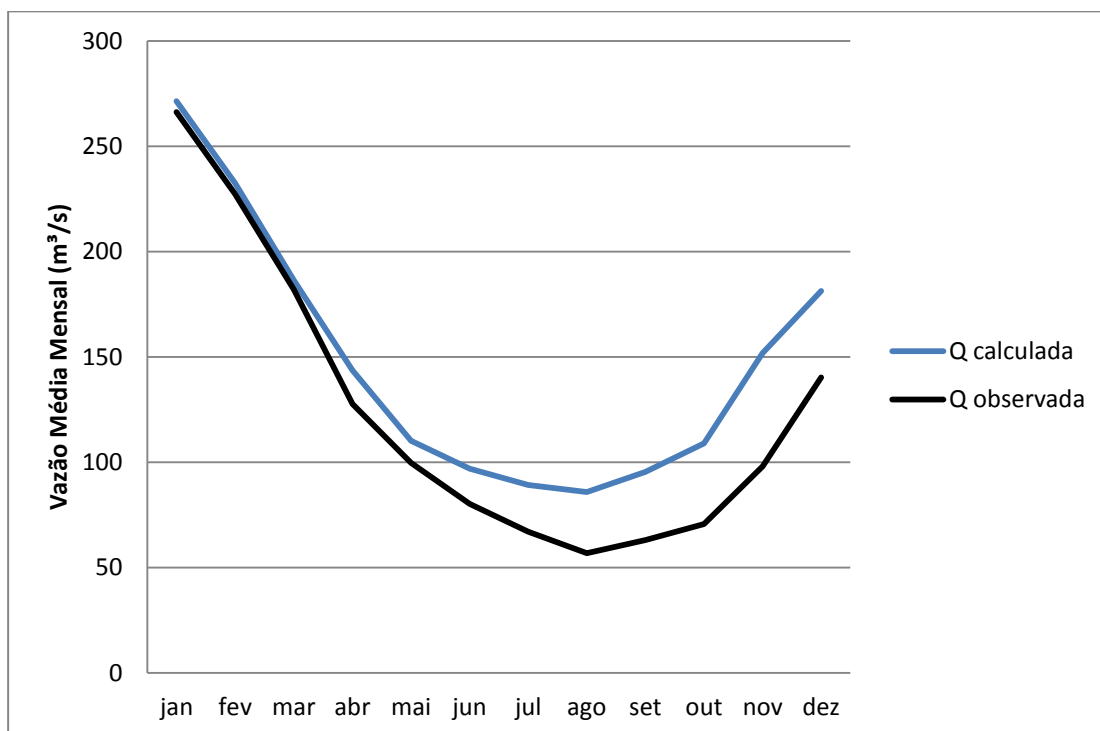


Figura 11: Vazões Médias Mensais em Camargos, de 1990 a 2000 (Elaboração própria)

Pode-se observar que as vazões calculadas com base nos dados do Eta-HadGEM2 conseguiram representar a sazonalidade da Bacia do Rio Grande, com um período seco bem definido no meio do ano. Porém, as médias de ambos os modelos descolaram das médias observadas nos seis últimos meses do ano. As diferenças entre as vazões médias, definidas como $(Q_{calc}-Q_{obs})/Q_{calc}$, estão apresentadas na tabela 8.

Tabela 8: Vazões médias mensais calculadas e observadas em Camargos, e diferença percentual entre os valores. Elaboração própria.

Mês	Vazão Calculada (m ³ /s)	Vazão Observada (m ³ /s)	Diferença
jan	271,3	266,2	+1,9%
fev	232,4	227,4	+2,2%
mar	186,3	181,9	+2,4%

abr	143,6	127,7	+11,1%
mai	110,1	99,6	+9,5%
jun	96,8	80,2	+17,2%
jul	89,2	66,9	+25,0%
ago	85,8	56,8	+33,7%
set	95,4	63,0	+33,9%
out	108,8	70,5	+35,2%
nov	151,8	98,0	+35,4%
dez	181,3	140,2	+22,7%

Os gráficos de vazão diária calculada pelo SMAP a partir dos dados do Eta-HadGEM2 e de vazão diária observada para cada ano entre 01/08/1990 e 30/12/2000 são apresentados no Anexo I deste trabalho. Pela sua análise, pode-se observar que, com exceção dos anos de 1996 e 2000, em todos os outros houve superestimação das vazões no período seco. A Tabela 9 apresenta as vazões médias para o período seco de cada ano, definido por EUCLYDES *et al* (2006) como o período de maio a outubro⁷, enquanto a Figura 12 mostra o comportamento das duas séries de vazões no ano de 1994.

Tabela 9: Vazões médias no período seco (01/05 a 30/10) de cada ano, calculadas e observadas em Camargos. Elaboração própria.

Ano	Vazão Calculada (m ³ /s)	Vazão Observada (m ³ /s)
1991	106,9	84,7
1992	163,7	91,1
1993	92,6	78,0
1994	97,1	75,3
1995	88,2	59,4
1996	59,8	73,3
1997	86,9	82,0
1998	106,1	63,3
1999	138,1	55,8
2000	55,3	68,8

⁷ Como as vazões calculadas para 1990 começam em agosto, este ano não foi considerado na Tabela 9.

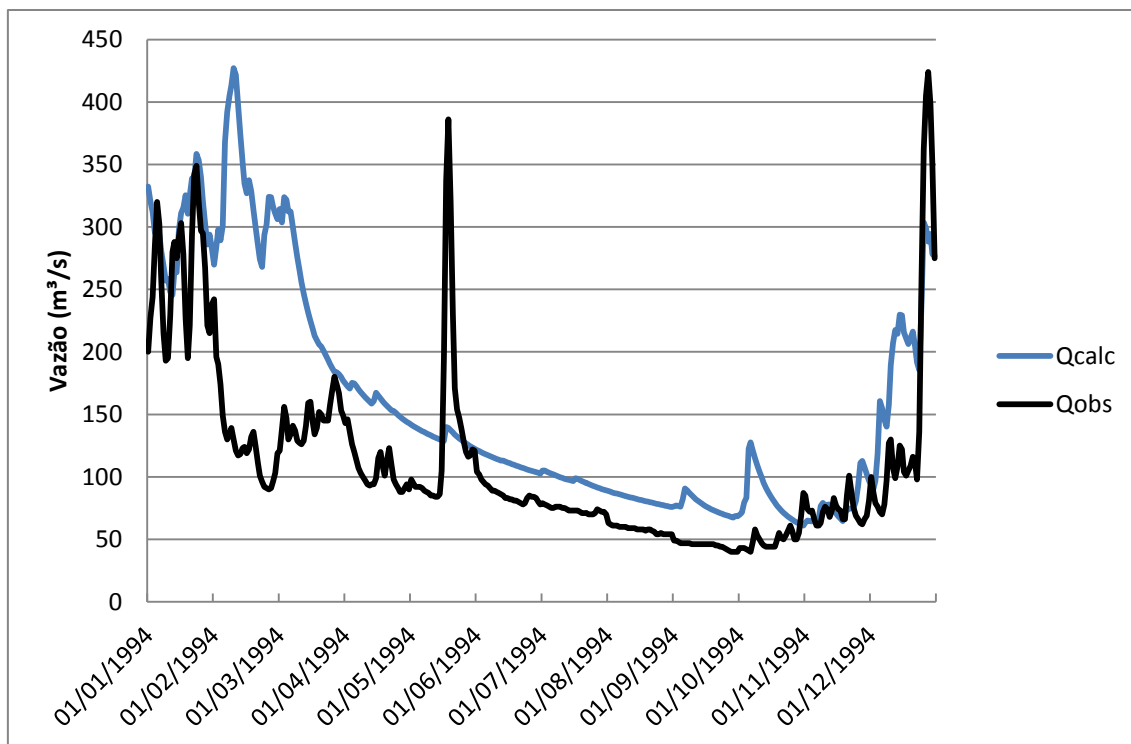


Figura 12: Vazões diárias em Camargos em 1994 para as vazões observadas e calculadas pelo SMAP

