

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS  
CENTRO DE ENGENHARIAS  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA



Trabalho de Conclusão de Curso

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VAZÕES A ALTERAÇÕES  
DE PRECIPITAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO  
CARINHANHA**

CHARLES WEIDER SILVEIRA

Pelotas, 2015

**CHARLES WEIDER SILVEIRA**

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VAZÕES A ALTERAÇÕES  
NA PRECIPITAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO  
CARINHANHA MG-BA**

Trabalho acadêmico apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Tirzah Moreira de Melo

Pelotas, 2015

·  
Banca examinadora:

Andréa Souza Castro - Centro de Engenharias/UFPEl

Prof<sup>a</sup>. MSc. Katiúcia Nascimento Adam - Faculdade de Tecnologia  
TecBrasil – Unidade Porto Alegre

Prof<sup>a</sup>. – Orientadora Dr<sup>a</sup>. Tirzah Moreira de Melo - Centro de  
Engenharias/UFPEl

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>

Prof<sup>a</sup>. MSc. Katiúcia Nascimento Adam - Faculdade de Tecnologia  
TecBrasil – Unidade Porto Alegre

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus, pela determinação, força e paciência que me fizeram chegar até o fim.

Aos meus pais, Ademir e Rose, minha tia Clara que estiveram ao meu lado até o fim, sempre me motivando para não desistir diante das dificuldades. E minha namorada Andressa por me acompanhar em toda esta caminhada, me incentivando em todos os momentos.

Às professora Tirzah de Melo e a Katiúcia Adam pela oportunidade de realizar este trabalho muito gratificante e que com certeza abrirá muitas portas daqui para frente. Agradeço a orientação e paciência, sempre disponíveis a ajudar.

A todos os professores da Engenharia Ambiental e Sanitária, pelo conhecimento que souberam transmitir, sendo de extrema importância para vencer esta etapa.

Aos amigos Pedro Amaral, Luan Pedrotti, Carlos Eduardo pelo companheirismo e amizade.

À Universidade Federal de Pelotas, pela estrutura e auxílios que foram fundamentais para minha formação.

Às pessoas que de algum modo, puderam contribuir em algum momento na minha graduação.

**MUITO OBRIGADO!**

## RESUMO

SILVEIRA, Charles Weider. **Análise de sensibilidade de vazões a alterações de precipitação na bacia do rio Carinhanha, MG-BA.** 2015. 75f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

As mudanças climáticas podem ser responsáveis pelas alterações no comportamento de precipitação, trazendo consequências sobre o sistema hidrológico, influenciando no regime de vazões em uma bacia hidrográfica. Sendo assim, uma maneira de determinar a relação entre mudanças climáticas e alterações nas vazões é a utilização de modelos hidrológicos, definindo as entradas meteorológicas e estimando as mudanças sobre estas vazões. Neste estudo, foi utilizado o modelo MGB-IPH, como ferramenta na simulação do regime hidrológico sobre o escoamento na bacia do rio Carinhanha. Foram utilizadas séries hidrometeorológicas de clima e vazão para calibração e verificação do modelo. Para facilitar a calibração e verificação do modelo, foram delimitados 3 sub-bacias, considerando suas áreas de influência, tendo seus exutórios exatamente na localização dos postos fluviométricos. Os dados de entrada de precipitação foram alterados com reduções de até 30% e aumentos de até 30% e foram analisadas as alterações nas vazões médias. Dessa forma, foi feita uma análise de sensibilidade de vazões com relação a alterações fixas de precipitação com o objetivo de mensurar os impactos sobre o regime de vazões na bacia do Rio Carinhanha. Esta bacia está situada na divisa entre os estados de Minas Gerais e Bahia, é um importante afluente do rio São Francisco, que é de vital importância para o país, tanto pelo potencial hídrico, como por sua contribuição histórica e econômica para a região. Os resultados apontam que aumentos de 30% na precipitação média na bacia levaria a um aumento de 78% nas vazões médias, enquanto que reduções de 30% na precipitação média levaria uma redução de 43% nas vazões médias. Estas alterações podem causar impactos na bacia, uma vez que aumentos no regime de vazões podem gerar problemas de inundações em áreas mais baixas da bacia, afetando populações ribeirinhas e reduções podem acarretar problemas de abastecimento público e comprometer com a perenidade do São Francisco, já que a bacia em estudo contribui com cerca de 20% da sua perenidade.

Palavras-chave: MGB-IPH; Bacia do rio Carinhanha; precipitação; mudanças climáticas.

## ABSTRACT

SILVEIRA, Charles Weider. **Flow sensitivity analysis precipitation changes in the basin of river Carinhanha, MG-BA.** 2015. 76f. Course Conclusion Paper (TCC). Graduation in Environmental and Sanitary Engineering. Federal University of Pelotas, Pelotas.

Climate change may be responsible for changes in precipitation behavior, bringing consequences on the hydrological system, influencing the flow regime in a watershed. Thus, one way to determine the relationship between climate change and changes in flow rates is the use of hydrological models, defining the meteorological inputs and estimating changes on these flows. In this study, the MGB-IPH model was used, as a tool for simulating the hydrological regime on the flow in the river basin Carinhanha. Hydrometeorological series of climate and flow for calibration and verification of the model were used. For easier calibration and verification of the model, three sub-basins were delimited considering its areas of influence, and its outlets exactly in the location of fluviometric stations. Precipitation input data has changed with reduction of up to 30% and increase to 30% and changes in the average flow were analyzed. Thus, it was made a sensitivity analysis of flow with respect to fixed precipitation changes with the aim of measuring the impact on the flow regime in the river basin Carinhanha. This basin is located on the border between the states of Minas Gerais and Bahia, it is an important affluent of the São Francisco River, which is of vital importance to the country, both by water potential as for its historical and economic contribution to the region. Results point out that a 30% increase in average precipitation in the basin would lead to a 78% increase in the average flow, while 30% reduction in average rainfall would take a 43% reduction in the average flow. These changes may affect the basin, since increase in the flow regime can lead to problems of flooding in low-lying areas of the basin, affecting coastal communities and reductions can lead to problems of public supply and compromise to the continuity of San Francisco, as the basin under study contributes about 20% of its continuity.

Key-words: MGB-IPH; river basin Carinhanha; precipitation; climate changes.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
1.1 OBJETIVOS .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.1.1 Objetivo Geral .....	Error! Bookmark not defined.
1.1.2 Objetivo Específico.....	Error! Bookmark not defined.7
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.8</b>
2.1 Mudanças Climáticas .....	Error! Bookmark not defined.
2.2 Impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos .	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.3 Características climáticas da Bacia do rio Carinhanha .....	25
2.4 Análise de sensibilidade .....	26
2.5 Modelo MGB-IPH .....	27
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>32</b>
3.1 Caracterização da área de estudo .....	Error! Bookmark not defined.
3.2 Séries hidrometeorológicas da bacia do Rio Carinhanha.....	34
3.3 Calibração do modelo MGB-IPH .....	36
3.4 Análise de sensibilidade de vazões.....	Error! Bookmark not defined.
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
4.1 Simulação hidrológica .....	Error! Bookmark not defined.
4.2 Discretização da bacia .....	42
4.2.1 Relevo .....	43
4.2.2 Tipos de solos .....	44
4.2.3 Tipos de vegetação e uso da terra .....	45

4.2.4 Hidrografia.....	47
4.2.5 Unidades de Resposta Hidrológica .....	48
4.2.6 Definição de sub-bacias .....	49
4.3 Calibração do MGB-IPH.....	50
4.3.1 Definição dos parâmetros fixos do modelo hidrológico .....	50
4.3.2 Definição dos parâmetros calibráveis do modelo hidrológico.....	52
4.4 Hidrogramas resultantes da calibração do MGB-IPH.....	55
4.5 Resultados e avaliação da calibração e verificação .....	56
4.6 Análise de sensibilidade de vazões.....	57
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>69</b>
<b>6. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>66</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Processos que causam variabilidade e mudanças climáticas. ....	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
Figura 2. Fenômeno do efeito estufa.....	20
Figura 3. Mudança relativa (%) das vazões de rios na América do Sul .....	24
Figura 4. Mapa de clima – Sub bacia do rio Carinhanha. ....	25
Figura 5. Representação esquemática do modelo MGB-IPH. ....	28
Figura 6. Localização da bacia do Rio Carinhanha .....	33
Figura 7. Mapa com as estações climáticas, pluviométricas e fluviométricas utilizadas na calibração do modelo MGB-IPH.....	34
Figura 8. Variabilidade temporal da temperatura do ar máxima, média e mínima do conjunto de postos do INMET .....	41
Figura 9. Umidade Relativa Normal, calculada pelo INMET, nas estações utilizadas para a aplicação do modelo hidrológico na bacia do rio Carinhanha.. ....	41
Figura 10. Velocidade do Vento Normal, calculada pelo INMET, nas estações utilizadas para a aplicação do modelo hidrológico na bacia do rio Carinhanha. ....	42
Figura 11. Insolação modelo hidrológico na bacia do rio Carinhanha.....	43
Figura 12. Relevo da bacia hidrográfica do rio Carinhanha obtido com base no MDE do SRTM.....	44
Figura 13. Tipos de solo na Bacia do rio Carinhanha.....	45
<b>No table of figures entries found.</b> Figura 24. Relação entre mudança na precipitação média e na vazão média da sub-bacia 1 .....	61

Figura 25. Relação entre mudança na precipitação média e na vazão média da sub-bacia 2 .....	61
Figura 26. Relação entre mudança na precipitação média e na vazão média da sub-bacia 3.....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros fixos do modelo MGB-IPH.....	30
Tabela 2. Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH. ....	30
Tabela 3. Descrição dos postos pluviométricos. ....	35
Tabela 4. Descrição dos postos fluviométricos. ....	36
Tabela 5. Descrição dos postos climáticos .....	36
Tabela 6. Características das URH da bacia do rio Carinhanha.....	49
Tabela 7. Características dos pontos utilizados na delimitação das sub-bacias. ....	50
Tabela 8. Valores de Albedo adotados para a bacia do rio Carinhanha.. ....	51

Tabela 9. Valores de Índice de Área Foliar (IAF) adotados para a bacia do rio Carinhanha.....	51
Tabela 10. Valores da altura média das árvores adotados para a bacia do Carinhanha.....	51
Tabela 11. Valores da resistência superficial em boas condições de umidade do solo adotados para a bacia do Rio Carinhanha. ....	52
Tabela 12. Valores dos parâmetros calibráveis adotados para a sub-bacia 1 do rio Carinhanha.....	53
Tabela 13. Valores dos parâmetros calibráveis adotados para a sub-bacia 2 do rio Carinhanha.....	53
Tabela 14. Valores dos parâmetros calibráveis adotados para a sub-bacia 3 do rio Carinhanha.....	53
Tabela 15. Medidas de desempenho nos diferentes postos fluviométricos no período de calibração (de 01/01/1979 até 31/12/1991). ....	<b>5Error! Bookmark not defined.</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Com o advento da Revolução Industrial, intensificou-se o uso dos recursos naturais no planeta, acarretando melhoria gradual na qualidade de vida. No entanto, dentre os diversos produtos finais dos processos produtivos, estão as emissões de gases de efeito estufa (GEE), que, quando em concentrações altas, favorecem o aumento da temperatura na superfície da Terra (MOREIRA e GIOMETTI, 2008).

Os principais GEE são o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o metano (CH<sub>4</sub>) e o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Estes GEE contribuem para armazenar o calor na atmosfera, permitindo que as ondas eletromagnéticas derivadas do Sol atravessem a atmosfera e aqueçam a superfície terrestre. Eles dificultam a saída da radiação infravermelha emitida pela Terra, mantendo-a, assim, aquecida (SANTOS et al., 2009; MARENGO, 2001; COTTON e PIELKE, 1995).

O aumento na concentração de GEE, em conjunto com alterações no uso do solo e o desmatamento, é o principal fator responsável pelas mudanças climáticas, entre outras atividades antrópicas (IPCC, 2014). O termo mudança climática refere-se à alteração climática ocorrida em uma escala temporal, como consequência da variabilidade natural do clima somada às alterações induzidas pelas atividades humanas, alterando o equilíbrio energético do sistema climático.

Segundo o Quinto Relatório (AR5) do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), é extremamente provável (95% a 100% de probabilidade) que a influência antrópica seja a causa dominante do aquecimento observado desde meados do Século XX, tendo os GEE concorrido para o provável aquecimento médio da superfície global (66% a 100% de probabilidade), de 0,5°C a 1,3°C, no período de 1951 a 2010, com a contribuição de outras forçantes antrópicas (IPCC, 2014).

Os efeitos dessas mudanças climáticas poderão se manifestar sobre os processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica como alterações na disponibilidade e qualidade da água, aproveitamento energético, abastecimento industrial, irrigação, entre outros. Segundo Tundisi (2008), a intensidade destas mudanças pode variar de acordo com as especificidades locais, visto que as bacias hidrográficas possuem características peculiares, e, portanto, respondem de forma distinta às alterações climáticas.

Murumkar et al. (2014) destacam que a precipitação é um dos principais indicadores nos estudos de impacto de mudanças climáticas. Mudanças nos regimes de precipitação podem ter consequências sobre o sistema hidrológico, como eventos extremos de secas e/ou enchentes mais severas, influenciando diretamente as vazões dos rios (IPCC, 2007).

Sendo assim, é possível que as alterações no clima ou mesmo mudanças climáticas já estejam acontecendo e que seus efeitos possam ser observados, por exemplo, nas séries de vazões de rios brasileiros e em toda a América do Sul. Alguns rios mostram períodos recentes mais úmidos ou mais secos do que as médias de longo prazo (BARROS et al., 2006).

De acordo com Hulme e Sheard (1999), é de se esperar que as alterações no regime de precipitação tenham implicações no regime de escoamento dos rios brasileiros. Também relatam, por exemplo, o aumento de 15% nas vazões do Rio Paraná desde a década de 1960, consistente com o aumento das precipitações observado nessa década.

Segundo Ambrizzi et al. (2007) e Marengo (2007, 2010), com vazões mais baixas e temperaturas da água mais elevadas, serão intensificados os efeitos da poluição nos corpos hídricos, reduzindo a qualidade da água com impactos sobre a agricultura, geração de energia, abastecimento público, recreação, e sobre os diversos setores. Segundo os mesmos autores, a ocorrência de chuvas mais intensas propiciará a elevação do nível dos rios e o alagamento das várzeas, provocando enchentes. Em áreas urbanas, a elevada impermeabilização do solo dificulta a absorção de água, potencializando as situações de inundação bem como de deslizamentos de encostas, as quais representam sérios problemas ambientais e de saneamento básico para as cidades.

Uma das abordagens para determinar a relação entre as mudanças climáticas e o escoamento superficial em bacias é a utilização de modelos hidrológicos, definindo as entradas meteorológicas e estimando as mudanças sobre o escoamento (XU et al., 2012). No contexto dos recursos hídricos, o principal efeito das alterações da precipitação se faz sentir no escoamento de bacias hidrográficas. Com isso, um aumento ou decréscimo X% na chuva pode levar a um aumento ou decréscimo de Y% na vazão média de um rio. Na literatura, esta alteração da vazão a uma proporcional alteração da precipitação é conhecida como sensibilidade de vazões e depende das características físicas da bacia hidrográfica (ADAM, 2011).

Desta forma, os impactos das mudanças climáticas sobre as vazões nos rios são comumente avaliados pelo uso de modelos hidrológicos chuva-vazão, e um modelo extensamente aplicado é o Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH) (COLLISHONN e TUCCI, 2001). Desde seu desenvolvimento, já foram realizadas diversas aplicações do modelo MGB em várias regiões do país (NETO et al., 2006; ADAM, 2011; MELLER et al., 2012; COLLISHONN e TUCCI, 2001; TOMASELLA et al., 2008; SILVA et al., 2007).

Recentemente, Tomasella et al. (2008) realizaram um estudo sobre as bacias do Rio Araguaia e Tocantins, utilizando o modelo hidrológico MGB-IPH (COLLISHONN e TUCCI, 2001) para avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre as disponibilidades hídricas. Os resultados mostram que poderá ocorrer uma redução de 20% na vazão média do rio Tocantins, em Tucuruí, no período de 2080 até 2099, se comparado ao período de 1970 a 1999. O impacto ocorreria de forma mais intensa nos períodos de estiagem.

A Bacia hidrográfica do Rio São Francisco é de vital importância para o país, não apenas pelo volume de água transportado em uma região semi-árida, mas, também, pelo potencial hídrico passível de aproveitamento e por sua contribuição histórica e econômica para a região. As principais atividades industriais são: siderurgia, mineração, química, têxtil, agroindústria, papel e equipamentos industriais (GOMES, 2014). Com isso, o uso dos recursos hídricos para estas atividades, além do uso para a geração de energia elétrica, acarretam impactos no regime de vazões.

Além disso, o rio São Francisco se encontra em um estado avançado de degradação e, dentre os principais agentes poluidores, destacam-se as ações desordenadas de mineradoras, a erosão do solo e o uso indiscriminado de agrotóxicos. Concomitantemente, observa-se o lançamento de efluentes domésticos e industriais, além da disposição inadequada de resíduos sólidos, comprometendo a qualidade dos diversos rios que compõem a bacia hidrográfica em questão. Uma das áreas mais críticas é a região de Belo Horizonte que possui elevada contaminação das águas provenientes da elevada carga inorgânica poluidora proveniente da extração e beneficiamento de minerais (GOMES, 2014). O aumento da contaminação deve atuar fortemente na economia da região, tendo como consequências profundas alterações na economia dependente da disponibilidade e demanda dos recursos hídricos.

O setor energético brasileiro é altamente dependente das hidrelétricas para produção de energia, envolvendo importantes riscos de oferta, pois o insumo das usinas hidrelétricas é a vazão dos rios, que por sua vez, é dependente do clima e sua variabilidade temporal e espacial (Santana, et al. 2011). De acordo com o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (2007), o aproveitamento

hidrelétrico do rio São Francisco, cujo potencial estimado é de 26300 MW, estando a instalados 10553 MW (15% do país), representa a base para o suprimento de energia da região Nordeste.

Nesse contexto, a bacia do rio Carinhanha, sub-bacia do rio São Francisco, objeto deste estudo, possui como principal atividade a agropecuária, exercendo um importante papel na economia de todos os municípios da bacia. Em aspectos ambientais, esta bacia está dentro do Bioma Cerrado que sofre uma intensa retirada da vegetação natural para uso agropecuário (RODRIGUES, 2002; SANO et al., 2009).

A ocupação da terra de forma desordenada e inadequada na região provoca a compactação do solo com a diminuição da infiltração da água, aumento do escoamento superficial, intensificação dos processos erosivos, perda da fertilidade natural e assoreamento dos rios (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006). O conhecimento do regime de chuvas e as projeções de vazões dos rios da bacia serão imprescindíveis para avaliação dos efeitos potenciais e para a tomada de decisões.

Outrossim, a bacia do rio Carinhanha possui uma importante Unidade de Conservação Federal – o Parque Nacional Grande Sertão Veredas - com uma área rica em biodiversidade e representativa das fitofisionomias do Cerrado. Além de ser de vital importância para a conservação do Bioma Cerrado, ela engloba importantes áreas de recarga de aquíferos e nascentes do Rio Carinhanha, que por sua vez, contribui em cerca de 20% com a perenidade do Rio São Francisco no período das secas (BORGES, 2009).

Diante dessa problemática, se faz necessário um estudo na bacia hidrográfica do rio Carinhanha, sub-bacia do rio São Francisco, que é uma região altamente dependente de atividades agrícolas podendo sofrer os impactos socioeconômicos resultantes das alterações climáticas, além de seus recursos hídricos serem de extrema relevância para o regime de vazões na bacia do rio São Francisco.