Embora as vazões diárias calculadas pelo SMAP a partir dos dados do Eta-HadGEM2 apresentem grandes diferenças em relação às vazões observadas no período, as vazões médias mensais calculadas para o período úmido tendem a se aproximar das vazões observadas, como foi visto na Tabela 8. O ano de 1994 é representativo do comportamento das duas séries de vazões: ambas apresentam o mesmo padrão de vazões mais baixas entre junho e novembro, mas as vazões do período seco são superestimadas pela simulação. Segundo CHOU *et al.* (2014a), corroborando os resultados da seção 4.1.1, o Eta-HadGEM2 tem tendência a superestimar as precipitações nos meses de inverno na região Centro-Sul do Brasil, que inclui a bacia do Rio Grande, o que é coerente com a tendência de vazões superestimadas no período seco, observada neste estudo.

4.2. Projeções Futuras

Foram realizadas duas rodadas do SMAP alimentado pelos dados do Eta-HadGEM2 para a década de 2040-2050 - uma considerando o RCP 4.5 e outra com o RCP 8.5 - e duas para a década de 2088-2098 - mais uma vez, uma com o RCP 4.5 e outra com o RCP 8.5. As projeções

futuras serão comparadas com as vazões calculadas pelo SMAP, com os dados do Eta-HadGEM2, para 1990 a 2000.

4.2.1. Precipitação anual média e Vazão média por período

As médias aritméticas da precipitação acumulada anual na bacia incremental a Camargos, e das vazões diárias em Camargos, foram calculadas para cada um dos períodos considerados: 1990-2000; 2040-2050; 2088-98 (períodos também identificados a partir desta seção como décadas de 1990, 2040 e 2090, respectivamente), e para os RCPs 4.5 e 8.5. Os resultados estão nas Figuras 13 e 14.

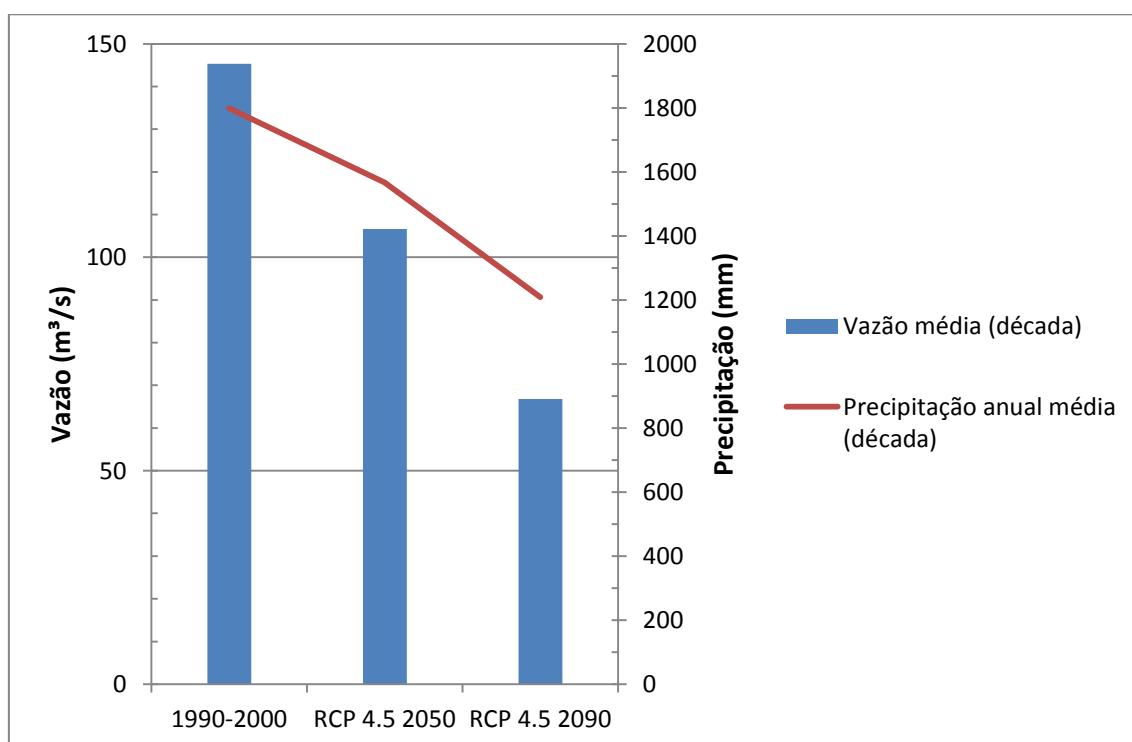


Figura 13: Precipitação anual média na sub-bacia de Camargos e Vazão Média em Camargos por década para os dados do modelo Eta-HadGEM2 com cenário RCP 4.5 (Elaboração própria)

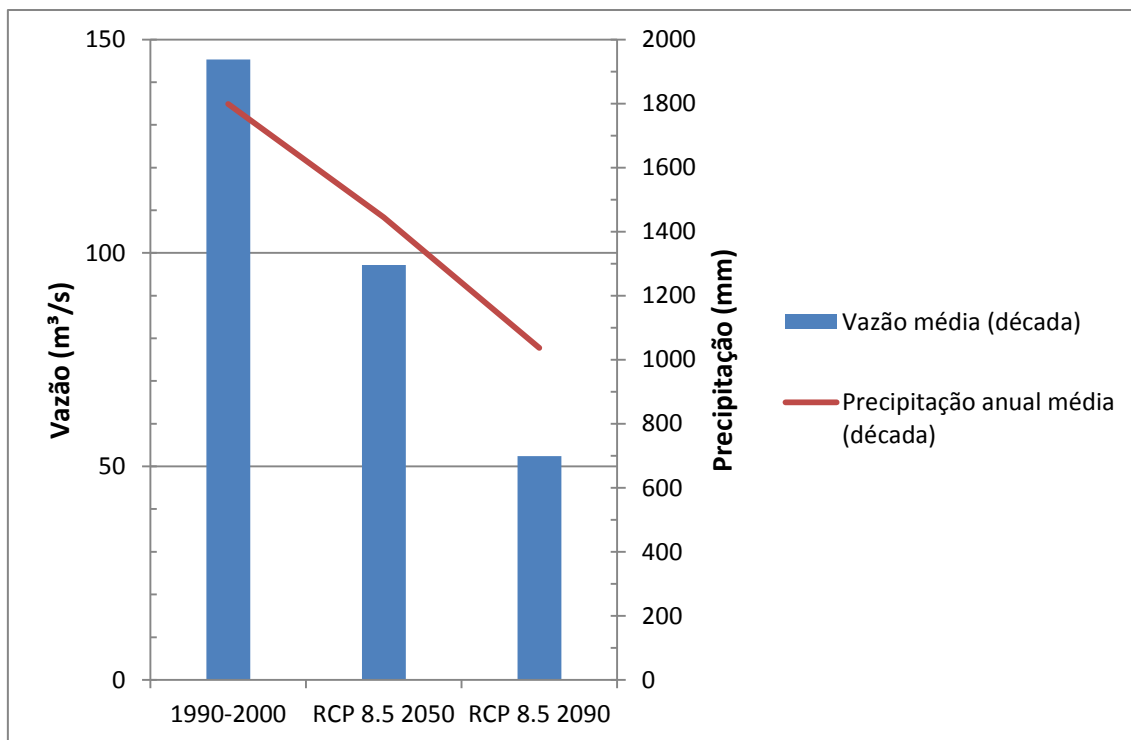


Figura 14: Precipitação anual média na sub-bacia de Camargos e Vazão Média em Camargos por década para os dados do modelo Eta-HadGEM2 com cenário RCP 8.5 (Elaboração própria)

Como se pode ver nas Figuras 13 e 14, para ambos os RCPs a precipitação anual na sub-bacia de Camargos tem tendência a diminuir ao longo do Século XXI, segundo o modelo Eta-HadGEM2. Consequentemente, as vazões do rio Grande afluentes à usina de Camargos também têm tendência a diminuir. Um aspecto interessante a se notar é que a queda da vazão é mais acentuada do que a da precipitação, evidenciando a relação não linear entre precipitação e vazão. Para auxiliar a análise da relação entre as duas, foi elaborada a Tabela 10, em que os mesmos dados das figuras 12 e 13 são apresentados como percentagem dos dados de Precipitação Média e Vazão Média calculados para o período 1990-2000.

Tabela 10: Precipitação anual média na sub-bacia de Camargos e Vazão Média em Camargos por década, expressas em percentagem dos valores médios de 1990-2000. Elaboração própria.

Período	Precipitação Média (mm)	Vazão Média (m³/s)
1990-2000	100,0%	100,0%
RCP 4.5 2050	87,1%	73,4%
RCP 4.5 2090	67,2%	46,0%
RCP 8.5 2050	80,3%	66,9%
RCP 8.5 2090	57,6%	36,1%

De fato, a precipitação anual média calculada pelo modelo para a década de 2090 representa 57,6% do valor calculado para a década de 1990 pelo mesmo modelo, enquanto o valor de vazão média calculado pelo SMAP para a década de 2090 corresponde a 36,1% da vazão média calculada para a década de 1990. Como foi visto na caracterização do modelo SMAP (seção 3.2.1), nem toda a água precipitada se converte em vazão, por isso a relação entre os dois termos não é linear: pelo contrário, com menores precipitações e temperaturas médias mais elevadas, é provável que uma proporção maior da água se perca por evapotranspiração. Além disso, o estudo de SANTANA *et al.* (2011), descrito na seção 2.4.4, também aponta, para a foz do rio São Francisco, quedas percentuais das vazões maiores do que as quedas na precipitação na bacia hidrográfica.

4.2.2. Curvas de Permanência de Vazão

As figuras 15 e 16 apresentam as curvas de permanência das vazões calculadas para cada período e RCP, com as vazões apresentadas em escala linear (Figura 15) e logarítmica (Figura 16).

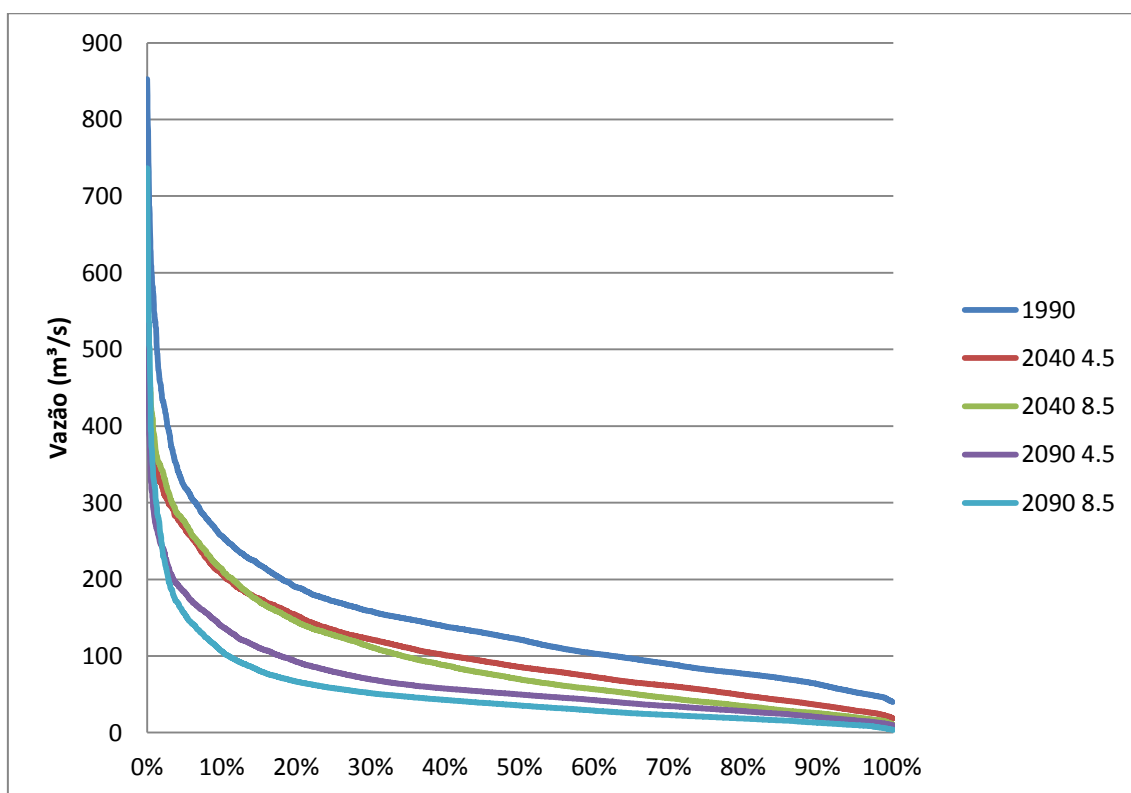


Figura 15: Curvas de permanência das vazões em Camargos calculadas para cada período e RCP. Escala linear. (Elaboração própria)

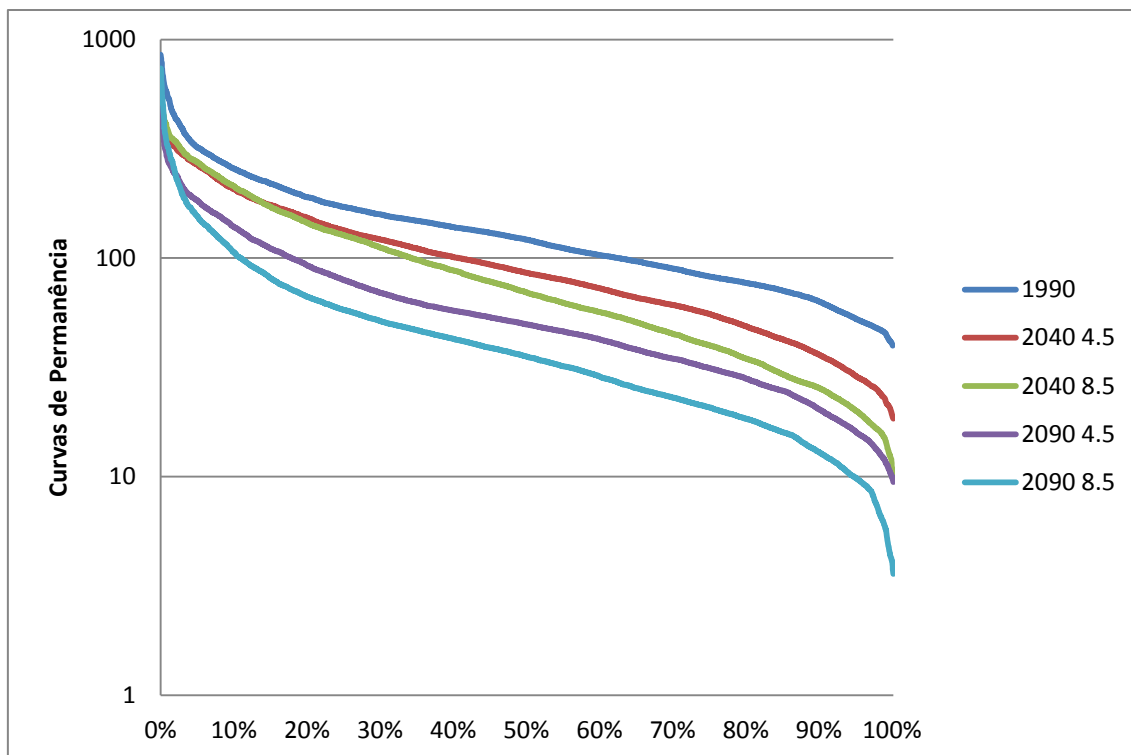


Figura 16: Curvas de permanência das vazões em Camargos calculadas para cada período e RCP. Escala logarítmica. (Elaboração própria)