Por conseguinte, neste trabalho, foi feita uma avaliação, através da aplicação da modelagem hidrológica, de como as vazões na bacia hidrográfica do rio Carinhanha podem ser influenciadas pela variação da precipitação. Portanto, será

feita uma análise de sensibilidade das vazões sobre as possíveis mudanças na precipitação, considerando cenários futuros de mudanças climáticas.

Portanto, o presente estudo visa fornecer informações à sociedade e aos gestores públicos e contribuir para um gerenciamento adequado dos seus recursos hídricos, tendo em vista as possíveis alterações nos regimes de vazões dos rios na bacia do rio Carinhanha.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem por objetivo realizar uma análise de sensibilidade das vazões com relação a alterações fixas de precipitação segundo resultados apresentados no Quinto Relatório (AR5) do IPCC (IPCC, 2014), para assim, detectar possíveis impactos das mudanças climáticas sobre os corpos hídricos desta bacia e suas relações com o ambiente.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar como as anomalias de precipitação podem afetar o regime de vazão dos rios;
- Identificar possíveis impactos sobre os recursos hídricos, agricultura, setor energético, abastecimento humano e industrial, qualidade das águas e recursos naturais.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Mudanças climáticas**

Para um melhor entendimento do estudo das flutuações climáticas, é necessário o entendimento dos conceitos de variabilidade, de anomalia e de mudança climática. Define-se a variabilidade climática como uma variação das condições climáticas em torno da média climatológica. Já anomalia climática refere-se a uma flutuação extrema de um elemento em uma série climatológica, com desvios acentuados do padrão observado de variabilidade. Por outro lado, mudança climática é um termo que designa uma tendência de alteração da média no tempo (RAMOS et al., 2008). Na Figura 1, estão representados os principais processos que causam variabilidade e as mudanças climáticas (BARRY e CHORLEY, 2013).

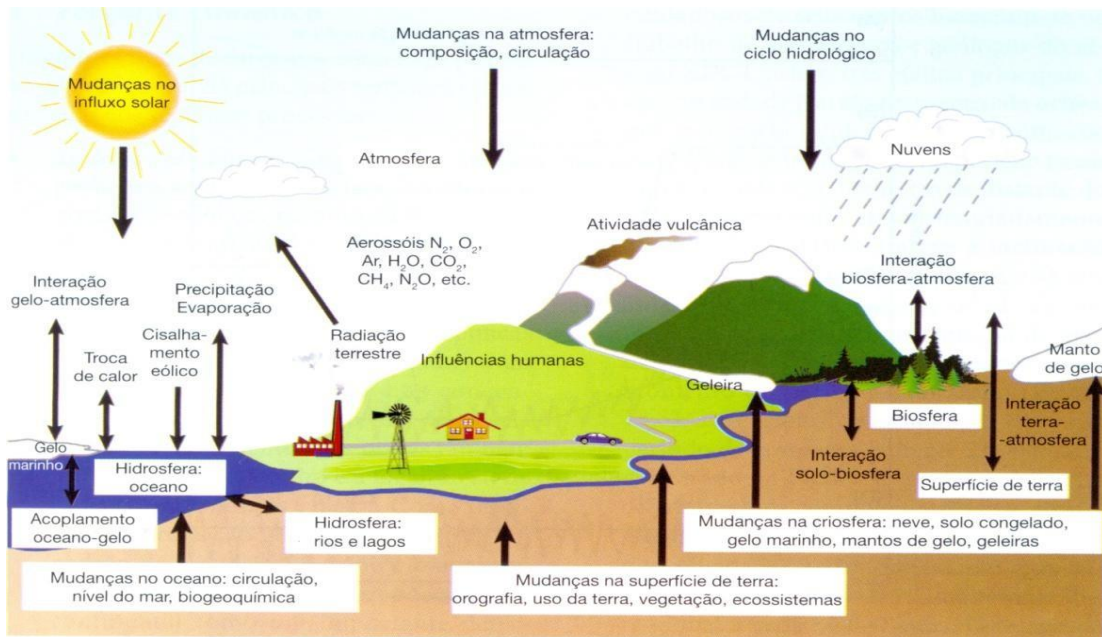


Figura 1. Processos que causam variabilidade e mudanças climáticas. Fonte: Barry e Chorley (2013).

As mudanças climáticas globais e sua manifestação mais preocupante, a intensificação do aquecimento da baixa atmosfera do planeta, apontam tanto para alterações negativas quanto positivas das paisagens e das condições de vida dos homens na superfície do planeta. As alterações negativas constituem-se nas mais importantes, pois que suas repercussões acenam para o desencadeamento de conflitos gerais pela acessibilidade a determinados recursos naturais (solos, florestas, água potável, etc.) e, de maneira muito específica para a expansão geográfica e para a intensificação de determinadas enfermidades. Dentre estas, destacam-se as parasitárias e infecciosas cuja incidência depende diretamente das condições climáticas. A intensificação do aquecimento global encontra-se, todavia, envolta em consideráveis incertezas e especulações, sobretudo quando se discute as causas do mesmo (MENDONÇA, 2006).

O desequilíbrio do balanço de energia do sistema terra – atmosfera, o qual ocasiona maior retenção de energia e o aumento do efeito estufa, está provocando um aquecimento da temperatura média do planeta. O fenômeno do efeito estufa ocorre devido à presença natural de gases, como o dióxido de carbono, o metano e o vapor de água na atmosfera, que permite que parte da energia emitida pelo Sol seja aprisionada. De acordo com Gore (2006), quando a energia do Sol incide na atmosfera sob a forma de ondas de luz aquecendo a Terra, parte dessa energia é

refletida e volta a irradiar-se pelo espaço, sob a forma de ondas infravermelhas. Em condições normais, uma parte dessa radiação é naturalmente retida pela atmosfera – e isso é bom, pois mantém a temperatura da Terra dentro de limites confortáveis (Figura 2).

Ainda segundo Gore (2006), o problema enfrentado agora é que a fina camada atmosférica está se tornando mais espessa em consequência da enorme quantidade de dióxido de carbono e outros gases do efeito estufa produzidos pelo homem. A atmosfera, agora mais densa, retém grande parte da radiação infravermelha que deveria escapar e se irradiar pelo espaço. Como resultado, a temperatura da atmosfera terrestre – e também dos oceanos – está se tornando mais alta, transformando a Terra em uma grande “estufa” (GORE,2006).

Reconhecendo a problemática das mudanças climáticas globais, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) e a UNEP (United Nations Environment Programme) criaram o IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), em 1988. O IPCC é uma entidade formada por cientistas de todo o mundo, com objetivo de estudar e divulgar abertamente as informações técnicas e sócio-econômicas e os impactos relevantes dos riscos à humanidade, visando criar mecanismos para a adaptação e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas globais.



Figura 2. Fenômeno do efeito estufa. Disponível em <http://www.rudzerhost.com/ambiente/estufa.htm>

Desde 1988, o IPCC publicou cinco Relatórios de Avaliação, os chamados ARs (*Assessment Report*): em 1990 (AR1), 1995 (AR2), 2001 (AR3), 2007 (AR4) e 2014 (AR5). Os relatórios são compostos de três volumes: Ciência (GTI); Impactos, Adaptações e Mitigações (GTII); e Dimensões Socioeconômicas das Mudanças Climáticas (GTIII). Analisando-se as conclusões de cada um dos relatórios nota-se claramente que a confiança nas previsões e na influência do ser humano nas mudanças climáticas vem aumentando (ESPARTA et al., 2002).

Em 2000, o IPCC concluiu um estudo sobre cenários de emissões e, baseado nestes e em resultados de 11 simulações com modelos climáticos globais cobrindo, pelo menos, o período de 1870 a 2100, foram elaborados cenários de alterações climáticas para várias regiões do planeta, incluindo cenários para o norte e para o sul da América do Sul (CARTER et al., 2000).

Um cenário pode ser definido como uma descrição do futuro, baseando-se num conjunto de suposições, acerca de relações chaves e mecanismos geradores, que devem ser coerentes e consistentes. Neste caso, os resultados são denominados projeções climáticas, que segundo IPCC (2014), é a resposta do sistema climático a um cenário de emissão e/ou concentração de gases do efeito estufa e aerossóis, ou cenários de forçantes radiativas frequentemente baseadas em simulações de modelos climáticos.

Em 2007, em seu quarto relatório (AR4) sobre mudanças climáticas, o IPCC adotou um conjunto de cenários climáticos, que foram agrupados de acordo com quatro projeções diferentes de emissões de gases de efeito estufa para o futuro, relacionados com aspectos de desenvolvimento social, econômico e tecnológico, crescimento populacional, preocupação com o meio ambiente e diferenças regionais. Estes grupos de cenários são conhecidos como cenários A1, A1B, A2 e B2. Também ocorrem variações destes grupos como os cenários A1T e A1F.

Resumidamente os cenários A2 e A1F representam uma perspectiva pessimista, com previsão de maior emissão de GEE na atmosfera ao longo das próximas décadas, enquanto os cenários B1, B2, e A1T representam uma perspectiva mais otimista, com menor emissão de GEE nas próximas décadas. Dentre estes conjuntos de cenários, o A1B (chamado de business as usual ou BAU)

é o que tem sido investigado de forma mais ampla (BARRY e CHORLEY, 2013; NAKICENOVIC, 2000) e apresenta uma projeção de emissões de GEE intermediárias em relação aos demais cenários.

No quinto Relatório (AR5), publicado em 2014 pelo IPCC, foram estabelecidos novos cenários, os chamados RCPs (Representative Concentration Pathways) e foram projetados de forma a acomodar uma gama de possibilidades de desenvolvimento econômico e social (TAYLOR et al., 2012; KHARIN et al., 2013).

Três RCPs principais são utilizados para as simulações futuras do clima, RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5. O número associado ao RCP é o valor do fluxo de calor ou radiativo ao final do século XXI em Watts/m<sup>2</sup>, o que equivale respectivamente, a um nível de emissão de CO<sub>2</sub> de 490 ppm (partes por milhão), 650 ppm e 1370 ppm. (VUUREN et al., 2011).

O cenário RCP 4.5 é o cenário desejado, ou seja, aquele em que os países consigam controlar os níveis de emissões, e o nível de CO<sub>2</sub> na atmosfera se estabilize logo após 2100. Entretanto, o cenário RCP 8.5 é reconhecidamente o mais provável. O aumento de temperatura induz a uma maior evapotranspiração, reduzindo a quantidade de água no solo, mesmo que as chuvas não diminuam significativamente. Esse fato pode causar a substituição dos biomas existentes hoje, por outros mais adaptados a climas com menor disponibilidade hídrica para as plantas, tais como savanas substituindo florestas, caatinga substituindo savanas, semi-deserto substituindo caatinga. Sendo assim, são importantes estimativas futuras do ciclo hidrológico (HORIKOSHI et al., 2007).

Diante das alterações climáticas já observadas, a ação integrada no âmbito internacional se faz necessária, particularmente quando se consideram os cenários futuros. Para tanto, várias iniciativas têm sido tomadas no âmbito de organizações inter e supranacionais visando estabelecer políticas e ações para reduzir as mudanças climáticas globais e seus efeitos. O Protocolo de Kyoto, sua assinatura por todos os países, e os avanços observados com a realização das diversas conferências mundiais do clima indicam medidas possíveis para minimizar os impactos negativos das referidas mudanças. Todavia, há ainda muito a ser feito para que as ações se concretizem (MENDONÇA, 2006).

Neste contexto, a precaução parece ser a atitude mais correta a ser tomada pela sociedade. Para tanto, várias iniciativas podem ser implementadas, tais como a redução do consumismo e do desmatamento. A estabilidade da temperatura média da Terra, ou a redução nos níveis previstos repercutir-se-á na manutenção das condições de vida no planeta, embora os cenários previstos sugiram como certa, em geral, a elevação das temperaturas médias do planeta nos próximos 100 anos (MENDONÇA, 2006).

## **2.2 Impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos**

A alteração climática, associada com as emissões de gases de efeito estufa, modificam as variáveis representativas do clima como temperatura, precipitação, umidade do ar, radiação, entre outros. Estas variáveis afetam o comportamento hídrico de uma região, podendo ocorrer significativos impactos sobre o regime hidrológico (ADAM, 2011).

Segundo as projeções do IPCC (2014), algumas consequências sobre o ciclo hidrológico seriam: Um ciclo hidrológico global mais expressivo (eventos extremos mais intensos); aumento nas intensidades da precipitação; aumento geral na evaporação; aumento na variabilidade das descargas dos rios junto com a elevação na pluviosidade. Partindo do pressuposto que cada bacia hidrográfica possui diferentes características físicas, como relevo e tipo de solo, as respostas às modificações climáticas podem ser divergentes dentre diferentes bacias hidrográficas.

Sendo assim, um aumento de vazões pode ser prejudicial para populações ribeirinhas em uma determinada região, porém um aumento de vazões em outra região pode ser benéfico, como foi percebido no setor energético brasileiro depois de 1970, sendo possível gerar mais energia (TUCCI, 2007).

Vários estudos apontam que o processo de mudança do clima poderá ter efeitos diretos e/ou indiretos sobre os recursos hídricos (PARRY ET AL, 2007, BATES, 2008, MARENGO, 2007, TUNDISI, 2008, MARENGO, 2010). De acordo

com Hulme e Sheard (1999), é de se esperar que as alterações no regime de precipitação tenham implicações no regime de escoamento dos rios brasileiros.

Na região do semiárido do Nordeste brasileiro, Krol e Bronstert (2007) identificaram uma tendência significativa de redução nas vazões do Rio Jaguaribe, após 2025, considerando um cenário de redução de 50% da precipitação nas próximas cinco décadas. Em um cenário de redução de 21% da precipitação, os autores não encontraram tendência significativa de alteração da vazão.

A partir de estudo realizado para diversas regiões do mundo, Rosenzweig et al., (2004) preveem que o suprimento de água na região Sul do Brasil (Rio Grande do Sul e Santa Catarina) será suficiente para atender à demanda da agricultura e, ainda, promover a expansão das áreas irrigadas.

Na figura 3 são apresentadas mudanças relativas de vazões de rios da América do Sul utilizando projeções climática do IPCC AR4. Para finais do século XXI, são esperados aumentos nas vazões dos rios da costa Oeste da América do Sul, próxima ao Peru-Ecuador e na bacia do Paraná-Prata. Também são esperados reduções nas vazões dos rios São Francisco Parnaíba, Tocantins, Xingu e outros no Leste da Amazônia, assim como no Chile central. Essas projeções são muito importantes, pois as alterações nas vazões podem mudar a frequência de enchentes, e isso pode produzir danos nos ecossistemas, e afetar a produção de alimentos, transportes e geração de energia. Os aumentos nas vazões são consistentes com os aumentos de chuva no futuro nessas regiões (MEEHL et al., 2007).

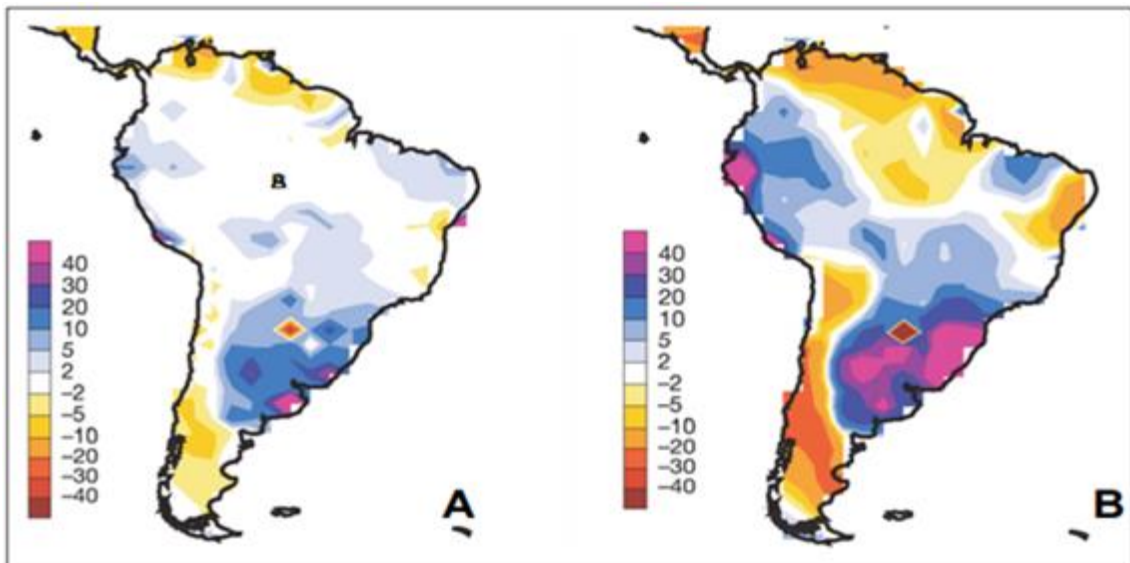


Figura 3. (A) Mudança relativa (%) das vazões de rios na América do Sul (média de nove modelos globais do IPCC AR4) para o período 1971-2000 relativo à média de 1900-1970, da rodada do clima do século XX (20C3M) do IPCC; (B) Mudança relativa (%) das vazões de rios na América do Sul (média de nove modelos globais do IPCC AR4) para o período 2041-2060 do cenário A1B relativo à média de 1900-1998 (rodada 20C3M).

As mudanças climáticas representam uma ameaça aos sistemas naturais e humanos, podendo resultar em transformações ambientais, econômicas, políticas e sociais. Neste contexto, os riscos derivados das mudanças climáticas, vêm sendo motivo de preocupação, sendo o setor de recursos hídricos um dos mais impactados.

No Brasil, já existe evidência científica de que a mudança do clima pode afetar a disponibilidade hídrica em muitas regiões. A resposta dos recursos hídricos às mudanças climáticas é variável segundo as especificidades de cada bacia hidrográfica. Regulamentações, estratégias e planos para adaptação visando minimizar os efeitos adversos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos são necessários, e de fato, já vêm sendo desenvolvidos por alguns países ou grupos de países, a exemplo da União Europeia. No Brasil, em 2011, a revisão do Plano Nacional de Recursos Hídricos, menciona pela primeira vez, o tema mudanças climáticas no processo de planejamento dos recursos hídricos (VEIGA e MAGRINI, 2013).

### 2.3 Características climáticas da Bacia do rio Carinhanha

O mapa de classificação climática de Thornthwaite (AYOADE, 1998) foi elaborado pela CODEVASF (Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba) para todo o vale do São Francisco (Figura 4). Por esta classificação, a maior parte da sub-bacia do Carinhanha possui clima subúmido seco. Na porção oeste há uma zona de clima úmido e a leste, uma pequena área de clima semi-árido, já próximo ao rio São Francisco (BORGES, 2009).