As curvas de permanência também apontam uma redução no perfil das vazões em Camargos, para ambos os períodos futuros e ambos os RCPs. Observa-se, contudo, uma redução ainda mais acentuada no período de 2088-98.

4.2.3. Vazões Q_{90} e Q_{95}

A Q_{90} , vazão de permanência de 90% do tempo, é um indicador de vazões utilizado em alguns estados do Brasil, como Bahia e Sergipe. A vazão Q_{90} é apresentada na Figura 17, com os gráficos separados por RCP.

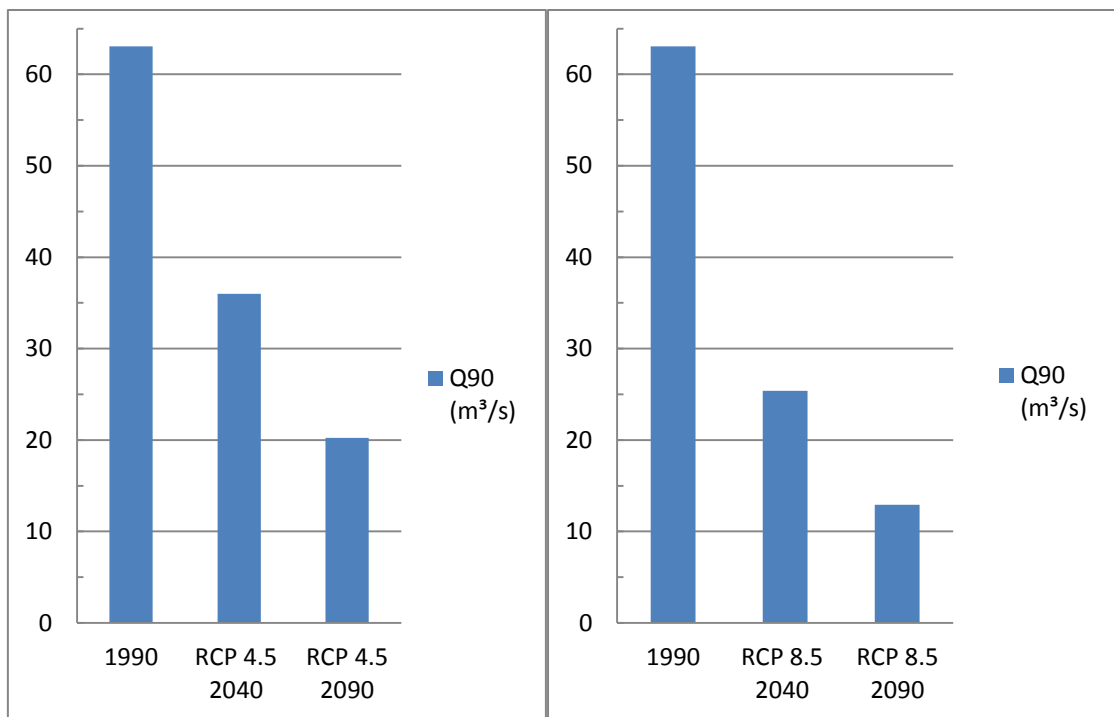


Figura 17: Vazão Q_{90} em Camargos por década, para o RCP 4.5 e para o RCP 8.5

Pode-se observar uma forte redução na Q_{90} , para ambos os RCPs. Como foi visto nas seções 2.1.1 e 2.1.2, e corroborado por CHOU *et al.* (2014a), o HadGEM2, na simulação para períodos passados, teve tendência a superestimar as precipitações em período seco, levando o SMAP a simular vazões maiores do que as observadas para este período. Assim, é possível que as vazões Q_{90} previstas para 2040-50 e 2088-98 na Figura 17, apesar de sua significativa redução, ainda estejam superestimadas, o que significaria vazões reais extremamente baixas, impactando a geração de energia elétrica e outros usos da água.

A Q_{95} , vazão de permanência de 95% do tempo, é um indicador muito utilizado para a avaliação da disponibilidade hídrica de cursos d'água. Trata-se de uma vazão menor que a Q_{90} e, como é descrito na seção 2.1, é o indicador padrão utilizado pela ANA para outorga em cursos d'água de domínio federal. A Q_{95} calculada para cada série de dez anos (1990-2000, 2040-2050, 2088-2098) é mostrada na figura 18, com os gráficos separados por RCP.

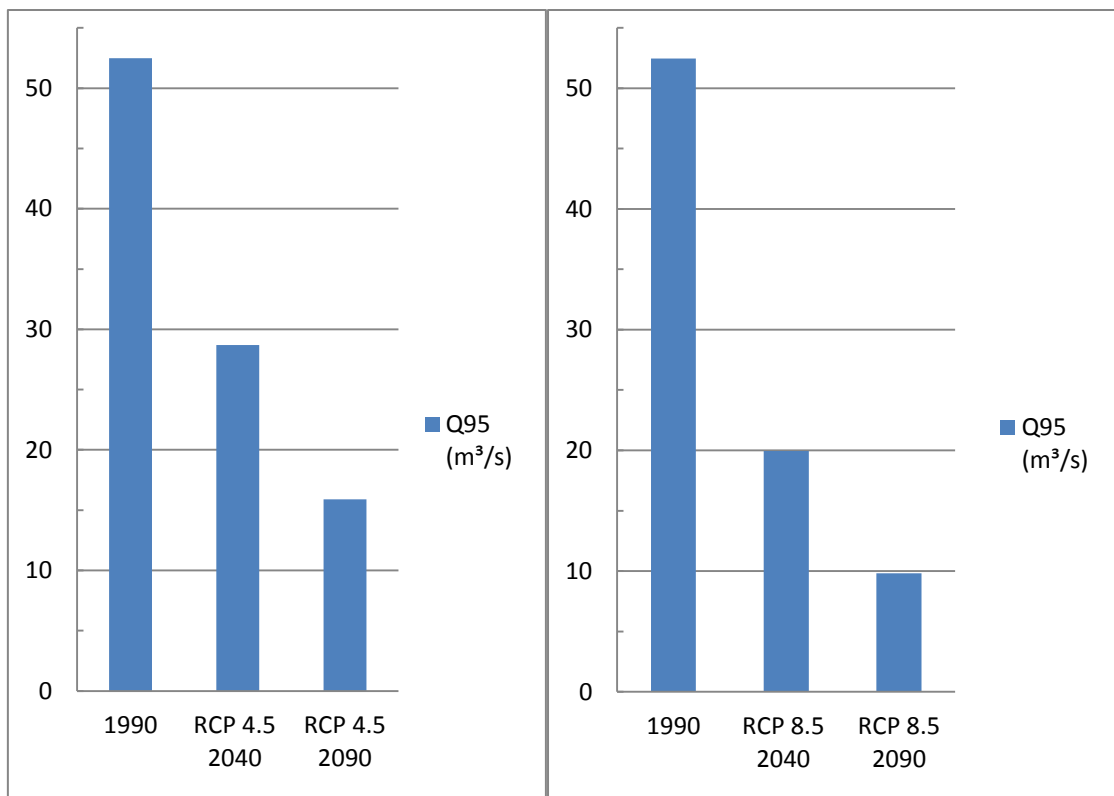


Figura 18: Vazão Q_{95} em Camargos por década, para o RCP 4.5 e para o RCP 8.5

Em ambos os cenários RCP, a redução da Q_{95} é considerável tanto entre a década de 1990-2000 e a de 2040 quanto entre esta última e a de 2088-2098. A tabela 11 resume os dados de Q_{90} e Q_{95} apresentados nas duas figuras acima.

Tabela 11: Vazões Q_{90} e Q_{95} em Camargos, por década, para o RCP 4.5 e para o RCP 8.5. Elaboração própria.

Vazões (m³/s)	1990	RCP 4.5 2040	RCP 8.5 2040	RCP 4.5 2090	RCP 8.5 2090
Q_{90}	63	36	25	20	13
Q_{95}	52	29	20	16	10

4.2.5. Vazão $Q_{7,10}$

Os valores mais baixos de uma série de vazões estão diretamente ligados à escassez hídrica, que afeta os mais diversos usos da água: abastecimento humano, dessedentação de animais, geração de energia elétrica, navegação, entre outros. A $Q_{7,10}$, menor vazão média móvel com 7 dias de duração e 10 anos de tempo de retorno, é usada como indicador nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, entre outros. A partir das rodadas do

SMAP, foram gerados os gráficos da Figura 19 com as vazões $Q_{7,10}$ registradas em cada década e cenário para os quais foi rodado o modelo. A tabela 12 também apresenta as mesmas vazões $Q_{7,10}$.

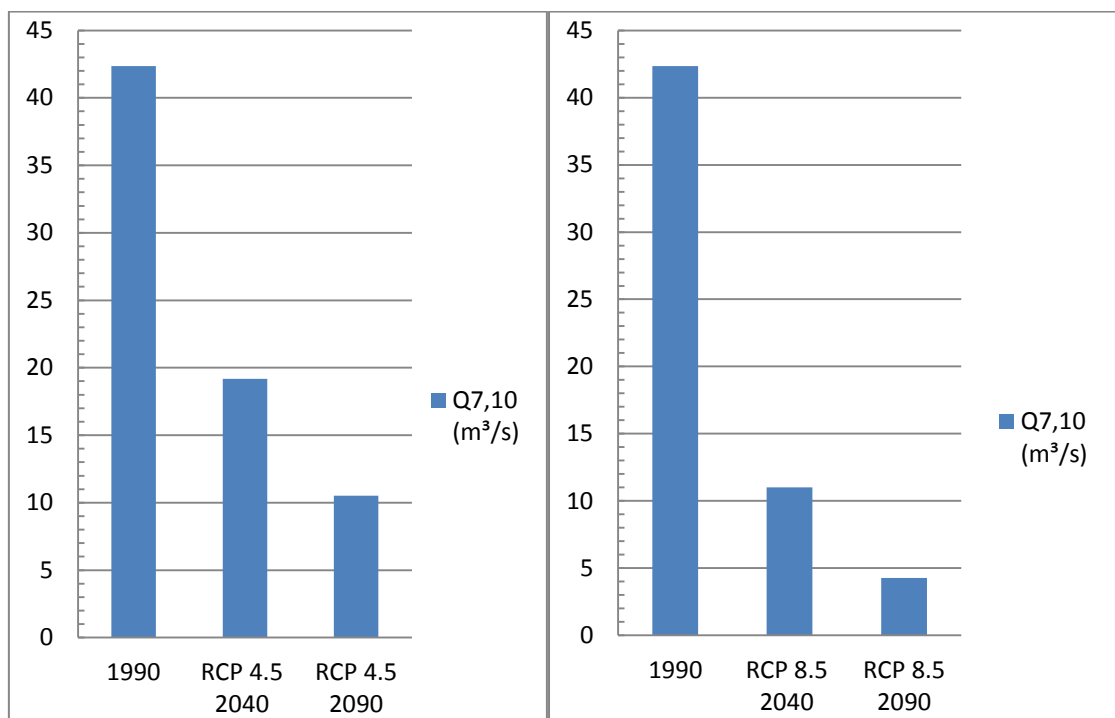


Figura 19: Vazão $Q_{7,10}$ em Camargos por década, para o RCP 4.5 e para o RCP 8.5

Tabela 12: Vazão $Q_{7,10}$ em Camargos por década, para o RCP 4.5 e para o RCP 8.5

	1990	RCP 4.5 2040	RCP 8.5 2040	RCP 4.5 2090	RCP 8.5 2090
$Q_{7,10}$ (m³/s)	42	19	11	11	4

A Figura 19 apresenta os menores valores de vazão diária calculados pelo SMAP. Dentre todos os gráficos deste trabalho, os da Figura 19 são os que apresentam a tendência de queda mais significativa. Os resultados são coerentes com os resultados de CHOU *et al.* (2014b), que apontam uma tendência de aumento, ao longo do Século XXI, do indicador CDD (*consecutive dry days* na sigla em inglês: dias secos consecutivos) nas regiões Nordeste e Sudeste do Brasil. Ainda assim, caso se confirmem, são preocupantes: a $Q_{7,10}$ prevista para a década de 2088-98 no cenário RCP 4.5 é de apenas 26% da $Q_{7,10}$ da década de 1990-2000, e se for usado o cenário 8.5, a $Q_{7,10}$ na década de 2090 se reduzirá para apenas 10% do valor obtido cem anos antes. Uma redução desse porte na vazão mínima, caso se observe, certamente trará prejuízos aos usuários do Rio Grande.

4.2.6. Vazões e Precipitações Máximas

Os valores extremos de precipitação e de vazão estão relacionados a enchentes, que poderão se tornar mais frequentes em determinadas regiões devido às mudanças climáticas, exigindo planejamento de longo prazo para proteção da população (DANDY, 2013). Estimativas de vazões máximas são essenciais para o planejamento visando à minimização de impactos decorrentes de tais cheias. A Figura 20 apresenta os valores máximos diários de precipitação e de vazão registrados em cada década em que o SMAP foi rodado.