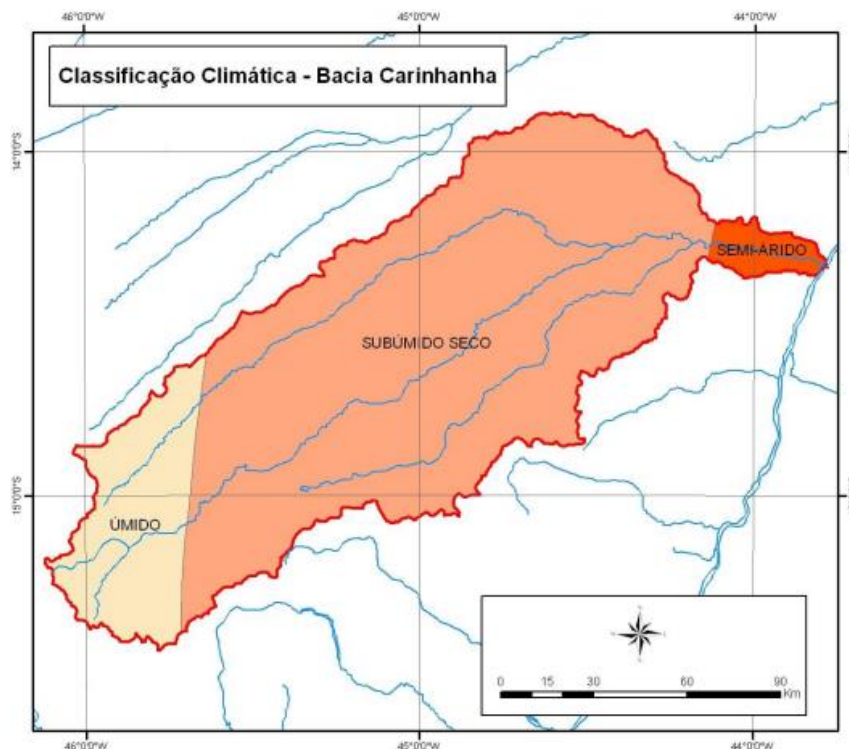


Figura 4 – Mapa de clima – Sub bacia do rio Carinhanha (Fonte:CODEVASF, 1998).

Os fenômenos El Niño e La Niña interferem sensivelmente no clima da região, proporcionando períodos de secas e períodos úmidos com frequência irregular. O elemento que mais caracteriza o clima do vale é a pluviosidade. Em todo o vale, há um período seco bem marcado. A precipitação apresenta média anual com cerca de 1.000 mm, sendo os mais altos valores na ordem de 1.500 mm e os mais baixos com cerca de 350 mm. A temperatura média anual de 20 a 26,5 °C, baixo índice de nebulosidade e, por consequência, grande incidência da radiação solar. Em função das elevadas temperaturas e dos baixos índices de nebulosidade, a evapotranspiração potencial média anual é muito alta, da ordem de 896 mm, apresentando valores elevados em toda região: entre 1300mm e 2140mm (FGV,

1998). A elevada evapotranspiração potencial não compensada pelas chuvas afeta expressivamente o balanço hídrico dos solos (IORIS, 2001).

## **2.4 Análise de sensibilidade**

A sensibilidade ou elasticidade de vazões refere-se à alteração de vazão a uma proporcional alteração de precipitação. Um aumento ou decréscimo de X% na chuva pode levar a um aumento ou decréscimo de Y% na vazão média de um rio. Esta relação é importante para identificar os efeitos da alteração que ocorrem na chuva e a consequência na vazão dos rios em estudos de mudanças climáticas. Dessa forma, este tipo de análise é uma alternativa para mensurar a vulnerabilidade da bacia a mudanças climáticas (ADAM, 2011).

Paiva e Collischonn (2010), ao analisarem a sensibilidade de vazões na bacia hidrográfica do Quaraí, no RS, constataram que o efeito de uma mudança da precipitação média é amplificado na vazão média desta bacia, em uma razão  $S = 1,85$ . A cada acréscimo/decrécimo de 1% na precipitação média tem-se um acréscimo/decrécimo de 1,85% na vazão média da bacia.

Um estudo realizado por Pontes et al.(2013) na bacia do rio Paraná à montante de Itaipu, indica que um aumento de 50% na precipitação média na bacia levaria a um aumento de 142% na vazão média enquanto uma redução de 50% na precipitação média levaria a uma redução de 84% na vazão média. Isso revela que uma variação de -84% na vazão média, que antes era de 11800 m<sup>3</sup>/s, passou a ser 1800 m<sup>3</sup>/s aproximadamente. Isso significa que, em afluentes menores, a diminuição da precipitação pode causar uma escassez de água, comprometendo a disponibilidade hídrica na região.

O aumento na precipitação também pode ser muito preocupante, tanto para a segurança de cidades ribeirinhas quanto para a segurança das usinas hidrelétricas da região. Ele pode comprometer obras de contenção de cheias e até as usinas hidrelétricas da região.

## **2.5 Modelo MGB-IPH**

Com o intuito de avaliar os impactos que possíveis mudanças no clima podem ocasionar sobre as vazões nos rios, tem-se utilizado de modelos hidrológicos em conjunto com projeções de modelos climáticos para tal análise. Tais impactos também podem ser avaliados por técnicas de análise de sensibilidade, como descrito anteriormente.

Neste contexto, os modelos hidrológicos são ferramentas matemáticas utilizadas para representar o comportamento dos elementos que compõem o ciclo hidrológico de modo a produzir resultados próximos aos encontrados na natureza. Devido à complexidade de se representar os fenômenos naturais, a modelagem hidrológica trabalha com simplificações desses fenômenos (MATOS, 2012).

Os principais usos para os modelos chuva-vazão são: o estudo do comportamento dos fenômenos hidrológicos; análise de consistência; previsão de vazão; previsão dos cenários de planejamento; estudos dos efeitos resultantes de modificação do uso do solo; estudo do efeito de mudança climática (TUCCI, 1998).

O Modelo Hidrológico Distribuído de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (MGB-IPH, COLLISCHONN, 2001) foi desenvolvido para a simulação de grandes bacias, superiores a 10 mil km<sup>2</sup>, sendo utilizado como ferramenta na simulação do regime hidrológico e na avaliação dos efeitos em macro-escala de diferentes percentuais de usos de água superficial e subterrânea sobre o escoamento no rio. A partir dos cenários de usos simulados no modelo, procura-se definir critérios de outorga integrada dos recursos hídricos na bacia em estudo (COLLISCHONN, 2001; SILVA, 2007).

O modelo MGB-IPH é um modelo hidrológico distribuído, que subdivide a bacia hidrográfica em um grande número de unidades menores, denominadas mini-bacias, comumente através de modelos digitais de elevação do terreno. Em cada uma das mini-bacias são realizados cálculos de balanço hídrico em passo de tempo diário, e são gerados resultados de vazão para cada dia ao longo do período de tempo simulado. São representados matematicamente os processos hidrológicos de interceptação, infiltração e armazenamento de água no solo, evapotranspiração,

escoamento e propagação de vazões ao longo dos rios principais (PEREIRA e KAYSER, 2013). A figura 5 mostra o esquema do modelo MGB-IPH.

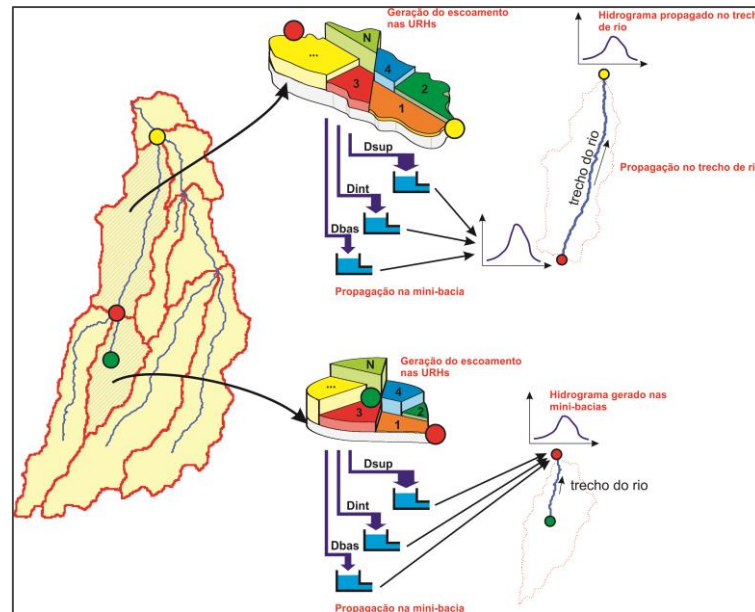


Figura 5 - Representação esquemática do modelo MGB-IPH (Fonte: Collischonn et al., 2007).

O modelo calcula a evaporação e transpiração pela equação de Penman – Monteith. Esta formulação tem uma forte base física, o que permite representar as alterações de evapotranspiração associadas às mudanças de uso do solo, embora para isso sejam necessários dados específicos para cada tipo de vegetação, que não estão normalmente disponíveis (COLLISCHONN et. al., 2007).

A propagação nos trechos de rio utiliza o método de Muskingum-Cunge, que relaciona a vazão de saída de um trecho de rio em um intervalo de tempo qualquer, às vazões de entrada e saída no intervalo de tempo anterior e à vazão de entrada no intervalo atual. Os parâmetros do modelo Muskingum-Cunge são calculados com base nos dados de comprimento, declividade, rugosidade e largura média dos trechos de rio. O comprimento e a declividade são obtidos de mapas topográficos. A largura é obtida com base em uma relação com a área de drenagem válida para a bacia e a rugosidade é estimada com base em observações locais, fotografias e informações sobre material do leito (ADAM, 2011).

O intervalo de tempo diário utilizado no modelo é subdividido em intervalos menores durante a propagação por Muskingum-Cunge na rede de drenagem,

considerando o intervalo de tempo ideal para a propagação apresentar precisão no tempo viagem e no amortecimento do hidrograma.

A infiltração no solo e o escoamento superficial são determinados a partir de modelo baseado em uma relação probabilística entre umidade do solo e fração de área saturada (áreas onde a infiltração é nula), conforme utilizado por Todini (1996) e Moore e Clarke (1981). Os volumes de escoamento sub-superficial e subterrâneo são funções da umidade do solo. O escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo são propagados em nível de célula através de reservatórios lineares (TUCCI, 2005).

Por ter uma forte base física, o modelo MGB-IPH é apropriado para ser utilizado em estudos de avaliação de impactos de mudanças no uso do solo ou mudanças climáticas. O MGB-IPH já foi aplicado com sucesso em estudos anteriores sobre impactos de mudanças climáticas em bacias hidrográficas, incluindo o rio Grande (NÓBREGA et al., 2011) o rio Ibicuí, importante afluente do rio Uruguai (ADAM, 2011), o rio Quaraí, entre o RS e o Uruguai (PAIVA et al., 2010), e o rio Paraguai na região do Pantanal (BRAVO et al., 2011).

### 2.5.1. Parâmetros do MGB/IPH

O modelo MGB-IPH possui uma série de parâmetros fixos e calibráveis que são definidos em diferentes etapas de sua aplicação.

Os parâmetros fixos (Tabela 1) são utilizados no cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith, estando assim associados com a vegetação existente em cada Unidade de Resposta Hidrológica (URH). Estes parâmetros podem ser estimados com auxílio de dados contidos na literatura (e.g. SHUTTLEWORTH, 1993; COLLISCHONN, 2001), bem como em aplicações anteriores do modelo (e.g. SILVA et al., 2007; COLLISCHONN, 2008; RIBEIRO NETO, 2006; PAIVA et al., 2011).

Tabela 1 - Parâmetros fixos do modelo MGB-IPH. Adaptado de Fan (2011).

<b>Parâmetro Fixo</b>	<b>Descrição</b>
Índice de Área Foliar (IAF)	O IAF expressa a relação entre a área das folhas de todas as plantas e da área de uma parcela de solo. É um parâmetro adimensional ( $m^2.m^{-2}$ ) e que, em geral, pode ser

---

	medido ou estimado a partir de informações na bibliografia.
Albedo	O albedo é a parcela da radiação solar que é refletida ao atingir a superfície do solo, considerando sua cobertura vegetal.
Resistência Superficial	A resistência superficial representa a resistência ao fluxo de umidade do solo, através das plantas, até a atmosfera. Esta resistência é diferente para os diversos tipos de plantas e depende de variáveis ambientais como a umidade do solo, a temperatura do ar e a radiação recebida pela planta.
Altura do Dossel	A altura média da vegetação é utilizada no modelo hidrológico para estimar a resistência aerodinâmica, que atua no controle da evapotranspiração. Quanto maior a resistência aerodinâmica, menor é o fluxo de evapotranspiração. A resistência aerodinâmica é considerada menor em florestas, onde a altura média da vegetação é maior e intensifica a turbulência do vento.

---

Os parâmetros calibráveis (Tabela 2) estão associados às propriedades físicas das URHs (Unidade de Resposta Hidrológica), e são aqueles para os quais o modelo é mais sensível. Tais parâmetros podem ser alterados no processo de calibração, validando, assim, o uso do modelo para determinada bacia hidrográfica.

Tabela 2 - Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH. Adaptado de Fan (2011).

<b>Parâmetro Calibrável</b>	<b>Descrição</b>
Capacidade de Armazenamento do Solo (Wm)	Capacidade de armazenamento de água no solo.
Forma da relação entre armazenamento e saturação (b)	Parâmetro empírico que define a variabilidade da capacidade de armazenamento do solo em torno de Wm.
Vazão durante a estiagem (Kbas)	Parâmetro que controla a vazão durante a estiagem. Valores mais altos implicam em maior escoamento subterrâneo.
Quantidade de água que esco subsuperficialmente (Kint)	Parâmetro controla a quantidade de água da camada de solo que esco subsuperficialmente.
Forma da curva de redução da drenagem intermediária	Controla a forma da curva de redução da drenagem intermediária ou sub-superficial do solo.

---

---

(XL)		
Fluxo do reservatório subterrâneo para a camada superficial (CAP)		Controla a possibilidade de retorno de água subterrânea para a camada de solo.
Armazenamento Residual (Wc)		Limita o armazenamento residual e subterrâneo.
Calibração da propagação superficial (CI)		Parâmetro para calibração da propagação superficial nas minibacias.
Calibração da propagação sub-superficial (CS)		Parâmetro para calibração da propagação subterrânea nas minibacias.
Retardo do reservatório subterrâneo (CB)		Parâmetro que representa o retardo do reservatório subterrâneo.
Vazão de Base (QB)		Parâmetro que representa o fluxo de base da minibacia.

---

### 3. METODOLOGIA

Este trabalho propõe um estudo de modelagem hidrológica para análise de sensibilidade de vazões devido à precipitação na bacia hidrográfica do Rio

Carinhanha, segundo as projeções climáticas contidas no Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC. Para tanto as seguintes etapas são necessárias:

- i. As séries hidrometeorológicas de clima e vazão foram empregadas para realizar a calibração e verificação do modelo MGB-IPH. Dessa forma, foram geradas as séries observadas que representam o clima e vazão presente.
- ii. Nesta etapa, foram produzidas as séries de precipitação e posteriormente uma análise de sensibilidade de vazões realizando modificações nas variáveis de precipitação. As modificações destas variáveis são realizadas de acordo com os resultados do AR5, do cenário RCP 4.5, que sintetizam as condições do clima para o século XXI. Como produto final, se tem a sensibilidade das vazões na bacia do rio Carinhanha em relação às variáveis de precipitação.
- iii. Análise dos resultados em termos de vazões médias.

### **3.1 Caracterização da área de estudo**

A bacia do Rio Carinhanha está situada na divisa dos estados de Minas Gerais e Bahia, (figura 6) abrangendo parcialmente 8 municípios mineiros e 4 baianos. Localiza-se entre os paralelos 13°50' e 15°30' de latitude sul e os meridianos 43°40' e 46°10' de longitude oeste de Greenwich, abrangendo uma área aproximada de 1.700.000 hectares (BORGES, 2009).

O Rio Carinhanha é afluente da margem esquerda do Rio São Francisco. Suas nascentes mais elevadas encontram-se a uma cota altimétrica de 920 metros, e sua desembocadura, no Rio São Francisco, tem aproximadamente 440 metros de altitude, o que representa uma amplitude altimétrica de cerca 480 metros (BORGES, 2009).

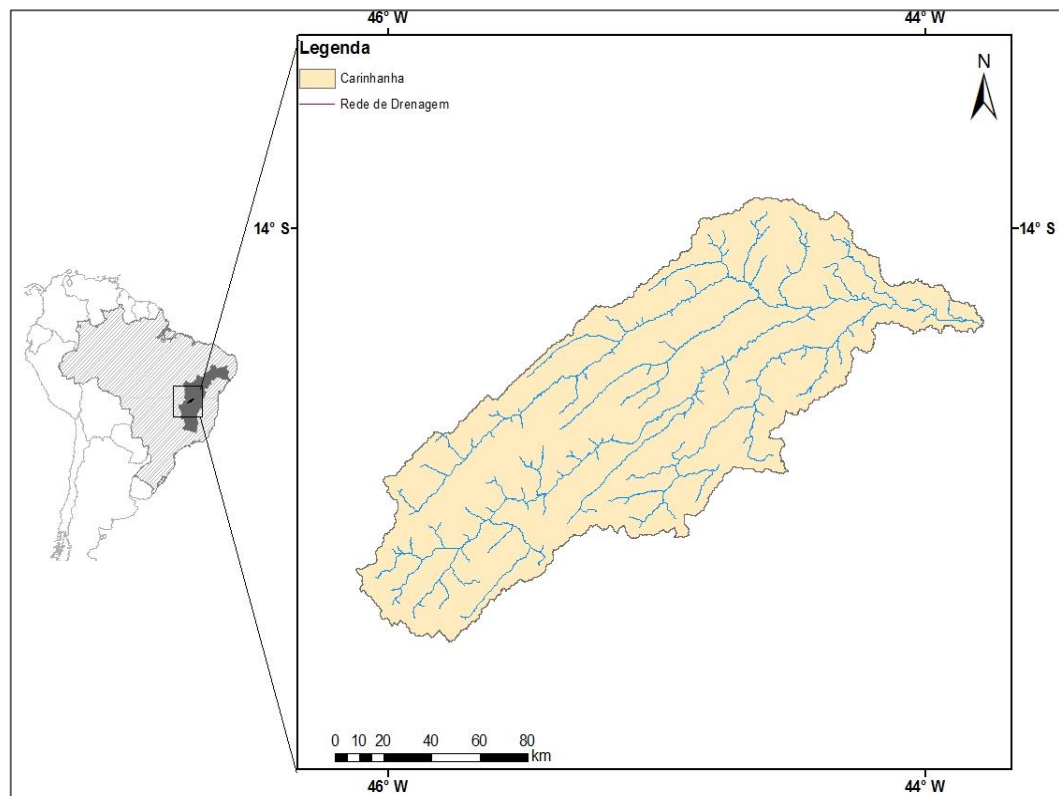


Figura 6 – Localização da bacia do Rio Carinhanha

Muitos afluentes do Rio São Francisco são perenes, além do próprio São Francisco. No Médio São Francisco há afluentes temporários na margem direita, onde predomina a caatinga como vegetação. Na parte mais baixa do Médio São Francisco, a agricultura irrigada é predominante com fruticultura de exportação e produção hortícola. A vegetação do Baixo São Francisco é predominantemente de cerrado e mata Atlântica. O Baixo São Francisco tem clima úmido, porém, com afluentes que provêm do semi-árido (ANA, 2004).

Destaca-se que a bacia compreende uma parte significativa do Polígono das Secas, que constitui um território reconhecido como sujeito a períodos críticos de prolongadas estiagens e situa-se, majoritariamente, na região Nordeste, porém estende-se até o norte de Minas Gerais (DA SILVA, 2004). Na porção sudoeste da área de estudo está localizado o Parque Nacional Grande Sertão Veredas, a única Unidade de Conservação Federal da bacia do Carinhanha. Trata-se de uma área rica em biodiversidade, com grande representatividade das fitofisionomias do Cerrado. É uma das mais importantes unidades de conservação do Bioma Cerrado, além de englobar importantes áreas de recarga de aquíferos e nascentes do Rio

Carinhanha, que contribui em cerca de 20% com a perenidade do Rio São Francisco no período das secas (BORGES, 2009). Segundo levantamento realizado em 2004 pela ANA, o rio Carinhanha contribui com cerca de 150 m<sup>3</sup>/s de vazão para a média anual do Rio São Francisco.