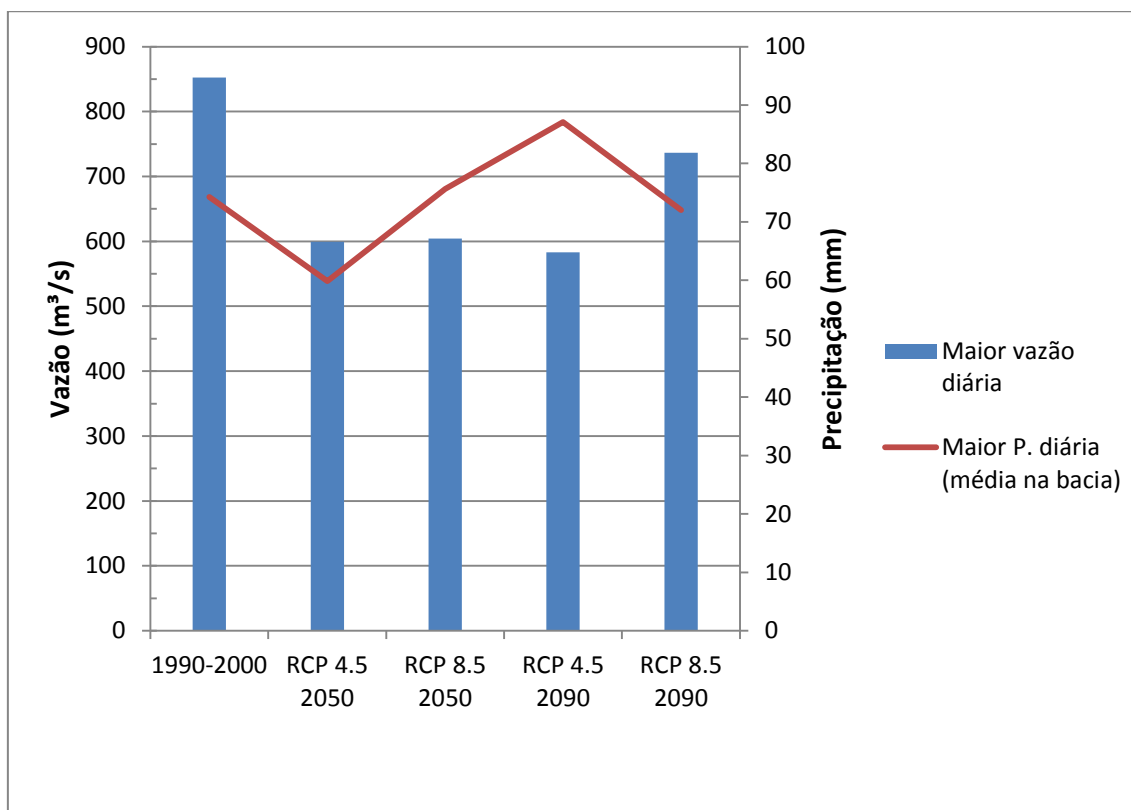


Figura 20: Valores máximos por década de Precipitação diária média na sub-bacia de Camargos e de Vazão diária em Camargos

A Figura 20 não apresenta uma tendência clara para as precipitações: de acordo com os dados do modelo Eta-HadGEM2, os valores máximos de precipitação não apresentam tendência significativa de aumento ou diminuição. Para as vazões, a Figura 20 aponta uma tendência de diminuição das vazões máximas em relação à década de 1990, porém a tendência é menos significativa do que as observadas para as vazões médias, Q_{90} , Q_{90} e $Q_{7,10}$.

5. Considerações Finais

5.1. Conclusões

A metodologia proposta neste trabalho conseguiu reproduzir os principais aspectos da bacia hidrográfica estudada. As precipitações e vazões simuladas para o passado reproduziram razoavelmente bem a sazonalidade da região, com um período úmido e um período seco, porém os modelos superestimaram as precipitações e vazões do período seco, o que parece ser uma tendência do modelo climático Eta-HadGEM2, segundo CHOU *et al.* (2014a), e não do modelo chuva-vazão SMAP. A metodologia pode ser adaptada para aplicação em outras bacias hidrográficas e utilizando dados de outros modelos climáticos.

As projeções de vazões do rio Grande em Camargos para o futuro indicam redução nas vazões médias e nas vazões representativas Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$. Por outro lado, não foi observada tendência significativa para as vazões máximas: as cheias deverão se manter em níveis semelhantes ou um pouco menores, segundo os modelos. Um dos aspectos a ser destacado nos resultados é a relação não linear entre precipitação e vazão, evidenciada nas Figuras 13 e 14 e na Tabela 10. Como mencionado na descrição do modelo SMAP, no ciclo hidrológico uma fração da precipitação torna-se escoamento superficial, outra fração infiltra no solo, e uma parte desta torna-se escoamento de base ou subterrâneo. Além disso, outros fatores, como a umidade do solo e a evapotranspiração, influenciada pela temperatura e pelo uso do solo, influenciam na quantidade de água que contribuirá para a vazão dos rios da bacia hidrográfica. Os aumentos previstos nas temperaturas médias (IPCC, 2013) influenciarão a evapotranspiração potencial, exigindo adaptações nos cálculos que utilizam este parâmetro. Tudo isso leva a crer que com o aumento da temperatura e da evapotranspiração devido às mudanças climáticas, as vazões anuais venham a se reduzir na região, a não ser que haja expressivo aumento da pluviosidade regional.

Os resultados encontrados são consistentes com os de outros estudos, como os de SANTANA (2013) para as vazões da Bacia do São Francisco e os de CHOU *et al.* (2014b) para precipitações no Centro-Sul do Brasil: ambos apontam um possível cenário de redução de precipitações e vazões em diversas bacias hidrográficas brasileiras ao longo do Século XXI, cenário este que deverá ser melhor estudado e, caso se confirme, impactará a operação da usina hidrelétrica de Camargos, assim como toda a população da bacia hidrográfica, tendo em vista os usos múltiplos da água: abastecimento humano, dessedentação de animais, irrigação, pesca, entre outros.

Cabe ressaltar que o modelo SMAP calcula a vazão natural, isto é, sem usos consuntivos e sem efeito de regularização (ver mais detalhes na descrição do modelo SMAP, seção 3.2.1). A regularização de fato não ocorre a montante do reservatório de Camargos, que é o primeiro dos reservatórios em cascata do rio Grande. Os usos consuntivos da água deverão passar por mudanças consideráveis até o final do Século XXI, podendo agravar as potenciais situações de estresse hídrico.

É importante destacar as principais limitações da metodologia: os resultados são função dos modelos climáticos globais (GCMs) e apenas um GCM regionalizado foi utilizado, sendo assim, as incertezas envolvidas são grandes: como descrito por NÓBREGA *et al.* (2010 apud SANTANA *et al.*, 2011), os resultados de previsões podem em alguns casos variar entre aumentos e reduções de vazão, dependendo do modelo climático adotado. Além disso, o modelo SMAP depende da qualidade dos dados de precipitação e vazão observadas, bem como da estimativa da evapotranspiração potencial, o que pode levar a diferenças entre as séries históricas e os valores reais ocorridos, especialmente em um caso de expansão da análise para outras regiões onde há menor volume de dados históricos. O SMAP também utiliza coeficientes estabelecidos na sua calibração, como a capacidade de saturação do solo e o parâmetro de recarga subterrânea, que dependem do solo na bacia: com possíveis modificações no uso do solo ao longo do século XXI, tais coeficientes poderão ser alterados de forma imprevisível, portanto a metodologia supõe a não alteração dos usos do solo na bacia.

5.2. Recomendações e Desenvolvimentos Futuros

Os resultados deste trabalho fazem parte de uma série de pesquisas relativamente recentes sobre mudanças climáticas, que ainda apresentam grandes incertezas e possibilidades de aprimoramento dos modelos, dos dados e de avaliação mais completa dos impactos em diversos setores, como a geração de energia e a irrigação. A seguir são apresentadas algumas recomendações e possibilidades de desenvolvimentos futuros:

- Comparar as vazões calculadas pelo SMAP a partir dos dados de outros GCMs, possibilitando uma maior abrangência e representatividade de possibilidades de clima futuro
- Fazer uma análise mais detalhada do impacto na evapotranspiração de um possível aumento das temperaturas, e suas consequências para o ciclo hidrológico e os usos múltiplos da água.

- Fazer um estudo abrangendo toda a Bacia do Rio Grande, incluindo todas as suas Usinas Hidrelétricas, e quantificar as perdas ou ganhos no potencial hidrelétrico de cada uma em decorrência das Mudanças Climáticas esperadas ao longo do Século XXI.