### 3.2 Séries hidrometeorológicas da bacia do Rio Carinhanha

Para a realização da modelagem hidrológica da bacia do Rio Carinhanha se faz necessária a aquisição de séries históricas de clima (temperatura e precipitação) e vazão representativas da área em estudo. Tais séries representam o clima atual e foram utilizadas neste trabalho para a calibração e verificação do modelo MGB-IPH. Dessa forma, após análises de quantidade e qualidade das séries, foram utilizados 3 postos fluviométricos e 22 postos pluviométricos, (Figura 7), pertencentes à rede hidrométrica da Agência Nacional das Águas (ANA), disponíveis em <http://hidroweb.ana.gov.br/>.

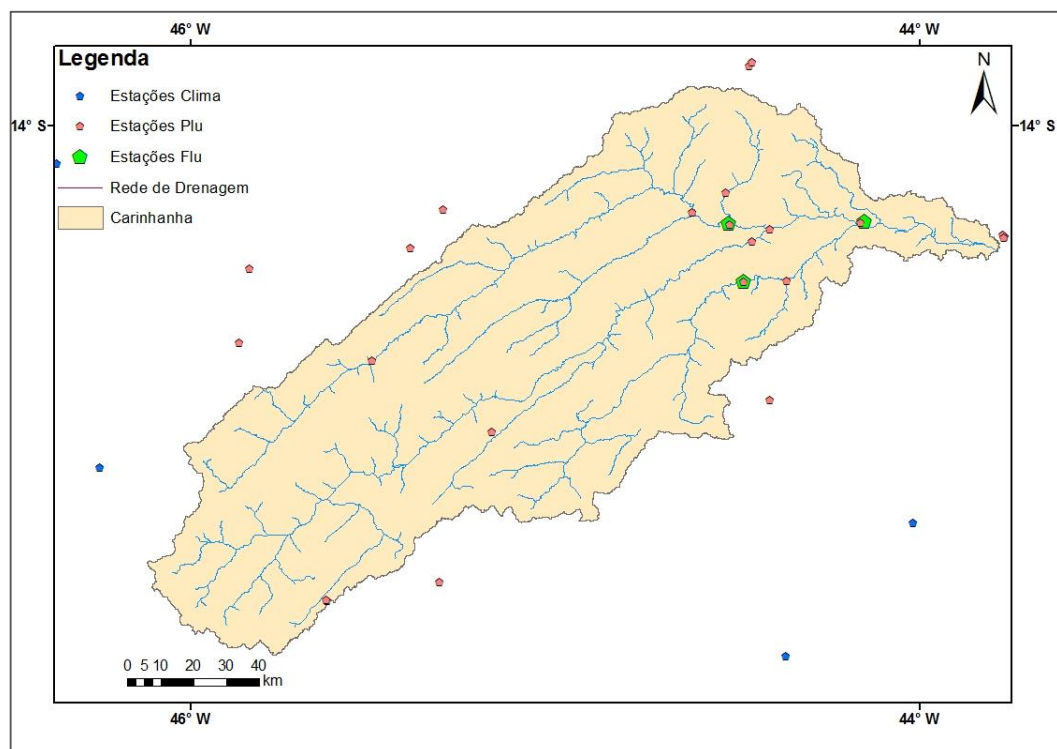


Figura 7 – Mapa com as estações climáticas, pluviométricas e fluviométricas utilizadas na calibração do modelo MGB-IPH

A seguir são apresentados as tabelas das estações para realização da calibração do modelo MGB-IPH.

Tabela 3 – Descrição dos postos pluviométricos

<b>Nº</b>	<b>Cód.</b>	<b>Nome</b>	<b>Lat.</b>	<b>Long.</b>	<b>Estado</b>
1	1545004	Gauchos	-15.30	-45.63	MG
2	1545006	Várzea Bonita	-15.24	-45.32	MG
3	1445000	Cajueiro	-14.84	-45.17	MG
4	1444003	Miravania	-14.74	-44.41	MG
5	1445005	Coba	-14.59	-45.86	BA
6	1444001	Capitânea	-14.42	-44.48	MG
7	1445004	Tomix	-14.33	-45.39	BA
8	1444000	São Gonçalo	-14.31	-44.46	MG
9	1443002	Carinhanha	-14.30	-43.76	BA
10	1444005	Lagoa das Pedras	-14.28	-44.40	MG
11	1444017	Fazenda Porto Alegre	-14.26	-44.52	BA
12	1444004	Juvenília	-14.26	-44.52	MG
13	1344028	Coribe	-13.82	-44.46	BA
14	1545007	Chapada Gaucha	-15.29	-45.62	MG
15	1445003	Ponte do Fortunato	-14.64	-45.50	BA
16	1444019	Montalvania	-14.42	-44.36	MG
17	1445001	Fazenda Cachoeirinha	-14.38	-45.83	BA
18	1443018	Carinhanha	-14.30	-43.76	BA
19	1444021	Ponte do Itaguari	-14.23	-44.62	BA
20	1445002	Projeto Alto Formoso	-14.22	-45.30	BA
21	1444015	Cocos	-14.18	-44.53	BA
22	1344001	Coribe( Rio Alegre)	-13.83	-44.46	BA

Tabela 4 – Descrição dos postos fluviométricos

Nº	Cód.	Nome	Lat.	Long.	Estado	Rio
1	45170001	Fazenda Porto Alegre	-14.155	-44.312	BA	Itaguari
2	45220000	Capitânea	-14.252	-44.285	MG	Coxá
3	45260000	Juvenília	-14.153	-44.098	MG	Carinhanha

Tabela 5 – Descrição dos postos climáticos

Nº	Cód.	Lat.	Long.	Nome	Estado
1	00083332	-14.1	-46.36	Posse	GO
2	00083384	-15.9	-46.05	Arinos	MG
3	00083334	-14.93	-46.25	Formoso	MG
4	00083386	-15.45	-44.36	Januaria	MG
5	00083389	-15.08	-44.01	Mocambinho	MG

A aplicação do modelo MGB-IPH também exige dados meteorológicos (temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e insolação), utilizados para calcular a evapotranspiração nas unidades de resposta hidrológica que compõem cada minibacia.

Com isso, foram usados dados climatológicos de 5 estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), com dados de temperatura, umidade, velocidade do vento, pressão atmosférica e insolação.

Para este trabalho foram selecionadas séries históricas, das variáveis hidrometeorológicas supracitadas, para um período de trinta anos (01/01/1979-31/12/1991). Séries históricas mais longas são inexistentes para área em estudo ou apresentam grandes períodos de falhas, tornando inviável sua utilização em estudos de modelagem hidrológica.

### 3.3 Calibração do modelo MGB-IPH

A calibração consiste num processo que ajusta os valores dos parâmetros (TABELA 1) e (TABELA 2), de tal forma que a resposta do modelo se assemelhe da forma mais consistente ao comportamento do sistema real. Na aplicação prática,

esse processo é realizado pelo ajuste de hidrogramas obtidos por simulação em comparação com dados fluviométricos observados. Na sua forma mais simples, a calibração é realizada ajustando os parâmetros manualmente enquanto se verifica o grau de acerto entre as observações e os resultados do modelo.

A calibração do modelo MGB-IPH foi realizada para o período de 01/01/1979 a 31/12/1991, seguida de verificação (01/01/1994 a 31/12/2006). As medidas de desempenho consideradas na calibração foram: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe das vazões calculadas e observadas (ENS); e o erro relativo de volume total dos hidrogramas ( $\Delta V$ ).

No procedimento de calibração são consideradas avaliações visuais subjetivas de ajuste dos hidrogramas e medidas de desempenho quantitativas, ou funções objetivo.

As medidas de desempenho consideradas na calibração são: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe das vazões calculadas e observadas (ENS); o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões calculadas e observadas (ENSLog); e o erro relativo de volume total dos hidrogramas ( $\Delta V$ ). As medidas de desempenho são descritas a seguir de acordo com Paiva (2009).

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe é uma forma de medir o quanto o modelo utilizado (MGB-IPH) é melhor do que um modelo alternativo cuja vazão calculada é sempre igual à média de longo termo no caso particular deste coeficiente. O valor é adimensional e pode variar entre  $-\infty$  a 1. Valores próximos de 1 indicam que o desempenho do modelo utilizado é bastante superior ao desempenho do modelo alternativo. Valores próximos de zero indicam que o modelo utilizado é tão ruim quanto o modelo alternativo. Valores positivos indicam que o modelo utilizado é melhor que o modelo alternativo. Valores negativos indicam que o modelo utilizado é pior que o modelo alternativo. Em geral, valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe acima de 0,7 são considerados satisfatórios. Quando os dados são analisados em intervalo de tempo mensal podem ser esperados valores ainda mais altos deste coeficiente, porém quando os dados de entrada (especialmente a chuva) apresentam muitas falhas, ou pouca cobertura espacial, os valores deste coeficiente podem ser inferiores a 0,6.

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe é calculado pela equação 1:

$$ENS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (QC_i - QO_i)^2}{\sum_{i=1}^N (QO_i - QOm)^2} \quad (1)$$

onde  $QC_i$  é a vazão calculada num intervalo de tempo  $i$ ;  $QO_i$  é a vazão observada neste mesmo intervalo de tempo;  $N$  é o número de intervalos de tempo; e  $QOm$  é a média das vazões observadas no período de  $N$  intervalos de tempo.

O coeficiente de Nash-Sutcliffe tem a tendência de dar mais valor a erros nos picos das vazões. Desta forma, ajustar o modelo apenas com o objetivo de maximizar o coeficiente de Nash-Sutcliffe pode resultar em um mau ajuste nos períodos de recessão, quando a vazão é mais baixa.

O coeficiente de Nash-Sutcliffe pode ser utilizado com os dados de vazão ou com os dados de vazão transformados por algum procedimento, como a raiz quadrada, o inverso ou os logaritmos. O objetivo de calcular o coeficiente de eficiência usando os logaritmos das vazões é que desta forma se obtém uma medida de desempenho menos sensível aos picos e mais sensível aos períodos de recessão de vazão.

Da mesma forma que o coeficiente de Nash-Sutcliffe das vazões, o coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões tem um valor adimensional que pode variar entre  $-\infty$  e 1.

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões é calculado pela equação 2:

$$ENS_{Log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\text{Log}(QC_i) - \text{Log}(QO_i))^2}{\sum_{i=1}^N (\text{Log}(QO_i) - QOm_{Log})^2} \quad (2)$$

onde  $QC_i$  é a vazão calculada num intervalo de tempo  $i$ ;  $QO_i$  é a vazão observada neste mesmo intervalo de tempo;  $N$  é o número de intervalos de tempo; e  $QOm_{Log}$

é a média dos logaritmos das vazões observadas no período de N intervalos de tempo.

O erro relativo de volume é uma forma de avaliar se existe um desvio sistemático de superestimativa ou subestimativa da vazão. O erro relativo de volume é adimensional, mas pode ser apresentado em termos percentuais. Um erro relativo de -20%, por exemplo, indica que o modelo hidrológico gera, ao longo de todo o período de simulação, uma vazão média 20% inferior à vazão observada. Idealmente os erros de volume deveriam se manter numa faixa de -10% a +10%, que pode ser considerada razoável em função das incertezas dos próprios dados medidos.

$$\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^N QC_i - \sum_{i=1}^N QO_i}{\sum_{i=1}^N QO_i} \quad (3)$$

onde QC<sub>i</sub> é a vazão calculada num intervalo de tempo i; QO<sub>i</sub> é a vazão observada neste mesmo intervalo de tempo; N é o número de intervalos de tempo.

Os parâmetros fixos foram estabelecidos de acordo com estudo realizado por Collischonn (2001). Os parâmetros calibráveis foram ajustados manualmente com objetivo de reproduzir, o melhor possível, o comportamento das vazões observadas na área em estudo.

São gerados também na etapa da calibração arquivos com informações dos postos fluviométricos, pluviométricos e climatológicos conforme disponibilidade de dados nos postos, segundo análise das séries históricas obtidas disponíveis no Sistema de Informações Hidrológicas.

Com isso, estas séries observadas foram utilizadas para calibrar e verificar o modelo. Na etapa seguinte, estas séries foram perturbadas para realizar a etapa de análise de sensibilidade de vazões.

### 3.4 Análise de sensibilidade de vazões

Esta etapa permite estimar o impacto que acréscimos ou decréscimos nas chuvas causariam ao regime de vazões na bacia do rio Carinhanha.

A sensibilidade de vazões é dada pela seguinte relação:

$S = (\Delta Q/Q)/(\Delta P/P)$ , onde

$Q$  é a vazão média;  $\Delta Q$  é a variação da vazão dada pela diferença entre a vazão perturbada por alterações da precipitação ( $Q'$ ) e a vazão média da bacia hidrográfica ( $Q' - Q = \Delta Q$ );  $P$  é a precipitação média da bacia hidrográfica e  $\Delta P$  é a variação da precipitação dada pela diferença entre a precipitação perturbação em  $X\%$  ( $P'$ ) e a precipitação média da bacia hidrográfica ( $P' - P = \Delta P$ ).

As séries de valores de precipitação foram perturbadas multiplicando-se as séries observadas por 0,7P (o que representa uma redução de 30%) com uma variação de 0,1, até sucessivamente 1,3P (aumento de 30%).

A partir da estimativa de anomalias de precipitação resultantes, foram obtidas as séries futuras de precipitação. Estas séries foram usadas como dados de entrada no modelo hidrológico MGB-IPH, gerando, com isso, as séries futuras de vazão.

Dessa forma, a análise de sensibilidade baseadas em mudanças na precipitação foi realizada a fim de mensurar o impacto das mudanças climáticas sobre o regime de vazões na bacia do rio Carinhanha.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Simulação hidrológica

Da Figura 8 à Figura 11, são apresentadas as curvas das Normais Climatológicas das estações do INMET, do período de 1979 á 1991, utilizadas na simulação hidrológica da bacia estudada.

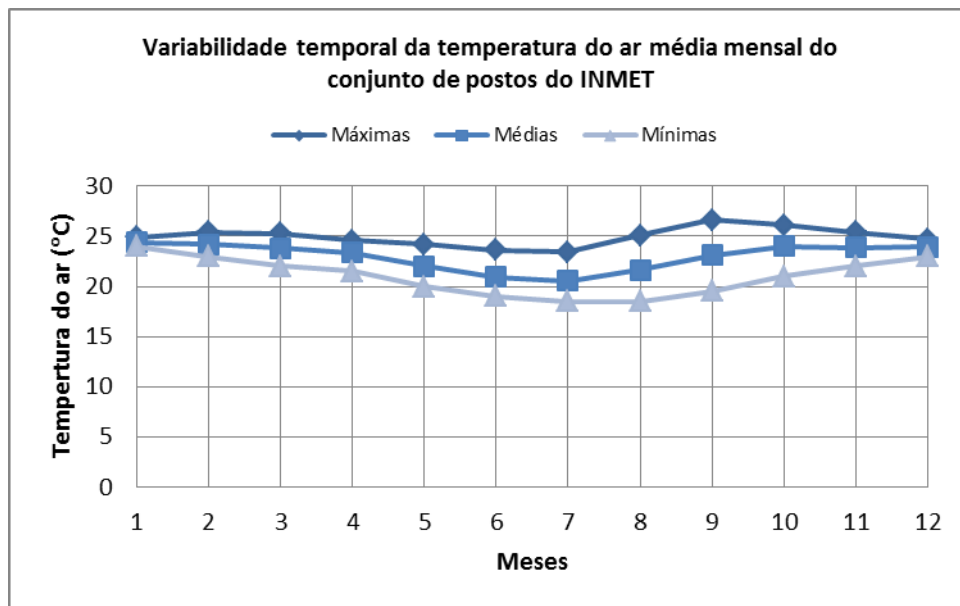


Figura 8 – Variabilidade temporal da temperatura do ar máxima, média e mínima do conjunto de postos do INMET.

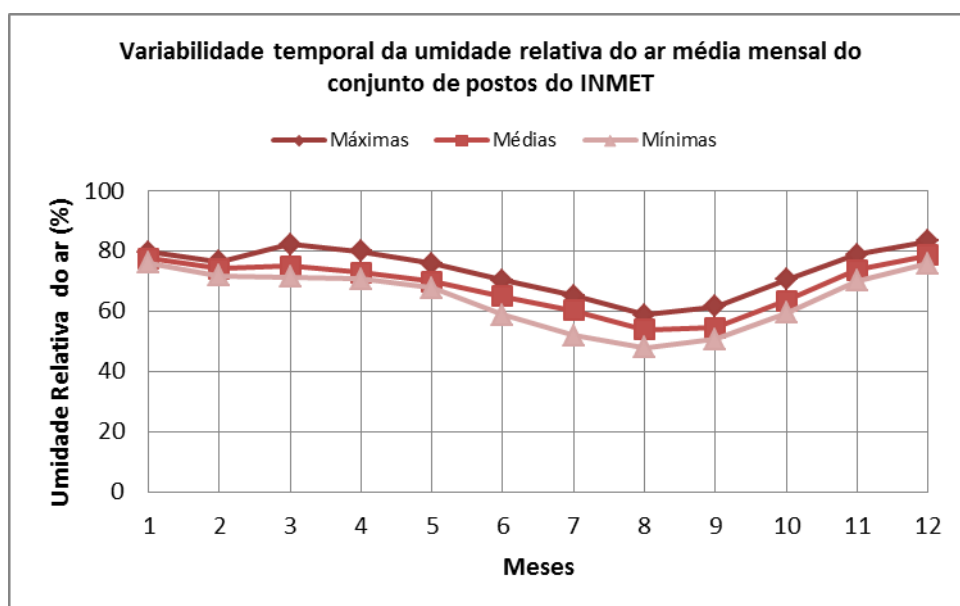


Figura 9: Umidade Relativa Normal, calculada pelo INMET, nas estações utilizadas para a aplicação do modelo hidrológico na bacia do rio Carinhonha

De acordo com a Figura 8 e 9, há pouca variação temporal das temperaturas mínimas, médias e máximas, bem como a umidade relativa para esta região, evidenciando que as temperaturas maiores nos meses de agosto e setembro coincidem com os menores valores de umidade relativa do ar.

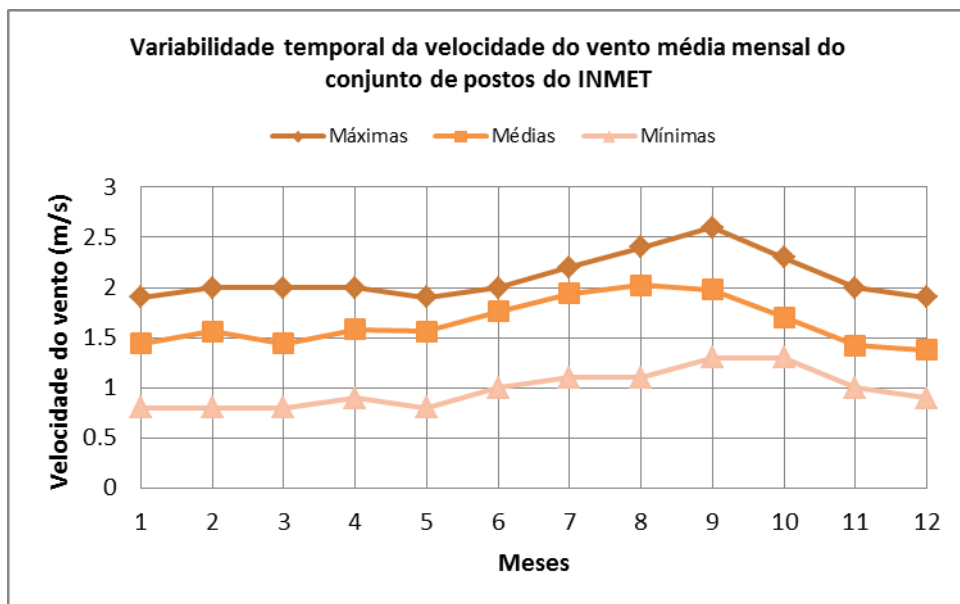


Figura 10: Velocidade do Vento Normal, calculada pelo INMET, nas estações utilizadas para a aplicação do modelo hidrológico na bacia do rio Carinhanha.

Da análise da Figura 10, observa-se que há uma maior variabilidade temporal da velocidade do vento, principalmente entre os meses de julho a setembro. O vento é gerado, entre outros fatores, pela diferença de temperatura do ar, sendo diretamente proporcional a relação. De forma geral, os meses com as maiores temperaturas coincidem com os meses com as maiores velocidades do vento.

A insolação é um fator que provoca variação da umidade relativa do ar. De acordo com as Figuras 9 e 11, as maiores insolações correspondem aos meses de junho a agosto, e nesse mesmo intervalo mensal, há uma redução na umidade relativa do ar.

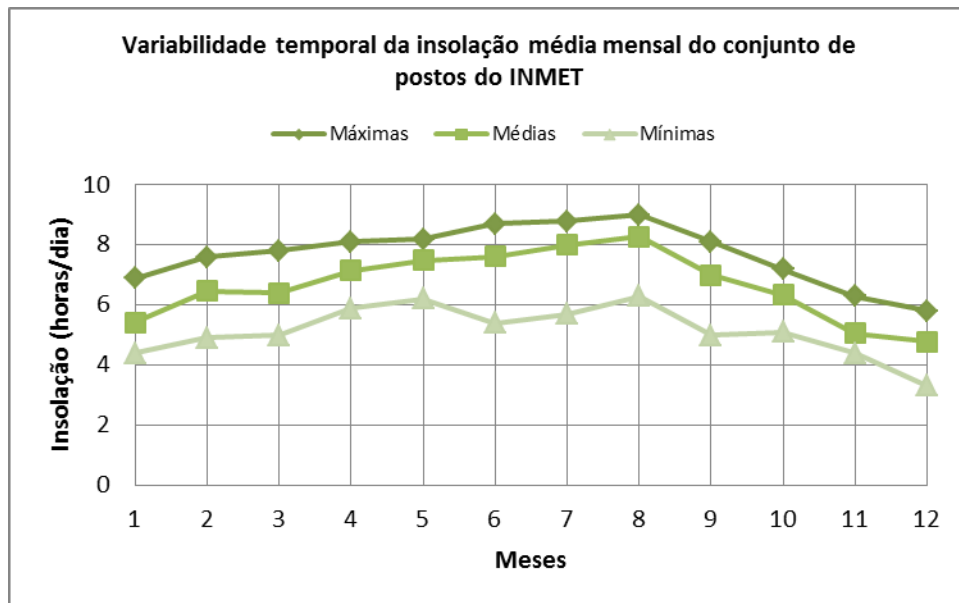


Figura 11: Insolação modelo hidrológico na bacia do rio Carinhanha.

## 4.2 Discretização da Bacia

Os dados de mapeamento utilizados neste trabalho foram relevo, tipos de solos, tipos de vegetação e uso da terra, hidrografia, URH's, e sub-bacias. Esta etapa, de geração de mapas, é chamada de discretização da bacia hidrográfica e é fundamental para utilização do modelo hidrológico MGB-IPH.

### 4.2.1 Relevo

Os dados de relevo foram obtidos diretamente do MDE (modelo digital de elevação) do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), que está apresentado na Figura 12, com resolução de 90 m.

As nascentes mais elevadas na bacia do Carinhanha encontram-se a uma cota altimétrica de 959 metros e sua desembocadura, no Rio São Francisco, tem aproximadamente 435 metros de altitude. Segundo Borges, (2009), mais de 90% da bacia do rio Carinhanha tem declividade inferior a 8%.

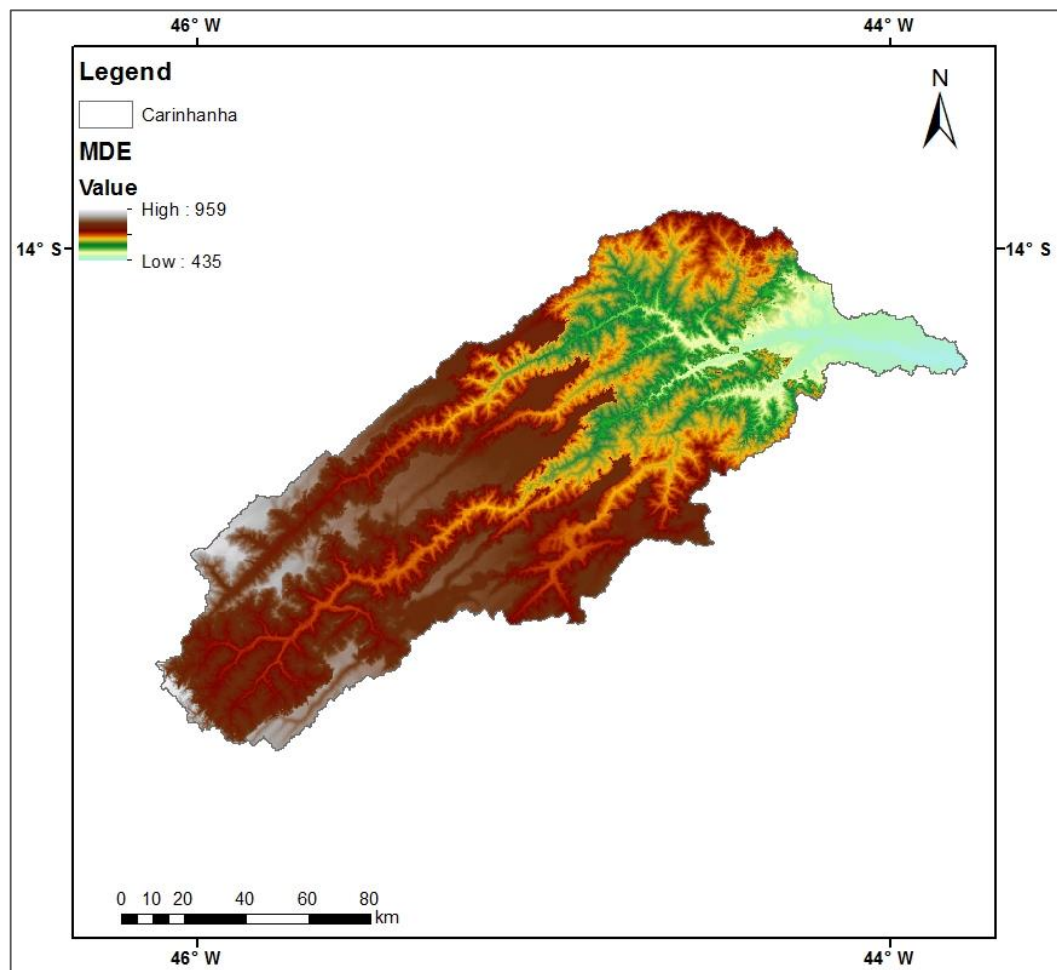


Figura 12 : Relevo da bacia hidrográfica do rio Carinhanha obtido com base no MDE do SRTM.

#### 4.2.2 Tipos de solos

A Figura 13 apresenta o mapa de tipos de solos.

O mapa de tipos de uso foi obtido através do Projeto RADAMBrasil (RADAMBRASIL, 1982), com escala de 1:1000.000. De acordo com este estudo, observa-se que a maior parte da área da bacia do rio Carinhanha apresenta solos dos seguintes tipos: latossolos, argissolos, cambissolos, neossolos e gleissolos.

Os latossolos são solos profundos, em avançado estágio de intemperização, forte a moderadamente drenados e normalmente apresenta baixa fertilidade natural. São solos muito explorados por lavouras mecanizadas, quando possuem textura argilosa, e por pastagens, quando possuem uma textura média. Os argissolos são solos minerais, ácidos e bem desenvolvidos, além de apresentarem baixa fertilidade

natural. Os solos rasos identificam as classes de cambissolos, neossolos e gleissolos (BORGES, 2009).

O mapa de tipos de solo foi utilizado na simulação do modelo hidrológico MGB-IPH, em um cruzamento com os dados de uso e ocupação da terra. Para a aplicação deste modelo, os tipos de solos foram agrupados em 2 classes, de acordo com o comportamento hidrológico esperado: solos profundos e solos rasos como mostra a Figura 13.

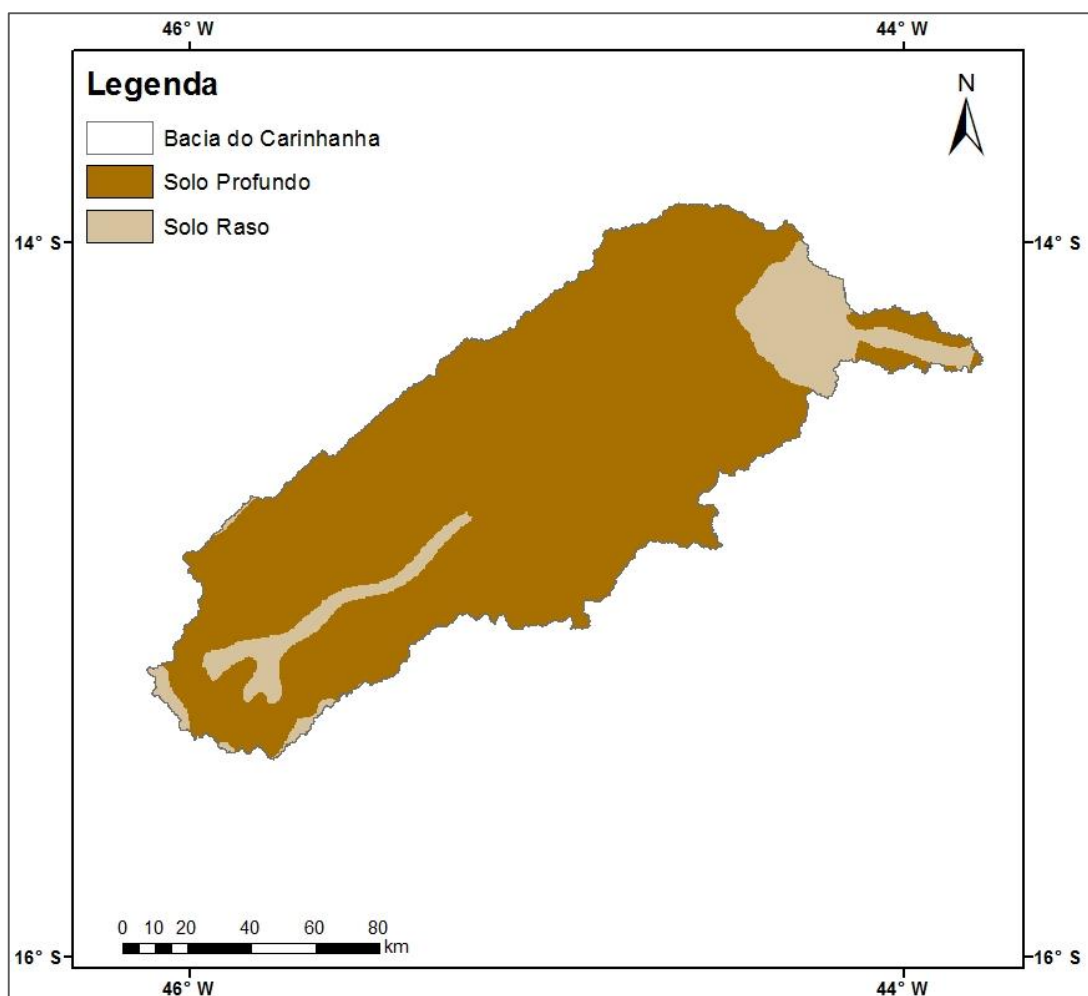


Figura 13 - Tipos de solo na Bacia do rio Carinhanha

#### 4.2.3 Tipos de vegetação e uso da terra

A Figura 14 apresenta o mapa de tipos de vegetação na bacia do Rio Carinhanha, com classes de vegetação simplificadas.

As classes de vegetação utilizadas foram: agricultura e pastos; campos e cerrado; veredas e água. Tais classes foram obtidas a partir da classificação manual de imagens utilizando o software ArcGis de acordo com a comparação de imagens da área de estudo obtidas no Google Earth.

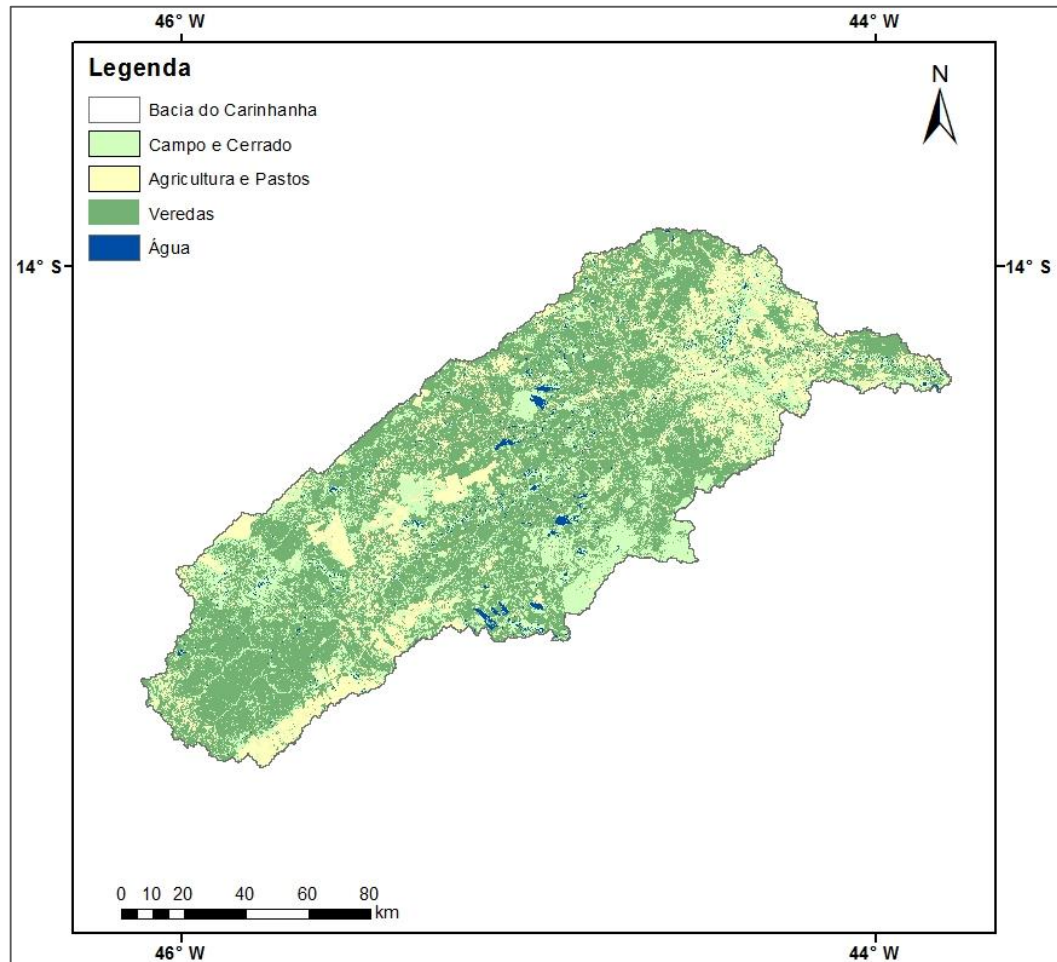


Figura 14 - vegetação e usos do solo na bacia do Carinhanha

De acordo com a Figura 14, Veredas e Cerrado são o tipo de vegetação predominante na área em estudo. Isso demonstra que a região apresenta boas condições de preservação de sua vegetação natural. Segundo Borges (2009), esta situação concede à bacia do Carinhanha uma grande importância, pois permite a adoção de políticas de manejo e conservação do solo com antecedência ao uso exploratório.

#### 4.2.4 Hidrografia

A Figura 15 mostra a rede de drenagem da bacia do rio Carinhanha e a divisão em minibacias com 257 elementos de discretização. Os principais rios da área são: Coxá, Itaguari e Carinhanha.

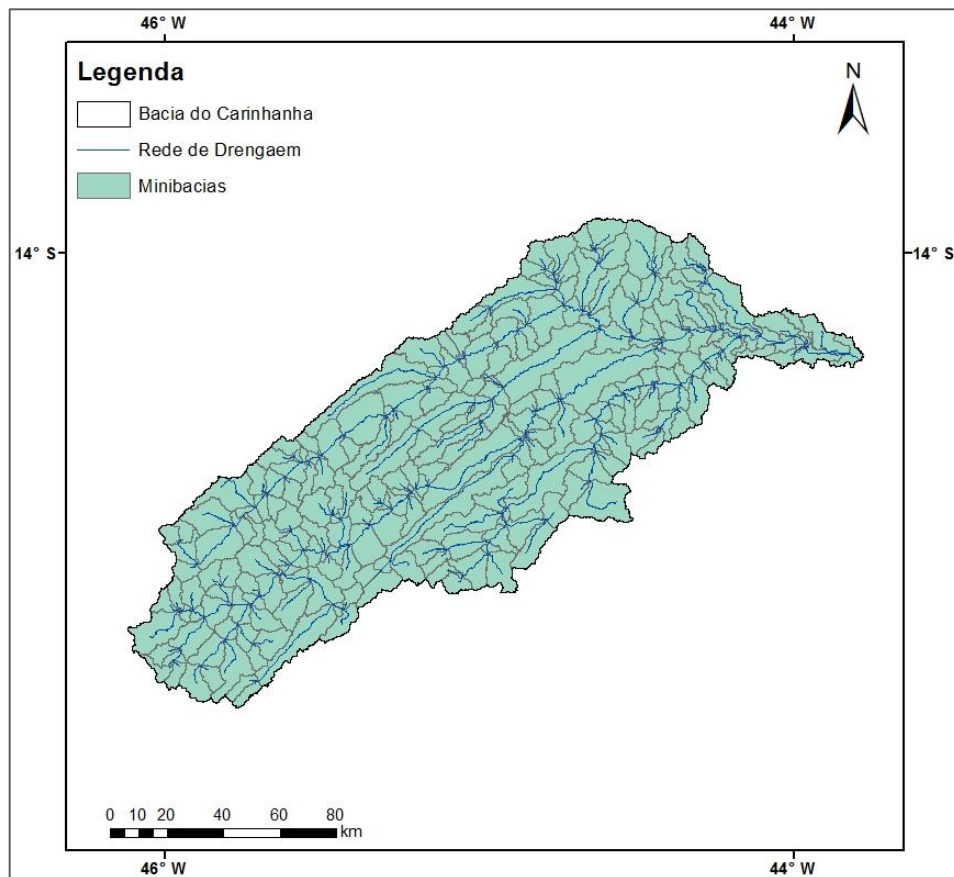


Figura 15: Divisão da bacia de estudo em 257 elementos de discretização denominados de minibacias.

Observa-se que a bacia do rio Carinhanha possui uma extensa rede de drenagem. A estação Fazenda Porto Alegre, localizada na porção leste da bacia, próximo à foz, possui uma área de drenagem de 40.300km<sup>2</sup>, contribuindo significativamente em um grande volume escoado na bacia do Rio São Francisco.