Referências Bibliográficas

ANA (Agência Nacional de Águas), 2005. **Superintendência de outorga e Cobrança. Outorga de direito de uso de recursos hídricos: diretrizes e prioridades.** Ministério do Meio Ambiente, Brasília. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/planejamento/planos/pnrh/VF%20Outorga.pdf>>. Acesso em: 24/11/2014.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), 1998. **Resolução nº 394 de 04 de dezembro de 1998.**

BAYER, Débora Missio; CASTRO, Nilza Maria dos Reis; BAYER, Fábio Mariano, 2012. “Modelagem e Previsão de Vazões Médias Mensais do Rio Potiribu”, **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos** v. 17 n.2 - Abr/Jun 2012, pp. 229-239.

BERNARDO, Salassier, 1995. **Manual de irrigação.** 6ª edição, Viçosa. Editora Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

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 e dá outras providências.

CHOU, Sin Chan ; LYRA, André ; MOURÃO, Caroline ; DERECZYNSKI, Claudine ; PILOTTO, Isabel ; GOMES, Jorge ; BUSTAMANTE, Josiane ; TAVARES, Priscila ; SILVA, Adan ; RODRIGUES, Daniela ; CAMPOS, Diego ; CHAGAS, Diego ; SUEIRO, Gustavo ; SIQUEIRA, Gracielle ; NOBRE, Paulo ; MARENGO, José, 2014a. “Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models”, **American Journal of Climate Change**, v. 03, p. 438-454. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.35039>>. Acesso em 21/01/2015.

CHOU, Sin Chan ; LYRA, André ; MOURÃO, Caroline ; DERECZYNSKI, Claudine ; PILOTTO, Isabel ; GOMES, Jorge ; BUSTAMANTE, Josiane ; TAVARES, Priscila ; SILVA, Adan ; RODRIGUES, Daniela ; CAMPOS, Diego ; CHAGAS, Diego ; SUEIRO, Gustavo ; SIQUEIRA, Gracielle ; MARENGO, José, 2014b. “Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios”,

American Journal of Climate Change, v. 03, p. 512-527, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>>. Acesso em 21/01/2015.

CNRH (Conselho Nacional de Recursos Hídricos), 2010. **Resolução Nº 110**, de 13 de abril de 2010. Aprova a proposta de instituição do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Grande, e dá outras providências. Ministério do Meio Ambiente, Brasília.

CRUZ, Jussara Cabral, 2001. **Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais**. Tese D.Sc. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DANDY, M.; JAIN, S. “*Extreme Rainfall In A Changing Climate: New Analysis And Estimation Considerations For Infrastructure Design, 2013*”. In: **Proceedings of The National Conference of Undergraduate Research (NCUR) 2013**. University of Wisconsin La Crosse, WI, EUA, abril de 2013. Disponível em: <<http://www.ncurproceedings.org/ojs/index.php/NCUR2013/article/viewFile/374/296>>. Acesso em 27/10/2014.

DASTAGIR, M. Rehan, 2014. “Modeling recent climate change induced extreme events in Bangladesh: a review”, **Weather and Climate Extremes**. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wace.2014.10.003>>. Acesso em: 16/01/2015.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética), 2013a. Plano Decenal de Expansão de Energia 2022. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PDEE/20140124_1.pdf>. Acesso em: 28/08/2014.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética), 2013b. Anuário estatístico de energia elétrica 2013. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20130909_1.pdf>. Acesso em: 28/08/2014.

EUCLYDES, Humberto Paulo ; FERREIRA, P. A. ; FARIA FILHO, R. F., 2006. “Critério de outorga sazonal para a agricultura irrigada no Estado de Minas Gerais estudo de caso”, **ITEM. Irrigação e Tecnologia Moderna**, v. 71, p. 42-50. Associação

Brasileira de Irrigação e Drenagem. Disponível em:

<http://www.hidrotec.ufv.br/download/Outorga_sazonal.pdf>. Acesso em 29/09/2014.

FERNANDES, Diego Simões; FOSTER, Paulo Roberto Pelufo, 2006. “Cálculo da Evapotranspiração Potencial Através do Método de Thorntwaite e Comparação com Dados de Reanálise de Evapotranspiração Potencial do NCEP para a Cidade de Pelotas-RS.”. In: *XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Florianópolis. Disponível em <<http://www.cbmet.com/cbm-files/14-1c697bfe1e69ce97a1c45d482dc1b713.pdf>>. Acesso em: 03/01/2015.

FIGUEIREDO, M. A. G.; ALVES, E. D. L.; VECCHIA, F. A., 2012. “A história do CO₂ nos processos de mudanças climáticas globais”, **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium**, Ituiutaba, v. 3,n. 2, p. 408-418, jul./dec. 2012.

FRANCISCO, Cristiane Nunes, 2004. Subsídios à gestão sustentável dos recursos hídricos no âmbito municipal – O caso de Angra dos Reis, RJ. Tese D.Sc. em Geociências. Programa de Pós Graduação em Geoquímica Ambiental, UFF, Niterói.

FURTADO, Mario Tosi, 2012. “Modelo adiabático da atmosfera terrestre compatível com o aquecimento global e o efeito estufa”, **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol.34 no.3. São Paulo, Julho/Setembro. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-11172012000300010&script=sci_arttext>. Acesso em: 26/09/2014.

GOLOMBEK, Rolf; KITTELSEN, Sverre A.C.; HADDELAND, Ingjerd, 2011. “Climate change: impacts on electricity markets in Western Europe”, **Climatic Change**, Novembro de 2011. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s10584-011-0348-6/fulltext.html>>. Acesso em: 08/10/2014.

GUILHON, L. G. F., 2002. **Modelo Heurístico de Previsão de Vazões Naturais Médias Semanais Aplicado à Usina de Foz do Areia**. Dissertação de M.Sc., Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/lfguilhon.pdf>>. Acesso em: 26/09/2014.

HENRIQUES JUNIOR, Mauricio Francisco, 2010. **Potencial de Redução de Emissão de Gases de Efeito Estufa pelo Uso de Energia no Setor Industrial Brasileiro**. Tese de D.Sc, Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2000. **Special Report on Emission Scenarios**. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2013. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate**. Cambridge, Reino Unido e New York, NY, EUA. Cambridge University Press.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2014a. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability - Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report**. Cambridge, Reino Unido e New York, NY, EUA. Cambridge University Press.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2014b. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change - Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report**. Cambridge, Reino Unido e New York, NY, EUA. Cambridge University Press.

IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), 2008. **Relatório Técnico nº 96.581-205. Diagnóstico da situação dos recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHRG) – SP/MG**. São Paulo.

KAMIGUCHI, K.; KITO, H.; UCHIYAMA, T.; Mizuta R.; NODA, A. 2006. "Changes in precipitation-based extremes indices due to global warming projected by a global 20-km-mesh atmospheric model", **SOLA (Scientific Online Letters on the**

Atmosphere), 2, pp.64–67. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2151/sola.2006-017>>. Acesso em 22/12/2014.

KOBIYAMA, M., VESTENA, L. R., 2006. "Aplicação do método de Penman Modificado no cálculo da evapotranspiração potencial para quatro estações meteorológicas do estado do Pará", **Revista Ciências Exatas e Naturais**, vol. 8, n. 1, pp. 83-97, Guarapuava/ PR, jan/jun de 2006. Disponível em: <<http://revistas.unicentro.br/index.php/RECEN/article/view/204/252>>. Acesso em 09/09/2014.

KRAUSKOPF NETO, R., (2005). **Atualização de modelos chuva-vazão-propagação com estimadores de estado**. Dissertação de M.Sc., Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

LONGHI, Eloísa Helena; FORMIGA, Klebber T.M. "Metodologias para determinar vazão ecológica em rios", **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 20, junho de 2011.