#### 4.2.5 Unidades de Resposta Hidrológica

Considera-se que o comportamento hidrológico de uma bacia dependa dos tipos de solos e da cobertura vegetal existente. Portanto, realizou-se uma combinação das informações dos mapas de solos e de vegetação, gerando um mapa de classes de comportamento hidrológico, chamado mapa de blocos. A Figura 16 apresenta o mapa de blocos gerado para a bacia do rio Carinhanha. Este mapa servirá como entrada no modelo hidrológico e servirá para formação das URH's.

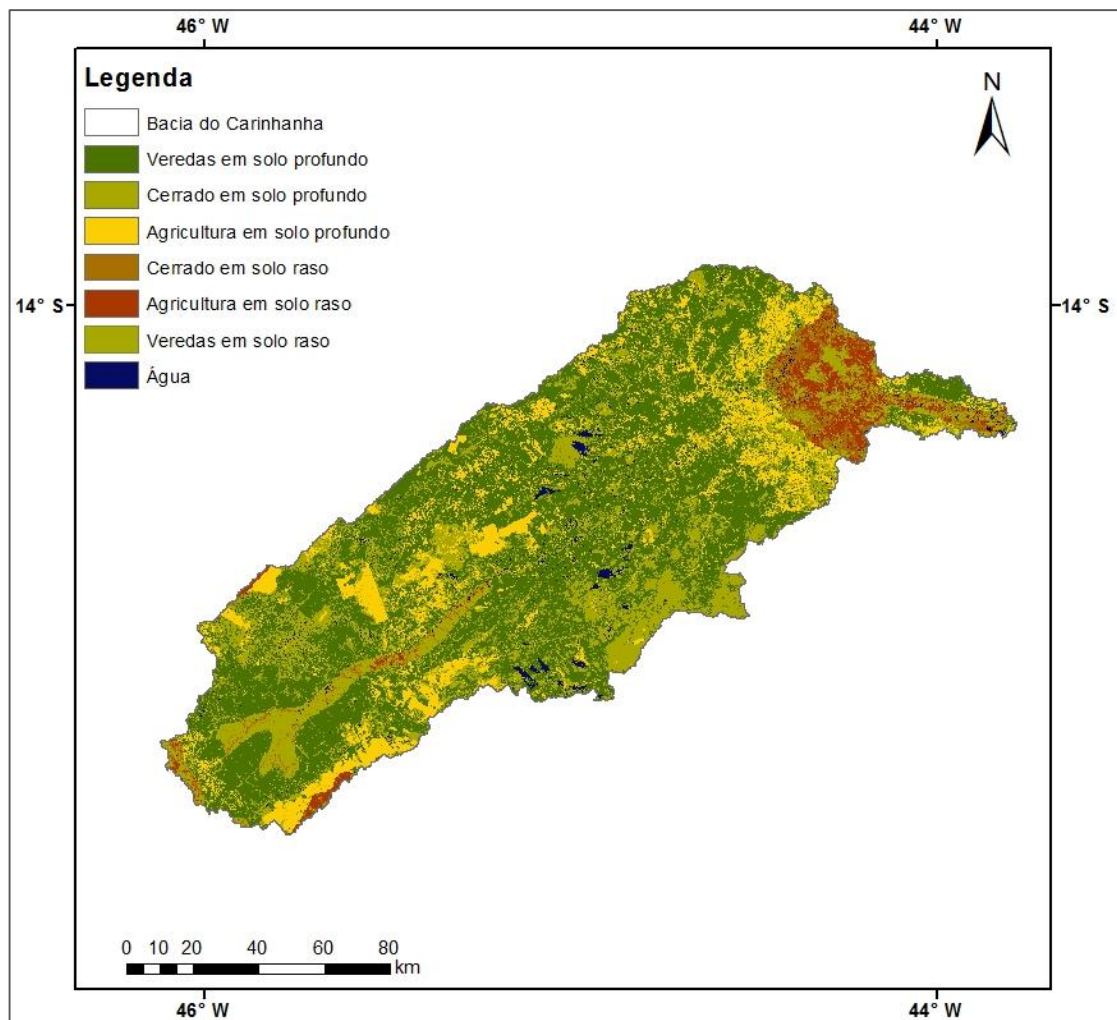


Figura 16: Unidades de Resposta Hidrológica (URH) da bacia do rio Carinhanha

Admite-se que uma dada URH tenha o mesmo comportamento hidrológico independentemente de onde esteja localizada dentro da bacia. A Tabela 6 apresenta

a nomenclatura utilizada em cada uma das URH's na bacia do rio Carinhanha e suas respectivas descrições.

Tabela 6: Características das URH da bacia do rio Carinhanha.

Ordem	URH	Descrição
1	FL_RASO	Floresta em solo raso
2	FL_FUNDO	Floresta em solo profundo
3	CP_RASO	Campos, cerrados e estepes em solo raso
4	CP_FUNDO	Campos, cerrados e estepes em solo profundo
5	AGR_RASO	Agricultura e pastos em solo raso
6	AGR_FUNDO	Agricultura e pastos em solo profundo
7	ÁGUA	Água
8	Verfundo	Veredas + solos profundos

#### 4.2.6 Definição de sub-bacias

Neste trabalho foram delimitadas as sub-bacias buscando facilitar a calibração do modelo. Para definir as sub-bacias foi considerada a localização dos postos fluviométricos. Estas sub-bacias têm seus exutórios exatamente na localização dos postos fluviométricos. A Figura 17 mostra a divisão em sub-bacias, com seus respectivos códigos de identificação, na bacia do rio Carinhanha.

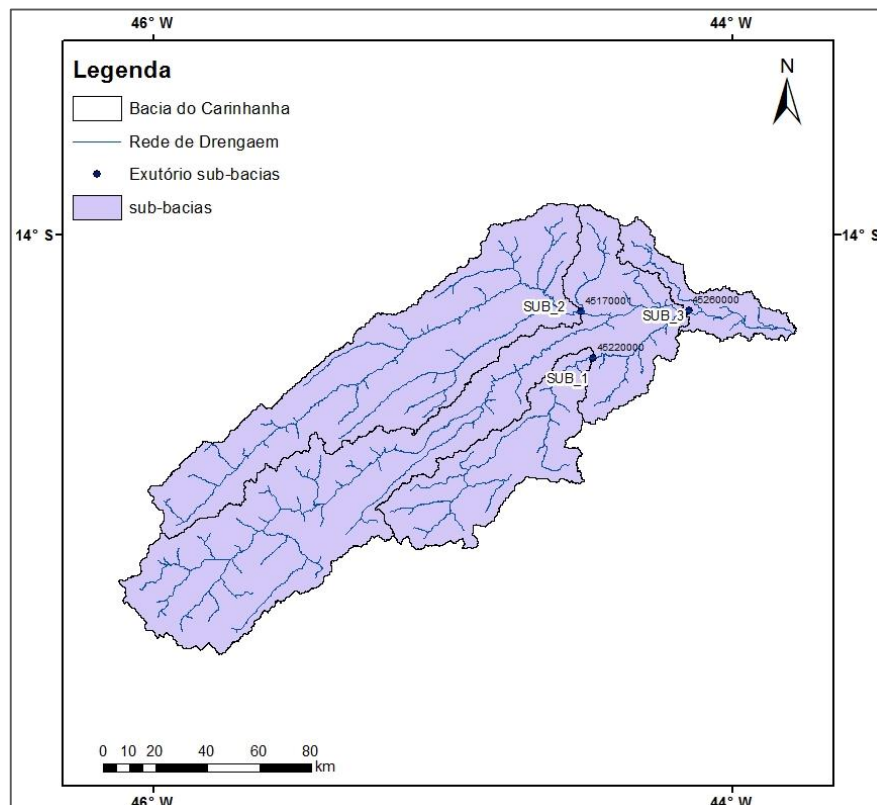


Figura 17- sub-bacias e seus exutórios

Para cada sub-bacia da Tabela 7 foram definidas as suas áreas de influência (bacias incrementais) utilizando o SIG, as quais estão resumidas na Tabela 7. Foi gerado um total de 3 sub-bacias, as quais foram numeradas de montante para jusante ao longo dos rios de forma que uma determinada sub-bacia não fique localizada a montante de outra com numeração inferior.

Tabela 7: Características dos pontos utilizados na delimitação das sub-bacias.

Nº	Código	Nome	Lat	Long	Rio
Sub-1	46220000	Fazenda Cachoeira	-13.25	-42.90	Coxá
Sub-2	45170001	Fazenda Porto Alegre	-14.15	-44.31	Itaguari
Sub-3	45260000	Juvenília	-14.15	-44.90	Carinhanha

### 4.3 Calibração do MGB/IPH

O modelo MGB-IPH foi calibrado utilizando-se dados de chuva observada nos pluviômetros da rede disponível no banco de dados da ANA, e dados de vazões em postos fluviométricos.

As estações fluviométricas da ANA foram utilizadas também como base para a divisão da bacia em sub-bacias e como ponto inicial na calibração de parâmetros.

Com base na disponibilidade temporal dos dados fluviométricos (dados de vazões naturais) e de dados de chuva para a bacia hidrográfica em questão, o período escolhido para a calibração do modelo hidrológico MGB-IPH foi de 01/01/1979 a 31/12/1991.

#### 4.3.1 Definição dos parâmetros fixos do modelo hidrológico

Os parâmetros fixos do modelo hidrológico foram estimados com auxílio de dados da literatura (SHUTTLEWORTH, 1993; COLLISCHONN, 2001) e do conhecimento dos tipos de vegetação existentes na bacia. Nas Tabelas 8 a 11 são apresentados os valores adotados para os parâmetros fixos na bacia do rio Carinhanha. Foram usados os mesmos parâmetros para as 3 sub-bacias.



Estes valores são baseados nos estudos de COLLISCHONN (2001) e indicam que os maiores valores são encontrados para as URH's veredas e cerrado e os menores valores para a agricultura.

Tabela 11: Valores da resistência superficial em boas condições de umidade do solo adotados para a bacia do Rio Carinhanha. Adaptado de Fan (2011).

URH	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Agricultura	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Veredas	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Cerrado	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Água	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

A resistência superficial representa a resistência ao fluxo de umidade do solo, através das plantas, até a atmosfera. É uma variável dependente da disponibilidade de água no solo. Em condições sem déficit hídrico, os valores são mínimos e quando o solo seca os valores aumentam.

#### 4.3.2 Definição dos parâmetros calibráveis do modelo hidrológico

Os parâmetros calibráveis do modelo hidrológico MGB-IPH foram associados às propriedades físicas das URHs. A calibração desses parâmetros sensíveis foi realizada em duas etapas. Na primeira foi feito um ajuste dos parâmetros fazendo alterações manuais nos seus valores, buscando assim aproximar ao máximo os hidrogramas calculados dos observados. Na segunda etapa, os parâmetros previamente estimados por calibração manual foram recalibrados automaticamente utilizando o algoritmo de otimização MOCOM-UA (YAPO et al, 1998). Dada a abordagem do modelo MGB-IPH ser baseada em URHs, foram ajustados diferentes conjuntos de parâmetros, cada um associado a uma determinada URH, cujos valores buscaram refletir seu comportamento hidrológico esperado.

Da Tabela 12 à Tabela 14 são apresentados os valores adotados para os parâmetros calibráveis nas sub-bacias do rio Carinhanha.

Tabela 12: Valores dos parâmetros calibráveis adotados para a sub-bacia 1 do rio Carinhanha. Adaptado de Fan (2011).

<b>Uso</b>	<b>Wm</b>	<b>B</b>	<b>kbas</b>	<b>kint</b>	<b>XL</b>	<b>CAP</b>	<b>Wc</b>
Agricultura	1000.0	0.04	1.20	3.00	0.67	0.00	0.10
Veredas	1000.0	0.04	1.50	3.00	0.67	0.00	0.10
Cerrado	1000.0	0.04	1.50	3.00	0.67	0.00	0.00
Água	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CS	15.00						
CI	50.00						
CB	6500.00						
QB_m <sup>3</sup> /skm <sup>2</sup>	0.0100						

Tabela 13: Valores dos parâmetros calibráveis adotados para a sub-bacia 2 do rio Carinhanha. Adaptado de Fan (2011).

<b>Uso</b>	<b>Wm</b>	<b>b</b>	<b>kbas</b>	<b>kint</b>	<b>XL</b>	<b>CAP</b>	<b>Wc</b>
Agricultura	1000.0	0.05	3.50	11.00	0.67	0.00	0.10
Veredas	1000.0	0.05	3.50	11.00	0.67	0.00	0.10
Cerrado	1000.0	0.05	4.00	16.00	0.67	0.00	0.00
Água	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CS	15.00						
CI	50.00						
CB	10000						
QB_m <sup>3</sup> /skm <sup>2</sup>	0.0100						

Tabela 14: Valores dos parâmetros calibráveis adotados para a sub-bacia 3 do rio Carinhanha. Adaptado de Fan (2011).

<b>Uso</b>	<b>Wm</b>	<b>b</b>	<b>kbas</b>	<b>kint</b>	<b>XL</b>	<b>CAP</b>	<b>Wc</b>
Agricultura	850.0	0.05	2.30	5.00	0.67	0.00	0.10
Veredas	900.00	0.05	2.30	6.00	0.67	0.00	0.10
Cerrado	1000.0	0.05	2.30	7.00	0.67	0.00	0.00
Água	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CS	15.00						
CI	50.00						
CB	8000						
QB_m <sup>3</sup> /skm <sup>2</sup>	0.0100						

O parâmetro Wm corresponde ao máximo armazenamento do solo. As diferenças no valor de Wm entre os diversos tipos de uso do solo e cobertura vegetal é necessária para fazer com que o modelo represente as diferenças na

evapotranspiração e na geração de escoamento. Se as vazões calculadas estiverem subestimadas umas das causas para isto é que este parâmetro esteja muito alto. É um parâmetro considerado muito importante pois influencia as vazões máximas, mínimas e o balanço total de volumes. Ainda, a capacidade de armazenamento do solo é considerada maior nas áreas com vegetação mais densa, por possuírem raízes mais profundas e retirar águas de maiores profundidades do solo.

O parâmetro  $K_{bas}$  é um parâmetro que controla a quantidade de água que deixa o solo e gera escoamento superficial. Valores mais altos implicam em maior escoamento subterrâneo. Os valores mais expressivos são encontrados para a sub-bacia 2, evidenciando que nesta sub-bacia há uma maior contribuição da vazão subterrânea.

O parâmetro  $K_{int}$  controla a quantidade de água da camada de solo que é escoada subsuperficialmente. A taxa de drenagem subsuperficial quando o solo está mais próximo da saturação é muito maior do que quando o solo está mais seco. Novamente os valores mais altos foram encontrados para a sub-bacia 2.

O parâmetro  $X_L$  controla a forma da curva de redução de drenagem intermediária ou sub-superficial do solo, com valores girando em torno de 0,67, segundo COLLISCHONN (2001).

O parâmetro  $cap$  controla a capacidade de retorno de água subterrânea para a camada de solo. Para o ajuste dos hidrogramas foi considerado o valor de 0, também segundo estudos feitos por COLLISCHONN (2001).

O valor de  $W_c$  é alterado para considerar a possibilidade de um retorno de água subterrânea à camada superficial de solo por fluxo ascendente. Dessa forma, é calibrado de forma a permitir o fluxo ascendente da água subterrânea para a camada de solo. O valor de (zero) para o Cerrado é justamente por este tipo de vegetação apresentar nenhuma ou baixa quantidade de água subterrânea.

O parâmetros  $CS$ ,  $CB$  e  $CI$  controlam o retardo do escoamento dentro das células de cada sub-bacia. Para esta calibração Foram considerados os mesmos valores para  $CS$  e  $CI$ , diferindo no valor de  $CB$ , possuindo um valor um pouco maior

para a sub-bacia 2. O parâmetro CS, juntamente com o Wm exercem forte influência sobre os picos de vazões.

#### 4.4 Hidrogramas resultantes da calibração do MGB-IPH

Da Figura 18 à Figura 20 são apresentados os hidrogramas resultantes da calibração do modelo hidrológico.

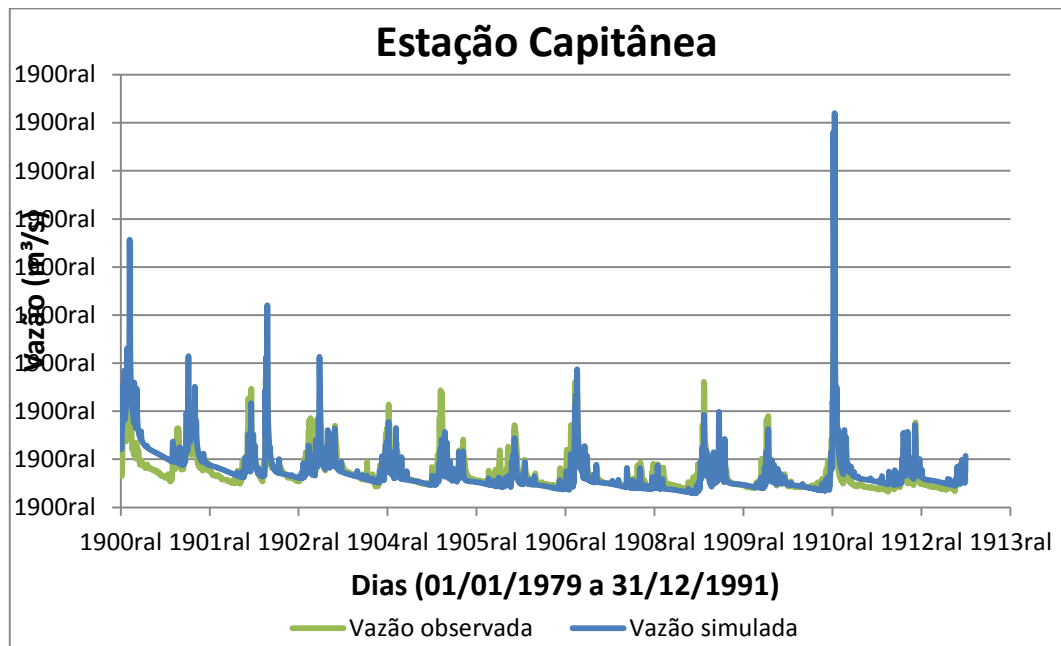


Figura 18: Hidrogramas simulados (azul) e observados (verde) na estação fluviométrica Capitânea

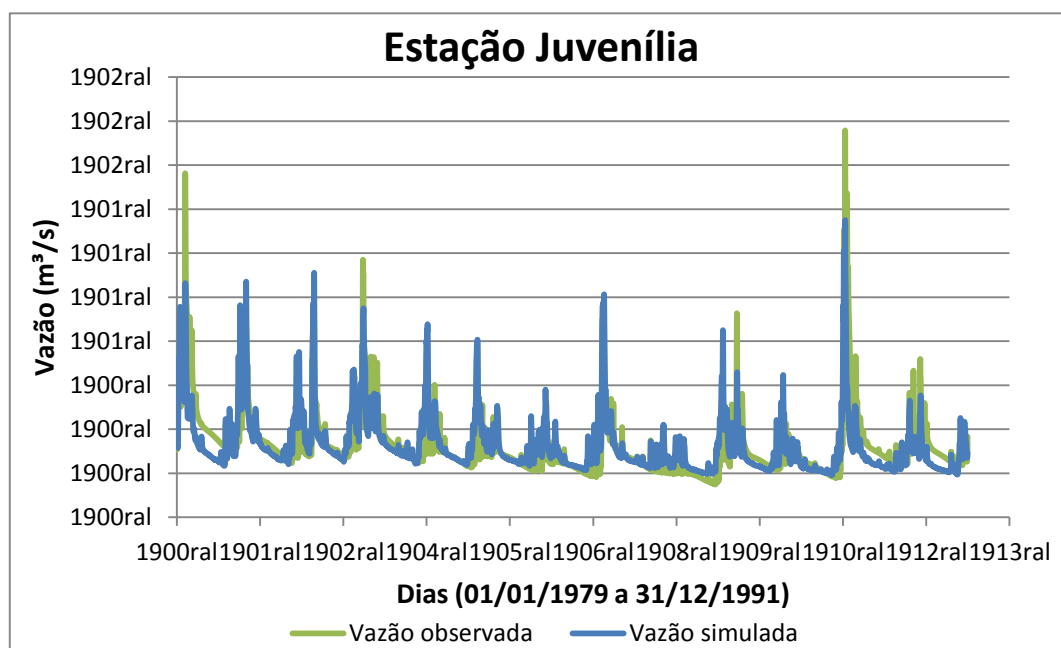


Figura 19: Hidrogramas simulados (azul) e observados (verde) na estação fluviométrica Juvenília.