LOPES, J. E., Braga B.F.F.; Conejo, J.L., 1982. **SMAP - A Simplified Hydrologic Model in Applied Modeling in Catchment Hydrology**. ed. V.P.Singh, Water Resources Publications.

LUCENA, André F. P., 2010. **Proposta metodológica para avaliação da vulnerabilidade às mudanças climáticas globais no setor hidroelétrico**. Tese de D.Sc, Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

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

NOLASCO, Henrique R., 2009. **Previsão de Vazões na UHE Camargos Utilizando o Modelo SMAP com Remoção de Viés dos Dados de Precipitação**. Projeto de Graduação em Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro.

OLIVEIRA, F.A., 2008. **Procedimentos para aprimorar a regionalização de vazões: estudo de caso da bacia do Rio Grande**. Dissertação M.Sc. em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), 2008a. **Plano da operação Energética 2013/2017**. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/avaliacao_condicao_operacao_energetica/PEN%202013%20-%20Vol%201%20-%20Condi%C3%A7%C3%B5es%20de%20Atendimento.pdf>. Acesso em 05/09/2014.

ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), 2008b. “Metodologia para a Previsão de Vazões uma Semana à Frente na Bacia do Alto/Médio rio Grande”. **Nota Técnica nº.139/2008**. Rio de Janeiro. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/NT%20139-2008%20R1.pdf. Acesso em 09/09/2014.

ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), 2013. **Plano Anual de Prevenção de Cheias Ciclo 2013/2014**. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/operacao/hidrologia/PlanoAnualDePreven%C3%A7%C3%A3oDeCheias-Ciclo2013-2014_28012014.pdf>. Acesso em 07/01/2015.

ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), 2014. **Atualização de Séries Históricas de Vazões - Período 1931 a 2013**. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/download/operacao/hidrologia/Atualiza%C3%A7%C3%A3o%20de%20S%C3%A9ries%20Hist%C3%B3ricas%20de%20Vaz%C3%B5es%20-%201931%20a%202013.pdf>>. Acesso em 27/01/2015.

PALL, P., et al., 2011: Anthropogenic greenhouse gas contribution to UK autumn flood risk. **Nature**, vol. 470, pp. 382-385, Londres, Reino Unido.

PITA, Rodolfo F. Q., 2011. **Influência das mudanças climáticas no cálculo da evapotranspiração no semi-árido da Paraíba.** Projeto de Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

RIO DE JANEIRO, 2007. **Portaria SERLA nº 567**, de 07 de maio de 2007. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/@inter_pres_aspres/documents/document/zwff/mdew/~edisp/inea_010198.pdf>. Acesso em 30/09/2014.

SANTANA, T. B.; SILVA, B. C.; SANTOS, A. H. M, 2011. “Estimativa de Impactos de Mudanças Climáticas nas Vazões do Rio São Francisco.” In: **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/75257ec819991a7bed5dc58f63d974f7_d7f8f3229e716cffb5a9e27d370595cd.pdf>. Acesso em 14/09/2014.

SANTANA, Thiago Balisa, 2013. **Impacto de mudanças climáticas sobre o regime de vazões e a geração hidrelétrica de energia.** Dissertação M.Sc., Universidade Federal de Itajubá. Disponível em: <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0042724.pdf>>. Acesso em 09/01/2015.

SCHAEFFER, Roberto ; SZKLO, Alexandre S. ; LUCENA, André F. P. ; BORBA, Bruno S.M. C. ; NOGUEIRA, Larissa P.P. ; FLEMING, Fernanda P. ; TROCCOLI, Alberto ; HARRISON, Mike ; BOULAHYA, Mohammed S. 2012 . “Energy sector vulnerability to climate change: A review”, **Energy**, n. 38, janeiro de 2012. Disponível em: <[doi:10.1016/j.energy.2011.11.056](https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.056)>. Acesso em 04/12/2014.

SELJOM, Pernille Merethe; ROSENBERG, Eva; FIDJE, Audun; HAUGEN, Jan Erik; MEIR, Michaela Georgine; REKSTAD, John Bernhard; JARLSET, Thore, 2011. “Modelling the effects of climate change on the energy system—A case study of Norway”, **Energy Policy**. Volume 39, Issue 11, pp. 7310-7321. Novembro de 2011.

SILVEIRA, Geraldo Lopes; ROBAINA, Adroaldo Dias; GIOTTO, Ênio; DEWES, Rogério, 1998. “Outorga para uso dos recursos hídricos: aspectos práticos e conceituais para o estabelecimento de um sistema informatizado”, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Vol. 3, nº 3, pp. 5-16, Jul/Set., 1998. Disponível em:

<https://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/b1c4aa8ff2332153468c854b287f9a1b_77a897e16f358aedf8fef2ea81328470.pdf>. Acesso em 21/09/2014.

TOMASELLA, J., RODRIGUEZ, D. A., CUARTAS, L. A., FERREIRA, M., FERREIRA, J. C., MARENGO, J. A., 2009. **Estudo de impacto das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos superficiais e sobre os níveis dos aquíferos na Bacia do Rio Tocantins**. CCST/INPE, Cachoeira Paulista.

TORINO, C. V.; CHAVEZ, H. O. Z.; BAEZ, C. A. V., 2014. “Usina Hidrelétrica Itaipu: produção de energia com alta performance – recorde mundial de produção em 2012 e 2013 com as marcas de 98,29 e 98,63 milhões de MWH”. In: **Anais do XVII Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais - SIMPOI**. São Paulo, agosto de 2014. Disponível em: <http://www.simpoi.fgvsp.br/arquivo/2014/artigos/E2014_T00218_PCN07755.pdf>. Acesso em 13/01/2015.

TRAMBLAY Y., NEPPEL L., CARREAU J., SANCHEZ-GOMES E., 2012. “Extreme value modelling of daily areal rainfall over Mediterranean catchments in a changing climate”, **Hydrological Processes**, v.26, issue 25, pp. 3934–3944. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8417>>. Acesso em 21/09/2014.

TUCCI, C.E.M., 1998. **Modelos Hidrológicos**. 1ª edição. ABRH Editora da UFRGS. Porto Alegre.

“UHE Itaipu: 100 milhões de MWh em 2013”, 2013. In: **Grandes Construções** n. 40, pp 18-27, agosto de 2013. Disponível em: <http://www.grandesconstrucoes.com.br/br/PDFS/GC_40.pdf>. Acesso em 14/10/2014

VOGEL, R. M., YAINDL, C., WALTER, M., 2011. “Nonstationarity: Flood Magnification and Recurrence Reduction Factors in the United States”, **Journal of the American Water Resources Association**, v. 43, n.3, pp. 464-474. Disponível em: <https://www.cityofboston.gov/images_documents/Dr%20%20Vogel%20Flood%20Magnification%20Study_tcm3-32165.pdf>. Acesso em 04/12/2014.

WESTRA, S.; ALEXANDER, L.; Zwiers, F., 2013. “Global increasing trends in annual maximum daily precipitation”, **Journal of Climate**, volume 26, pp.3904-3918.

Disponível em: <http://envsci.rutgers.edu/~toine379/extremeprecip/papers/westra_et_al_2013.pdf>. Acesso em 28/11/2014.

YAMBA, Francis; WALIMWIPI, Hartley; JAIN, Suman; ZHOU, Peter; CUAMBA, Boaventura; MZEZEWA, Cornelius, 2011. “Climate change/variability implications on hydroelectricity generation in the Zambezi River Basin”, **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, vol. 16, issue 6, pp 617-628, Agosto de 2011.

Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11027-011-9283-0#page-1>>. Acesso em 21/09/2014.

ANEXO I: Série de Vazões Diárias Calculadas e Observadas em Camargos entre 1990 e 2000