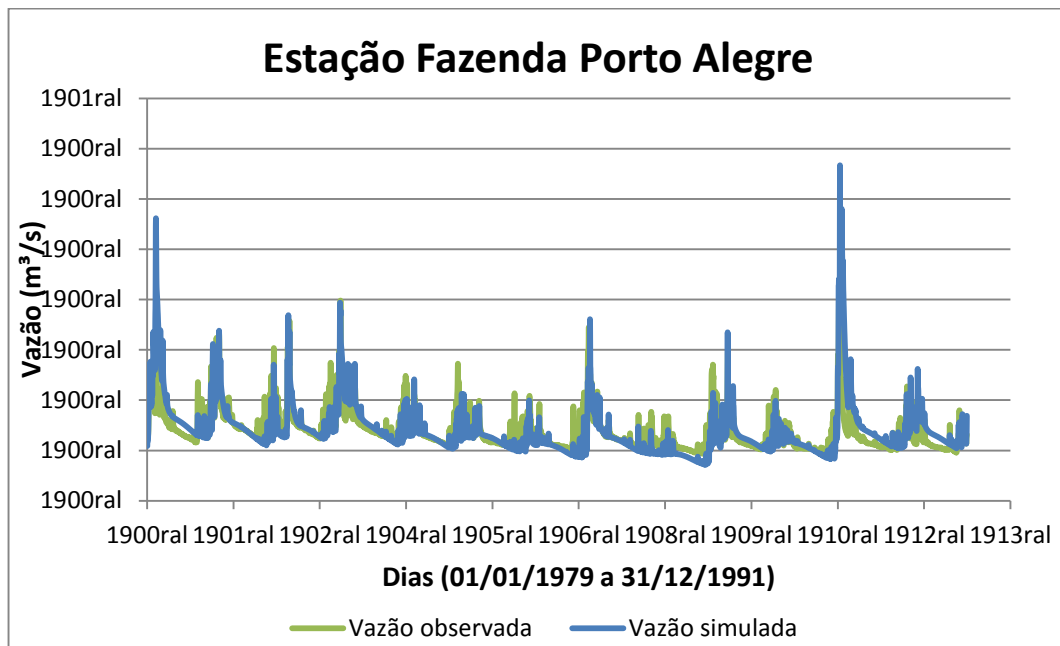


Figura 20: Hidrogramas simulados (azul) e observados (azul) na estação fluviométrica Fazenda Porto Alegre

Observa-se que em todos os hidrogramas há alguns eventos de cheias superestimados, porém o comportamento geral dos hidrogramas observados e calculados é muito bem representado pelo modelo. Desta forma, pode-se observar que os parâmetros utilizados e resultantes da calibração do modelo permitiram uma reprodução satisfatória do fenômeno simulado, fornecendo vazões muito semelhantes às vazões observadas.

#### 4.5 Resultados e avaliação da calibração e verificação

A Tabela 15 apresenta as medidas de desempenho do modelo no período de calibração.

Tabela 15: Medidas de desempenho nos diferentes postos fluviométricos no período de calibração (de 01/01/1979 até 31/12/1991).

Nome	ENS	ENSlog	$\Delta V$
Capitânea	0.87	0.84	6.228
Fazenda Porto Alegre	0.90	0.88	1.24
Juvenília	0.86	0.82	2.175

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) tem um valor máximo igual a um (1), que corresponde a um ajuste perfeito entre as vazões simuladas pelo modelo e as vazões observadas. Este coeficiente tem a tendência de dar mais valor a erros nos picos das vazões. Desta forma, ajustar o modelo apenas com o objetivo de maximizar o coeficiente de Nash-Sutcliffe pode resultar em um mau ajuste nos períodos de recessão, quando a vazão é mais baixa. O coeficiente NSLog também tem valor máximo igual a 1. O objetivo de calcular o coeficiente de eficiência usando os logaritmos das vazões é que desta forma se obtém uma medida de desempenho menos sensível aos picos e mais sensível aos períodos de recessão de vazão. O erro relativo de volume é uma forma de avaliar se existe um desvio sistemático de superestimativa ou subestimativa da vazão.

Quanto aos resultados das medidas de desempenho, os índices de Nash-Sutcliffe (ENS) das vazões variaram entre 0.86 e 0.90. Já os resultados para o coeficiente de Nash-Sutcliffe dos Logaritmos das vazões variam entre 0.82 e 0.88. Isso indica que a simulação hidrológica está representando bem os dados observados, inclusive em períodos de vazões mais baixas. Os erros de volume foram baixos, variando na faixa de 1.24% a 6.228%, e não apresentaram tendência sistemática de superestimativa ou subestimativa.

Os resultados da calibração são considerados satisfatórios em todos os pontos de interesse.

#### **4.6 Análise de sensibilidade de vazoes**

Os resultados da análise de sensibilidade são apresentados em gráficos, para cada uma das sub-bacias, mostrando as vazões atuais ( $Q_{ref}$ ) calculadas pelo modelo MGB-IPH entre os anos de 1979 a 1991 (Figuras 21 a 23). As outras curvas são perturbações das séries dos valores da precipitação de referência, que refletem em alterações nas vazões futuras, para um período futuro qualquer. Também são apresentados gráficos que expressam a relação entre mudanças na precipitação e vazão médias (Figuras 24 a 26).

Mudanças climáticas podem gerar impactos sobre o regime de vazões em uma bacia hidrográfica. Dessa forma, a análise de sensibilidade de vazões em relação as vazões médias de referência foi realizada com intuito de verificar o impacto no regime de vazões na bacia do rio Carinhonha. O impacto aqui é definido como a anomalia entre as vazões em um período futuro qualquer (devido a alterações fixas de precipitação) e as vazões no período de referência em cada sub-bacia.

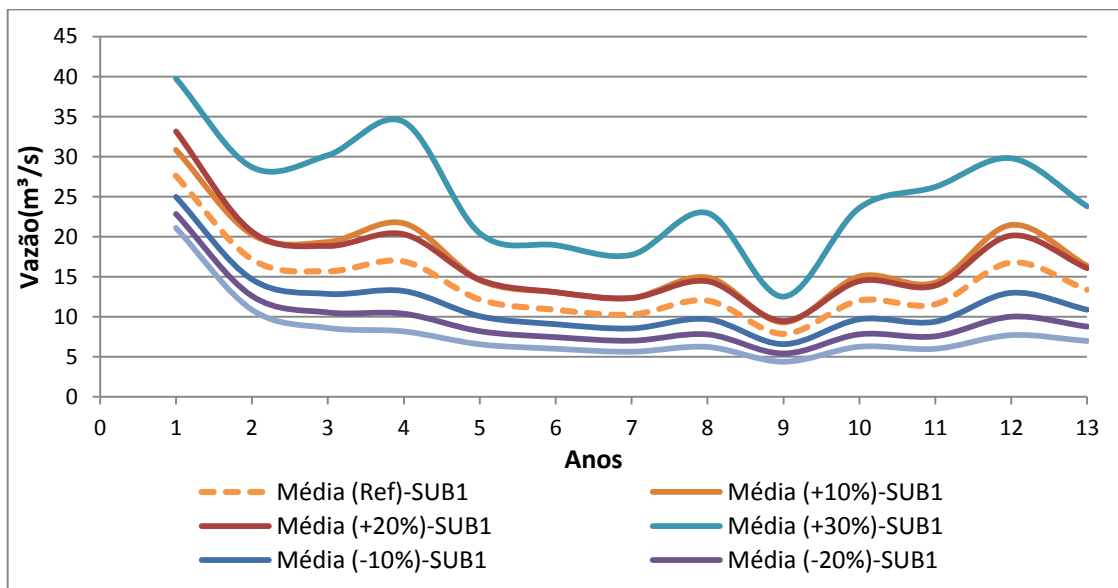


Figura 21: Análise de sensibilidade para a sub-bacia 1

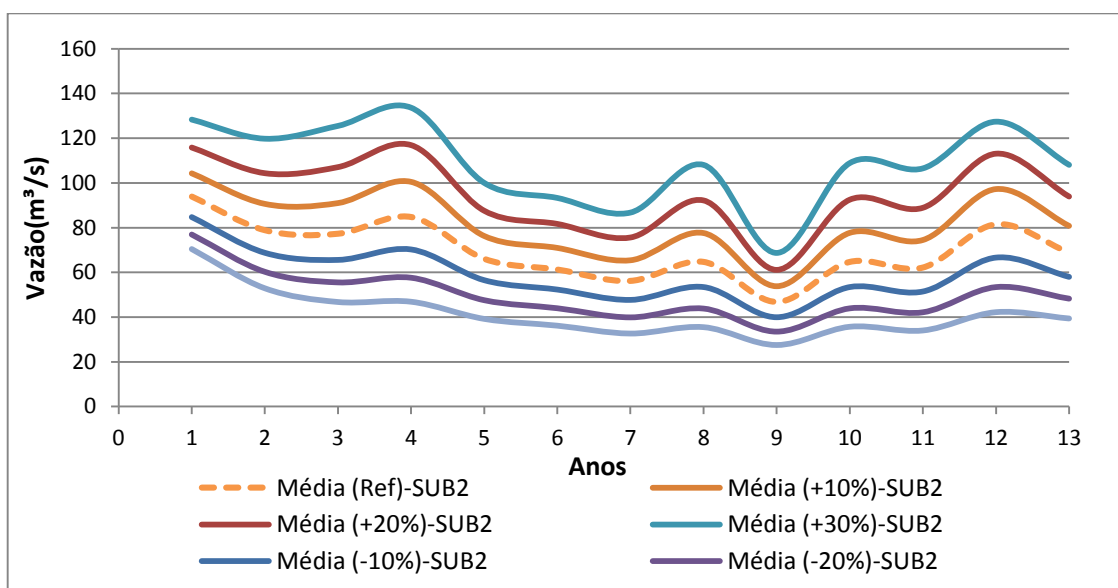


Figura 22: Análise de sensibilidade para a sub-bacia 2

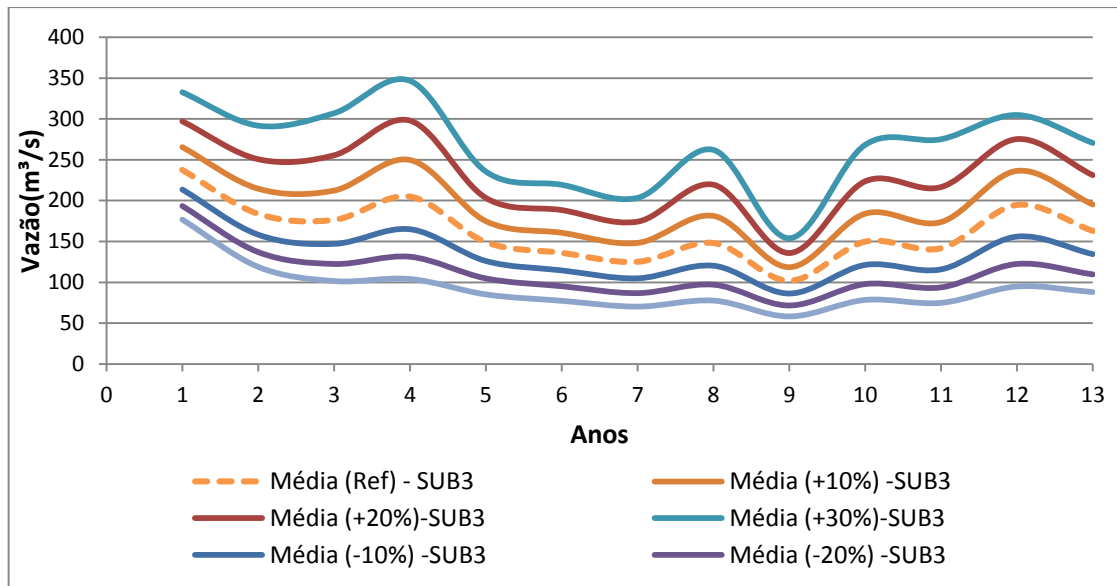


Figura 23: Análise de sensibilidade para a sub-bacia 3

A sub-bacia 1 possui a menor área de drenagem em relação às outras, com uma vazão média para o período de 14,2 m<sup>3</sup>/s. Como possui a menor área de drenagem, é mais sensível a variações de precipitação, como observa-se para o aumento de 30% da precipitação média.

A análise de sensibilidade indica que para esta sub-bacia aumentos nas vazões são mais expressivos, notadamente para a variação de 30% nas chuvas. Por meio da figura 24, observa-se que um aumento de 30% na precipitação média causaria um aumento de 78% nas vazões médias, enquanto uma redução de 30% na precipitação, causaria uma redução de 43% nas vazões. Isto se deve ao fato de que grandes eventos de precipitação, atingindo pequenas áreas, causam maiores vazões, podendo provocar grandes enchentes.

Segundo Pontes et al., (2013) esse maior aumento nas vazões, se deve provavelmente ao fato de que ao aumentar a precipitação, há uma saturação dos reservatórios representados no modelo MGB-IPH. Assim, o aumento no escoamento superficial tende a aumentar com o aumento da precipitação. Em contrapartida, a diminuição da precipitação gera menos escoamento superficial, porém ainda há contribuição devido ao escoamento de base resultante da água acumulada no solo e nos reservatórios subterrâneos.

Apesar da variação nas vazões ser maiores devido ao aumento na precipitação, vale lembrar que a diminuição da mesma também é impactante. Uma redução de 43% (variação de -30% na precipitação), significa que uma vazão que antes era de 14,2 m<sup>3</sup>/s passou a ser 8,04 m<sup>3</sup>/s. Em afluentes menores a diminuição desta precipitação pode causar uma escassez de água, comprometendo a disponibilidade hídrica da região. Isto pode se tornar ainda mais agravante, pois de acordo com o Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do rio Paramirim, principal rio da sub-bacia 1, é prática comum na região, o desvio de cachoeiras e córregos formados por grotas e nascentes para garantir o abastecimento de fazendas e para projetos particulares de irrigação. Tais práticas têm gerado a redução dos volumes de água ao longo do rio (PLANO DIRETOR DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAMIRIM, 1995).

A sub-bacia 2 possui uma extensa rede de drenagem, recebendo vários afluentes para o principal rio desta bacia – o rio Itaguari. Segundo SILVA (2011), A rede de drenagem é formada por riachos, limitados eventualmente por margens inclinadas evidenciando um controle estrutural. Geralmente esta drenagem se apresenta como veredas relacionados com afloramentos do lençol freático. São rios que tem baixos gradientes correndo lentamente sobre a topografia e possuindo uma extensa faixa de planície.

Segundo PENMAN (1963), vários fatores interferem no escoamento de uma bacia hidrográfica, tais como a área, a quantidade e intensidade da precipitação. Como a bacia 3 possui uma maior área de drenagem, possui um maior escoamento superficial apresentando para o período considerado, uma vazão de 162,51 m<sup>3</sup>/s. Pode-se dizer que esta sub-bacia é mais sensível à variações de precipitações em relação às outras. Isto se deve ao fato de possuir uma grande rede de drenagem.

A sub-bacia 3, localizada no exutório da bacia, é a sub-bacia que recebe contribuições das outras sub-bacias, apresentando os maiores volumes de vazões, possuindo em média, para o período considerado, uma vazão de 162,8m<sup>3</sup>/s.

Pela análise das figuras 23 e 26, as maiores variações nas vazões da bacia 3 correspondem aos aumentos nas precipitações, principalmente ao aumento de 30% na precipitação. Uma vazão média que antes era de 162,8 m<sup>3</sup>/s aumentou para

267,02 m<sup>3</sup>/s, ou seja um aumento de 104,2 m<sup>3</sup>/s. Este aumento considerável nas vazões poderia ser muito preocupante para a segurança das comunidades ribeirinhas, como a Comunidade Moreira, localizada na margem esquerda do rio Carinhanha.

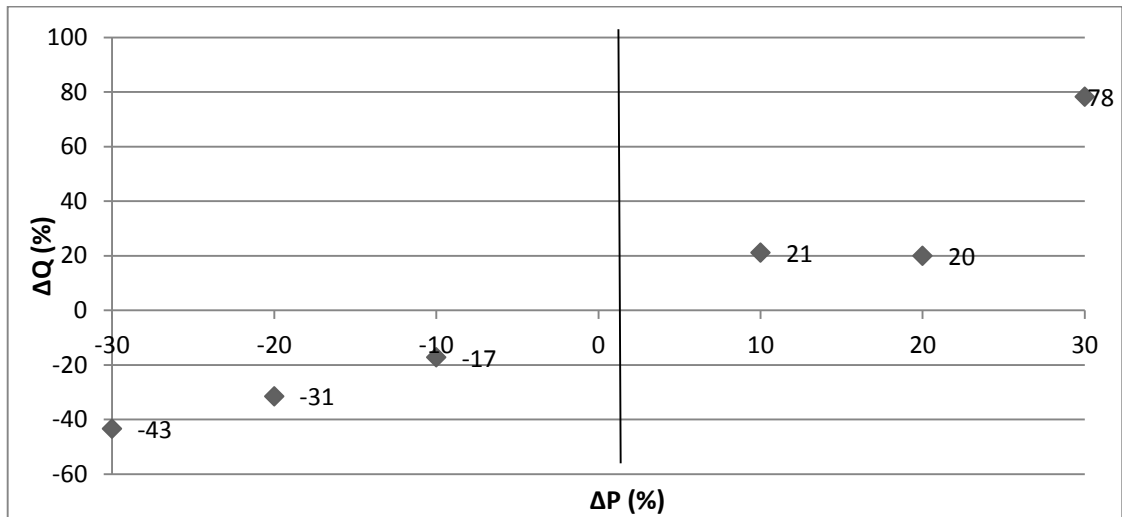


Figura 24. Relação entre mudança na precipitação média e na vazão média da sub-bacia 1

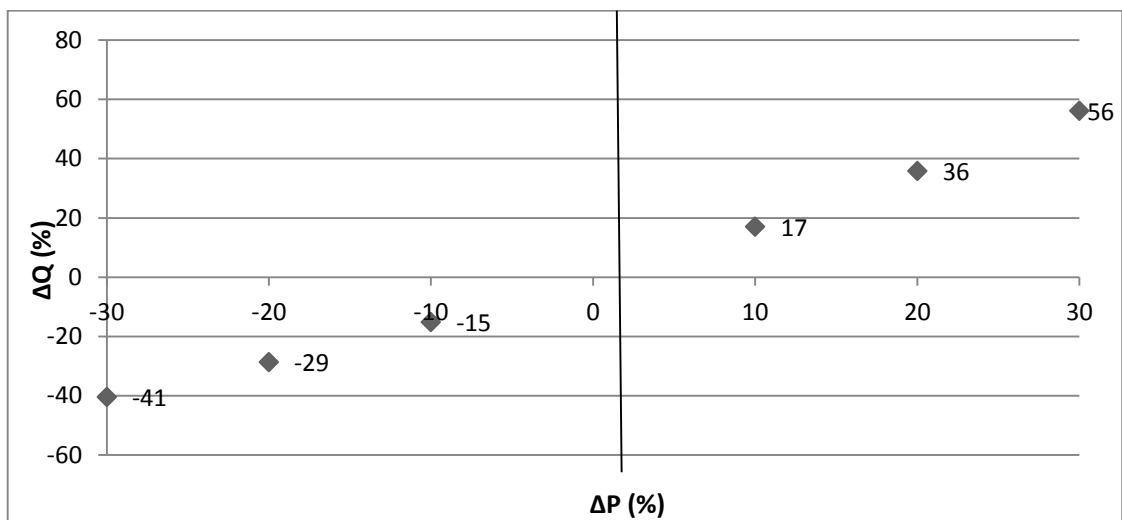


Figura 25. Relação entre mudança na precipitação média e na vazão média da sub-bacia 2

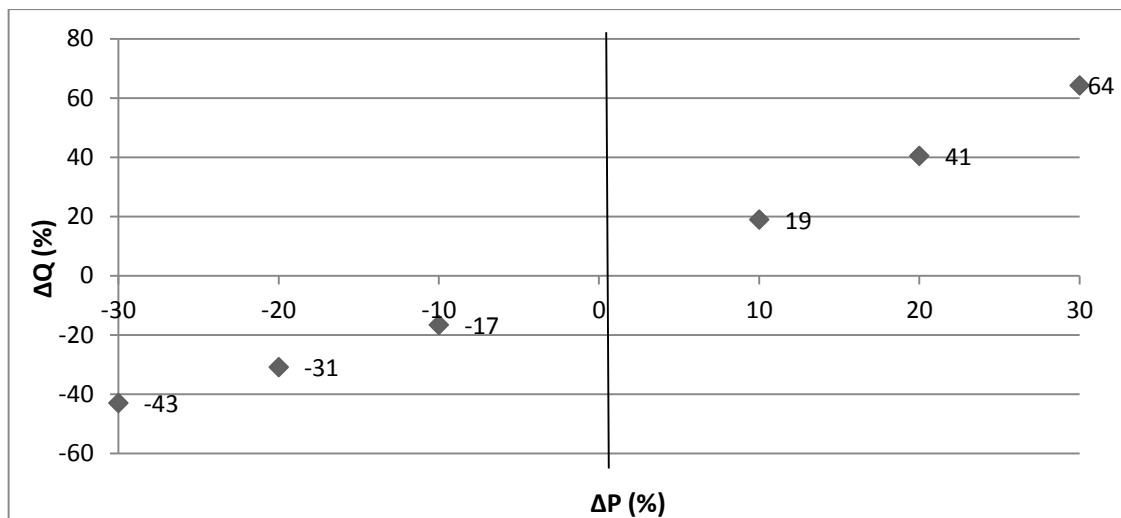


Figura 26. Relação entre mudança na precipitação média e na vazão média da sub-bacia 3

Ademais, aumento das vazões poderia causar problemas de assoreamento para o rio São Francisco. O assoreamento do leito do rio é causado por partículas de granulometria maior, como areia e pequenos seixos que são carregados em eventos de grandes chuvas. Assim como a bacia do rio Carinhanha apresenta uma matriz arenosa (BORGES, 2009), seria significativa fonte potencial para o assoreamento do Rio São Francisco.

Concomitantemente, um aumento na precipitação aliado a degradação da vegetação nas margens do rio Carinhanha, aumenta o escoamento superficial e diminui a infiltração nos solos, corroborando para o significativo impacto ambiental sobre umas das principais áreas de recarga do São Francisco.

Contudo, uma redução de vazões para esta bacia poderia ser muito impactante. Na foz do rio Carinhanha, predomina um sistema de lagoas marginais, rico em biodiversidade local, exercendo importante função para a reprodução de diversas espécies de peixes do Rio São Francisco. Na época das cheias, o rio inunda e conecta-se às lagoas marginais e muitas espécies de peixes migram do rio para as lagoas que serão seu local de reprodução e desova. Durante o período de seca, as lagoas se transformam em um ambiente rico em nutrientes, que servirá de viveiro para os filhotes de peixes, até que na próxima cheia eles possam retornar para o rio (CUNICO et al., 2002). Dessa forma, uma redução da vazão, mesmo que pequena, poderia se tornar de grande impacto para uma região sensível e rica em

ecossistemas de alta complexidade, o que poderia ser mais expressivo para a sub-bacia 3.

Além disso, o rio Carinhanha, o principal rio desta sub-bacia contribui com cerca de 20% para a perenidade do rio São Francisco, com isso, uma redução nas vazões poderia causar impactos ambientais e econômicos, tais como: diminuição do volume de água para a bacia do São Francisco, gerando conflitos com relação à utilização da água, em face da redução da oferta, impedimentos à navegação, redução da recarga subterrânea e erosão das margens, contribuindo para o carreamento de sedimentos para jusante.

De forma geral, essas perturbações nos valores das séries evidencia que aumentos ou reduções nas vazões podem gerar impactos diversos, dependendo das características de cada sub-bacia.

## 5. CONCLUSÕES

O estudo proposto teve como objetivo avaliar como as anomalias de precipitação podem afetar o regime de vazão na bacia hidrográfica do rio Carinhanha. Esta bacia é um importante afluente para o rio São Francisco, sendo uma região que apresenta grandes áreas de formação sedimentar, permitindo maior infiltração das chuvas, mais abundantes e regulares do que em outras regiões da bacia do rio São Francisco.

A utilização do modelo hidrológico MGB-IPH foi indispensável para avaliação dos impactos das mudanças climáticas no regime de vazões da bacia em estudo. Este modelo se apresentou satisfatório na representação das vazões simuladas, resultando em uma boa calibração para a bacia em estudo.

A alteração da precipitação mostra impactos relativos diferenciados sobre o regime de vazões em uma bacia hidrográfica. Um aumento na precipitação, decorrente das mudanças climáticas, na vazão dos rios que compõem a bacia hidrográfica do Carinhanha pode ser preocupante para as populações ribeirinhas, mas pode ser benéfico para o aproveitamento energético das usinas e reservatórios do rio São Francisco.

Contudo, uma diminuição na precipitação e conseqüentemente nas vazões pode afetar diretamente o suprimento de água para abastecimento humano e industrial, além dos impactos na irrigação e agricultura. Como a bacia do rio Carinhanha está compreendida em uma parte significativa do Polígono das Secas, isto se torna ainda mais preocupante, pois populações que vivem nesta região podem ser prejudicadas.

A qualidade das águas depende das vazões dos rios. Quanto maior a vazão, maior será a capacidade de diluição dos corpos de água. Porém, com o aumento da demanda bentônica (carga no fundo dos rios) e da vazão, há incorporação desta carga no volume transportado pelo rio, diminuindo sua qualidade. Um aumento significativo nas vazões da bacia do rio Carinhanha pode elevar substancialmente esta carga bentônica, fazendo com que os processos de tratamentos de água subsequentes se tornem mais onerosos.

A bacia do Carinhanha possui remanescentes do Cerrado e nas suas nascentes está localizado o Parque Nacional Grande Sertão Veredas, importante sistema de recarga de aquíferos, sendo de extrema importância sua preservação, pois é uma área rica em biodiversidade, além de englobar áreas de recarga de aquíferos e nascentes do rio Carinhanha,

As águas do São Francisco representam cerca de 2/3 da disponibilidade de água doce do Nordeste brasileiro segundo o projeto Áridas (1995). A sub-bacia do rio Carinhanha contribui com 20% da perenidade do rio São Francisco, sendo fundamental a permanência de suas vazões e conservação da qualidade da água. No entanto, a bacia vem sofrendo pressões antrópicas, reduzindo sua qualidade da água com a crescente urbanização, expansão da indústria e mecanização da agricultura. Assim, é de extrema importância a cobertura dos serviços públicos de saneamento para não comprometer a qualidade da água, além de ações voltadas para o uso sustentável dos recursos hídricos.

As informações obtidas neste trabalho possibilitam que ações de planejamento para os municípios que compõem a bacia, auxiliem na melhor gestão dos seus recursos hídricos, tendo em vista os impactos que as mudanças climáticas podem causar na precipitação e conseqüentemente no regime de vazões, contribuindo assim, em um manejo adequado, voltado para a sustentabilidade dos recursos naturais.

## 6. REFERÊNCIAS

- ADAM, Katiúcia Nascimento. **Análise dos impactos de mudanças climáticas nos regimes de precipitação e vazão na Bacia do Rio Ibicuí**. 2011. 147f. Dissertação de Mestrado. (Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- AYOADE, J. O. O clima e a agricultura. **Introdução à climatologia para os trópicos**, v. 5, 1998.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS**. Resolução no 209, de 22/04/2004. Aprova as séries de vazões de usos consuntivos referentes a aproveitamentos hidrelétricos localizados na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.
- AMBRIZZI, T. et al. Cenários regionalizados de clima no Brasil para o Século XXI: Projeções de clima usando três modelos regionais. **MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE-MMA, SECRETARIA DE BIODIVERSIDADE E FLORESTAS-SBF, DIRETORIA DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE**, 2007.
- BARROS, Vicente et al. Cambio climático en la cuenca del Plata. In: **Cambio climático en la cuenca del Plata**. CONICET, 2006.
- BARRY, Roger G.; CHORLEY, Richard J. **Atmosfera, tempo e clima**. Bookman, 2013.
- BATES, Bryson et al. **climate change and Water: technical Paper vi**. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2008.
- BORGES, Kelly Maria Resende. **Avaliação da susceptibilidade erosiva da Bacia do Rio Carinhanha (MG/BA) por meio da EUPS-Equação Universal de Perda de Solos**. 2009.
- BRAVO, J. M. et al. Coupled hydrologic-hydraulic modeling of the upper Paraguay River basin. **Journal of hydrologic engineering**, v. 17, n. 5, p. 635-646, 2011.

- CAMAPUM DE CARVALHO, José; MELO, Maria Tereza da Silva. A erosão à luz da legislação ambiental. **Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro**, p. 1-37, 2006.
- CARTER, Tim et al. Interim Characterizations of Regional Climate and Related Changes up 2100 Associates with the Provisional SRES Marker Emissions Scenarios. **IPCC Secretariat, c/o WMO, Geneva, Switzerland**, 2000..
- CHANGE, Climate. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007.
- COLLISCHONN, Walter. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Hydrologic simulation of large basins. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1, 2001.
- COLLISCHONN, Walter et al. The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 878-895, 2007.
- COLLISCHONN, Bruno; COLLISCHONN, Walter; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. **Journal of Hydrology**, v. 360, n. 1, p. 207-216, 2008.
- COTTON, R.; PIELKE, R. A. **Human impacts on weather and climate**. Cambridge: Cambridge University, 1995. 288p.
- COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO**. BACIA. DISPONÍVEL EM: <http://www.cbhsaofrancisco.org.br>. Acesso em 18 out. 2015.
- DA SILVA, BENEDITO CLÁUDIO; T CLARKE, ROBIN. Análise estatística de chuvas intensas na Bacia do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 3, p. 265-272, 2004.
- ESPARTA, A. Ricardo J. et al. Principais Conclusões do Terceiro Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. In: **Apresentado no IX Congresso Brasileiro de Energia**. 2002.

- FAN, Fernando Mainardi. **Acoplamento entre modelos hidrológicos e sistemas de informação geográfica: integração do modelo MGB-IPH**. 2011.
- GORE, Albert. Uma verdade inconveniente. **Direção: Davis Guggenheim. Estados Unidos. Estúdio: Lawrence Bender Productions**, 2006.
- HORIKOSHI, Andréa Sanae; FISCH, Gilberto. Balanço hídrico atual e simulações para cenários climáticos futuros no Município de Taubaté, SP, Brasil. **Revista Ambiente e Água. An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 2, n. 2, 2007.
- HULME, M.; SHEARD, N. Cenários de alterações climáticas para o Brasil. **Climate Research Unit, Norwich, UK**, v. 6, 1999.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Core Writing Team, PACHAURI, R. K.; MEYER, Leo. (eds). Geneva: IPCC, 132 p, 2014.
- IORIS, Antônio AR. Water Resources Development in the São Francisco River Basin (Brazil): Conflicts and Management Perspectives. **Water international**, v. 26, n. 1, p. 24-39, 2001.
- KROL, Maarten S.; BRONSTERT, Axel. Regional integrated modelling of climate change impacts on natural resources and resource usage in semi-arid Northeast Brazil. **Environmental Modelling & Software**, v. 22, n. 2, p. 259-268, 2007.
- MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e regionais: avaliação do clima atual do Brasil e projeções de cenários climáticos do futuro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 16, n. 1, p. 1-18, 2001.
- MARENGO, Jose A.; VALVERDE, Maria C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. **Revista Multiciência**, v. 8, p. 5-28, 2007.
- MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; NOBRE, C. A. Mudanças climáticas e recursos hídricos. **Águas do Brasil: Análises Estratégicas**. São Paulo: Instituto de Botânica, p. 201-215, 2010.

- Matos, A. B. Efeito do controle de montante na previsão hidrológica de curto prazo com redes neurais: aplicação à bacia do ijuí. Dissertação de mestrado. 2012.
- MELLER, Adalberto; BRAVO, Juan Martín; COLLISCHONN, Walter. Assimilação de dados de vazão na previsão de cheias em tempo-real com o modelo hidrológico MGB-IPH. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos: RBRH**, v. 17, n. 3, 2012.
- MEEHL, Gerard A. et al. Global climate projections. **Climate change**, v. 283, 2007.
- MENDONÇA, Francisco. Aquecimento Global e suas manifestações regionais e locais: alguns indicadores da região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 2, 2006.
- MOORE, R. J.; CLARKE, R. T. A distribution function approach to rainfall runoff modeling. **Water Resources Research**, v. 17, n. 5, p. 1367-1382, 1981.
- MOREIRA, H. M.; GIOMETTI, ABR “Protocolo de Quioto e as possibilidades de inserção do Brasil no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo por meio de projetos em energia limpa”. **Contexto internacional**, v. 30, n. 1, 2008.
- MURUMKAR, A. R.; ARYA, D. S. Trend and Periodicity Analysis in Rainfall Pattern of Nira Basin, Central India. **American Journal of Climate Change**, v.3, p. 60-70, 2014.
- NAKICENOVIC, Nebojsa; SWART, Robert. Special report on emissions scenarios. **Special Report on Emissions Scenarios, Edited by Nebojsa Nakicenovic and Robert Swart, pp. 612. ISBN 0521804930. Cambridge, UK: Cambridge University Press, July 2000.**, v. 1, 2000.
- NETO, Alfredo Ribeiro. **Simulação Hidrológica na Amazônia: Rio Madeira**. 2006. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.
- NÓBREGA, M. T. et al. Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 2, p. 585-595, 2011.
- PARRY, Martin L. (Ed.). **Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of Working Group II to the fourth assessment**

**report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge University Press, 2007.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W. Climate change impacts on river Quaraí flow. **Climate and Water Resources Modelling, edited by: Fung, CF, Lopez, A., and New, M., John Willey & Sons, 2010.**

PAIVA, R.C.D; COLLISCHONN, W.; TUCCI, Carlos E.M. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. **Journal of Hydrology**, v. 406, n. 3, p. 170-181, 2011.

PEREIRA, Margarita; KAYSER, Rafael; COLLISCHONN, Walter. **Regionalização de vazões assistida por modelagem hidrológica para análises de disponibilidade de água, estudo de caso: bacia do rio ibicuí-rs, 2013.**

PONTES, Paulo RM et al. **Análise da sensibilidade da vazão do rio paraná a potencial alteração da precipitação, 2013.**

BRASIL, Radam. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral. **Projeto Radambrasil**, v. 28, 1982.

RAMOS, Maria Angélica Barreto et al. Mudanças climáticas. **Geodiversidade do Brasil: conhecer o passado, para entender o presente e prever o futuro**, p. 163, 2008.

RIBEIRO NETO, Alfredo et al. Hydrological modelling in Amazonia:- use of the MGB-IPH model and alternative databases. **IAHS-AISH publication**, p. 246-254, 2006.

RODRIGUES, S. C. Impacts of human activity on landscapes in Central Brazil: a case study in the Araguari watershed. **Australian Geographical Studies**, v. 40, n. 2, p. 167-178, 2002.

ROSENZWEIG, Cynthia et al. Water resources for agriculture in a changing climate: international case studies. **Global Environmental Change**, v. 14, n. 4, p. 345-360, 2004.

- SANO, Edson Eyji et al. Mapeamento da cobertura vegetal natural e antrópica do bioma Cerrado por meio de imagens Landsat ETM+. **Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. INPE, Natal**, p. 1199-1206, 2009.
- SANTANA, T. B. ; SILVA, B. C. ; Santos, A.H.M. . **Estimativa de Impactos de Mudanças Climáticas nas Vazões do Rio São Francisco**. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011.
- SANTOS, C. A. C.; BRITO, J. I. B.; RAO, T. V. R.; MENEZES, H. E. A. Tendências dos Índices de Precipitação no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 39-47, 2009.
- SILVA, Ferdnando Cavalcanti. Análise integrada de usos de água superficial e subterrânea em Macro-escala numa bacia hidrográfica: o caso do Alto Rio Paranaíba. **Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul**, v. 188, 2007.
- SHUTTLEWORTH, W. James. Handbook of hydrology. **Handbook of hydrology**, 1993.
- TAYLOR, Karl E.; STOUFFER, Ronald J.; MEEHL, Gerald A. An overview of CMIP5 and the experiment design. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 4, p. 485-498, 2012.
- TODINI, E. The ARNO rainfall—runoff model. **Journal of Hydrology**, v. 175, n. 1, p. 339-382, 1996.
- TOMASELLA, J., RODRIGUEZ, D. A., CUARTAS, L. A., FERREIRA, M., FERREIRA, J. C., AND MARENGO, J.B. (2008). Study of the climate change impacts on surface water resources and groundwater levels in the Tocantins river basin. CCST/INPE, 71 p.
- Tucci, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS, ABRH, 1998. 669p.

- TUCCI, E. M., et al. Previsão de vazão de longo prazo na bacia do Rio São Francisco III: Previsão de vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. **13p. Submetido**, 2005.
- Tucci, C. E. M. Mudanças climáticas e impactos sobre os recursos hídricos no Brasil. **Ciência & Ambiente, Santa Maria, RS**, n. 34, p. 137-156, 2007.
- Tundisi, J. G. Recursos hídricos no futuro: Problemas e soluções. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 7-16, 2008.
- VEIGA, Lilian Bechara Elabras; MAGRINI, Alessandra. **RECURSOS HÍDRICOS, MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ADAPTAÇÃO: PROPOSIÇÕES PARA O BRASIL A LUZ DA UNIÃO EUROPEIA**, 2013.
- VAN VUUREN, Detlef P. et al. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic change**, v. 109, p. 5-31, 2011.
- XU, Xiangyu; YANG, D.; SIVAPALAN, M. Assessing the impact of climate variability on catchment water balance and vegetation cover. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 1, p. 43-58, 2012.
- YAPO, Patrice Ogou; GUPTA, Hoshin Vijai; SOROOSHIAN, Soroosh. Multi-objective global optimization for hydrologic models. **Journal of hydrology**, v. 204, n. 1, p. 83-97, 1998.